

**UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA**  
**GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y AGROAMBIENTAL**



**“VALORIZACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN DE LA  
INDUSTRIA DE PROCESADOS VEGETALES MEDIANTE  
CO-COMPOSTAJE CON TRONCO DE PALMERA”**

TRABAJO FIN DE GRADO

MARZO-2016

Autor: Fco Borja Sanchez García

Tutor/es: Raúl Moral Herrero.

M<sup>a</sup> Dolores Pérez Murcia.



## **AGRADECIMIENTOS:**

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión de los profesores María Dolores Pérez Murcia y Raúl Moral Herrero, a quienes me gustaría expresar mi agradecimiento, por hacer posible la realización de este estudio. Además de agradecer su paciencia, tiempo y dedicación que tuvieron para que saliera de manera exitosa.

A los técnicos de laboratorio de la universidad, en especial a Mari Sol, por enseñarme a desenvolverme en el laboratorio y a realizar los experimentos pertinentes, de forma paciente y muy clara.



**Título:** VALORIZACIÓN DE LODOS DE DEPURACIÓN DE LA INDUSTRIA DE PROCESADOS VEGETALES MEDIANTE CO-COMPOSTAJE CON TRONCO DE PALMERA

**RESUMEN:**

En este trabajo, se desarrolla un procedimiento de optimización para obtener la mejor relación de co-compostaje de lodos de depuradora de agroindustrial y un agente estructurante (tronco de palmera). La optimización se basa en el análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas durante el proceso y especialmente en los composts maduros. Los procesos de compostaje se llevaron a cabo usando composteras de 350L, con aireación natural y volteos de periódicos. La temperatura y la humedad fueron utilizadas para monitorear los procesos de compostaje durante 60 días. La evaluación de calidad final permitió verificar las capacidades de higiene, agronómicas y fertilizantes de compost desarrollados.

Palabras clave: Materiales Estructurantes, Lodo de Depuradora, Compostaje, Compost.

**Title:** TESTING OF SEVERAL BULKING AGENTS IN COMPOSTING OF SEWAGE SLUDGE

**ABSTRACT:**

In this investigation, an optimisation procedure was developed to establish the best relationship for co-composting of agro industrial sewage sludge and a bulking agent (palm tree trunk). The optimization is based in the analysis of the physical, chemical, and biological properties during the process and especially in the matured composts. The composting processes were carried out using 350L composters, with natural aeration and periodic turnings. Temperature and humidity were used to monitor the composting processes during 60 days. A final quality assessment was developed in order to verify hygienic, agronomic and fertilizing capacities of developed composts.

Keywords: bulking agents, sewage sludge, Composting, Compost.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1. RIESGOS MEDIOAMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS</b>	
<b>ORGÁNICOS.....</b>	<b>8</b>
1.1.1. Tipos de riesgos medioambientales.....	8
1.1.2. Principales agentes contaminantes.....	8
<b>1.2. BIOMASA RESIDUAL PROCEDENTE DEL MANEJO DE JARDINERÍA: EL</b>	
<b>CASO DE LA PALMERA.....</b>	<b>13</b>
1.2.1. Origen residuo poda y jardinería.....	13
1.2.2. Producción y destino de los restos de poda y jardinería .....	15
1.2.3. Características de los residuos de poda y jardinería.....	16
1.2.4. Biomasa residual en palmeras.....	18
<b>1.3. INDUSTRIA AGROALIMENTARIA. SECTOR TRANSFORMADOS .....</b>	<b>19</b>
1.3.1. Importancia del sector.....	19
1.3.2. Procesos y técnicas aplicadas a los procesados vegetales .....	20
1.3.3. Residuos generados.....	21
1.3.4. Lodos de depuración generados en la industria de transformados vegetales: características.....	24
1.3.5. Uso de los lodos depuradora generados en la industria de transformados vegetales.....	26
<b>1.4. FUNAENTOS TEÓRICOS DEL COMPOSTAJE .....</b>	<b>29</b>
1.4.1. Definición y etapas del proceso de compostaje .....	29
1.4.2. Condiciones para el proceso de compostaje.....	31
1.4.3. Sistemas de compostaje.....	34
1.4.4. evaluación del grado de madurez de un compost .....	36
<b>1.5. UTILIZACIÓN DEL COMPOST.....</b>	<b>4.3</b>
1.5.1. Enmienda orgánica.....	44
1.5.2. Uso como sustrato de cultivo.....	45
1.5.3. Legislación Medioambiental aplicada al uso del compost como enmienda orgánica y como sustrato.....	46

<b>2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....</b>	<b>56</b>
<b>3. MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>60</b>
<b>3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>63</b>
3.2.1 Descripción de la estación depuradora de aguas residuales de la industria agroalimentaria. ....	63
3.2.2. Características de los residuos utilizados .....	67
3.2.3 Dispositivo de compostaje utilizado.....	68
<b>3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>69</b>
3.3.1. Cálculo y preparación de la mezcla.....	69
3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje.....	71
3.3.3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas.....	73
<b>3.4. MÉTODOS ANALITICOS.....</b>	<b>73</b>
<b>3.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS.....</b>	<b>76</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>78</b>
<b>4.1. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE.....</b>	<b>78</b>
<b>4.2. EVOLUCIÓN DE LA FRACCIÓN HIDROSOLUBLE: PH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y POLIFENOLES.....</b>	<b>86</b>
<b>4.3. EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA Y DE SU FRACCIÓN SÓLIDA.....</b>	<b>95</b>
<b>4.4. PARÁMETROS INDICATIVOS DE LA CALIDAD DEL COMPOST.....</b>	<b>111</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>116</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>126</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>127</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>129</b>

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1. RIESGOS MEDIOAMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS</b>	
<b>ORGÁNICOS.....</b>	<b>8</b>
1.1.1. Tipos de riesgos medioambientales.....	8
1.1.2. Principales agentes contaminantes.....	8
<b>1.2. BIOMASA RESIDUAL PROCEDENTE DEL MANEJO DE JARDINERÍA: EL</b>	
<b>CASO DE LA PALMERA.....</b>	<b>13</b>
1.2.1. Origen residuo poda y jardinería.....	13
1.2.2. Producción y destino de los restos de poda y jardinería .....	15
1.2.3. Características de los residuos de poda y jardinería.....	16
1.2.4. Biomasa residual en palmeras.....	18
<b>1.3. INDUSTRIA AGROALIMENTARIA. SECTOR TRANSFORMADOS .....</b>	<b>19</b>
1.3.1. Importancia del sector.....	19
1.3.2. Procesos y técnicas aplicadas a los procesados vegetales .....	20
1.3.3. Residuos generados.....	21
1.3.4. Lodos de depuración generados en la industria de transformados vegetales: características.....	24
1.3.5. Uso de los lodos depuradora generados en la industria de transformados vegetales.....	26
<b>1.4. FUNAENTOS TEÓRICOS DEL COMPOSTAJE .....</b>	<b>29</b>
1.4.1. Definición y etapas del proceso de compostaje .....	29
1.4.2. Condiciones para el proceso de compostaje.....	31
1.4.3. Sistemas de compostaje.....	34
1.4.4. evaluación del grado de madurez de un compost .....	36
<b>1.5. UTILIZACIÓN DEL COMPOST.....</b>	<b>4.3</b>
1.5.1. Enmienda orgánica.....	44
1.5.2. Uso como sustrato de cultivo.....	45
1.5.3. Legislación Medioambiental aplicada al uso del compost como enmienda orgánica y como sustrato.....	46

<b>2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....</b>	<b>56</b>
<b>3. MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>60</b>
<b>3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>63</b>
3.2.1 Descripción de la estación depuradora de aguas residuales de la industria agroalimentaria. ....	63
3.2.2. Características de los residuos utilizados .....	67
3.2.3 Dispositivo de compostaje utilizado.....	68
<b>3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>69</b>
3.3.1. Cálculo y preparación de la mezcla.....	69
3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje.....	71
3.3.3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas.....	73
<b>3.4. MÉTODOS ANALITICOS.....</b>	<b>73</b>
<b>3.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS.....</b>	<b>76</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>78</b>
<b>4.1. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE.....</b>	<b>78</b>
<b>4.2. EVOLUCIÓN DE LA FRACCIÓN HIDROSOLUBLE: PH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y POLIFENOLES.....</b>	<b>86</b>
<b>4.3. EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA Y DE SU FRACCIÓN SÓLIDA.....</b>	<b>95</b>
<b>4.4. PARÁMETROS INDICATIVOS DE LA CALIDAD DEL COMPOST.....</b>	<b>111</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>116</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>126</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>127</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>129</b>



# 1. INTRODUCCIÓN

---



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 RIESGOS MEDIOAMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS ORGÁNICOS

Una de las principales características de nuestra sociedad de consumo en la que vivimos, es la velocidad a la que se generan los residuos, que es muy superior a la capacidad de hacerlos desaparecer.

El problema surge cuando la actividad humana; y en este caso, la sobrepoblación y la falta de respeto sobre el medio ambiente, hace generar una cantidad de materia orgánica cuya integración en los ciclos naturales no se realiza con la adecuada velocidad, provocando una acumulación desmesurada. Está acumulación de residuos provoca una serie de problemas ambientales importantes sino se gestiona de forma adecuada.

#### 1.1.1 Tipos de riesgos medioambientales.

Los riesgos medioambientales asociados a los residuos orgánicos (Navarro y col., 1995) son:

- La degradación física, química y biológica del suelo
- La contaminación de aguas superficiales y subterráneas
- La contaminación atmosférica
- La contaminación de la cadena trófica
- Los problemas sanitarios

#### 1.1.2 Principales agentes contaminantes

Los principales agentes que inducen los riesgos medioambientales anteriormente comentados son:

- ⇒ La presencia de metales pesados y otras sustancias tóxicas
- ⇒ La existencia de microorganismos patógenos
- ⇒ El exceso de nutrientes o la deficiencia o demanda de los mismos
- ⇒ Solubilidad de sales en exceso: salinidad
- ⇒ Presencia de materiales no biodegradables
- ⇒ Otros agentes.

Como orientación, en la **Tabla 1.1** se muestran los principales agentes contaminantes, así como una correlación entre éstos y los diferentes residuos estudiados, con el fin de evaluar su mayor o menor presencia en cada residuo. Es importante mencionar que aquellos residuos derivados de procesos de transformación de productos agrícolas y ganaderos, así como los residuos urbanos (basuras y lodos), son los materiales a los que en general, se les debe mostrar una mayor atención por la posible presencia de agentes contaminantes y componentes no biodegradables.

**Tabla 1.1.** Riesgos que debemos cuestionar relacionados con los residuos orgánicos (Navarro y col., 1995).

RESIDUO	Metales pesados	Sustancias tóxicas	Patógenos	Exc. / Dem. Nutrientes	Salas en exceso	Materiales no biodegradables
Residuo ganaderos			⊗	⊗		
Abonado verde				⊗		
Residuos de cosechas		⊗		⊗		
Agroindustriales	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Basuras urbanas	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Lodos de depuradora	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗

- **Metales pesados y otras sustancias tóxicas**

- *Elementos potencialmente tóxicos*

Se consideran elementos potencialmente tóxicos aquellos elementos que no tienen funciones esenciales y que poseen una elevada toxicidad (As, metales pesados, etc.) y aquellos que son esenciales pero tóxicos en determinadas concentraciones ( Mo, Zn, Cu...).

- *Compuestos orgánicos potencialmente tóxicos*

Existe una enorme variedad de compuestos orgánicos potencialmente perjudiciales para el medio ambiente, los cuales se agrupan en diversas familias o categorías, las principales de las cuales, de acuerdo a un estudio a nivel europeo realizado en 2004 (Amlinger y col., 2004) se muestran a continuación:

- Bifenilos policlorado (PCB)
- Dibenzodioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCCD y PCCF)
- Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHS)
- Pesticidas clorados y compuestos orgánicos halogenados adsorbibles (AOX)
- Sulfonato de alquilbenceno lineal (LAS)
- Nonifenol (NPE)
- Ftalatos: dietilhexil ftalato (DEHP), butilbencil ftalato (BBP) y dibutil ftalato (DBP)

Su determinación resulta muy compleja y cara, de manera que la realización de análisis preventivos rutinarios conllevaría unos costes altos para el sector del tratamiento de residuos. A diferencia de los metales pesado que salvo pérdidas por lixiviación se concentran en el compost final a causa de la degradación de la materia orgánica, los contaminantes orgánicos pueden desaparecer en mayor o menor medida durante el compostaje, no sólo por su mineralización, sino por su degradación parcial hasta formas más resistentes, volatilización y nebulización al unirse a micro gotas de vapor de agua.

- **Patógenos**

La presencia de organismos patógenos es prácticamente inherente al concepto de residuo. Es uno de los problemas más importantes que se dan en los materiales residuales frescos y que pueden afectar al hombre. Por ello resulta importante realizar procesos de acondicionamiento que nos permitan controlar y eliminar este riesgo tan importante el mantenimiento de temperaturas adecuadas. Durante el proceso de compostaje toda la masa del producto facilita la eliminación de patógenos.

Los contaminantes biótico (virus, bacterias, hongos, protozoos, helmintos, etc.), independiente de su tipología, han sido poco estudiados a pesar de que constituyen un gran riesgo para los ecosistemas, debido a la alteración de los sistemas biológicos que ocasionan la entrada de microorganismo ajenos a éstos.

- **Exceso y Demanda de nutrientes**

Cuando se añaden residuos frescos al suelo un riesgo que se puede plantear es la demanda inicial de nutrientes por parte del propio residuo para activar los procesos biológicos, pudiendo aparecer deficiencias de nitrógeno para el cultivo, debido a la competencia estrecha por este elemento entre los microorganismos y la planta.

Otra situación que puede derivarse del vertido o uso inadecuado de estos residuos es la deficiencia de oxígeno. Los materiales frescos y con alto contenido orgánico, cuando son enterrados a una mayor profundidad que la superficie, presentan dificultades para la mineralización por falta de oxigenación lo que produce la formación de compuestos tóxicos. Los residuos frescos, pueden provocar situaciones de deficiencia de oxígeno que se traducen en procesos de eutrofización.

- Exceso de nutrientes

Por otro lado una desmesurada aplicación de fertilizantes nitrogenados así como una inadecuada gestión de residuos de naturaleza orgánica provoca que los niveles de nitratos en aguas superficiales y subterráneas sea cada vez mayor. Este hecho puede ocasionar problemas graves de salud pública, pues al ingerirse a través del agua potable, puede ser precursor de compuestos de naturaleza tóxica para el organismo.

La eutrofización, desarrollo excesivo de algas o plantas acuáticas, se manifiesta cada vez más a menudo en los sistemas acuáticos. La presencia excesiva de las algas

consume el oxígeno disuelto, en ocasiones hasta el agotamiento de las reservas, provocando la muerte por asfixia de la fauna y de la flora. Las algas se desarrollan cuando sus condiciones ambientales son favorables: temperatura cálida, sol, agua rica en nutrientes y en particular en nitrógeno y fósforo, siendo este último el factor limitante.

- **Salinidad**

La presencia de sales solubles puede influir desfavorablemente sobre la producción agrícola. Los residuos de naturaleza orgánica suelen presentar valores elevados de salinidad. Los valores que se muestran en la **Tabla 1.2** son orientativos de la presencia de sales solubles en diferentes residuos, pues la variabilidad de este parámetro es muy elevada.

La salinización, acumulación excesiva de sales en el suelo, afecta a la absorción hídrica del cultivo. Este proceso depende más de la cantidad total de sales que de los distintos iones que la componen.

El problema de la salinidad debe abordarse de forma conjunta al contenido total de sales, las especies iónicas del residuo y las características del suelo. Además hay que tener en cuenta la sensibilidad del vegetal y las condiciones climáticas de la zona.

**Tabla 1.2.** Conductividad eléctrica de diferentes residuos (Navarro y col., 1995)

RESIDUO	VALOR (dS/m)
Lodo de depuradora	0,8- 11
Gallinaza	5,7
Estiércol de oveja	2,8- 7
Estiércol de ternero	4,7
Estiércol de vaca	4,0
Estiércol de conejo	1,0- 2,9
Purín de cerdo	5,0-12
Piel de almendra	7,1
RSU	3,8- 10

## 1.2. BIOMASA RESIDUAL PROCEDENTE DEL MANEJO DE JARDINERÍA: EL CASO DE LA PALMERA

### 1.2.1 Origen de los residuos de poda y jardinería

Los residuos vegetales procedentes de las zonas verdes y la vegetación privada y pública, al igual que el origen de los materiales estructurantes que se ensayan (tronco de palmera molida), se incluyen dentro de la denominación de *Biorresiduo*. En la **Ley 22/2011**, de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados se define el término ***biorresiduo*** como residuo biodegradable de jardines y parques, residuos alimentarios y de cocinas procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimiento de venta al por menor, así como residuos comparables procedentes de plantas de procesamiento de alimentos. En la **Figura 1.1** se muestra la clasificación de los biorresiduos según MAGRAMA, 2015.



**Figura 1.1.** Clasificación de los biorresiduos de competencia Municipal (MAGRAMA, 2015).

Los residuos orgánicos biodegradables de origen vegetal; a efectos de su gestión pueden subdividirse en dos corrientes específicas que se deben gestionar de forma diferenciada:

- **Residuos de Jardinería**

Fracción vegetal en forma de restos vegetales de pequeño tamaño y de tipo no leñoso que procede de servicios de jardinería (ramos de flores mustios, malas hierbas, césped, pequeñas ramas de poda, hojarascas, etc.). Esta fracción vegetal, considerada como similar a la FORS, puede gestionarse también “in situ” o de forma independiente a los restos de comida, según la configuración de los servicios de recogida y los niveles de generación. El césped por su alto contenido en humedad y por su composición, puede dar problemas de emisiones de olores.

- **Poda**

La poda está constituida por fracción vegetal en forma de restos vegetales de tamaño grande y de tipo leñoso. Por sus características requiere una gestión específica por cuestiones relacionadas con logística de recogida, el tratamiento y la temporalidad de generación (frecuencia y periodo) (MAGRAMA, 2015). Los residuos más problemáticos son las hojas de palmera, ya que sus fibras se enredan en las trituradoras y disminuye su rendimiento.

El residuo de poda utilizado en este estudio es el tronco de palmera triturado.

- ***Phoenix dactylifera* L. (Palmera datilera)**

- Familia: *Arecaceae*
- Nombre científico: *Phoenix dactylifera* L.
- Características: palmera de hasta 30 m altura con hojas pinnada de 6-7 cm con tacto liso, foliosos lanceolados y con pecíolo con espinas.

El clima donde habita la Palmera datilera se encuentra de forma natural en altitudes comprendidas entre los 0-200 metros de altitud, prefiriendo exposiciones soleadas.

Se trata de la palmera más conocida y también está muy extendida en las zonas calidas por su cultivo de dátiles. Puede llegar hasta los 600 años de vida aunque muere antes por rotura del viento.

En las zonas turísticas y urbanas, especialmente del sur y el sureste español y las áreas insulares, existe una mayor profusión de especies palmáceas. Su manejo y mantenimiento necesita de estrategias específicas debido al gran volumen de residuos



que se genera en cortos periodos del año debido a la estacionalidad en su mantenimiento (poda, recortes etc.).

### 1.2.2 Producción y destino de los restos de poda y jardinería

La generación de restos de poda y de jardinería se debe, mayoritariamente, a las actividades de mantenimiento de las zonas verdes de espacio público. Con la nueva tendencia urbanística enfocada hacia un mayor ratio de parques y jardines municipales por habitante, se ha incrementado progresivamente el volumen generado de estos restos. Además, su incorrecta gestión supone la pérdida de materia orgánica potencialmente valorizable en otros usos, por lo que resulta necesaria la introducción de tecnologías y procesos que sean capaces de recuperar aquellos materiales contenidos en los desechos, reintroduciéndolos en el ciclo productivo.

La gestión de residuos de poda y de jardinería están dentro de la gestión de los residuos urbanos, que queda regulada mediante la **Ley 10/2000**, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunitat Valenciana, dictada como norma adicional de protección en base a la competencia autonómica reconocida en el artículo 148.1.23 de la Constitución Española.

En el ámbito de la Comunidad Valenciana, no se dispone de reglamentación específica. Sin embargo, el vigente Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana (Decreto 81/2013 de 21 de junio, del Consell de aprobación definitiva del Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana (PIRCV), [2013/6658]), establece un modelo de gestión de los residuos urbanos ordenado que enfatiza la recuperación de materia orgánica de calidad a nivel de acera y de materia inorgánica de alta calidad en áreas de aportación, destinándose los residuos orgánicos a planta de compostaje y las fracciones de papel/ cartón, vidrio y envases ligeros a plantas de clasificación y de valorización.

Por otro lado, en consonancia con la jerarquía de residuos y con objeto de reducir la emisión de gases de efecto invernadero originados por la eliminación de residuos en vertederos, se establece la implantación de la recogida separada de los biorresiduos con el objeto de fomentar su separación en origen y su tratamiento en las plantas de valorización para la obtención de un compost de calidad.

Los tratamientos más habituales de la fracción orgánica de los residuos urbanos son el compostaje y la biometanización. Los requisitos mínimos para la gestión de biorresiduos y los criterios de calidad para el compost y el digerido procedentes de biorresiduos se ajustarán a lo establecido al efecto por la normativa comunitaria y la normativa básica estatal que se dicte en la materia.

En el año 2012 la **cantidad total estimada de residuos de competencia municipal** recogidos en España fue de unos 21,2 millones de toneladas. Las cantidades que se indican en la siguiente **Tabla 1.3** corresponden a residuos domésticos y comerciales, procedentes de hogares y del sector servicios (comercio, oficinas e instituciones) gestionados por las Entidades Locales, no incluyéndose los residuos comerciales gestionados por canales privados distintos al municipal.

**Tabla 1.3.** Cantidad de residuos urbanos recogidos en España en 2012 (MAGRAMA 2015a).

Modalidad de recogida	Código LER – RESIDUO		t/año	%
<b>Residuos maclados</b>	20 03 01	Mezclas de residuos municipales.	17.911.465	85
<b>Residuos recogidos separadamente</b>	20 01 01	Papel y cartón	1.085.574	15
	15 01 01	Envases de Papel y cartón		
	20 01 02	Vidrio	8.818	
	20 01 08	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes	547.564	
	20 02 01	Residuos biodegradables de parques y jardines	249.101	
	15 01 06	Envases mezclados	641.266	
	15 01 07	Envases vidrio	726.729	
<b>TOTAL</b>			21.170.517	100

### 1.2.3 Características de los residuos de poda y jardinería

A menudo se les denomina “agentes estructurantes” por su función de aportar estructura, porosidad y resistencia a la compactación a la mezcla a compostar. Sin embargo, estos materiales aportan mucho más, ya que logran alcanzar, el equilibrio de nutrientes y condiciones físicas, que permiten la formación de una mezcla adecuada facilitando el proceso y contribuyendo a la obtención de un producto de mayor calidad.

Como se puede observar en la **Tabla 1.4**, en general estos materiales se caracterizan por una baja humedad a modo que pueden compensar y absorber el

exceso de humedad habitualmente presente en los residuos orgánicos. Además, presenta una elevada cantidad de materia orgánica y carbono orgánico, principalmente lignina, celulosa y hemicelulosa, de modo que su relación C/N es alta. Por tanto se consideran ideales para compensar las bajas relaciones C/N de muchos residuos orgánicos y minimizar así las pérdidas de nitrógeno en el proceso de compostaje.

La poda verde se diferencia de las dos fracciones por un mayor contenido en humedad, materia orgánica y nitrógeno. Esta variabilidad es debida a la composición de poda según el momento en que se realiza y el tiempo de almacenamiento en la planta.

**Tabla 1.4.** Características de residuo de poda y jardinería (Montemurro y col., 2009; Barrena y col.,2011b; Hernández-Apolaza y Guerrero, 2008)

PARAMETRO	PODA VERDE	PODA FINA (< 10 mm)	PODA GRUESA (10-20 mm)
Materia seca (%)	40,3	92	83
Materia orgánica (%)	84,78	88,8	74,8
pH	6,67	7,53	7,91
Conductividad Eléctrica (dS/m)	2,08	1,74	1,09
Carbono Orgánico (g/Kg)	453	279	506
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/kg)	1,10	1	1
Nitrógeno Total (g/kg)	14,8	0,5	1,2
C/N	30,6	52	42

En la **Tabla 1.5**, podemos observar las principales características analíticas de residuos vegetales individuales recogidos en plantas de compostaje de restos verdes (Proyecto OPTIVER, 2012). Podemos ver que los restos con mayor contenido en hojas, y por tanto menos leñosos, tienden a presentar una mayor humedad, relación C/N más baja y mayor contenido nutritivo, a pesar de la gran variación existente entre los diferentes materiales, que destaca en nutrientes como el calcio donde hay diferencias superiores al orden de magnitud de materiales. Además, en estos residuos menos leñosos existe una mayor disponibilidad de los nutrientes debido no sólo a las formas

químicas en las que se encuentran sino a la menor resistencia física de las estructuras vegetales donde se engloban.

Los restos vegetales más leñosos como los de palmera, presentan unas características analíticas ideales para compensar las características de los residuos orgánicos, como los lodos de depuradora, debido a su baja humedad y alta relación C/N.

**Tabla 1.5** Principales características analíticas de Residuos Vegetales individuales recogidos en plantas de compostaje de restos verdes (Fuente de elaboración propia)

	HUMEDAD (%)	COT (%)	Norg (%)	C/N	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
<b>ALGARROBO</b>	46,6	47,9	1,64	29,1	0,109	0,963	0,993	0,163
<b>BUGANVILLA</b>	71,1	44,2	2,02	21,9	0,204	1,842	1,550	0,433
<b>FALSA PIMIENTA</b>	63,7	52,4	2,08	29,2	0,114	2,008	0,400	0,096
<b>MORERA</b>	51,6	42,1	1,92	22,0	0,083	1,162	3,386	0,136
<b>PALMERA COMUN</b>	<b>53,6</b>	<b>50,1</b>	<b>0,81</b>	<b>61,9</b>	<b>0,094</b>	<b>1,892</b>	<b>0,814</b>	<b>0,497</b>
<b>PINO</b>	42,8	60,4	0,71	85,1	0,069	0,423	0,607	0,098

#### 1.2.4. Biomasa residual en palmáceas

Las **especies palmáceas** son un cultivo con una elevada importancia a nivel ambiental, paisajístico, económico y cultural, con una creciente presencia en la UE y especialmente en España. Además existen parajes y entornos protegidos de palmeras debido a su singularidad y riqueza en muchas áreas de Europa y también en España (sureste español y zonas insulares). La poda de estas especies representa una gran cantidad de biomasa por hectárea y año. Según diversas estimaciones, en Europa existen entre 20 y 100 millones de palmeras de la especie Phoenix y entre 10-20 millones de la especie Washingtonia robusta, de las que el 40% se ubican en España. Si consideramos una producción promedio de biomasa por poda de 5 kg anuales, obtenemos una producción de biomasa residual (mayoritariamente depositada en vertederos) cercana a 200.000 toneladas, sin considerar la biomasa residual adicional asociada a los especímenes afectados por la plaga del picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*).

Los residuos vegetales de especies palmáceas son flujos residuales procedentes de las actividades urbanas y periurbanas, no vinculados a procedimientos de reciclaje del sector agrícola.

La enorme cantidad de volumen de residuos generados, debido principalmente a su naturaleza y la densidad, la falta de instalaciones de pre-tratamiento y tratamiento específicas, generalmente, conducen a una eliminación incontrolada con pérdidas significativas de recursos en términos de energía, nutrientes y materia orgánica. En muchos casos, se recurre a la quema controlada o incontrolada de los residuos como técnica de gestión de residuos más barata. Esta situación produce emisiones de GEI, directas e indirectas y varios impactos en el medio ambiente y la salud humana, así como aumentar el riesgo de incendio. En este sentido, el mapeo y georeferenciación es esencial para estimar el potencial de producción de biomasa, especialmente cuando los acontecimientos puntuales, como la infección por picudo rojo y su erradicación, incrementan drásticamente la necesidad de una gestión adecuada de las grandes cantidades de biomasa generadas.

### **1.3. INDUSTRIA AGROALIMENTARIA: SECTOR DE TRANSFORMADOS VEGETALES**

#### **1.3.1 Importancia del sector.**

La industria agroalimentaria Española ocupa el cuarto puesto en volumen de producción a nivel de la Unión Europea, destacando las industrias de procesado y conservación de pescados, crustáceos y moluscos. En España se ha de destacar la industria del tomate y la conservera de fruta, como la más importante. El norte de Europa presenta una estructura agroindustrial más fuerte frente a la Española, aun así son dependientes de los productos de los países del Sur al ser estos los productores de materia prima.

Representa a nivel nacional la primera rama industrial del país, siendo fuente de empleo, ingresos e inversión, es Cataluña la comunidad autónoma con mayor importancia en el sector agroindustrial.

### 1.3.2 Procesos y técnicas aplicadas a los procesados vegetales

El procesado de frutas y verduras incluye gran cantidad de operaciones unitarias donde se tratan diferentes materias primas y se obtienen conservas, zumos, concentrados, etc (**figura 1.2**). A lo largo de las etapas de procesado en las que se transforman las materias primas en el producto final, se generan grandes cantidades de residuos y de un amplio espectro. El consumo de agua y generación de aguas residuales es posiblemente el aspecto de mayor incidencia ambiental.

**Figura 1.2:** Procesos y técnicas aplicadas a los procesados vegetales  
(Red Española de compostaje 2015)



### 1.3.3. Residuos generados

#### *Aguas residuales*

En la industria agroalimentaria y en particular en los transformados vegetales, el consumo de agua es elevado. En la **Tabla 1.6** se detallan las etapas consideradas de mayor impacto en cuanto a la generación de aguas residuales así como las principales características de estos vertidos.

**Tabla 1.6.** Etapas de mayor impacto en la generación de aguas residuales y principales características de los vertidos en la industria de transformados vegetales. (Red Española de compostaje 2015)

ETAPA	CARACTERÍSTICAS AGUA RESIDUAL
<b>Etapas genéricas</b>	
<b>Lavado</b>	* Caudal elevado * Carga contaminante: tierra, restos vegetales, materia orgánica, sólidos en suspensión
<b>Escaldado</b>	* Caudal reducido * Carga contaminante alta: materia orgánica, nutrientes
<b>Enfriado</b>	* Caudal elevado * Carga contaminante baja
<b>Pelado y asado</b>	* Caudal elevado * Carga contaminante elevada: pieles, materia orgánica, sólidos en suspensión, conductividad, pH extremo
<b>Limpieza</b>	* Caudal alto * Carga contaminante: restos de producto, materia orgánica, sólidos en suspensión, restos productos limpieza
<b>Etapas específicas conservas, salsas vegetales y zumos</b>	
<b>Tratamiento térmico</b>	* Caudal elevado * Temperaturas elevadas * Carga contaminante despreciable
<b>Etapas específicas congelados</b>	
<b>Generación de frío</b>	* Caudal muy elevado * Temperaturas elevadas * Carga contaminante despreciable

Las características del vertido generado difieren muy significativamente en función de:

- Producto: tomate, pimiento, naranja, etc.
- Estado del producto: grado de madurez, corte o laminado, etc.
- Forma de recolección: manual o automática.
- Tiempo de contacto entre el producto escaldado y el agua, etc.
- Buenas prácticas de fabricación empleadas: barrido sólidos, etc.
- Cantidad de agua utilizada para las operaciones.
- Sistemas de recirculación o recuperación del agua: torres de refrigeración, etc.

Las aguas residuales procedentes de la industria agroalimentaria presentan una importante carga contaminante debida principalmente al contenido de materia orgánica y sólidos en suspensión, aceites y grasas (con la elaboración de algunos productos) y en ocasiones sales disueltas o vertidos con alta conductividad, pH variable en función del proceso, materia prima o si se utiliza el pelado alcalino y bajo contenido en metales pesado. Además hay una irregularidad en la producción en función de las diferentes campañas de elaboración y en ocasiones con paradas de actividad entre campañas, dificultando todo ello el tratamiento de las aguas residuales. Este tipo de agua, una vez depurada, tiene gran valor para su uso en agricultura, así como los fangos generados.

**Tabla 1.7.** Caudal y carga contaminante en subsectores. BREF Mayo 2003.  
(Red Española de compostaje 2015)

Subsectores	Caudal (m <sup>3</sup> /t materia prima)	Carga contaminante
Conservas y congelados vegetales	3.5 a 8.5	DBO <sub>5</sub> : 140 a 7.000 mg/l SST: 60 a 3.000 mg/l
Zumos	0.5 a 6.5	DBO <sub>5</sub> : 500 a 3.200 mg/l SST: 300 a 1.300 mg/l

Como podemos observar, en la tabla 6, el rango de carga contaminante de las aguas residuales es amplio en todos los casos, dependiendo sobre todo de la materia prima, de las técnicas empleadas, de los sistemas de reutilización de agua, etc.



Es importante señalar que el vertido de las aguas residuales en las empresas del sector se produce de manera conjunta, es decir, las aguas residuales procedentes de las diferentes etapas se unen y dan lugar a un vertido conjunto. En algunos casos las aguas limpias generadas en el proceso se canalizan de forma separada al resto de aguas de fabricación.

### **Residuos sólidos**

Los residuos sólidos generados en el subsector de transformados vegetales son importantes sobre todo en cuanto a su volumen o cantidad, diferenciándose entre orgánicos, inertes y peligrosos (**Figura 1.3**). Los residuos más habitualmente producidos en la industria de transformados vegetales se muestran en la **Tabla 1.8**.

El 83 % de los residuos generados son orgánicos (procedentes de operaciones de corte, troceado, pelado, etc.). El 16 % son residuos inertes correspondientes a cartón, plástico, chatarra, vidrio, hojalata, etc. El 0,7% perteneciente a otros, lo componen los lodos de depuración o aceites de frituras, y tan solo el 0.3 corresponde a peligrosos. Los restos orgánicos, presentan la característica de ser valorizables como subproductos, reciclables o sirven como materia prima para otros procesos.



**Figura 1.3.** Distribución de residuos sólidos de la industria de transformados vegetales. (Red Española de compostaje 2015)

**Tabla 1.8.** Residuos sólidos más comunes de la industria de transformados vegetales. (Red Española de compostaje 2015)

Residuo	Código CER	Peligrosidad
Restos orgánicos de frutas y hortalizas	020103	No
Papel y cartón	200101	No
Plástico	200139	No
Envases metálicos	200140	No
Envases de vidrio	200102	No
Residuos asimilables a urbanos	200301	No
Aceite de maquinaria usado	130203	Si
Residuos de envases peligrosos	150110	Si
Lodos de depuradora	020305	No

#### 1.3.4 Lodos de depuración generados en la industria de transformados vegetales: características

Los lodos de depuración se obtienen durante el proceso de depuración de los vertidos líquidos de la industria. En los últimos años son numerosas las empresas del sector que están instalando depuradoras, con el objetivo de cumplir la normativa en materia de depuración.

Un elevado porcentaje de estas empresas disponen de sistemas de depuración biológicos debido a que es el más idóneo para las características de estas aguas residuales con una alta biodegradabilidad. Dada la irregularidad en la producción en función de las diferentes campañas y a veces con paradas de actividad entre campañas, en el caudal y en la carga orgánica, los tratamientos aplicados deben ser determinados mediante un estudio completo de caracterización y caudal de las aguas residuales generadas. Los **tratamientos** más habituales en la **línea de aguas** son:

- Pretratamientos:
  - Desbaste
  - Tamizado
  - Desarenado
  - Desengrasado
  - Homogeneización

- Tratamientos primarios:
  - Decantación
  - Coagulación y floculación
  - Filtración: carbón activo, filtros arena
- Tratamientos secundarios: biológicos aerobios
  - Fangos activos
  - Fangos activos doble etapa
  - SBR
  - Lecho móvil
  - M.B.R.
- Tratamientos terciarios: con vista a la reutilización del agua depurada, aunque estos sistemas están poco implantados en el sector.
  - Cloración
  - Ozonización
  - Ultravioleta
  - Ultrafiltración
  - Osmosis inversa

Junto con el tratamiento biológico de aguas es necesario instalar la **línea de tratamiento de lodos**, cuyo objetivo es eliminar agua del exceso de fango generado durante la depuración. Consta normalmente de una etapa de espesamiento (con o sin adición de agentes químicos), además puede realizarse también otra de deshidratación que persigue conseguir un mayor grado de sequedad para hacerlo más manejable.

La cantidad de lodo generado por el sector de transformados vegetales va aumentando significativa y progresivamente con la instalación de depuradoras en las empresas.

Las características de los lodos de depuración de la industria agroalimentaria vendrán dados por el tipo de tratamiento usado y fundamentalmente por las peculiaridades del efluente a tratar, sujeto a una fuerte estacionalidad debido a las variaciones estacionales de las materias primas tratadas en la industria. Así las características de los lodos producidos fluctuarán a lo largo del año.

Independientemente de la procedencia y tratamientos recibidos de los **lodos**, en general tienen un bajo contenido en materia seca y niveles de pH próximos a 7. Su contenido en materia orgánica supera el 50%, y su contenido en macronutrientes N y P es elevado siendo deficientes en la concentración de K. La presencia de metales

pesados suelen estar por debajo de los valores permitidos en las distintas normativas de aplicación de lodos de depuradora al sector agrario.

### **1.3.5 Uso de lodos de depuradora generados en la industria de transformados vegetales.**

Los lodos de depuración, podríamos considerarlo como un residuo “nuevo” dentro del sector de la industria de transformados vegetales, ya que es consecuencia de la instalación de depuradores de tipo biológico que se están instalando en los últimos 10-15 años. El destino habitual de estos lodos es su eliminación mediante gestor autorizado. Aunque, al igual que el resto de residuos de naturaleza orgánica como los restos de materia prima, pueden valorizarse como subproductos mediante: producción de compost, elaboración de piensos para alimentación animal, producción de metano, aprovechamiento térmico y obtención de compuestos de alto valor añadido en las industrias alimentaria, farmacéutica, química y cosmética.

Los lodos de depuración generados en la industria de transformados vegetales son diferentes a los procedentes de depuradoras urbanas, fundamentalmente en que son mucho más homogéneos en su composición ya que proceden del tratamiento de aguas residuales cuya carga contaminante es principalmente materia orgánica de origen vegetal y carente de contaminantes tipo metales pesados y compuestos orgánicos de naturaleza tóxica (hidrocarburos, disolvente, etc.), además son microbiológicamente más limpios.

Los subproductos orgánicos, tanto de restos orgánico como de lodos de depuración, generados pueden valorizarse mediante:

- a) **Aplicación en la industria:** a través de la obtención de “compuestos de interés” para su reutilización en la industria alimentaria humana y animal, farmacéutica, cosmética, industria química y en la agricultura. Entre los compuestos están los antimicrobianos, compuestos bioactivos (polifenoles, fitoestrógenos, isoprenoides y ácidos grasos vegetales, compuestos órgano sulfurados y monoterpenos), compuestos aromáticos, grasos, vitaminas, azúcares, materias gelificantes (peptinas), ácidos, aceites, aromas y sabores.

b) **Aplicación energética:**

- Utilización como biomasa para convertirse en energía en forma de biogás mediante digestión anaerobia.
- Obtención de bioetanol: a partir de la fermentación de azúcares que se encuentran en los vegetales.
- Obtención de biohidrógeno: el alto contenido en carbohidratos, almidón y celulosa de los residuos de la industria de alimentos hace que sean útiles en la producción de biogás. Los lodos de depuración que contiene carbohidratos y proteínas que normalmente se utilizan para obtener biogás, pueden utilizarse para obtener biohidrógeno después de un pretratamiento (Bedoya et al., 2008).
- Obtención de biocombustibles sólidos: mediante carbonización hidrotermal (HTC). Proceso en medio acuoso que transforma la biomasa bajo ciertas condiciones de presión, temperatura y medio ácido en carbón, con alto poder calorífico (aprox. 6000 kcal/kg). Además se genera un agua fertilizada ya que la mayor parte de los elementos nutritivos de la biomasa se absorben en el agua.

- c) **Aplicación en agricultura:** obtención de compost. Los objetivos específicos están mantener el rendimiento y la calidad productiva agrícola, asegurar la calidad sostenible del recurso suelo, evitar la transferencia de contaminantes a otros medios y preservar la cadena alimentaria y la salud (Felipó 2001). Su utilización incrementa el contenido de materia orgánica del suelo, mejora la capacidad de retención hídrica, actúa como fuente de nutrientes a largo plazo y algunos de ellos tienen capacidad para controlar enfermedades de plantas.

Los lodos de las depuradoras, tienen la peculiaridad respecto a otros tipos de residuos, de que su uso en el suelo está regulado por la **Directiva 86/278/CEE** relativa a la protección del medio ambiente y en particular de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura, estableciendo el marco normativo que permite fomentar la valorización de los lodos de depuración mediante su aplicación a los suelos agrarios, garantizando simultáneamente una protección eficaz del medio ambiente.

Esta directiva se incorporó a la legislación española mediante el **RD 1310/1990** de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuradora en el sector agrario. Así, se permite la utilización en suelos agrícolas de los lodos de depuración cuando la concentración de metales pesado de los lodos y de los suelos receptores no supere ciertos límites y además, se controle la acumulación de los metales en las parcelas receptoras (**Tabla1.9**).

**Tabla 1.9.** Directiva 86/278/CEE y Real Decreto 1310/1990 de 29 de Octubre, donde se regula la normativa actualmente vigente sobre metales pesados en el entorno suelo-lodo.

Valor límite de concentración de metales pesados en los suelos		Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria		Valor límite para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años	
Elemento	Valores límite (mg kg <sup>-1</sup> m.s.)		Valores límite (mg kg <sup>-1</sup> m.s.)		Valores límite (kg Ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
	pH<7	pH>7	pH<7	pH>7	
<b>Cadmio</b>	1	3,0	20	40	0,15
<b>Cobre</b>	50	210,0	1000	1750	12,00
<b>Níquel</b>	30	112,0	300	400	3,00
<b>Plomo</b>	50	300,0	750	1200	15,00
<b>Zinc</b>	150	450,0	2500	4000	30,00
<b>Mercurio</b>	1	1,5	16	25	0,10
<b>Cromo</b>	100	150,0	1000	1500	3,00

La Directiva prohíbe la aplicación de los lodos de depuradora sin tratar y también prohíbe de manera explícita la aplicación de los lodos tratados para determinados cultivos y establece plazos para su aplicación en los cultivos autorizados.

También indica que la aplicación de los lodos debe de hacerse teniendo en cuenta las necesidades de la planta. Limita los contenidos de metales pesados y exige análisis periódicos de los suelos y lodos. Además, exige control estadístico de los lodos producidos, cantidades dedicadas a fines agronómicos, composición y características de los lodos, tipos de tratamiento e identificación del destinatario y lugar de aplicación.

## 1.4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL COMPOSTAJE

El compostaje constituye un procedimiento adecuado de la valorización de los residuos orgánicos, incluyendo la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora. Este sistema de tratamiento de residuos orgánicos, reporta un beneficio ambiental ya que evita los riesgos de contaminación provocados por otras alternativas como, la incineración o el vertido y así facilitar un mejor aprovechamiento de la materia orgánica.

### Los principales objetivos del proceso de compostaje son:

- Estabilización de la materia orgánica y la higienización, mediante la eliminación de patógenos y de las malas hierbas.
- Reducción del peso y volumen de los materiales que se van a compostar.

Con estos objetivos el uso agrícola del producto final obtenido, presentará efectos beneficiosos para el suelo y para los cultivos (Moreno-Casco y col., 2008)

### 1.4.1 Definición y etapas del proceso de compostaje

Podemos definir al compost como el producto que resulta del proceso de compostaje y maduración, constituido por una materia orgánica estabilizada semejante al humus, con poco parecido con la original, puesto que se habrá degradado dando partículas más finas y oscuras. Será el producto inocuo y libre de sustancias fitotóxicas, cuya aplicación al suelo no provocará daños a las plantas y permitirá su almacenamiento sin posteriores tratamientos ni alteraciones (Costa y col.,1991).

El compostaje es un proceso biooxidativo controlado, en el que intervienen numerosos y variados microorganismos, que requiere una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, implica el paso por una etapa termófila y una producción temporal de fitotoxinas, dando como productos de los procesos de degradación, dióxido de carbono, agua y minerales, así como una materia orgánica estabilizada, libre de fitotoxinas y dispuesta para su empleo en agricultura sin que provoque fenómenos adversos (Costa y col., 1991).

El hecho de que sea biooxidativo exige una condición biológica, que hace al compostaje diferente tanto de los procesos físicos y químicos como todos aquellos que no se realicen de forma aerobia. Además, debe distinguirse el compostaje de todos

aquellos procesos naturales sin control alguno, los cuales suelen desembocar siempre en anaerobiosis más o menos acusadas.

La conversión de la materia orgánica inicial, biodegradable, al estado de materia orgánica humificada (humus), realizada durante el compostaje, es un proceso microbiológico influido por la naturaleza de los organismos presentes, como bacterias, hongos y actinomicetos, fundamentalmente. Durante el proceso de compostaje tiene lugar una sucesión de predominio de diferentes microorganismos; en función de la influencia de determinados factores, como la naturaleza química del sustrato que está siendo digerido con mayor intensidad, el contenido de humedad, la disponibilidad de oxígeno, la temperatura, la relación C/N y el pH, ciertos microorganismos se multiplican más rápidamente que otros, predominando en el medio de fermentación.

El proceso de compostaje conduce a la producción de dióxido de carbono, agua y minerales y, por último, a una materia orgánica estabilizada.

El compostaje debe, por tanto, tener como resultado un producto estabilizado, con un alto valor fertilizante para ser empleado en agricultura; además, el producto ha de ser fácilmente manipulado y almacenado, y su empleo directo en el suelo no debe provocar efectos adversos.

La evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje marca las diferentes etapas que nos determinan el grado evolutivo del material compostado. Las etapas que componen este proceso en condiciones aerobias y el tipo de microorganismo que actúan son las siguientes (Chen e Inbar,. 1993):

1. **Etapas mesófila.** Al comienzo del proceso, la masa está a temperatura ambiente. A medida que la población de microorganismo se multiplica, la temperatura aumenta rápidamente. Es una etapa con carácter mesófilo, en la cual, entre los productos que se forman, destacan los ácidos orgánicos de cadena corta. La acidificación lleva consigo el descenso del pH. La temperatura se eleva hasta los 40 °C.



2. **Etapa termófila.** Alcanzados los 40 °C, la actividad mesófila cesa y se entra en una etapa termófila, en la que se distinguen dos fases:
  - Una fase inicial, en la cual la temperatura se eleva progresivamente, la acidez del medio evoluciona, apreciándose un aumento del pH, consecuencia directa de la presencia del ión amonio como producto de la degradación.
  - En una segunda fase, más lenta, hay un incremento mayor de la temperatura, alcanzándose una temperatura de 75 °C. En esta etapa se produce la destrucción de bacterias patógena, hongos y bacterias termofílicas. El aumento de la temperatura puede provocar pérdida de nitrógeno en forma amoniacal y el pH desciende ligeramente.
3. **Etapa de enfriamiento.** La temperatura desciende provocando la ralentización de la reacción y el calor generado es menos que el que se pierde. Al descender tanto la temperatura se recuperan las condiciones térmicas ambientales. El pH no sufre modificación apreciable.
4. **Etapa de maduración.** Tiene lugar a temperatura ambiente. En esta etapa se producen complejas reacciones secundarias de condensación y de polimerización, las cuales dan lugar al humus como producto final la etapa de maduración precisa de un período de tiempo más extenso que las etapas anteriores. Se detecta la presencia de sustancias dotadas de actividad antibiótica y la desaparición de patógenos.

#### 1.4.2 Condiciones para el proceso de compostaje

Dado que el compostaje es un proceso biooxidativo y que depende fundamentalmente de la actividad microbiana, es de suma importancia controlar diferentes factores, que influyen en mayor o en menor grado, para conseguir la optimización de esta actividad. Estos factores están directamente relacionados con la naturaleza del sustrato o bien, con las condiciones de desarrollo del mismo. Tanto unos como otros aparecen tan íntimamente ligados entre sí, que es difícil de hacer una consideración individualizada.

**La naturaleza del sustrato** sobre el que actúan los microorganismos es otro factor relevante. Los principales residuos que se destinan a la producción de compost son de origen agrícola, ganadero, urbano (basuras y lodos), industrial y forestal.

Las características físicas, físico-químicas del sustrato que influyen en el compostaje son:

- A. El tamaño de las partículas, cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano, más rápido y completo será la reacción (mayor actividad química por unidad de masa). La experiencia demuestra que el tamaño debe de estar entre 1 y 5 cm de diámetro (Biddlestone y Gray,1991).
- B. La porosidad del sustrato, los sustratos con poca porosidad, como los lodos, purines, etc., es conveniente mezclarlos con otros materiales que confieran estructura apropiada para la aireación y la capacidad de retención hídrica, y que además serán preferentemente inertes, desde el punto de vista químico, con el fin de que no presenten reacciones simultáneas (Costa y col.,1991).
- C. La relación superficie/volumen de las partículas, esta relación tiene una influencia directa en la forma y la velocidad de degradación. La relación aire/agua en los intersticios de las partículas es igualmente importante; agua y oxígeno son indispensables para la actividad microbiológica y cuando la proporción es menor del nivel crítico, el metabolismo y la respiración disminuyen y se paralizan (Costa y col.,1991).
- D. Relación C/N: los valores más recomendables de esta relación para un rápido y eficiente compostaje están comprendidos entre 25 y 35 (Saña y Soliva.,1987; Costa y col.,1991). Si la relación tiene valores menores se producen pérdida de nitrógeno en forma de amonio y si por el contrario, la relación inicial es elevada, el proceso se prolonga siendo necesaria la adición de nitrógeno para rebajarla.
- E. Contenido en nutrientes. Los microorganismos del proceso del compostaje precisan elementos esenciales para su nutrición, desarrollo y reproducción. Entre estos están algunos micronutrientes (boro, manganeso, zinc, cobre, hierro, molibdeno y cobalto) aunque en poca cantidad, pueden llegar a ser tóxicos a concentraciones altas. Estos elementos desempeñan un importante papel en la

síntesis de enzimas, en el metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporta intracelular y extracelular (Biddlestone y Gray,1991).

- F. pH: se puede compostar materiales dentro de un amplio rango de valore de pH (3-11). No obstante, los comprendidos entre 5,5 y 8 son los que se consideran óptimos, ya que en general los hongos toleran un amplio margen de pH (5-8) mientras que, las bacterias tienen un margen más estrecho pH (6-7,5) (Costa y col.,1991).

**Condiciones Ambientales:** en este apartado se consideran aquellos parámetros cuya correcta evolución es necesaria para que se desarrolle adecuadamente el proceso de compostaje.

- A. Temperatura: este parámetro varía durante el proceso de compostaje marcando las diferentes etapas que nos determina el grado evolutivo del material compostado desde el punto de vista termodinámico, la biodegradación se desarrolla a través de un proceso global exoenergético, constituido por diferentes etapas, mesófila, termófila, de enfriamiento y de maduración se consideran óptimas las temperaturas del intervalo 35-55 °C, ya que a temperatura más alta, los microorganismos mueren o se desactivan por encontrarse esporulados. Por otra parte, la generación de temperaturas demasiado altas implica una mayor mineralización que conduce a la obtención de productos finales (Saña y Solvia, 1987).
- B. pH: la acidez inicial es la propia de los residuos a compostar y posteriormente desciende, para alcanzar y superar la neutralidad. En la etapa inicial del compostaje, los microorganismos actúan sobre la materia orgánica más lábil, liberando ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH inicial. Posteriormente, debido a un aumento en la concentración del ión amonio el pH va aumentando. Conviene tener en cuenta que aumentos grande en los valores de pH acompañados con elevadas temperaturas, supone la pérdida de nitrógeno en forma de amoniaco (Costa y col.,1991).
- C. Aireación: es imprescindible asegurar la presencia de oxígeno para el desarrollo del proceso de compostaje, pero siempre dentro de unos límites, ya que el exceso de aireación puede provocar el enfriamiento de la masa con la consiguiente

disminución de la actividad microbiana. El nivel de oxígeno óptimo está dentro del intervalo 10-18% (Biddlestone y Gray,1991). El oxígeno no sólo es necesario para la respiración de los microorganismos y el metabolismo aerobio, sino también para oxidar algunas moléculas presentes en la masa a compostar.

- D. **Humedad:** los microorganismos necesitan cierta cantidad de agua para su metabolismo. El nivel óptimo de humedad está situado entre un 40 y 60%. La actividad microbiana se reduce considerablemente cuando el contenido en humedad está por debajo del 30%. Por debajo del 12% la actividad microbiana cesa y el proceso es extremadamente lento (Saña y Solvia,1987).

**Tabla 1.10.** Condiciones deseables durante el proceso de compostaje (Fermor,1993; Rynk et al., 1992)

CARACTERÍSTICAS	RANGO RAZONABLE	RANGO ÓPTIMO
Relación C/N	20:1-40:1	25:1-30:1
Contenido de Humedad	40-65%	50-60%
Concentración de oxígeno	Mayor al 5%	Mucho mayor al 5%
pH	5,5-9	6,5-8
Temperatura	45-66	55-60

### 1.4.3 Sistemas de compostaje

Los distintos sistemas de compostaje se diferencian en su nivel de complejidad, grado de control del proceso, método de ventilación empleado y que sean abiertos o cerrados.

Los diferentes sistemas de compostaje se pueden agrupar en dos grandes tipos:

#### **Sistemas abiertos :**

- a) **Compostaje en pilas estáticas:** formación de pilas de reducida altura, que se dejan sin movimiento. La aireación ocurre naturalmente a través del aire que fluye en forma pasiva a través de la pila. Puede producirse, en algunas zonas de la pila anaerobiosis, generando malos olores, gases y líquidos no deseables. Por esto se debe de tener especial cuidado en la realización de la mezcla inicial, eligiendo materiales que permitan tener una adecuada porosidad de la pila durante el

proceso. Es un proceso lento y no permite la obtención de un producto de alta calidad.

- b) Compostaje en pilas de volteo o en hileras:** el material se amontona en pilas alargadas al aire libre. El tamaño y la forma de las pilas dependerá del clima, material utilizado y la maquinaria disponible. Las pilas deben de ser volteadas de forma regular, ya sea con maquinaria (volteadoras) o en forma manual.
- c) Compostaje en pilas estáticas aireadas en forma pasiva:** el material a compostar se dispone en pilas y su aireación se produce a través de una red de tuberías perforadas que están colocadas en la parte inferior de la pila. La altura recomendada de la pila es de 1 a 1,5 metros. Se coloca una cubierta porosa (turba) para permitir un flujo adecuado de aire y así se evita la emisión de olores, ya que la turba presenta afinidad por las moléculas que lo causan y controlar la humedad.
- d) Compostaje en pilas aireadas forzosamente:** a diferencia del anterior, en este sistema se utiliza un compresor que succiona aire hacia el exterior o lo inyecta al interior de la pila. Este tipo de compostaje necesita una serie de equipamientos, como un compresor, red de tuberías, válvulas y sistema de control de presión de aire, temperatura y humedad, por lo que tiene un alto valor económico.

#### **Sistemas Cerrados:**

- a) Compostaje en reactores:** se lleva a cabo en un contenedor o recipiente cerrado. La principal ventaja es su rápida velocidad de descomposición (10-14 días) y que se necesita poco terreno. Sin embargo, presenta un alto coste en la instalación y operación (Mathur,1991).

Por último en la **Tabla 1.11** se indican las ventajas y desventajas de los distintos tipos de sistemas de compostajes.

**Tabla 1.11.** Ventajas y desventajas de los sistemas de compostaje  
(FAO, **Stickelberger, D. 1975**)

MÉTODOS DE COMPOSTAJE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Pilas estáticas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Una vez que la pila esta armada, necesitan volteos ocasionales para restaurar la porosidad.</li> <li>- Bajos costos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compostaje lento</li> <li>- Mayor riesgo de olores</li> <li>- Pilas deben ser pequeñas</li> <li>- Susceptibles a efectos climáticos.</li> </ul>
<b>Pilas de volteo o en hileras</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permita el compostaje de un gran volumen de residuos.</li> <li>- La aireación permite un mejor secado y separación del material que las pilas estáticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Susceptibles a efectos climáticos.</li> <li>- Requiere de una mayor cantidad de labores (volteos)</li> <li>- Problemas de olores.</li> <li>- Alta disponibilidad de terreno.</li> <li>- Alto costo en maquinarias</li> </ul>
<b>Pilas estáticas aireadas pasivamente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No requiere de volteo</li> <li>- Menos costos que la de aireación forzada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Susceptibles a efectos climáticos.</li> <li>- No apropiada para materiales de fácil compactación.</li> <li>- La mezcla inicial es crítica para mantener la aireación</li> <li>- Espacio para maquinarias.</li> </ul>
<b>Pilas aireadas forzadamente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se requiere de espacio para la maquinaria volteadora.</li> <li>- Menor tiempo de compostaje</li> <li>- Alcanza mayores temperaturas (muerte de patógenos)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En algunos casos seca demasiado la pila</li> </ul>
<b>Reactor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No existe influencia climática.</li> <li>- Rápida descomposición.</li> <li>- Mejor calidad del producto final</li> <li>- Mejor uso del espacio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto coste inicial y operacional.</li> </ul>

#### 1.4.4 Evaluación del grado de madurez de un compost.

La evaluación de la madurez de los productos compostados ha sido considerada desde hace tiempo como uno de los grandes problemas, en relación a la utilización de esos materiales, sobre todo en su aspecto agrícola debido a que el término compost es utilizado con criterios muy diversos. Algunos autores apuntan incluso a la especificación de diferenciar entre compost fresco, compost y compost maduro, en función de las características y sobre todo, del tiempo en el cual ha sido sometido al proceso de compostaje. Por ello, cuando un compost va a ser utilizado debe de tener unas condiciones que garanticen la falta de peligrosidad del mismo.

Otro problema añadido es el propio concepto de madurez ya que cubre distintos grados de estabilidad según vaya a ser el destino del compost. Por esto, se recomienda realizar un seguimiento completo del desarrollo del proceso de compostaje, ya que de esta forma se puede obtener una idea más clara y segura de la madurez del producto, de la eficacia del proceso de compostaje y su aplicabilidad.

La aplicación agrícola de un compost sin un adecuado grado de madurez, puede ocasionar efectos negativos muy graves, como:

1. Originar una disminución del contenido de oxígeno a nivel de las raíces.
2. Si la relación C/N es alta, se produce un bloqueo de nitrógeno en el suelo.
3. Excesivo aumento de la temperatura del suelo.
4. Acumulación de sustancias fitotóxicas.
5. No se produce la eliminación de microorganismos patógenos.

### **Métodos de evaluación del grado de madurez**

La diversidad y complejidad de los procesos que tienen lugar en el compostaje, hace que cualquier parámetro evaluado pueda suministrar una información valiosa sobre las características y evaluación del material en función del tiempo.

Por ello, las variables utilizadas recorren una amplia gama de determinaciones y análisis, tanto cualitativos como cuantitativos.

En general los podemos clasificar en:

#### **A. MÉTODOS DE OBSERVACIÓN**

1. Olor: los materiales frescos desprenden compuestos como amoníaco, aminas y en general ácidos orgánicos, que producen malos olores, pero que a medida que el compost madura tienden a desaparecer. La evaluación de estos compuestos ha sido utilizada como criterio de madurez (Iglesias Jiménez y Pérez García, 1989).
2. Temperatura: el control y seguimiento de la curva de temperatura durante el compostaje puede darnos información de la fase en la cual se encuentra el proceso, dado que se supone que en la fase final de estabilización se alcanza de forma continua la temperatura ambiente (Stickelberger, 1975).

3. Color: la evaluación colorimétrica puede ser considerada como un criterio de madurez para determinados materiales (Sugahara y col.,1979).

#### B. MÉTODOS BASADOS EN EL ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD MICROBIANA

Estos métodos se basan en la relación existente entre la madurez de la masa y la estabilidad biológica de los materiales, midiendo la actividad de la biomasa microbiana o de los constituyentes fácilmente biodegradables.

1. Métodos respirométricos: emplean el estudio de la respiración del compost (absorción de oxígeno o desprendimiento de anhídrido carbónico). Consideran maduro un compost que no consuma más de 40 mg de oxígeno por Kg de materia seca en una hora, después de incubarlo durante 3 días (Iglesias Jiménez y Pérez García,1989).
2. Determinación de sustancias orgánicas degradables: Morel y col.,1979, realizan un estudio de la evolución de la madurez del compost por métodos indirectos relacionándola con características físico-químicas del material como son edad, el carbono orgánico total (representante de todas las sustancias orgánicas disponibles) y los azúcares solubles (fracción fácilmente fermentable), obteniendo una estimación de la degradabilidad y maduración del compost.

$$D.E.G = 3,166 - 0,011 (Edad) + 0,059 (C.O.T) + 0,832 (A.E)$$

Siendo:

Edad = días de compostaje

C.O.T = Carbono Orgánico Total

A.E = Azúcares Extraíbles con agua caliente

Los valores de límites de madurez definidos por respuesta vegetal son:

DEG < 2,4 → COMPOST MADURO

DEG > 2,7 → COMPOST INMADURO



3. Métodos de análisis bioquímico: basados en el estudio de enzimas indicadores de la actividad celular y otros se basan en la identificación de la microflora específica de cada fase del compostaje.

#### C. MÉTODOS DE ANÁLISIS FÍSICOS Y FISICOQUÍMICOS

Se basan en una evaluación cualitativa o cuantitativa de las sustancias que durante el proceso de compostaje experimentan una fermentación o humificación.

1. Contenido de carbono orgánico hidrosoluble: García y col., (1992), determinaron el contenido de carbono orgánico hidrosoluble durante el compostaje de 6 mezclas, preparadas con dos residuos urbanos de distinta procedencia, un residuo agrícola y otro agroindustrial, y consideraron que un compost estaba maduro cuando el contenido de carbono orgánico hidrosoluble era  $< 0,5\%$ . Sin embargo, Hue y Liu, (1995) encontraron que el porcentaje de carbono orgánico del extracto acuoso tenía que ser  $< 1\%$  para establecer que un compost había alcanzado un grado de madurez aceptable, basándose en el estudio de 16 compost de origen y composición distintos, mientras que Bernal y col.,1998. Consideraron 7 mezclas preparadas con materiales de muy distinto origen y propusieron que un compost estaba maduro cuando su contenido en carbono orgánico hidrosoluble era  $< 1,7\%$ .
2. Relación C/N en la muestra sólida: es el criterio que con más asiduidad se ha venido empleando para determinar el grado de madurez del compost y definir su calidad agronómica. Muchos autores han propuesto una relación C/N por debajo de 20 como indicativa de un aceptable nivel de madurez (Poincelot 1974; Cárdenas y Wang, 1980; Golueke, 1991) ó con un valor menor de 15 (Juste, 1980).
3. Relación C/N en el extracto acuoso: teniendo en cuenta que la mayor parte de las reacciones que ocurren en el proceso de compostaje son transformaciones bioquímicas de la materia orgánica de los residuos, llevadas a cabo por los microorganismos cuyo metabolismo ocurre en fase acuosa, Hue y Liu (1995), basándose en el estudio de 17 compost de origen y composición distinta, propusieron la relación  $C_{ORG}$  soluble en agua/  $N_{ORG}$  total y de este modo consideraron que un compost había alcanzado un grado de madurez aceptable cuando la relación de  $C_{ORG}$  soluble en agua/ $N_{ORG}$  total era  $< 0,70$ , mientras que

Bernal y col. (1998), consideraron una colección de 7 mezclas preparadas con materiales de distinta procedencia, encontrando que el valor de esta relación tenía que ser  $< 0,55$ .

4. Determinación del contenido en polisacáridos son progresivamente descompuestos por la microflora desarrollada en el curso de los distintos estadios de termogénesis y maduración. Esta fracción compuesta, fundamentalmente, por mono y disacáridos, desaparece por hidrólisis, mientras que otros polisacáridos lo hacen más lentamente debido a su estructura más resistente (celulosa) (Morel y col.,1979).
5. Variación de pH: este parámetro ha sido utilizado como marcador del punto final del compostaje debido a que durante este proceso se produce alcalinización o evolución hacia niveles neutros. Basados en este hecho, Jann y col. (1959) realizaron un ensayo que consistía en incubar el material final del proceso de compostaje en condiciones de anaerobiosis a una temperatura de 55 °C. Si al cabo de 24 horas el pH del compost era alcalino, indicaba que éste estaba maduro.
6. Ausencia de compuestos indicadores de un medio reductor: si al final del compostaje se detectase la presencia de compuestos reductores, tales como el amonio y ácido sulfhídrico, indicaría que durante el proceso ha existido un potencial redox inadecuado de los materiales, mostrando que las condiciones de la pila han sido predominantemente anaerobias y que los residuos están todavía en un período de descomposición. De este modo, Zucconi y Bertoldi (1987) establecieron que si el contenido en  $\text{NH}_4^+$  en un compost era superior al 0,04% indicaba que éste no estaba lo suficientemente maduro. A este respecto, también Spohn (1978) desarrolló un rápido test cualitativo para determinar la presencia de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , por medio de la aplicación de reactivos específicos a un papel de filtro humedecido con un extracto del compost.
7. Nitrificación: Bernal y col. (1998) establecieron que un compost estaba maduro cuando su relación  $\text{NH}_4/\text{NO}_3$  era  $< 0,16$ , basándose en el estudio de una colección de mezclas preparadas con materiales de muy distinto origen.
8. Estudio de la materia orgánica humificada: los principales índices para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica de los compost, a partir de los

porcentajes de carbono extraíble ( $C_{EXT}$ ), carbono de ácidos húmicos ( $C_{AH}$ ) y de los ácidos fúlvicos ( $C_{AF}$ ), son los siguientes:

- Relación de humificación:  $C_{EX}/C_{OT} \times 100$
- Índice de humificación:  $C_{AH}/C_{OT} \times 100$
- Porcentaje de ácidos húmicos:  $C_{AH}/C_{EX} \times 100$
- Relación de polimerización:  $C_{AH}/C_{AF}$

Los valores mínimos de cada uno de estos índices para poder evaluar la madurez del compost, encontrados en el estudio de Roletto y col. (1985) realizado sobre 5 mezclas preparadas con un residuo lignocelulósico y con otro residuo orgánico rico en nitrógeno son:

- ⇒ Relación de humificación > 7%
- ⇒ Índice de humificación > 3,5%
- ⇒ Relación de polimerización > 1

Mientras que, Iglesia Jiménez y Pérez García (1992 b), basándose en el estudio del compost de residuos sólidos urbanos, propusieron los siguientes valores:

- Índice de humificación > 13%
- Porcentaje de ácidos húmicos > 62%
- Relación de polimerización > 1,6

Lo anterior nos indica que estos índices sólo serán útiles para seguir el proceso de compostaje de una determinada pila, por lo que se deberá estudiar su evolución en el tiempo más que los valores finales y esto sucede por que dependen de la naturaleza de los materiales originales que se utilicen.

9. Capacidad de intercambio catiónico: Harada e Inoko (1980) desarrollaron un método para determinar la capacidad de cambio catiónico en compost y observaron que en el compostaje de residuos sólidos urbanos se producía un aumento conforme progresaba el proceso hasta que alcanzaba un valor estable. Concluyeron que si éste era > 60 meq/100g, sobre la materia orgánica, nos indica que el compost está maduro (Harada y col.,1981). Sin embargo, Iglesias Jiménez y Pérez García (1992 b) encontraron que el valor de este parámetro tenía que ser > 67 meq/100g, sobre la materia orgánica, para considerar al compost maduro. Además, Iglesias Jiménez y Pérez García (1992 a), basándose en el estudio de dos

pilas preparadas con residuos sólidos urbanos y sin lodos de aguas residuales urbanas, propusieron la relación capacidad de cambio catiónica/carbono orgánico total (CCC/C<sub>OT</sub>) como índice de madurez más fiable que la capacidad de cambio sola, considerando que un compost es maduro cuando esta relación es > 1,9, mientras García y col., (1992) encontraron un valor más alto, debía de ser > 3,5, considerando 6 mezclas preparadas con dos residuos urbanos de distinta procedencia, un residuo agrícola y otro agroindustrial.

10. Estudio del contenido de ácidos volátiles: el proceso de fermentación de la materia orgánica implica el desprendimiento de numerosas sustancias orgánicas volátiles, detectables por técnicas cromatográficas y cuya presencia en mayor o menor grado puede ser considerada como un índice de madurez. De Vleeschauwer y col., (1981) ponen de manifiesto la presencia de ácido acético, propiónico isobutírico, etc. Según estos autores, una concentración de 300 ppm de acético inhibe el desarrollo vegetal y a partir de 2.000 ppm no se observa germinación.

#### D. ENSAYOS SOBRE VEGETALES

Sin lugar a dudas, son los ensayos más fiables, ya que ponen de manifiesto la presencia de productos fitotóxicos que no son detectado por los métodos anteriores.

1. Test de germinación: como los propuestos por Sphon (1978), Zucconi y col., (1981), aunque el más generalizado es éste último que utiliza semillas de *Lepidium sativum* y que calcula un índice de germinación que combina el porcentaje de germinación y la longitud media de las raíces.
2. Test de crecimiento: supone la evaluación del efecto del compost sobre distintos vegetales, siendo los más corrientes el rye-grass, el maíz y la cebada.

En función de todos los métodos expuestos anteriormente, se puede tener la idea del grado de dificultad que supone la determinación del índice de madurez universal y extrapolable a todos los materiales compostables. La elección de uno u otro parámetro estará en función del tipo de residuo a evaluar y de las condiciones económicas en las que se vaya a realizar el estudio. Sin embargo, cualquier

metodología utilizada ha de seguir unas pautas que garanticen su adecuación para la evaluación del grado de madurez de un compost, como son:

- Estar basados en la evaluación de parámetros determinables por técnicas analíticas objetivas, sencillas, rápidas y reproducibles.
- No ha de verse afectada su reproducibilidad por manipulaciones y preparaciones previas.

Por último, decir que la calidad del producto dependerá principalmente de los materiales de origen y de las condiciones de temperatura, humedad y aireación que existan durante el proceso.

### 1.5 UTILIZACIÓN DEL COMPOST

Antes de utilizar un compost, es necesario conocer su composición química concreta. Dicha información será muy útil para evaluar su idoneidad para un determinado uso y establecer las estrategias de gestión oportunas en un ámbito de aplicación específica.

Es necesario garantizar que los productos utilizados en la nutrición vegetal o en la mejora de las características del suelo cumplan con dos requisitos fundamentales:

1. Eficacia agronómica.
2. Ausencia de efectos perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

La valorización agrícola de los materiales estabilizados mediante compostaje puede realizarse mediante diferentes vías, atendiendo a unos objetivos concreto, entre los que cabe diferenciar su uso como:

- ❖ Enmienda orgánica
- ❖ Sustrato de cultivo

Para cada uno de estos usos (Martínez, 1995) habrá que atender de forma específica a los factores más determinantes de su eficacia, tanto los derivados de las características del compost como los asociados al escenario edafoclimático y los requerimientos de los cultivos o vegetación. Asimismo, se deberá tener en cuenta el marco legislativo y normativa aplicable en cada caso. Sea cual sea la valorización agrícola, prevista para el compost, su uso y aplicación deberá atenderse a las buenas prácticas agrícolas, tal y como indican en el RD 506/2013 y el RD 865/2010.

La evaluación de la aptitud de un compost para un determinado uso, debe hacerse de forma integral, valorando todos los parámetros de forma conjunta (Iglesias y col., 2008; Masaguer y Benito, 2008; Huerta y col., 2010; Soliva y col., 2013), dado que el comportamiento del compost va a depender de la interrelación e interacción de estos parámetros con el escenario suelo-planta-atmósfera.

### **1.5.1 Uso como enmienda orgánica**

Este uso pretende incrementar el contenido en sustancias húmicas del suelo como enmienda de corrección en suelos pobres o de mantenimiento en rotaciones o producciones agrícolas con balance húmico negativo (Urbano, 2002).

Los efectos principales se asocian a la mejora general de la fertilidad física, química y biológica, resultantes del aumento o mantenimiento del nivel de sustancia húmicas. Este uso es muy conveniente en los suelos agrícolas dado que se ha observado un descenso progresivo de los niveles de materia orgánica que provoca paulatinamente una disminución de la fertilidad y un aumento de la erosionabilidad (Favoiono y Hogg, 2008).

Los programas de enmienda orgánica de corrección en los sistemas agrícolas se ejecutan generalmente a largo plazo, y consisten en realizar un conjunto de aplicaciones que permitirán un adecuado ajuste de las dinámicas biológicas y de fertilidad del suelo.

El uso del compost bien elaborado como enmienda orgánica es de elección frente a otros residuos orgánicos dado a su elevada estabilidad de la materia orgánica y de su contenido en sustancias húmicas (Soliva,2001; Moral y Muro,2008; Soliva y col., 2013). Además, la utilización del compost aplicándolo al suelo como enmienda disminuye el uso de fertilizantes inorgánicos y hace que parte del carbono que contiene la materia orgánica del compost se fije en el suelo.

La producción de fertilizantes minerales requiere tanto el consumo de energía como la extracción y utilización de materias primas que aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero. El compost, por su contenido en nutrientes, no puede sustituir completamente a los fertilizantes minerales, si los puede reemplazar de

manera parcial. De esta forma, puede conseguir una disminución de las emisiones de efecto invernadero de entre 4 y 82 kg CO<sub>2</sub> eq/t FORM (Boldrin y col., 2009)

Es de sumo interés conocer tanto el contenido en materia orgánica total del compost, como su contenido en materia orgánica resistente (MOR) que rendirá sustancias húmicas al suelo y utilizar compost que tengan un contenido de nitrógeno orgánico y mineral bajo, y así evitar la contaminación por nitratos.

### **1.5.2 Uso como sustrato de cultivo**

El uso del compost en el cultivo sin suelo es una forma de valorización de este producto mucho más reciente que las tradicionales como enmienda orgánica o fertilizante orgánico. El compost puede sustituir a la turba en la producción de tierra vegetal y evitar las emisiones que se producen durante su extracción y mineralización en condiciones aerobias. Según Boldrin y col. (2009) las emisiones equivalente de CO<sub>2</sub> debidas al uso de turba se encuentran entre 550 y 1.197 kg CO<sub>2</sub> eq/t turba. Además, la utilización del compost como sustitutivo de la turba supone un ahorro entre 44 y 838 kg CO<sub>2</sub> eq/t FORSU.

Para los cultivos sin suelo cuyo objetivo comercial es la puesta en el mercado de plantas en contenedor, se requiere de sustratos físico y químicamente activos (Lemaire y col., 2003), que retengan agua y que posean capacidad de intercambio catiónico.

Este sistema es utilizado para la multiplicación por semillas y esquejes de plantas hortícolas, frutícolas o especies forestales, y para la producción de plantas en contenedor para su uso principal en jardinería y paisajismo.

En general, los composts de corteza de pino, los de residuos de poda urbana, los vermicomposts y algunos de los lodos de EDAR tienen mayor aptitud que los de estiércol y de FORM.

Las principales debilidades que presentan muchos composts en relación con su uso como componente de sustrato de cultivo se podrían corregir mejorando el proceso de compostaje. Las actuaciones se pueden dirigir tanto a:

a) **Materias primas:**

- Co-compostando materiales básicos con otros ácidos ( disminuye el pH) y disminuye la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco.
- Utilizando materias primas poco salinas
- Utilizando materias primas con bajo contenido en sustancias fitotóxicas.

b) **Proceso de compostaje:**

- Reduciendo el tamaño de las partículas de los materiales de partida o del producto final mediante afinado o criba.

No obstante, el objetivo principal se basa en realizar un buen compostaje, tanto en la fase de descomposición como en maduración, producir un compost estable y maduro (Bernal y col., 1998 y 2009).

### **1.5.3 Legislación medioambiental aplicada al uso del compost como enmienda orgánica y como sustrato de cultivo.**

El compost, independientemente de la fuente inicial de residuos y materia orgánica a compostar, presenta infinidad de usos desde el punto de vista agrario. Se utiliza como fuente de enmienda orgánica de los suelos cultivados y suelos disgregados, así como para el mantenimiento del nivel húmico, recuperación de suelos improductivos, y como sustrato hortícola para el cultivo de plantas.

Sin embargo, el uso de estos productos tratados encuentra serias dificultades por factores relacionados como la calidad y riesgos asociados. Los factores que limitan la aplicación de compost están relacionados por: el tamaño de partícula, la presencia de metales pesados, la producción de malos olores tras su aplicación, presencia de microorganismos patógenos, semillas de malas hierbas, y de materiales inertes como vidrio, plásticos y metales.

El suelo agrícola es un recurso inestimable y limitado, por ello las gestiones agrícolas, entre ellas el abonado, deben desarrollarse teniendo en cuenta criterios de protección, para garantizar su fertilidad y su valor agronómico, presente y futuro. La aparición de nuevos productos fertilizantes y de nuevos ingredientes en su



formulación ha obligado a modificar las regulaciones de su uso, de forma que se eviten sus posibles efectos nocivos en el agua, el suelo, la flora, la fauna y el ser humano.

Por otra parte, la utilización de compost como sustituto parcial de la turba para la elaboración de sustratos de cultivo, es una práctica que va en desarrollo en los últimos años. La agricultura intensiva necesita este tipo de insumos en grandes cantidades para el desarrollo de semilleros, viveros, horticultura intensiva protegida, etc. Su uso también se extiende en otros sectores como la jardinería y el paisajismo. El uso de materiales orgánicos como los compost en la elaboración de los sustratos de cultivo permite además del anclaje y crecimiento de la planta, intervenir en su alimentación. Por ello, es importante definir las características físicas, químicas y biológicas de los sustratos de cultivo y establecer normativas que garanticen su uso sin riesgos para la salud humana.

En la **Tabla 1.12**, se recoge la legislación actual sobre productos fertilizantes, **Real Decreto 506/2013** que regula las enmiendas orgánicas elaboradas con residuos orgánicos y la legislación sobre sustratos de cultivo **Real Decreto 865/2010**, así como la propuesta de la Comisión Europea (2014) sobre el uso de compost y digeridos, recogida en el informe final sobre el “Fin de la Condición de Residuo” (FdR) para residuos biodegradables que han sido sometidos a un tratamiento biológico de compostaje o digestión.

**Tabla 1.12.** Legislación y directrices referentes al uso de compost en agricultura.  
(Elaboración propia)

---

### Disposiciones Nacionales

---

- ▶ Real Decreto 506/2013 de 28 de junio, sobre productos fertilizantes .
  - ▶ Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo.
  - ▶ Real Decreto 1039/2012, de 6 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo.
- 

### Directrices

---

- ▶ Comisión Europea. Informe final sobre el “Fin de la Condición de Residuo” (FdR) (Comisión Europea, 2014).
-

El **Real Decreto 506/2013** de 28 de junio sobre productos fertilizantes, clasifica dentro del “*Grupo 6. Enmiendas Orgánicas*” el **compost** producido a partir de residuos biodegradables, como “producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables del Anexo IV, recogidos separadamente”.

En el Real Decreto 506/2013 se recogen las normas de identificación y etiquetado de los productos, comercialización y los márgenes de tolerancia. También se indican las materias primas permitidas en la elaboración de abonos orgánicos, órgano-minerales y de enmiendas orgánicas, pudiendo utilizarse materias primas de origen orgánico, animal o vegetal, estas son:

- Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos.
- Residuos de la transformación de la madera y de la producción de tableros y muebles, pasta de papel, papel y cartón.
- Residuos de las industrias del cuero, de la piel y textil.
- Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos.
- Residuos municipales (residuo domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones), incluidas las fracciones recogidas selectivamente.

En la **Tabla 1.13** se exponen los requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost según el real Decreto 506/2013. Los compost se clasificaran atendiendo a su contenido en metales como A, B ó C, añadiéndose: “*contenido en metales pesados inferior a los límites autorizados para esta clasificación*”. Además, deberá declararse el contenido en cobre (Cu) y zinc (Zn) cuando sobrepasen los límites máximos correspondientes a la clase A (70 y 200 mg/kg de materia seca, respectivamente).

Sin perjuicio de las limitaciones establecidas en esta normativa, los productos fertilizantes elaborados con componentes de origen orgánico se aplicarán al suelo siguiendo los *códigos de buenas prácticas agrarias*. Los productos de la *clase C* no

podrán aplicarse sobre suelos agrícolas en dosis superiores a cinco toneladas de materia seca por ha y año. En zonas de especial protección, particularmente a efectos del cumplimiento del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE 45, 2003) y el Real Decreto 261/1996 relativo a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en agricultura, las comunidades autónomas modificarán, en su caso, la cantidad anterior. El Real Decreto 261/1996 limita la incorporación de N en 170 kg por hectárea y año, pudiendo alcanzar los 210 kg durante los primeros programas de actuación, pudiendo las Comunidades Autónomas establecer cantidades distintas en base a ciertas consideraciones.



**Tabla 1.13.** Requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost según el real Decreto 506/2013.

Parámetro	Real Decreto 506/2013		
<b>Mat. Orgánica total (%)</b>	35		
<b>Humedad máxima (%)</b>	40		
<b>C/N</b>	< 20		
<b>N inorgánico máximo (% N total)</b>	15		
<b>Metales pesados</b>	Clase A	Clase B	Clase C
(mg/kg m.s.):			
Cadmio	0,7	2	3
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI)	nd	nd	nd
Cobre	70	300	400
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1000
<b>Contaminantes orgánicos</b>			
Polifenoles (% p/p)	0,8		
Furfural(% p/p)	0,05		
Microorganismos			
<b>Salmonella spp</b>	Ausentes en 25 g de compost		
<i>E. coli</i>	<1000 MPN/g		
<b>Semillas de malas hierbas</b>	-		
<b>Partículas (%)</b>	90 (25mm)		
<b>Impurezas (%)</b>	No puede contener		
<b>Gravas y piedras (%)</b>	No puede contener		

nd: no detectable según método oficial; MPN: número más probable; **Clase A:** Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna A. **Clase B:** Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna B. **Clase C:** Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna C.

Recientemente la Comisión Europea ha publicado el **informe final sobre el “Fin de la Condición de Residuo”** (FdR) para residuos biodegradables que han sido sometidos a un tratamiento biológico de compostaje o digestión (Comisión Europea, 2014). El alcance de la condición de fin de residuo incluye el compost y el digerido higienizados y estabilizados obtenidos de un proceso biológico en el que se han utilizado exclusivamente materiales no contaminados procedentes de la recogida selectiva de biorresiduos tales como, residuos verdes de parque y jardines y otros

grandes espacios, biorresiduos de hogares, comedores, restaurantes, mercados, así como residuos biodegradables de origen agrícola (incluido estiércol), forestal, pesquero u hortícola, biorresiduos del procesado de alimentos, y subproductos de origen animal (categoría 2 y 3, según el reglamento CE Nº 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de octubre de 2009). Los requisitos de calidad propuestos para compost en informe FdR se presentan en la **Tabla 1.14** Se excluye del ámbito de aplicación de la FdR los lodos de depuración urbanos, los lodos de la industria papelera y la fracción orgánica mezclada de los RU procedente de separación mecánico-biológica, físico-química o manual.

**Tabla 1.14** Propuesta de los requerimientos de calidad del compost. Posibles parámetros y valores límite de los requisitos de calidad mínima del producto. Informe “Fin de la condición de residuos” (Comisión Europea, 2014).

Parámetro	Valor
<b>Contenido mínimo en materia orgánica</b>	15 % m.s.
<b>Estabilidad mínima</b>	- Índice respirométrico máximo: 25 mmol O <sub>2</sub> /kg M.O. /h según EN 16087-1 - Rottegrade III, IV o IV(test de autocalentamiento, temperatura máxima 30 °C por encima de la ambiental) según EN 16087-2
<b><i>Salmonella spp</i></b>	Ausentes en 25 g
<b><i>E. Coli</i></b>	1000 CFU/g m.f.
<b>Contenido límite de impurezas macroscópicas</b>	< 0,5% en peso sobre m.s. en vidrio; Metal y plástico >2mm
<b>Semillas viables y propágulos de plantas</b>	2 semillas viables/litro de compost
<b>Metales pesados y Contaminantes orgánicos</b>	mg/kg m.s.
Cd	1,5
Cr	100
Cu	200
Hg	1
Ni	50
Pb	120
Zn	600
PAHs <sub>16</sub>	6

m.s.: materia seca; m.f.: materia fresca; CFU: unidades formadoras de colonias.

En el informe FdR, se establece también una serie de requerimientos para el proceso de compostaje basados en el mantenimiento de una serie de temperaturas durante un periodo de tiempo determinado a lo largo del proceso (a continuación se exponen los requerimientos para compost que no contengan subproductos de origen animal):

- ▶  $T \geq 65^{\circ}\text{C}$ , 5 días
- ▶  $T \geq 60^{\circ}\text{C}$ , 7 días
- ▶  $T \geq 55^{\circ}\text{C}$ , 14 días

Actualmente la Comisión Europea se encuentra en proceso de revisar el Reglamento (EC) Nº 2003/2003 con el objeto de realizar una completa armonización de las normativas relativas a los fertilizantes minerales y orgánicos, incluyendo a las materias primas y los productos finales. Este nuevo reglamento debería estar publicado en el año 2015 otorgando al **compost FdR** (compost de alta calidad) un completo **status de producto**. Los compost de menor calidad (lodos, RSU mezclados, etc.) se denominarían en principio **residuo bioestabilizado** y con **status de residuo** podría utilizarse en agricultura con ciertas restricciones.

Respecto a la valorización del compost como sustrato de cultivo, en el **Real Decreto 865/2010** de 2 de julio, modificado por el Real Decreto 1039/2012, de 6 de julio, sobre sustratos de cultivo, se definen y tipifican todos aquellos productos denominados como sustratos, con el fin de garantizar que los que se ponen en el mercado sean agrónomicamente eficaces y que eviten posibles efectos nocivos en el agua, el suelo, la flora, la fauna y el ser humano.

Los compost de residuos orgánicos, entre ellos los elaborados con residuos urbanos, quedarían dentro del *“grupo 1: productos orgánicos como sustratos de cultivo o componentes de los mismos”*. Las especificaciones y las declaraciones obligatorias y opcionales establecidas en el anexo I del RD 865/2010 para compost de residuos orgánicos que se utilicen como sustrato de cultivo o como componente de los sustratos de cultivo se muestran en la **Tabla 1.15**.

**Tabla 1.15** Características de los compost como sustratos de cultivo o componente de los sustratos de cultivo, según el RD 865/2010.

Denominación tipo de producto	Descripción	Especificaciones	Declaraciones obligatorias	Declaraciones opcionales
Compost	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), de materiales orgánicos biodegradables del Anexo V, bajo condiciones controladas	- Materia orgánica sobre materia seca > 20% (m/m)	-Principales componentes (mas del 10% (v/v) ordenados en orden decreciente de porcentaje. - Materia orgánica sobre materia seca. - Conductividad eléctrica, CE. - pH - Cantidad en volumen	- Densidad aparente seca. - Volumen de aire - Volumen de agua 1, 5 y 10 KPa - Materia seca - Espacio poroso total - Granulometría

En esta normativa no se excluyen los lodos de depuración urbanos y la fracción orgánica mezclada de los RU procedente de separación mecánico-biológica, físico-química o manual.

En el Anexo VI del RD 865/2010 se establecen asimismo los límites máximos de microorganismos y metales pesados en los sustratos de cultivo, **Tablas 1.16 y 1.17** respectivamente. Para los microorganismos se establecen dos limitaciones:

- a) La materia prima transformada, lista para ser usada como ingrediente de productos orgánicos de origen animal, debe ser sometida a un proceso de higienización que garantice que su carga microbiana no supera los valores máximos establecidos en el Reglamento (CE) n.º 1774/2002.
- b) En los sustratos de cultivo de origen orgánico, se acreditará que no superan los niveles máximos de microorganismos, incluidos en el anexo VI de dicho RD y expresados en la **Tabla 1.16**.

En cuanto a los metales pesados los límites máximos que se establecen son aplicables a todos los grupos de productos (orgánicos, minerales, de síntesis mineral u orgánica, preformados y de mezcla), con alguna salvedad para el caso de las lanas minerales que se indica en la Tabla 6.8. Según el contenido en metales de los sustratos se establecen dos clases: A (sin restricción de uso) y B (no aplicables en cultivos de plantas para consumo humano).

**Tabla 1.16** Niveles máximos de microorganismos en sustratos de cultivo de origen orgánico, anexo VI RD 865/2010.

Microorganismo	Nivel máximo
Salmonella	Ausente en 25 g de producto elaborado
<i>Listeria monocytogenes</i>	Ausente en 1 g de materia bruta (únicamente para cultivos cuya producción se consuma en crudo).
<i>Escherichia coli</i>	< 1000 número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.
Enterococcaceae	Entre 10 <sup>4</sup> y 10 <sup>5</sup> número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.
<i>Clostridium perfringens</i>	Entre 10 <sup>2</sup> y 10 <sup>3</sup> número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.

**Tabla 1.17** Niveles máximos de metales pesados en sustratos de cultivo, anexo VI RD 865/2010.

Parámetro	Clase A	Clase B
Cadmio (mg/kg)	0,7	2
Cobre (mg/kg)	70	300
Níquel (mg/kg)	25	90
Plomo (mg/kg)	45	150
Zinc (mg/kg)	200	500
Mercurio (mg/kg)	0,4	1,5
Cromo (total) (mg/kg)	70	250
Cromo (VI) (mg/kg)	0,5	0,5



## 2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

---



## 2. ANTECEDENTES Y OBJETIVO

El aumento de la actividad agroindustrial ha llevado consigo un incremento en la producción y acumulación de residuos orgánicos, en las últimas décadas. La perspectiva de que este crecimiento se detenga está avalada por las diferentes reglamentaciones y directrices vigentes, cuya finalidad última es reducir los impactos ambientales de la producción y gestión de los residuos así como minimizar las fuentes de contaminación orgánica para el medio ambiente. Una de las prioridades de la política de medio ambiente de la UE es precisamente la gestión de los residuos generados. Éstos no sólo son una fuente potencial de contaminación, sino que pueden llegar a ser un valioso recurso secundario.

En este sentido, la política de gestión de residuos de la UE se ha desarrollado teniendo en cuenta tres principios básicos:

- Impedir que se generen residuos.
- Recuperar los residuos generados.
- Eliminación de éstos de forma segura.

Por otra parte, los suelos del sudeste mediterráneo español caracterizados por ser deficientes en materia orgánica debido a un clima que presenta bajas precipitaciones y elevadas temperaturas, haciéndolos vulnerables a la degradación. Con la aplicación de residuos orgánicos al suelo se puede ralentizar la degradación de dichos suelos y aumentar el contenido de materia orgánica de los mismos además de favorecer el crecimiento de una capa vegetal.

En este sentido diferentes materiales de origen muy diverso se están generando en diferentes actividades ligadas al hombre y su estilo de vida, que tienen consideración de residuos o subproductos, pero que, en todo caso, tienen una naturaleza mayoritariamente orgánica. La posibilidad cierta de que estos materiales de naturaleza orgánica puedan ser utilizados en la agricultura viene avalada por la actividad preindustrial agrícola, donde materiales residuales como los estiércoles constituían la única fuente de fertilidad para los suelos agrícolas. Con posterioridad y durante un largo periodo han caído en desuso a favor de la utilización de fertilizantes

inorgánicos de síntesis o minerales. Sin embargo en los últimos años este desequilibrio entre la fertilización orgánica tradicional a base de materiales ahora considerados residuos frente a la fertilización inorgánica se está invirtiendo, con el fin de paliar los efectos negativos que están generando el mal uso de estos fertilizantes inorgánicos sobre la agricultura, asociados a la dosificación abusiva, la contaminación del medio y especialmente de los acuíferos, a la salinización de los suelos, a la pérdida de propiedades físicas, etc.

Estos materiales residuales o subproductos de naturaleza orgánica se generan en todos los sectores de actividad, si bien en el sector primario (agricultura y ganadería) y en las actividades de transformación asociadas a estas áreas (Industria agroalimentaria), es donde son cuantitativamente más importantes, por otra parte, los restos vegetales del mantenimiento de parques y jardines municipales, aumentan todos los años. Estos residuos de alto porcentaje en materia orgánica pueden ser un aporte importante para los suelos pobre en materia orgánica, como los de la zona del sureste español.

El compostaje de los residuos orgánicos generados en las zonas urbanas de forma directa o indirecta, como una alternativa para el reciclado y aprovechamiento de los mismos, es interesante no solo porque reduce el volumen de estos residuos sino también porque el compost obtenido puede utilizarse con fines agrícolas, recuperándose y aprovechándose así la materia orgánica y los nutrientes contenidos en dichos residuos.

*Por tanto, en este ensayo nos planteamos como objeto principal, el estudio de la viabilidad del uso de residuos de especies palmáceas como material estructurante para la valorización por co-compostaje mediante pila móvil con ventilación natural y por volteos periódicos, de lodos de depuradora procedentes de la depuración de aguas residuales de la Industria Agroalimentaria del procesado de vegetales, con el fin de obtener un producto final estabilizado, humificado y con valor añadido.*

Para ello, se establecen los siguientes objetivos concretos:

- Caracterización inicial de los residuos a compostar.
- Desarrollo de un sistema de compostaje mediante el sistema compostera móvil, donde los componentes de la mezcla a compostar varían en su proporción, configurando diferentes opciones de mezcla.
- Seguimiento de los parámetros indicadores del proceso de compostaje, a nivel de temperatura y aireación.
- Estudio de la evolución de características fisicoquímicas y químicas de la mezcla de residuos a lo largo del proceso de compostaje así como del producto final obtenido (compost).



## 3. MATERIAL Y MÉTODOS

---



### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este trabajo experimental se plantea como objeto principal el *estudio de la valorización por co-compostaje mediante pila móvil con ventilación natural y por volteos periódicos, de lodos de depuración de la industria de procesados vegetales y del residuo de origen vegetal, tronco de palmera, procedente del arranque de palmeras en el municipio de Elche, con el fin de obtener un producto final estabilizado, humificado y con valor añadido*. Para conseguir el objetivo principal del presente trabajo, se han ensayado 4 pilas en composteras móviles de 350 litros (C1, C2, C3, C4), a base de lodos de depuradora procedentes de la industria agroalimentaria y de material vegetal (tronco de palmera) que fue homogeneizado y troceado a un tamaño de partícula de 1 cm. Para ello, se estableció el siguiente diseño experimental, dividido en 4 fases:

*Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar.*

*Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar.*

*Fase 3: Desarrollo de un sistema de compostaje mediante el sistema pila móvil en compostera.*

*Fase 4: Análisis de las características físico-químicas y químicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso, así como del producto final obtenido.*

#### **Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar**

Se pretende conocer la naturaleza de los residuos que van a intervenir en el proceso de co-compostaje, con el fin de establecer con posterioridad una estrategia de compostaje adecuada en función de la tipología de estos materiales. En nuestro ensayo se caracterizaron 2 materiales distintos.

- **Lodo EDARI**: los lodos EDARI son residuos que resultan de la depuración de aguas residuales del sector agroindustrial. Los lodos tienen buenas propiedades desde el punto de vista agronómico por sus contenidos (NPK) y MO, pudiendo ser

utilizados como enmienda orgánica. El lodo utilizado procede de la depuración de aguas residuales procedente de la industria de congelados vegetales y de elaboración de procesados vegetales de cuarta gama, situada en El Raal, Comunidad de Murcia. La EDARI dispone de un tratamiento físico-químico (DAF) y de un tratamiento biológico del tipo reactor discontinuo secuencial (SBR). Los lodos generados en ambos tratamientos son deshidratados mediante centrifugación.

- **Tronco de Palmera:** Se trata de restos vegetales provenientes del arranque de palmeras en el municipio de Elche, este material está siendo abundante durante los últimos años debido a la plaga del picudo rojo. El tronco de palmera al ser un material muy fibroso es perfecto como estructurante, y su elevada C/N la hace ideal para ser compostado con materiales con baja relación C/N como los lodos.



**Figura 3.1.** Materiales iniciales: tronco palmera y lodo EDARI

**Muestreo de los materiales iniciales:**

El material utilizado para la elaboración de las mezclas que se incorporan a cada compostera se ha recogido del acopio que se disponía en la planta de compostaje COMPOLAB ubicada en la EPSO.

Cada material se muestreo por separado tomando submuestras a diferentes alturas y profundidades del montón de acopio para obtener una muestra representativa, que se homogeneizó para obtener una muestra final, mediante el

método del cuarteo, para su análisis que se realizó por triplicado.

### **Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar**

Debido a la propia naturaleza del proceso de compostaje, es necesario que la mezcla a compostar posea una serie de características a nivel físico, físico-químico y químico que condicionan el proceso. Por eso, a la hora de elaborar la pila de compostaje nos planteamos como objetivos básicos la obtención de una adecuada Humedad, Porosidad y Relación C/N en la mezcla inicial.

### **Fase 3: Desarrollo del sistema de compostaje en compostera móvil**

Una vez establecida la mezcla con las condiciones óptimas iniciales en función de nuestros objetivos, se desarrolla el sistema de compostaje en compostera móvil de 350 litros, donde se controlan las condiciones de entorno a nivel de aireación, temperatura y humedad en las que deberá estar comprendida la mezcla a compostar en el sistema. La aireación se controla mediante volteos periódicos vaciando la compostera y procediendo a la mezcla de sus materiales y la temperatura con sondas incorporadas en la propia compostera.

### **Fase 4: Análisis de las características fisicoquímicas y químicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso así como del producto final obtenido (compost).**

En las muestras de los materiales iniciales se determinó:

- Humedad
- pH
- Conductividad eléctrica
- Materia orgánica
- Nitrógeno total
- Relación C/N Carbono hidrosoluble
- Polifenoles solubles
- Contenido de P, K, Ca y Na



Se estudia la evolución de la mezcla a lo largo de todo el proceso, desde el inicio hasta que se obtiene el compost maduro. Esto se hace mediante el estudio de diferentes parámetros indicativos del proceso:

- Asociados al propio proceso de compostaje: temperatura, altura y volumen de la pila.
- Asociados a la evolución de la materia orgánica: materia orgánica, carbono orgánico, pérdida de la materia orgánica y relación entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total.
- Asociados a la evolución de contenidos nutrientes como NPK y de Na en el compost, de interés para la nutrición vegetal nivel agronómico.
- Asociados a la evolución de la fracción hidrosoluble: pH y conductividad eléctrica.
- Asociados a la madurez del compost: capacidad de intercambio catiónico e índice de germinación.

## 3.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

### 3.2.1. Descripción de la estación depuradora de aguas residuales de la industria agroalimentaria.

La estación depuradora de aguas residuales de la industria agroalimentaria (EDARI) que proporcionó los lodos para este estudio de compostaje, trata las aguas residuales de diferentes industrias de procesamiento de verduras y hortalizas, estas industrias son de tipo envasado para 4ª gama, conservera y de congelado (FRUVECO S.A., Sociedad cooperativa limitada Conservas El Raal y Ultracongelados Azarbe). Dentro de los insumos aparecen de temporada (alcachofa y brócoli) y de forma más continuada (tomate y pimiento).

El proceso de tratamiento se esquematiza en la Figura 3.2. El proceso comienza con la entrada del agua residual desde las industrias (cada industria tiene su propia tubería de desagüe). El agua residual llega a una unidad de **tratamiento físico-químico**

de flotación por aire disuelto (**DAF**) (**8**). En esta unidad, se adicionan polielectrolitos para ayudar a la formación de flóculos que, ayudados por el aire disuelto, flotan hasta la superficie, donde un sistema de arrastre los conduce hasta una canalización con destino al **depósito de lodos** (**7**). La carga contaminante eliminada en esta fase reduce las necesidades de oxígeno en el tratamiento aerobio posterior. El agua todavía con una carga orgánica importante se dirigen hacia el **tanque de homogenización** (**3**), en este tanque no se produce ningún tipo de acción solo se almacena. La capacidad de almacenaje es de 3000 m<sup>3</sup>, con una altura de 8 metros.

La planta cuenta con dos reactores aerobios del tipo **reactores discontinuos secuenciados SBR (R.1 y R.2)**, con una capacidad de 4000 m<sup>3</sup> y 8 metros de altura, ambos son automáticos y de tipo secuencial, por lo que estando en funcionamiento nunca se solapan; dicho de otro modo, cuando el R.1 está en fase de sedimentación el R.2 está en fase de digestión. La aireación que se produce dentro de los reactores es forzada, por recirculación del agua de dentro del tanque que es enriquecida con O<sub>2</sub> mediante un sistema **Venturi** (**4**).



**Figura 3.2.** Estación depuradora de aguas residuales agroindustriales, Raal, Murcia.

Un reactor discontinuo secuencial es un sistema de crecimiento suspendido en el que el agua residual se mezcla con un lodo biológico existente en un medio aireado. Es el único proceso biológico en el que se combina en un mismo tanque el proceso de

reacción, aeración y clarificación. El sistema SBR consta de, al menos, cuatro procesos cíclicos: llenado, reacción, decantación y vaciado, tanto de efluente como de lodos. En la primera fase, se introduce el agua residual al sistema. Durante la segunda fase del ciclo, el agua residual es mezclada mecánicamente para eliminar las posibles espumas superficiales y preparar a los microorganismos para recibir oxígeno. En esta segunda etapa (reacción) se inyecta aire al sistema. La etapa de reacción es un proceso cuyos resultados varían con su duración, y en la que el agua residual es continuamente mezclada y aireada, permitiendo que se produzca el proceso de degradación biológica. El tercer ciclo, llamado etapa de decantación, genera condiciones de reposo en todo el tanque para que los lodos puedan decantar. Durante la última fase, o fase de vaciado, el agua tratada es retirada del tanque mediante un sistema de eliminación de sobrenadante superficial. Finalmente, se puede purgar el lodo generado para mantener constante la concentración de éste. Esta tecnología es capaz de tolerar variaciones de carga y caudal y genera como producto lodos estabilizados. Dependiendo de la naturaleza del efluente a tratar es la calidad y las propiedades de los lodos generados.

Como se trata de un proceso de oxidación y los materiales entrantes a la planta ocasionalmente no son homogéneos, se dispone de una **estación O<sub>2</sub> (5)** para enriquecer los reactores y así acelerar la oxidación. Esta función se pone en funcionamiento cuando los niveles de materiales a oxidar superan a las concentraciones de O<sub>2</sub>, de lo contrario se produciría una bajada en el rendimiento de los reactores que conlleva más tiempo dentro del tanque para que el proceso concluya. Teniendo en cuenta que la entrada de insumos es constante esto supone un problema.

Para llevar a cabo el vaciado del tanque se emplea: para la fase líquida un sistema de vacío de superficie, mientras que para lodos se aprovecha la presión por columna de agua (m.c.a) que lleva los lodos hasta el **depósito de lodos (7)**.

Los lodos almacenados en el depósito de lodos (7) se bombean hacia la planta de **centrifugado (6)** donde se disponen de 3 centrifugadoras obteniendo como resultado una pasta densa.

La fase líquida una vez ha sido extraída del reactor es canalizada al exterior y vertida en la acequia de Merancho. El caudal evacuado es de unos 5000 m<sup>3</sup>/día. Por otro lado, la cantidad de lodo producido varía de 25 a 40 toneladas/día.



**Figura 3.3.** Unidad de tratamiento físico-químico de flotación por aire disuelto (DAF).



**Figura 3.4.** Fase de aireación.



**Figura 3.5.** Fase de sedimentación.



**Figura 3.6.** Sistema de enriquecimiento de oxígeno.



**Figura 3.7.** Depósito de lodos.

### 3.2.2. Características de los residuos utilizados

En el caso del tronco de palmera no está siempre disponible por lo que es necesario un almacenamiento, las características del tronco no varían en exceso de un individuo a otro, por otro lado, la industria agroalimentaria presenta diferentes lodos según el producto empleado, esta diferencia también se produce en el tiempo debido a la estacionalidad de los materiales utilizados en el proceso de industria. Las características de los materiales utilizados en el proceso de co-compostaje ensayado se muestran en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Características de los materiales utilizados como ingredientes en las composteras.

Parámetro	Lodo EDARI	Tronco Palmera
Humedad (%)	86,3	29,9
pH	5,63	6,74
CE (dS/m)	5,48	6,59
MO (%)	81,5	83,2
Corg (%)	50,5	40,4
Nt (%)	6,71	1,95
C/N	7,52	20,7
Polifenoles (mg/kg)	6575	971
P (g/kg)	2,40	0,20
Na (g/kg)	8,23	15,6
K (g/kg)	13,3	31,4

\*CE: conductividad eléctrica; MO: materia orgánica; Corg: Carbono orgánico total; Nt: nitrógeno total.

Respecto a la humedad, el lodo EDARI utilizado en este ensayo presenta alta humedad como corresponde a este tipo de materiales (86 %), mientras que el tronco de palmera es un material con menor contenido en humedad (30%). En este aspecto estos materiales se complementan de cara al proceso de compostaje. Cuando la humedad es excesiva y la biodegradabilidad moderada, puede ocurrir que el calor producido biológicamente en el proceso de compostaje sea insuficiente para las dos funciones principales de evaporar agua (la del sustrato y la formada en el proceso) y la de calentar la masa a temperaturas termófilas para su higienización. El ingrediente tronco de palmera puede compensar esta condición debido a su mayor porcentaje de materia seca. El lodo EDARI y el tronco de palmera tienen un pH ligeramente ácido. Ambos materiales presentan un contenido salino moderado, algo superior en el caso del tronco de palmera. Las sales tienden a concentrarse durante el proceso



de compostaje por lo que será un factor a tener en cuenta en el compost final de cara a su uso agrícola.

Ambos materiales presentan altos contenidos en materia orgánica, superiores al 80 %, siendo también elevados los contenidos en carbono orgánico, 50% para el lodo y 40% para el tronco de palmera. Respecto a la relación C/N esta suele ser bastante baja en los lodos en comparación con otros residuos orgánicos. Las pérdidas de nitrógeno en forma de emisiones de amoníaco suponen una pérdida del valor agronómico del lodo, además de ser una fuente de contaminación. Durante el compostaje estas pérdidas son prevenibles con un ajuste adecuado de la relación carbono/nitrógeno (C/N) en la mezcla inicial, así nos aseguramos que el nitrógeno permanece en el compost. En los residuos analizados la relación C/N es mucho menor en los lodos EDARI. El contenido de nutrientes N y P es mayor en lodo que en los residuos de poda, mientras que el contenido de K y Na es superior en los restos de poda que en el lodo EDAR.

Es importante indicar aunque no se muestran los datos en este trabajo que el lodo EDARI utilizado cumple la legislación vigente sobre metales pesados en el entorno suelo-lodo (Directiva 86/278/CEE y Real Decreto 1310/1990), siendo los contenidos de Cu, Zn, Cd, Ni, Cr, Pb y Hg, inferiores a las concentraciones límite establecidas en la legislación para su aplicación al suelo.

### **3.2.2. Dispositivo de compostaje utilizado**

El proceso de compostaje objeto de este estudio se ha desarrollado en la Escuela Politécnica de Orihuela (E.P.S.O.) en el departamento de Edafología y Química Agrícola, en unos dispositivos comerciales diseñados para tal fin (composteras domésticas).

Las composteras están fabricadas en polietileno de alta densidad y resistente a los rayos ultravioletas, tienen doble pared termo-aislante y una capacidad de 350 litros, color verde, con dimensiones 70 cm x 70 cm x 85 cm de altura y un peso de 9 Kg, tienen un sistema de ventilación natural para garantizar la degradación de la materia orgánica en condiciones aeróbicas Figura 3.8. El suministro de aire se realiza mediante unos orificios situados en diferentes lugares de las composteras para proporcionar un suministro de aire lo más homogéneo posible.



Figura 3.8. Compostera 350 litros.

### 3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este apartado se comentan todos los procesos y pasos seguidos para la realización del proceso de compostaje, su seguimiento analítico a lo largo del tiempo de experimentación, así como los procesos previos para la preparación de la mezcla a compostar. Por ello se comenta este desarrollo experimental en diferentes pasos:

1. Preparación de las 4 mezclas a compostar.
2. Seguimiento del proceso de compostaje.
3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas.

#### 3.3.1. Cálculo y preparación de la mezcla.

Para realizar este ensayo, se planteó como objetivo encontrar la proporción adecuada de los ingredientes a co-compostar, lodo EDARI y tronco de palmera, que permita un buen desarrollo del proceso para la obtención de un compost de calidad. Uno de los requisitos es que las mezclas tengan una relación C/N entre 20 y 35, rango ideal para el buen desarrollo del proceso. Para ello se calcularon las cantidades necesarias a mezclar (Lodo (EDARI) + (Tronco de palmera)) para alcanzar dicho

objetivo.

Este proceso se realizó mediante las expresiones:

$$\text{Ecuación (1)} \quad P = A + B + C$$

$$\text{Ecuación (2)} \quad C/N = \frac{(A * \% C_A * \% MS_A) + (B * \% C_B * \% MS_B) + (C * \% C_C * \% MS_C)}{(A * \% N_A * \% MS_A) + (B * \% N_B * \% MS_B) + (C * \% N_C * \% MS_C)}$$

P = Peso total de la pila, en kg.

A = Peso del componente A, en kg.

B = Peso del componente B, en kg.

C = Peso del componente C, en kg.

C<sub>A</sub>, C<sub>B</sub>, C<sub>C</sub> = Carbono de componente A, B y C, respectivamente.

N<sub>A</sub>, N<sub>B</sub>, N<sub>C</sub> = Nitrógeno de componente A, B y C, respectivamente.

MS = Materia seca.

En la Tabla 3.2, se expone la proporción de cada componente en la mezcla. Una vez establecidos los porcentajes de mezcla de los residuos sujetos a compostaje, se procedió al muestreo de los residuos, para su posterior caracterización inicial, a su pesado mediante báscula analítica, y a su posterior homogeneización, se realizaron tandas de mezcla hasta alcanzar el peso deseado de mezcla inicial. El proceso de elaboración se realizó según la siguiente secuencia: se pesaba la parte proporcional de los materiales residuales teniendo en cuenta los porcentajes de cada uno de ellos en la mezcla y se homogeneizaba la mezcla, se revolvía durante unos cinco minutos cada una de las submezclas y se le incorporaba una cantidad de agua equivalente a 30 litros por cada tanda, el proceso se observa en la Figura 3.9. Una vez suficientemente homogeneizados los residuos, éstos se vertían en las composteras de 350 L.





**Figura 3.9.** Proceso de llenado de las composteras.

**Tabla 3.2.** Proporciones de materiales en las pilas de compostaje EDARI, en peso seco.

Compost	% Lodo EDARI	% Tronco Palmera	% Cascara Almendra
<b>C1</b>	59,5	39,5	1
<b>C2</b>	39,6	59,4 %	1
<b>C3</b>	32,8	66,2	1
<b>C4</b>	19,5	79,5	1

### 3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje.

- Una vez llenas las composteras se realizó un seguimiento del proceso, fundamentalmente basado en el control de la temperatura y aireación.
- Las composteras se muestrearon a los 0 días (inicio de compostaje), a los 15, 35 y 50 días (final de bioxidativa) y a los 80 días (final de maduración).

- Se realizaron 2 volteos a los 15 y 35 días, con la finalidad de homogeneizar el material y reactivar la temperatura de las pilas.
- La fase biooxidativa del compostaje se consideró finalizada cuando la temperatura se igualó a la del ambiente y no hubo reactivación tras el volteo (día 30).
- Los compost se dejaron madurar durante un periodo de 1 mes.
- Finalmente el compost obtenido se trituró para obtener un producto homogéneo.



**Figura 3.10.** Volteo de la pila.



**Figura 3.11.** Fase de maduración



**Figura 3.12.** Homogeneización

### 3.3.3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas.

- Cada muestra de compostaje se formó a partir de 3 submuestras tomadas de sitios diferentes de la pila, considerando todo el perfil (desde la parte superior hasta la parte inferior de la pila).
- Las muestras se secaron al aire y se molieron a 0,5 mm para su análisis.
- Las composteras se muestrearon a los 0 días (inicio de compostaje), a los 16, 35 días (final de biooxidativa) y a los 80 días (final de maduración).
- Las pilas se voltearon dos veces a los 7 y 20 días desde el inicio. Los volteos se realizaron vaciando completamente las composteras, homogeneizando y volviendo el material de nuevo a su interior.
- En los materiales iniciales se analizó la humedad, el pH y la conductividad eléctrica, la materia orgánica, carbono orgánico total, polifenoles, nitrógeno total, fósforo, sodio y potasio. Todos los análisis se realizaron por triplicado.
- En las muestras de compostaje se determinó el pH y la conductividad eléctrica en el extracto acuoso 1:10 (w/v), materia orgánica, carbono orgánico total y el nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico, fosforó, sodio, potasio y también se determinó el índice de germinación (IG). Todos los análisis se realizaron por triplicado.

### 3.4. MÉTODOS ANALITICOS

#### Preparación de la muestra

Las muestras de residuos vegetales se secan en una estufa de aire forzado a 60°C y las muestras de lodo a 105°C. Posteriormente se muelen y tamizan a través de una malla de 0,5 mm de luz.

En el caso de las muestras de compost, una vez secas a 105 °C se muelen en un molino y se tamizan a través de una malla de 0,5 mm de luz.

- **Humedad original**

Se toma como humedad el porcentaje de agua con respecto a muestra húmeda, por diferencia de pesadas entre material húmedo y seco a 105°C.

- **Pérdida de peso por calcinación**

En lodos, se toma como “materia orgánica” la pérdida de peso por calcinación a 540°C, una vez extraídas mediante lavados sucesivos con ácido clorhídrico, sustancias de naturaleza inorgánica presentes en el lodo, tales como sales amónicas, carbonatos, fosfatos, etc. La pérdida de peso se expresa como porcentaje respecto a peso de muestra seca (MAPA, 1994).

En los residuos vegetales y compost, se toma como “materia orgánica” la pérdida de peso por calcinación a 430 °C. Se determina según el método de Navarro y col. (1993). La pérdida de peso se expresa como porcentaje respecto a peso de muestra seca.

- **Medida del pH**

El pH se mide sobre la suspensión acuosa obtenida por agitación mecánica durante 2 horas de la proporción 1:10, sólido/líquido. La medida se realiza con un pH-metro.

- **Conductividad eléctrica**

Se determina sobre la suspensión acuosa anterior, previamente centrifugada y filtrada, con un conductímetro.

- **Capacidad de Intercambio Catiónico**

Se realiza una limpieza de la muestra mediante varios baños de agua, dejando la muestra sin cationes, posteriormente se satura con Bario y se determina mediante un blanco.

- **Carbono orgánico total y nitrógeno total**

Se realiza quemando la muestra a 1020°C en un analizador elemental (Navarro y col., 1991).

- **Polifenoles**

Se determinan los polifenoles solubles mediante extracción acuosa en relación 1:20 mediante la modificación del método Folin (Beltrán y col., 1999).

- **Mineralización de la muestra**

Se prepara la mezcla con una digestión nítrico-perclórica y tras el paso por el bloque digestor se enrasa y almacena.

- **Fósforo total**

Se determina por medida espectrofotométrica de la intensidad de coloración amarilla producida por el complejo fosfovanadato molibdato amónico (Kitson y Mellon, 1994), obtenido sobre una fracción del extracto de mineralización.

- **Sodio y potasio**

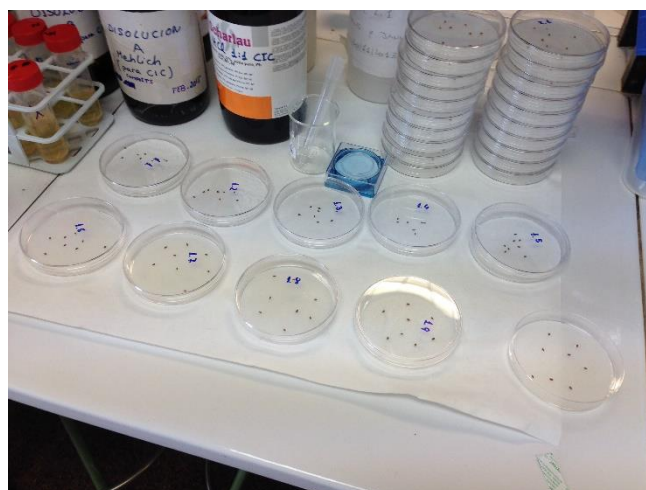
Estos elementos se midieron en disoluciones adecuadas del extracto de mineralización, mediante fotómetro de llama.

- **Índice de germinación (IG)**

El índice de germinación (IG) fue determinado usando semillas de *Lepidium sativum* L. (Zucconi et al., 1985). Se determina a partir de los porcentajes de semillas germinadas y longitud de las raíces de semillas *Lepidium sativum* L., incubadas en un extracto acuoso de compost.



**Figura 3.13.** Semillas de *Lepidium sativum* L.



**Figura 3.14.** Lote de semillas

### 3.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS

El tratamiento estadístico aplicado a los datos obtenidos se realizó mediante un análisis estadístico multivariante de doble vía donde se estudiaron las diferencias entre tratamientos plantados, considerando:

- El tiempo de compostaje como primera variable estadística (t=0, t=16, t=35, t=50 y t=80 días).
- La dosis de participación del tronco de palmera en la formulación de la mezcla a compostar como segunda variable de análisis estadístico (17%, 42%, 67% y 83% del ingrediente palmera).

En los casos de que la F-ANOVA mostró cierta significación, se empleó la prueba Tukey-b como prueba post-hoc para evaluar las diferencias entre medias específicas, mostrándose en los resultados mediante el empleo de letras para una probabilidad del 95% ( $P < 0,05$ ).



## 4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. EVOLUCIÓN DE FACTORES RELATIVOS AL PROPIO PROCESO DE COMPOSTJE: TEMPERATURA, ALTURA, VOLUMEN Y DENSIDAD APARENTE DE LAS PILAS.

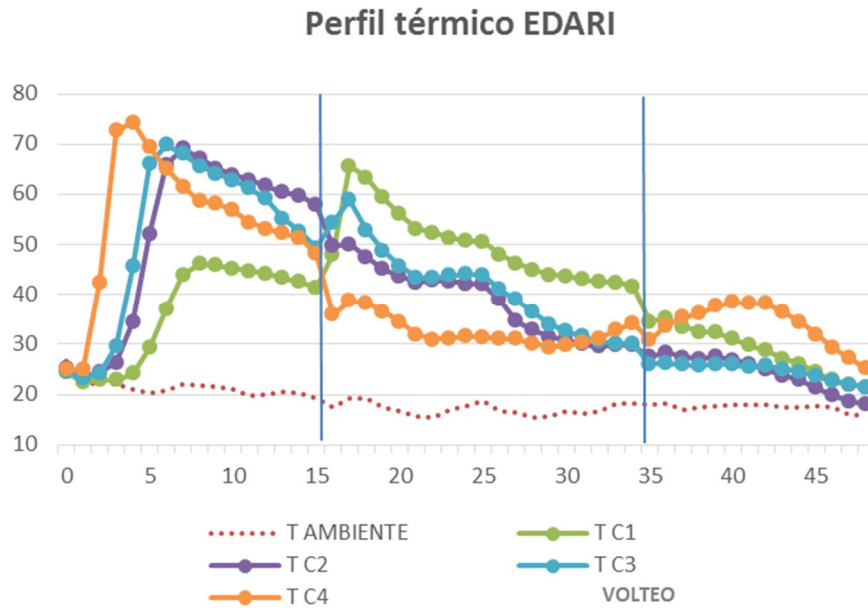
#### *Temperatura*

La temperatura es el parámetro más utilizado para seguir la evolución del proceso de compostaje, ya que su medida es directa e instantánea y puede hacerse de manera continua. La temperatura de la pila es el reflejo de la actividad microbiana que determina el proceso y, por tanto, su seguimiento permite detectar cualquier posible alteración del mismo. De este modo, una disminución de este parámetro será indicativo de un descenso en la actividad microbiana, que puede deberse a la falta de aireación, a un contenido insuficiente de agua o a la escasez de elementos nutritivos en el medio, mientras que un aumento de temperatura debe interpretarse como un buen desarrollo del proceso aeróbico.

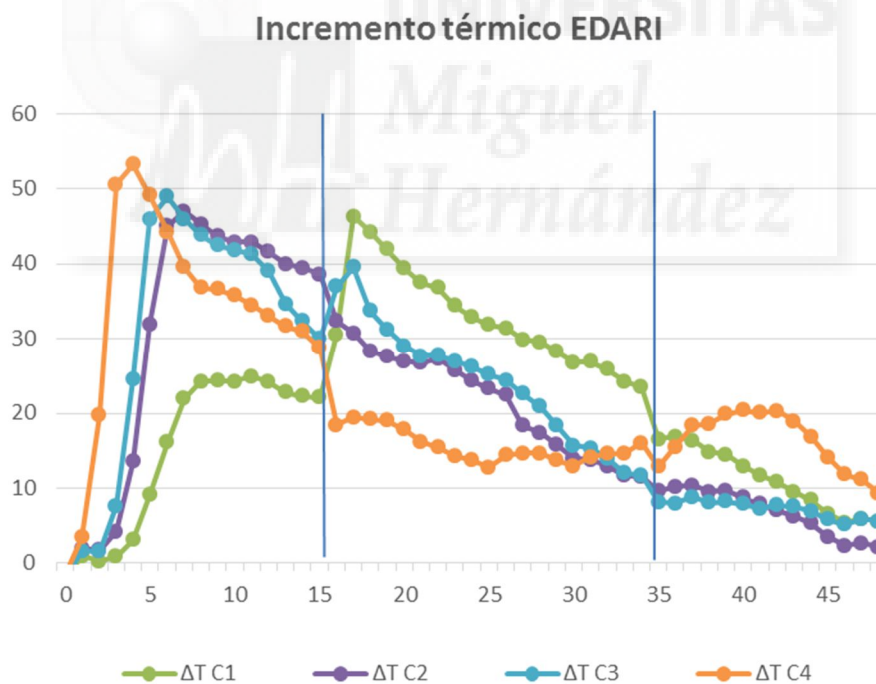
El compost atraviesa diferentes fases, que suelen repetirse con cada volteo realizado. Después de cada volteo, se produce normalmente un aumento de temperatura, asociado a la fermentación del material externo de la pila. Esto es debido a la reactivación de los microorganismos que disponen de nuevos principios inmediatos para su metabolismo al homogeneizar la masa mediante el volteo, procedentes de la capa superficial y de la zona cercana a la ventilación de la pila y que prácticamente no habían sido degradados a causa de la escasa humedad de los materiales en la zona periférica de la pila, o por el enfriamiento de la masa al aplicar la ventilación no se puede llevar a cabo (Stentiford y col., 1985). Estas secuencias de variación de temperatura generan cada vez un menor incremento de temperatura debido a la presencia cada vez menor de materia orgánica de fácil descomposición, que es en la que se basa el aumento de microorganismos no especializados.

En la **Figuras 4.1**, se muestra la evolución de la temperatura de cada una de las pilas, durante el proceso de compostaje de la mezcla, la temperatura ambiental, así como los días en los que se realizaron los volteos a la pila. En la **Figura 4.2**, se muestra el incremento térmico experimentado, una vez restada la temperatura ambiental de la temperatura de la compostera.





**Figuras 4.1.** Evolución de la temperatura de las pilas (en °C), durante el proceso de compostaje.



**Figuras 4.2.** Evolución del incremento térmico (en °C) experimentado en la pilas, durante el proceso de compostaje.

Según se observa en la **Figura 4.1**, la fase biooxidativa de los procesos de compostaje desarrollados se prolongó durante 48 días, momento en que los procesos verificaron un diferencial sostenido durante unos 10 días de menos de 10°C, entre la

temperatura promedio de la pila y la temperatura ambiental y no hubo reactivación de la temperatura tras el volteo.

La pila que inició antes la fase termófila fue la C4 a los 2 días de iniciado el compostaje, seguido de la C3 a los 4 días, de la C2 a los 5 días y de la C1 a los 7 días (**Figura 4.1**). La mayor proporción de estructurante tronco de palmera en las pilas contribuyó a una reactivación más rápida de las temperaturas de las pilas y con mayor intensidad. Los incrementos térmicos al inicio de la fase termófila fueron mayores al incrementarse la presencia del estructurante tronco de palmera (**Figura 4.2**).

Los diferentes volteos realizados sirvieron para homogeneizar la masa, suministrar oxígeno al proceso y reactivar así el proceso microbiano, al disponer de nuevo de compuestos orgánicos fácilmente biodegradables (Stentiford, Mara, y Taylor 1985). Se realizaron 2 en cada una de las pilas. Después del primer volteo se produjo un incremento de la temperatura, pero sin llegar a alcanzarse los valores iniciales. La disminución de la temperatura posterior fue paulatina. Se realizó un volteo más a los 34 días no observándose incrementos significativos de la temperatura de la mezcla respecto de la ambiental, dándose por concluida la fase biooxidativa a los 48 días.

En la **tabla 4.1** se muestran los datos del índice exotérmico (EXI) durante la fase biooxidativa, la temperatura (T) máxima y mínima y el número de días con fase termófila. El índice exotérmico (EXI) se calcula sumando el incremento diario de temperatura de la pila respecto a la temperatura ambiente, durante el periodo de fase biooxidativa.

**Tabla 4.1.** Índice exotérmico (EXI), T máxima y mínima promedio del proceso y nº de días con fase termófila (T>40°C).

	C1	C2	C3	C4
<b>EXI (°C)</b>	1018	985	1040	1051
<b>EXI/día biooxidativa</b>	21,2	20,5	21,7	21,9
<b>T max (°C)</b>	65,7	69,1	69,8	74,3
<b>T min (°C)</b>	21,4	18,0	21,4	25,0
<b>días &gt; 40 °C</b>	28	21	23	14

EXI= índice exotérmico

En la pila C1, la temperatura máxima del proceso fue de 65,7 °C que se alcanzó a los 17 días de proceso, el número de días con condiciones termófilas ( $T > 40^{\circ}\text{C}$ ) fue de 28 y el índice exotérmico acumulado durante el proceso fue de 1018 °C. En la pila C2, la temperatura máxima del proceso fue de 69,1 °C, el número de días con condiciones termófilas ( $T > 40^{\circ}\text{C}$ ) fue de 21 y el índice exotérmico acumulado durante el proceso fue de 985 °C. En la pila C3, la temperatura máxima del proceso fue de 69,8 °C, el número de días con condiciones termófilas ( $T > 40^{\circ}\text{C}$ ) fue de 23 y el índice exotérmico acumulado durante el proceso fue de 1040 °C. En la pila C4, la temperatura máxima del proceso fue de 74,3 °C, el número de días con condiciones termófilas ( $T > 40^{\circ}\text{C}$ ) fue de 14 y el índice exotérmico acumulado durante el proceso fue de 1051 °C.

Así, en la pila C1, con mayor proporción de lodo EDARI que aporta mayor cantidad de polifenoles iniciales, la etapa termófila se alargó más en el tiempo, el doble respecto a la desarrollada en la pila C4. Estos resultados concuerdan, en parte, con los encontrados por Cáceres, y col., (2015) que observaron temperaturas más altas y mayor tiempo de compostaje en pilas con un 75% de residuos vegetales probablemente debido a la naturaleza de lignina-celulósico de su ingrediente principal. La celulosa, hemicelulosa y lignina presentes en estos residuos son parcialmente descompuestos y transformados a una velocidad inferior (Bernal y col, 2009).

Los requisitos europeos en materia de saneamiento de compost, establecen más de dos semanas a  $T < 55^{\circ}\text{C}$  (Comisión Europea 2014) y a la Agencia de Protección Medio ambiental de Estados Unidos (EPA, 2003), considera que para una correcta higienización del material las pilas de compost deben mantener durante 15 días, o al menos durante 5 días consecutivos, una temperatura superior a 55 °C. Los compost C2, C3 y C4 mantuvieron temperaturas superiores a 55°C durante 10, 9 y 8 días, respectivamente, por lo que podrían considerarse higienizados desde el punto de vista del criterio EPA (2003).

En el perfil térmico de las composteras 2, 3 y 4, se alcanzaron temperaturas máximas superiores a las alcanzadas por Bustamante y col. (2013) en un ensayo de compostaje de similares características (compostera de 350 l) con fase sólida del

digerido obtenido tras la digestión anaerobia de purín de cerdo mediante su co-compostaje con diferentes agentes estructurantes.

### **Altura y volumen de las pilas**

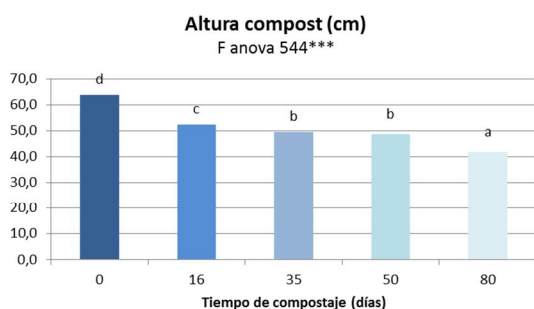
Los resultados obtenidos para el altura y volumen de las pilas se detallan en la Tabla 4.2 y en las Figura de la 4.3 a la y 4.6.

En todas las pilas ensayadas, la altura y el volumen evolucionan como es esperable, disminuyendo con el tiempo de compostaje, y además de forma más significativa durante los primeros 35 días. La reducción del volumen a lo largo del proceso de compostaje disminuye con el aumento de la presencia de tronco de palmera en las pilas.

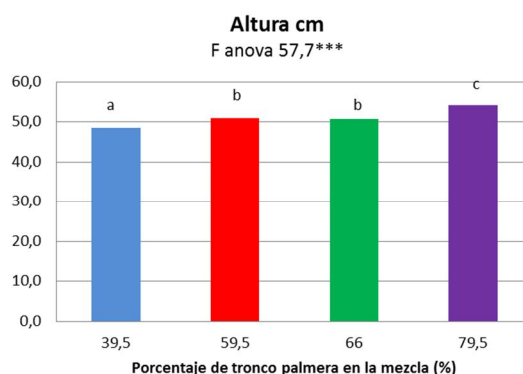
**Tabla 4.2.** Evolución de la altura y volumen de la pila durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	Altura (cm)	Volumen (L)
<b>C 1</b> (59,5% L EDARI: 39,5% TP : 1% A)	0	58d	244d
	16	49c	209c
	35	45ab	194ab
	50	47bc	201bc
	80	43a	185a
<b>F anova</b>		<b>91,5***</b>	<b>91,5***</b>
<b>C 2</b> (39,5% L: 59,5% TP : 1% A)	0	65c	272c
	16	49b	209b
	35	48b	205b
	50	49b	209b
	80	43a	185a
<b>F anova</b>		<b>150***</b>	<b>150***</b>
<b>C 3</b> (33% L: 66% TP : 1% A)	0	64d	268d
	16	51c	217c
	35	48b	205b
	50	49bc	209bc
	80	41a	177a
<b>F anova</b>		<b>154***</b>	<b>154***</b>
<b>C 4</b> (19,5% L: 79,5% TP : 1% A)	0	67e	276e
	16	59d	248d
	35	56c	237c
	50	49b	209b
	80	40a	173a
<b>F anova</b>		<b>188***</b>	<b>188***</b>

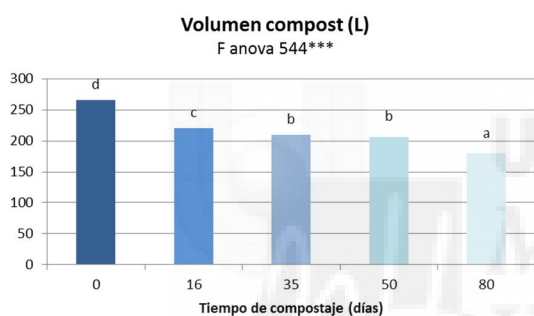
L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra



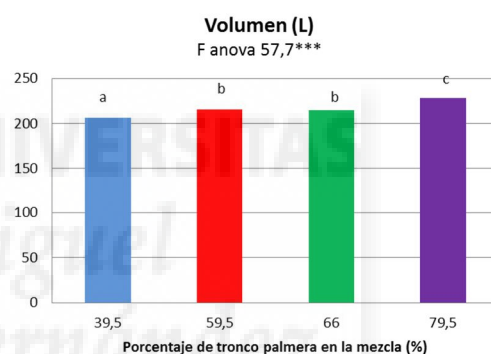
**Figura 4.3.** Influencia del tiempo de compostaje en la altura de la pila.



**Figura 4.4.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la altura de la pila.



**Figura 4.5.** Influencia del tiempo de compostaje en el volumen de la pila.



**Figura 4.6.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en el volumen de la pila.

### **Densidad aparente**

La densidad aparente está relacionada con la porosidad y el contenido en humedad, y es una característica muy importante (Croteau y Alpert 1994) en lo que respecta al funcionamiento del proceso aeróbico y a la ocupación y ordenación del espacio, sirve para realizar el cálculo de ocupación en la planta y por tanto el espacio necesario a la hora del diseño.

En la realización de la mezcla, la incorporación de restos vegetales triturados disminuye la densidad y facilita el esponjamiento y por tanto la autoaireación, lo que ayuda a reducir la necesidad de volteo y por tanto los consumos de combustible.

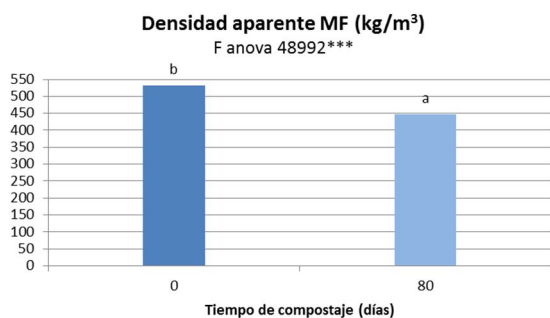
Inicialmente, una elevada densidad aparente está asociada a una baja porosidad que puede inducir un deficiente establecimiento del proceso, debido a que se dificulta el paso del aire y, a la larga, se obtiene una estabilización inferior de la materia orgánica. Los principales factores que hacen variar el valor de la densidad aparente son el contenido en agua y la presencia de material que aporte estructura, como pueden ser los restos vegetales. Por ello, a la hora de interpretar los valores resultantes de la densidad aparente es preciso tener en cuenta estos dos factores. Sin embargo, aunque la densidad inicial no sea favorable, con un buen manejo y volteos periódicos se puede generar una adecuada aportación de aire que mejora el proceso. En general, debido a los cambios asociados a la pérdida de masa y volumen a medida que avanza el proceso, el contenido total de materia y especialmente de agua y materia orgánica total disminuye y por consiguiente suele aumentar la densidad aparente sobre materia seca.

Los resultados obtenidos para la densidad aparente se detallan en la Tabla 4.3 y en las Figuras de la 4.7 a la 4.10.

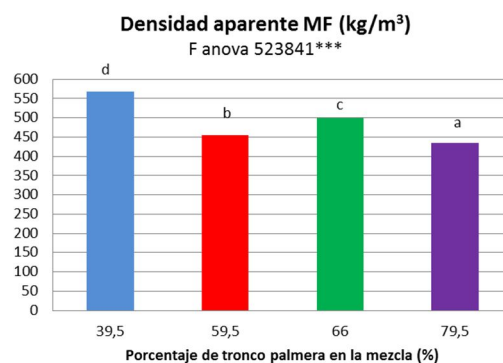
**Tabla 4.3.** Evolución de la densidad aparente durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	DA m.f. (kg/m <sup>3</sup> )	DA m.s. (kg/m <sup>3</sup> )
<b>C 1</b> (59,5% L: 39,5% TP : 1% A)	0	726b	160b
	80	411a	87a
<b>F anova</b>		<b>131421***</b>	<b>150940***</b>
<b>C 2</b> (39,5% L: 59,5% TP : 1% A)	0	503b	118a
	80	407a	119a
<b>F anova</b>		<b>20661***</b>	<b>50,8ns</b>
<b>C 3</b> (33% L: 66% TP : 1% A)	0	523b	141b
	80	477a	139a
<b>F anova</b>		<b>3504***</b>	<b>64**</b>
<b>C 4</b> (19,5% L: 79,5% TP : 1% A)	0	376a	106a
	80	494b	134b
		<b>25173***</b>	<b>19090***</b>

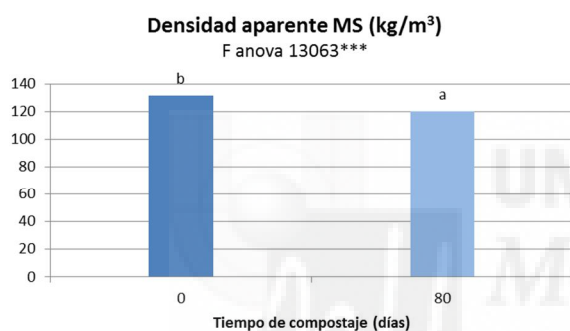
L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra; DAm.f.: densidad aparente expresada sobre materia fresca; DA m.s.: densidad aparente expresada como materia seca.



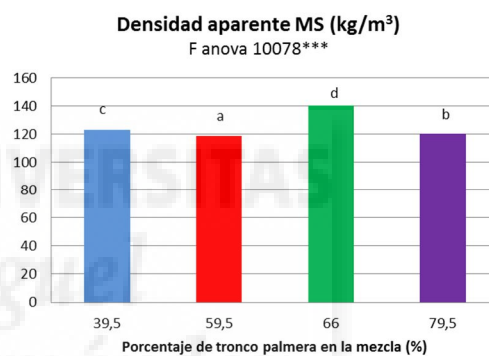
**Figura 4.7.** Influencia del tiempo de compostaje en la densidad aparente en materia fresca.



**Figura 4.8.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en densidad aparente sobre m.f. de la pila.



**Figura 4.9.** Influencia del tiempo de compostaje en la densidad aparente en materia seca.



**Figura 4.10.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la densidad aparente sobre m.s. de la pila.

En nuestro experimento, realizado mediante composteras, la densidad aparente expresada tanto en materia fresca como seca, en general, disminuye con el proceso de compostaje, mostrando una tendencia inversa a la usual. Sin embargo, la evolución de la densidad aparente en función de la presencia creciente del ingrediente tronco de palmera no manifiesta una tendencia clara. La densidad aparente de los compost en las muestras analizadas al final del proceso de compostaje se encuentra en el rango entre 400-500 kg/m<sup>3</sup>. Estos valores están en concordancia con los encontrados por otros autores. En este punto debemos recordar que las mezclas binarias donde se usan residuos de tipo secundario como fangos, presentan densidades aparentes iniciales en torno a 1000 kg/m<sup>3</sup> (debido a sus altos contenidos

en agua, 85% o más) por lo que aunque el proceso de compostaje suele concentrar la materia y por tanto aumentar la densidad, la pérdida de volumen no compensa la pérdida de materia, especialmente del agua, resultando en densidades aparentes menores.

#### 4.2. EVOLUCIÓN DE LA FRACCIÓN HIDROSOLUBLE: pH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y POLIFENÓLES.

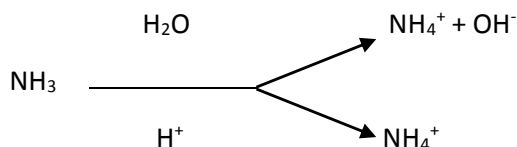
##### **pH**

La variación del pH a lo largo del compostaje se ha tomado en muchas ocasiones como un parámetro indicativo de la evolución del proceso. Generalmente, el pH disminuye en las primeras horas o días del proceso debido a la liberación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, procedentes de la descomposición de las fracciones más lábiles de la materia orgánica. Posteriormente se observa un aumento del pH, como consecuencia de la degradación de compuestos con grupos carboxílicos y fenólicos, de carácter ácido, y la mineralización de proteínas, aminoácidos y péptidos a amoníaco (Iglesias Jiménez y Pérez García, 1991), el cual se protonará durante el proceso de amonificación para formar amonio. Esta protonación puede resultar de la reacción del agua con el  $\text{NH}_3$  para formar  $\text{NH}_4\text{OH}$ , con producción de iones  $\text{OH}^-$ , ó de la protonación directa con el consumo de un ión  $\text{H}^+$  del medio (Reuss y Johnson, 1986), contribuyendo de esta manera a la subida del pH, tal y como se muestra en las siguientes reacciones:

##### Descomposición



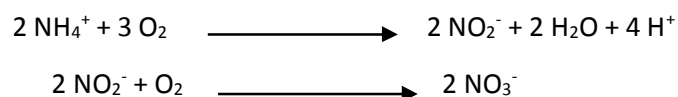
##### Amonificación



Por último, el pH disminuye, ya que los procesos de degradación no son tan intensos y se produce la nitrificación del amonio originado en la etapa anterior, que conlleva la liberación de iones  $\text{H}^+$  (Gagnon y col., 1993), tal y como se muestra en las siguientes ecuaciones:



Nitrificación.



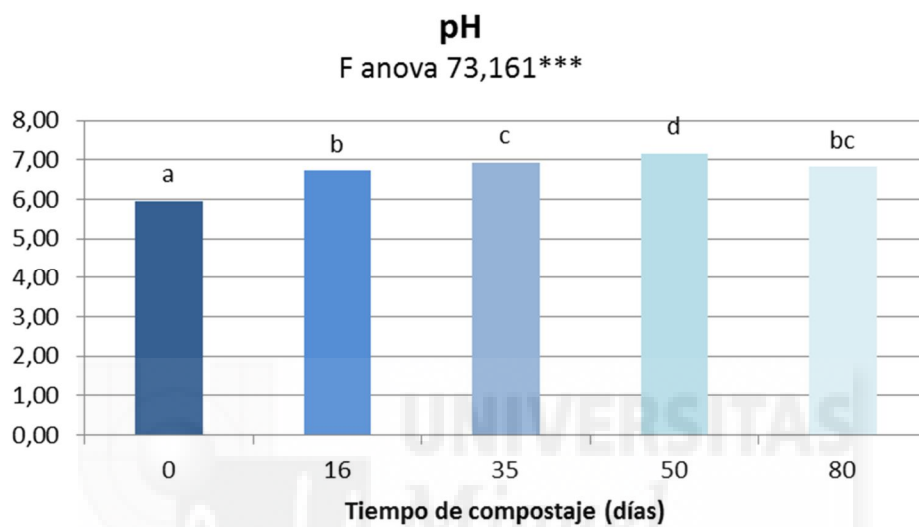
Los resultados obtenidos para el pH se detallan en la Tabla 4.4 y las Figura 4.11 y 4.12, que muestran respectivamente como el tiempo de compostaje y la proporción de materiales iniciales han influido en el pH.

**Tabla 4.4.** Evolución del pH durante el proceso de compostaje.

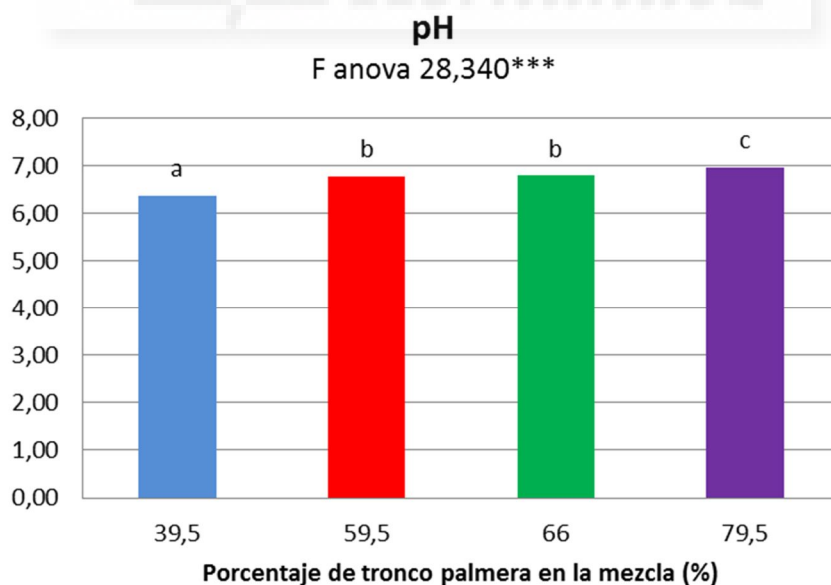
Compostera	Tiempo de compostaje (días)	pH
<b>C 1</b> (59,5% L EDARI: 39,5% TP : 1% A)	0	5,87a
	16	6,50b
	35	6,36b
	50	6,65b
	80	6,43b
<b>F anova</b>		<b>8,87**</b>
<b>C 2</b> (39,5% L: 59,5% TP : 1% A)	0	5,88a
	16	6,86ab
	35	7,02ab
	50	7,30c
	80	6,78b
<b>F anova</b>		<b>25,3***</b>
<b>C 3</b> (33% L: 66% TP : 1% A)	0	6,00a
	16	6,68b
	35	7,05bc
	50	7,22c
	80	6,94bc
<b>F anova</b>		<b>19,9***</b>
<b>C 4</b> (19,5% L: 79,5% TP : 1% A)	0	6,10a
	16	6,83b
	35	7,30c
	50	7,44c
	80	7,11bc
<b>F anova</b>		<b>23,6***</b>

L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra

Inicialmente, los valores de pH fueron ácidos en todas las pilas, presentando mayor acidez con mayor presencia de lodo EDARI. Según Rynk (1992) la acidez inicial podría influir en el desarrollo de la actividad termófila, evitando que se alcancen temperaturas elevadas durante esta fase. En las pilas estudiadas, se observó un aumento de la temperatura máxima alcanzada durante la fase termófila al disminuir la acidez inicial.



**Figura 4.11.** Influencia del tiempo de compostaje en el pH.



**Figura 4.12.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en el pH.

En la tabla 4.4, se presenta los valores de pH medidos en los compost estudiados. En la pila C1 el pH aumentó en la fase biooxidativa y se mantuvo constante hasta el final. En las pilas C2, C3 y C4, con menor proporción de lodo EDARI el pH aumentó durante la fase biooxidativa posiblemente debido a la descomposición de compuestos orgánicos nitrogenados y posterior amonificación del amoniaco liberado, y, finalmente, disminuyó durante la etapa de maduración posiblemente debido a los procesos de nitrificación.

El tiempo de compostaje influyó en la evolución del pH, aumentando en hasta el final de la etapa biooxidativa y disminuyendo en la de maduración, por los motivos comentados anteriormente. En la Tabla 4.4 podemos observar que el aumento del ingrediente tronco de palmera, conlleva un pH inicial y final más básico. En los composts acabados el pH varío de 6,4 a 7,1, incrementándose con el aumento de la presencia del estructurante tronco palmera. Todos ellos mostraron un pH adecuado para su uso agrícola.

### **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica (CE) generalmente se incrementa a lo largo del proceso como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica y de la concentración relativa de iones debida a la pérdida de peso, pero esto ocurre siempre que el compostaje se efectúe controlando la pérdida de sales solubles por lixiviación, debida a riegos o lluvia si el proceso se realiza al aire libre. Algunas veces puede producirse un descenso de la CE durante el proceso, lo que puede deberse a fenómenos de lixiviación en la masa, provocados por una humectación excesiva de la misma o por la lluvia, si el proceso se realiza al aire libre (Paredes y col, 2001).

Los valores de la conductividad eléctrica (CE) obtenidos en el proceso de compostaje se exponen en la Tabla 4.5 y en las Figuras 4.13 y 4.14, se muestra respectivamente la variación de la CE con el tiempo de compostaje y con la proporción del ingrediente tronco palmera de la pila. Se observa que la conductividad eléctrica en los compost elaborados se incrementa conforme avanza el tiempo de compostaje, posiblemente debido a la mineralización de la materia orgánica y la liberación de iones durante la degradación. La pila 4 presentó una conductividad eléctrica inicial inferior

pero fue el compost C4 el que presentó una mayor CE final (7,62 mS/cm). El compost C3 fue el que menor CE presentó (6,84 mS/cm).

Los compost incrementaron su CE durante la fase de maduración de forma significativa, Bustamante y col. (2008) también observaron incrementos en la CE de pilas elaboradas con residuos vitivinícolas en la fase final del proceso que atribuyó a la volatilización de amoníaco y la precipitación de sales minerales.

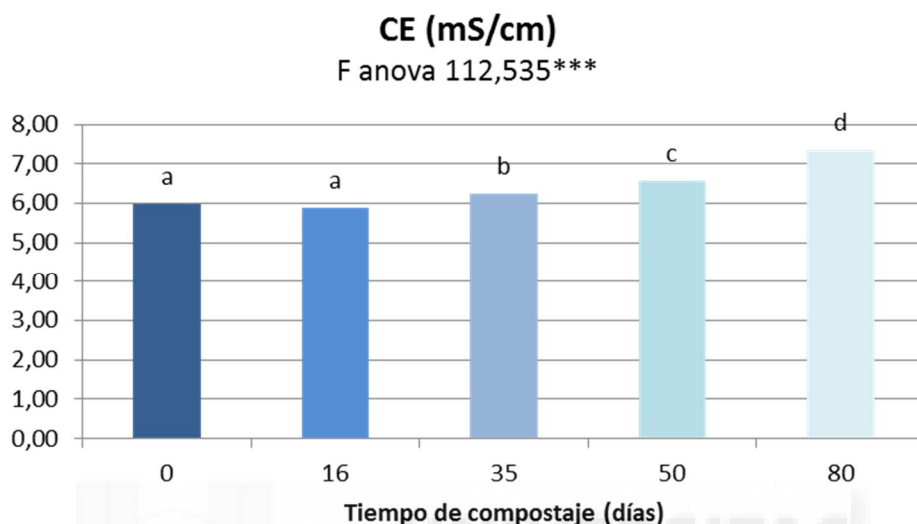
**Tabla 4.5.** Evolución de la conductividad eléctrica durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	CE mS/cm
<b>C 1</b> (59,5% L: 39,5% TP : 1% A)	0	6,07a
	16	5,76a
	35	6,30ab
	50	6,74b
	80	7,55c
<b>F anova</b>		<b>26,9***</b>
<b>C 2</b> (39,5% L: 59,5% TP : 1% A)	0	6,21a
	16	6,86b
	35	6,31a
	50	6,89b
	80	7,41c
<b>F anova</b>		<b>19,7***</b>
<b>C 3</b> (33% L: 66% TP : 1% A)	0	5,93b
	16	5,09a
	35	5,68b
	50	5,84b
	80	6,84c
<b>F anova</b>		<b>48,1***</b>
<b>C 4</b> (19,5% L: 79,5% TP : 1% A)	0	5,67a
	16	5,81a
	35	6,61b
	50	6,85b
	80	7,62c
<b>F anova</b>		<b>50,7***</b>

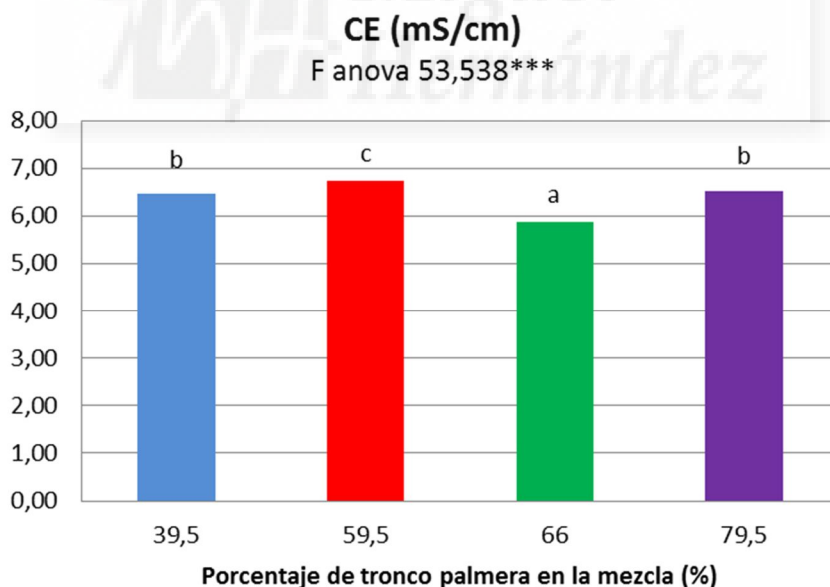
L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra

La conductividad eléctrica del compost es un parámetro a tener en cuenta en su uso agrícola. La adición de compost con elevada salinidad a los suelos agrícolas podría inhibir la germinación de semillas (He y col., 1995; Hargreaves y col., 2008) e

incrementar la conductividad eléctrica de los suelos donde se aplican. No obstante, la conductividad eléctrica desciende pasado el tiempo después de la aplicación, posiblemente por la toma de nutrientes por parte de las plantas y por la lixiviación de éstos (Zhang y col., 2006).



**Figura 4.13.** Influencia del tiempo de compostaje en la CE.



**Figura 4.14.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la CE.

Los composts maduros obtenidos presentaron valores altos de CE (6,8-7,6 mS/cm) lo cual supone una limitación para su uso como enmendante orgánico, por la posibilidad de inducir salinidad en el suelo y toxicidad en los cultivo, y especialmente

como sustrato o componente de sustrato de cultivo (Rynk 1992). Los valores obtenidos son comparables a los obtenidos en compost elaborados con la fracción orgánica de residuos municipales y en compost elaborados con lodos de depuradora (López y col., 2014).

Según Lasaridi y col. (2006), el valor de conductividad eléctrica que un compost debe tener para no provocar efectos adversos no ha de superar los 3 mS/cm. En todos los compost elaborados se supera dicho valor desde el inicio.

La elevada CE podría reducirse a través de mezclas con otros materiales y / o lavando el compost con agua de riego en las primeras etapas del proceso (Cáceres y col., 2014).

### ***Contenido en polifenoles***

Los polifenoles se encuentran prácticamente en todos los materiales vegetales, se componen básicamente de ácido fenólicos que incluyen benzoato y derivados hidroxycinamato y flavonoides (Guendez y col., 2005). Los compuestos fenólicos merecen especial atención debido a su repercusión sobre la inhibición de la germinación de semillas (Manios y col. 1987), sobre la inmovilización del nitrógeno del suelo (Bustamante et al., 2007) y por su efecto antimicrobiano (Scalbert, 1991) que puede inhibir y limitar el proceso de compostaje. La evolución de los polifenoles solubles durante el proceso de compostaje es un parámetro a tener en cuenta en su uso agrícola, ya que están relacionados directamente con las propiedades fitotóxicas de los materiales a compostar.

Los valores de la concentración de polifenoles obtenidos en el proceso de compostaje se incluyen en la Tabla 4.6 y en las Figuras 4.15 y 4.16 que muestran cómo el tiempo de compostaje y la proporción del estructurante tronco palmera ha influido en el contenido de polifenoles.

En cuanto a la evolución de polifenoles, se ve que con el paso del tiempo el contenido va descendiendo, se puede observar también que en el día 35 hubo un pequeño repunte, esto puede deberse a que durante la degradación de polifenoles

complejos, se generan polifenoles más simples, que son posteriormente también degradados. Por otro lado, vemos que el aumento del ingrediente tronco palmera, lleva consigo una menor cantidad de polifenoles (figura 4.16), debido a que el lodo lleva la mayor parte de la carga de polifenoles, mientras que el tronco palmera tiene concentraciones más bajas.

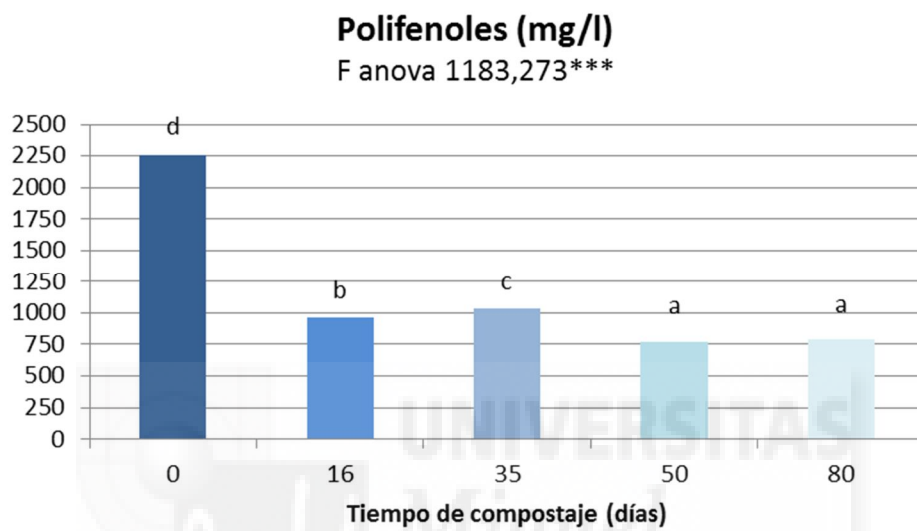
**Tabla 4.6.** Evolución de la concentración de polifenoles de las pilas durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	Polifenoles mg/l
<b>C 1</b> (59,5% L: 39,5% TP : 1% A)	0	2682e
	16	1345c
	35	1897d
	50	1142b
	80	952a
<b>F anova</b>		<b>224***</b>
<b>C 2</b> (39,5% L: 59,5% TP : 1% A)	0	2540c
	16	726b
	35	832b
	50	534a
	80	764b
<b>F anova</b>		<b>484***</b>
<b>C 3</b> (33% L: 66% TP : 1% A)	0	1967c
	16	1158b
	35	747a
	50	850a
	80	811a
<b>F anova</b>		<b>273***</b>
<b>C 4</b> (19,5% L: 79,5% TP : 1% A)	0	1855b
	16	608a
	35	644a
	50	564a
	80	631a
<b>F anova</b>		<b>419***</b>

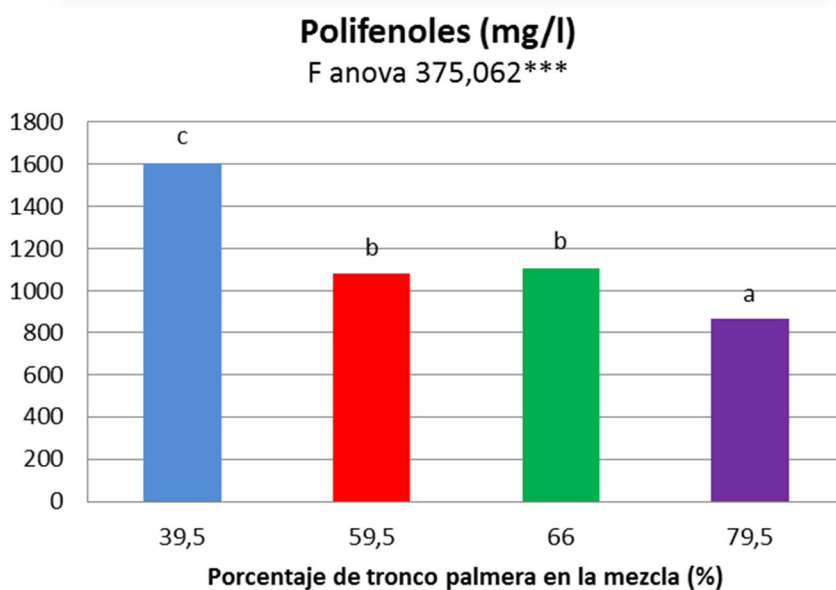
L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra

En la Tabla 4.6 y en la figura 4.15, se muestra como el mayor descenso en la concentración de polifenoles en las pilas se da en las primeras fases o etapas del proceso de compostaje, debido a la gran actividad inicial que llevan a cabo las poblaciones microbianas encargadas de degradar estos compuestos tan complejos

hasta finalmente obtener una concentración constante que puede estar relacionada con la madurez del compost. La disminución de los compuestos de naturaleza fenólica durante el proceso de compostaje se debe al predominio de las vías degradativas y de polimerización frente a la liberación al medio acuoso de sustancias fenólicas (Saviozzi y col., 1987). El factor tiempo de compostaje ha influido de forma significativa en la evolución de los polifenoles durante el proceso.



**Figura 4.15.** Influencia del tiempo de compostaje en la concentración de polifenoles hidrosolubles.



**Figura 4.16.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la concentración de polifenoles hidrosolubles.



En todos los compost los valores finales están por debajo a 1000 mg/kg de polifenoles solubles, aunque ligeramente superiores a los obtenidos por Bustamante y col. (2008) en compost de residuos vitivinícolas.

### **4.3. EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA Y DE SU FRACCIÓN SÓLIDA**

El estudio de la evolución de la materia orgánica en su conjunto y de su fracción sólida nos proporciona información acerca de los procesos que ocurren durante el compostaje y de la mayor o menor intensidad de la actividad microbiana durante el progreso del mismo.

#### ***Materia orgánica***

El porcentaje de materia orgánica presente en el compost, es indicativo de la naturaleza, más o menos orgánica que tiene la pila. En teoría, la tasa de materia orgánica debe ir descendiendo debido a la descomposición que ocurre en la etapa bio-oxidativa. El contenido final de materia orgánica (MO) en el compost dependerá del valor inicial, de su degradabilidad y de la transformación que hayan sufrido sus componentes durante el proceso. Es un parámetro importante porque en el caso de aplicarse al suelo incide de forma global en todas sus propiedades (físicas, químicas y biológicas) y en caso de utilizarse como sustrato la MO incidirá sobre sus propiedades físicas, siendo indispensable además conocer su estabilidad. Pérdidas considerables de MO durante la fase de bio-oxidativa indica la estabilidad relativa alcanzada por los productos después de la etapa de bio-oxidativa.

Los valores de la materia orgánica analizados durante el proceso de compostaje se incluyen en la Tabla 4.7 y en las Figuras 4.17 y 4.18 se muestra la influencia del tiempo de compostaje y la proporción del ingrediente tronco palmera en el contenido de MO.

A lo largo de todo el proceso se observa una disminución de la cantidad de MO presente en el compost, como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso. Esta pérdida, en general, es más acusada durante los primeros días de compostaje, coincidiendo con la

fase termófila, la intensa actividad microbiana en esta etapa, promueve una mayor degradación y mineralización de la MO presente. Esto no fue así en el caso del compost C4 que siguió perdiendo MO de forma acusada hasta el final, posiblemente debido a un pequeño aumento de temperatura más tardío que se produjo en esta pila. El tiempo de compostaje ha sido un factor decisivo en la evolución de éste parámetro (Figura 4.17). Por otro lado se puede ver como la cantidad de MO disminuye con el aumento en la concentración del estructurante tronco de palmera (Figura 4.18).

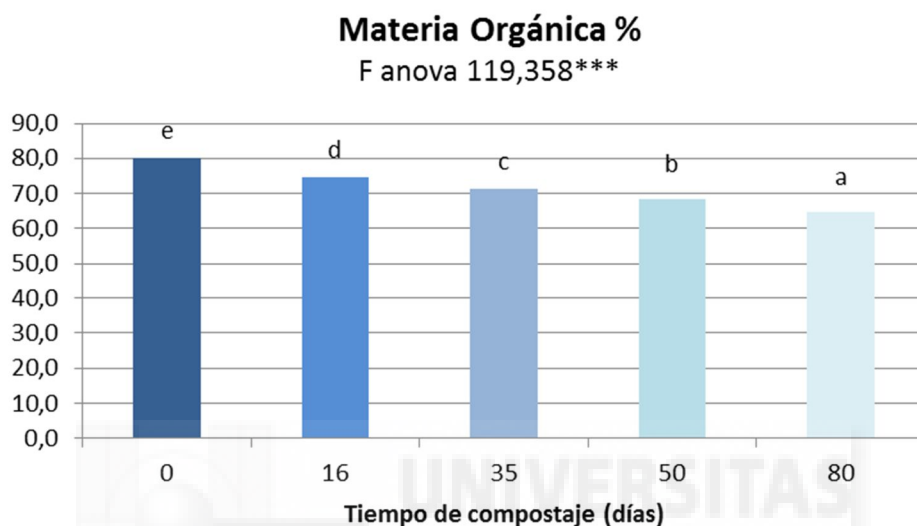
**Tabla 4.7.** Evolución del contenido de materia orgánica (MO) de las pilas durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	MO %
<b>C 1</b> (59,5% L: 39,5% TP : 1% A)	0	86,6b
	16	79,9a
	35	79,5a
	50	78,7a
	80	76,6a
<b>F anova</b>		<b>14,5***</b>
<b>C 2</b> (39,5% L: 59,5% TP : 1% A)	0	83,2d
	16	78,0c
	35	72,7b
	50	69,5ab
	80	68,0a
<b>F anova</b>		<b>33,4***</b>
<b>C 3</b> (33% L: 66% TP : 1% A)	0	78,6d
	16	72,7c
	35	66,5b
	50	63,7ab
	80	61,5a
<b>F anova</b>		<b>38,8***</b>
<b>C 4</b> (19,5% L: 79,5% TP : 1% A)	0	72,1d
	16	67,9cd
	35	66,4c
	50	61,5b
	80	52,5a
<b>F anova</b>		<b>43,7***</b>

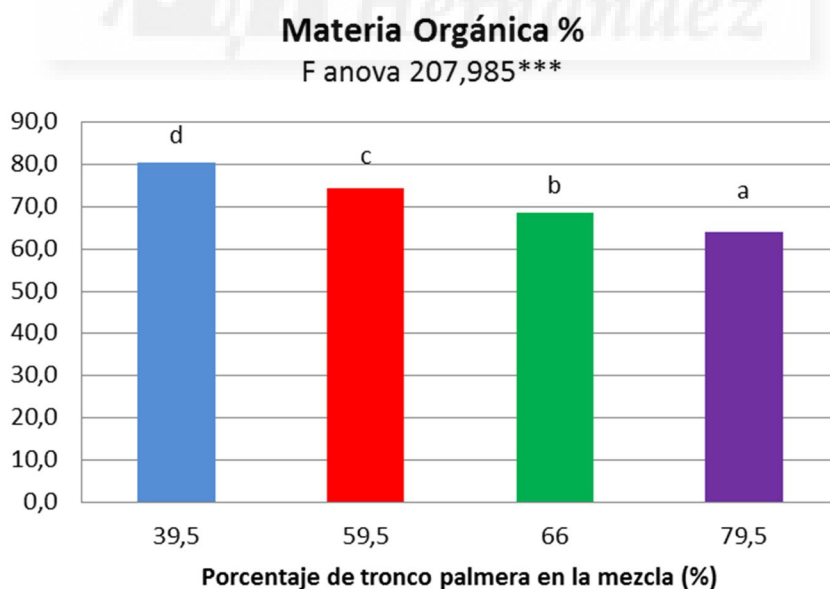
L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra

Los valores de materia orgánica en los compost finales son altos, superiores al 50%, comparables a los alcanzados en plantas de compostaje industriales en España

(Huerta-Pujol y col, 2011) y en compost de restos de poda urbana (López y col. 2014. También comparables con los contenido de MO obtenidos por Bustamante y col. (2013) en compost utilizando la fracción sólida del digerido de purín porcino con diferentes agentes estructurantes. Estos valores son superiores a los establecidos en la legislación para compost (MO  $\geq$  35%) (RD 506/2013).



**Figura 4.17.** Influencia del tiempo de compostaje en la concentración de MO.



**Figura 4.18.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la concentración de MO.

### ***Pérdida de materia orgánica***

Las pérdidas de materia orgánica (MO) reflejan la evolución sufrida por la mezcla de residuos estudiada. Éstas se calcularon a partir del contenido de cenizas inicial ( $X_1$ ) y en el punto de estudio ( $X_n$ ), de acuerdo con la ecuación de Viel y col. (1987):

$$\text{Pérdidas MO (\%)} = 100 - 100 \left[ \frac{X_1 (100 - X_n)}{X_n (100 - X_1)} \right]$$

Esta ecuación representa el porcentaje de materia orgánica perdida con respecto a la cantidad inicial, para ello se considera que el contenido de cenizas a lo largo del proceso es constante y de este modo se evita el efecto concentración provocado por las pérdidas de peso de la pila debidas a la degradación de la materia orgánica.

Los valores de pérdida de materia orgánica obtenidos en el proceso de compostaje se incluyen en la Tabla 4.8 y en las Figuras 4.19 y 4.20 muestran como el tiempo de compostaje y la proporción de ingrediente tronco palmera iniciales ha afectado a la pérdida de MO.

Debido a los procesos de degradación, como consecuencia de la actividad microbiana, se produce una pérdida de MO, siendo esta más acusada durante la fase termófila, tras esto los compuestos más sencillos se han degradado y la pérdida de MO va disminuyendo. El factor tiempo ha sido decisivo en la evolución de éste parámetro. En la figura 4.19, se observa que en las composteras con menor cantidad del estructurante tronco de palmera (C1, C2 y C3) la cantidad de materia orgánica perdida es similar, mientras que en la pila C4 con una mayor proporción de tronco muestra una pérdida menor de MO, también fue la pila que mostró menores niveles de MO iniciales y finales.

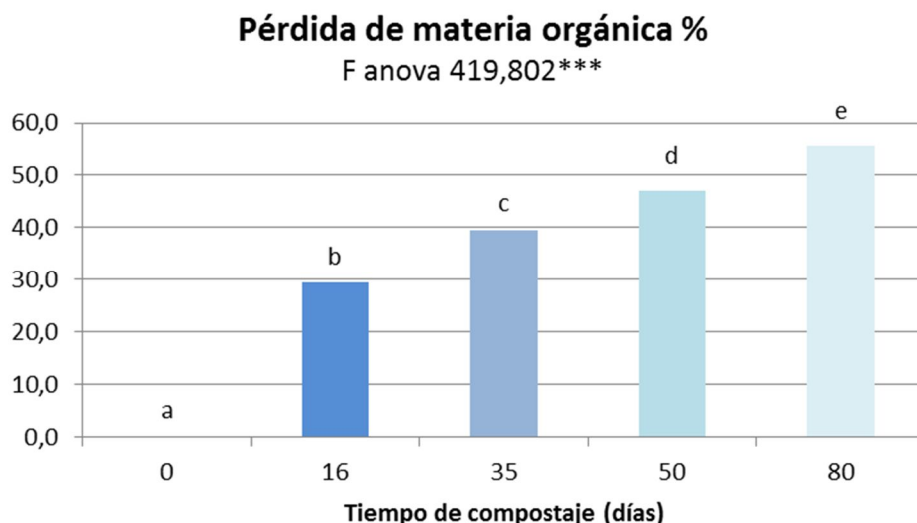
Al final de proceso, se alcanzaron pérdidas de MO cercanas al 35% para los compost C1, C2 y C3 e inferiores al 30% para el compost C4. Pérdidas considerables de MO durante la fase de bio-oxidativa indica la estabilidad relativa alcanzada por los productos después de la etapa de bio-oxidativa. Esto puede ser utilizado como un indicador de la tasa de compostaje (Petric y col, 2012).

Cáceres y col. (2014) observaron mayores pérdidas de materia orgánica en el compostaje de residuos vegetales y fracción sólida de estiércoles al aumentarse la proporción de restos vegetales en la pilas.

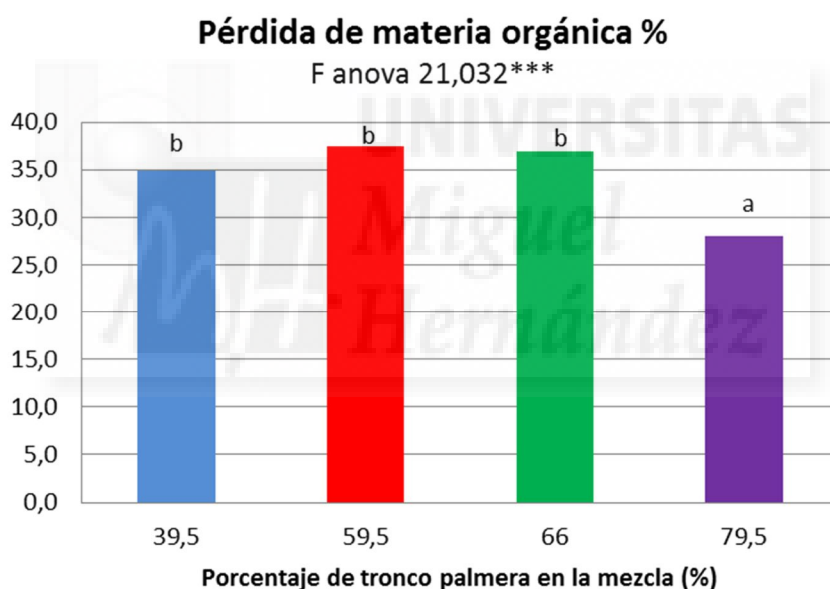
**Tabla 4.8.** Evolución de la pérdida de MO de las pilas durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	Perdida MO %
<b>C 1</b> <i>(59,5% L: 39,5% TP : 1% A)</i>	0	0,0a
	16	39,6b
	35	40,5b
	50	43,5bc
	80	50,7c
<b>F anova</b>		<b>86,0</b>
<b>C 2</b> <i>(39,5% L: 59,5% TP : 1% A)</i>	0	0,0a
	16	28,7b
	35	46,2c
	50	54,6cd
	80	57,5d
<b>F anova</b>		<b>122***</b>
<b>C 3</b> <i>(33% L: 66% TP : 1% A)</i>	0	0,0a
	16	29,2b
	35	46,2c
	50	52,2cd
	80	56,8d
<b>F anova</b>		<b>137***</b>
<b>C 4</b> <i>(19,5% L: 79,5% TP : 1% A)</i>	0	0,0a
	16	19,9b
	35	25,0b
	50	38,3c
	80	57,2d
<b>F anova</b>		<b>103***</b>

L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra.



**Figura 4.19.** Influencia del tiempo de compostaje en la pérdida de MO.



**Figura 4.20.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la pérdida de MO.

### ***Carbono orgánico total***

Del mismo modo que el contenido de materia orgánica y el contenido de carbono orgánico disminuyen a lo largo del proceso de compostaje como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso.

Los valores de carbono orgánico total (COT) obtenidos en el proceso de compostaje se muestran en la Tabla 4.9 y en las Figuras 4.21 y 4.22 se muestra respectivamente, la influencia de los factores tiempo de compostaje y la proporción de ingrediente tronco palmera en el contenido de carbono orgánico.

**Tabla 4.9.** Evolución del carbono orgánico total (COT) de las pilas durante el proceso de compostaje.

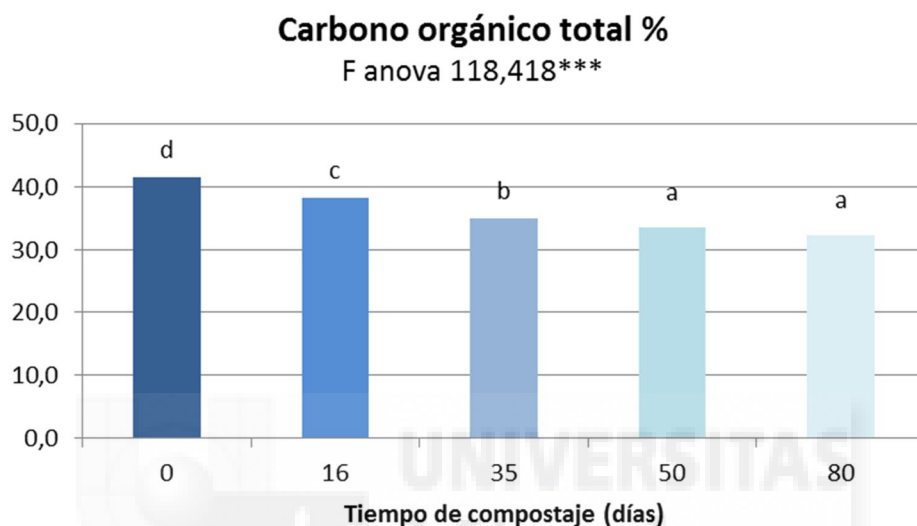
Compostera	Tiempo de compostaje (días)	COT
<b>C 1</b> (59,5% L: 39,5% TP : 1% A)	0	46,8b
	16	41,5a
	35	41,5a
	50	40,4a
	80	38,6a
<b>F anova</b>		<b>15,6***</b>
<b>C 2</b> (39,5% L: 59,5% TP : 1% A)	0	42,4d
	16	37,9c
	35	32,9b
	50	30,5a
	80	31,9ab
<b>F anova</b>		<b>88,8***</b>
<b>C 3</b> (33% L: 66% TP : 1% A)	0	38,6b
	16	37,6b
	35	32,8a
	50	31,9a
	80	32,3a
<b>F anova</b>		<b>26,0***</b>
<b>C 4</b> (19,5% L: 79,5% TP : 1% A)	0	38,3c
	16	36,0c
	35	32,7b
	50	31,2b
	80	26,5a
<b>F anova</b>		<b>32,6***</b>

L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra

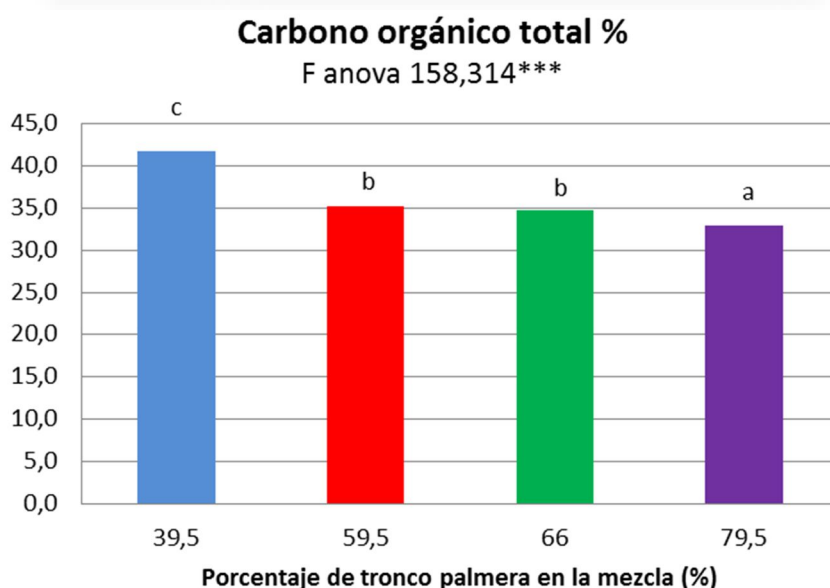
Como muestra la Figura 4.21 el tiempo de compostaje ha influido de forma significativa en el contenido de COT que ha disminuido a lo largo del proceso como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso. También la proporción de ingredientes ha marcado diferencias, disminuyendo el contenido de COT con la

presencia de más estructurante.

El mayor descenso de COT se aprecia en la fase biooxidativa, debido a la mayor actividad microbiana en esta etapa, no encontrándose prácticamente cambios en el contenido de COT durante la etapa de madurez. Los valores de COT en los compost finales son altos, variando entre un 38% para la pila C1 y un 26% para la pila C4.



**Figura 4.21.** Influencia del tiempo de compostaje en el contenido de carbono orgánico total.



**Figura 4.22.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en el contenido de carbono orgánico total.



### ***Nitrógeno total***

El nitrógeno es un nutriente esencial para la vida vegetal cuya toma, por parte de las plantas, se produce en su forma inorgánica. Los contenidos de nitrógeno en un residuo fresco o compostado de naturaleza orgánica condiciona su capacidad fertilizante. El nitrógeno se encuentra tanto en forma orgánica como en forma inorgánica, aunque mayoritariamente es la forma orgánica la que está presente en los residuos orgánicos.

A lo largo del proceso de compostaje, se produce una descomposición de la materia orgánica y, por tanto, también de su fracción nitrogenada, siendo de esperar que durante el proceso de compostaje el nitrógeno orgánico se irá transformando, paulatinamente, en especies inorgánicas. Estas especies inorgánicas, en un cierto porcentaje, se pueden perder por lixiviación con la fase líquida o por volatilización a la atmósfera (liberación de amoníaco). Así pues, tenemos una serie de procesos que hacen que el contenido de nitrógeno presente en la pila inicial pueda verse disminuido. Sin embargo, la pérdida de materia orgánica que se produce a lo largo del compostaje, traducida por tanto en una reducción en el peso de la masa a compostar, hace que las especies nitrogenadas, tanto orgánicas como inorgánicas, experimenten el llamado “efecto concentración”, es decir, al final del proceso de compostaje, a pesar de que se pierde nitrógeno, éste estará más concentrado en el compost final debido a esa reducción en la masa de la pila comentada anteriormente. Por tanto, el contenido en nitrógeno aumenta durante el proceso de compostaje probablemente debido a un efecto concentración, como consecuencia de la pérdida de peso de la pila por degradación de materia orgánica, además de la posible fijación biológica de nitrógeno (Paredes y col., 2002).

Los valores de nitrógeno total (NT) obtenidos en el proceso de compostaje se incluyen en la Tabla 4.10 y en las Figuras 4.23 y 4.24 muestran como el tiempo de compostaje y la proporción de materiales iniciales han afectado a la concentración de NT.

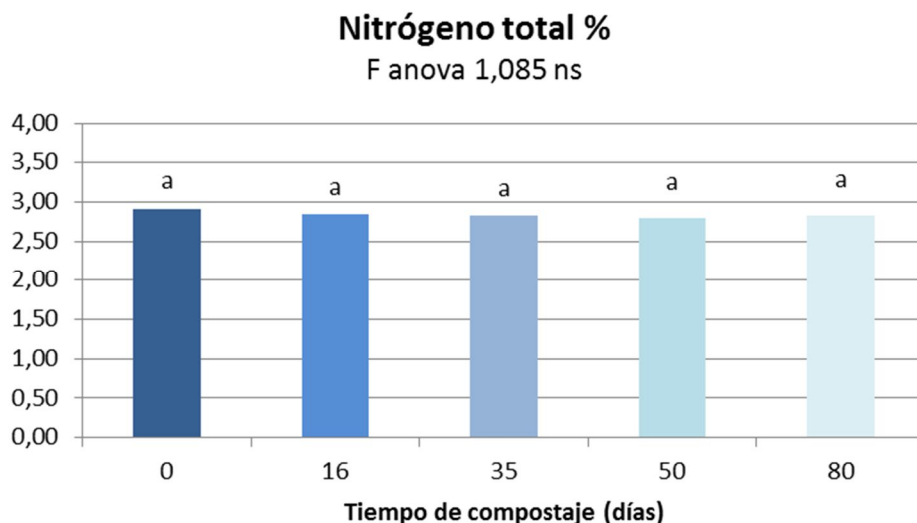
En la figura 4.23, se observa que los valores de NT no han variado con el tiempo de compostaje, en el caso de las pilas C3 y C4 e incluso en la pila C2 se observa un

ligero descenso, solo en la caso de la pila C1 se observó un ligero aumento. El aumento en la proporción de ingrediente tronco palmera ha disminuido el contenido inicial de NT en las pilas ensayadas. La no evolución de este parámetro durante el compostaje hace que el compost con mayor contenido en NT sea el C1 (4,0%), siendo para el resto en torno al 2,5%. Posiblemente se hayan producido pérdidas de nitrógeno por lixiviación con la fase líquida o volatilización a la atmósfera (liberación de amoníaco).

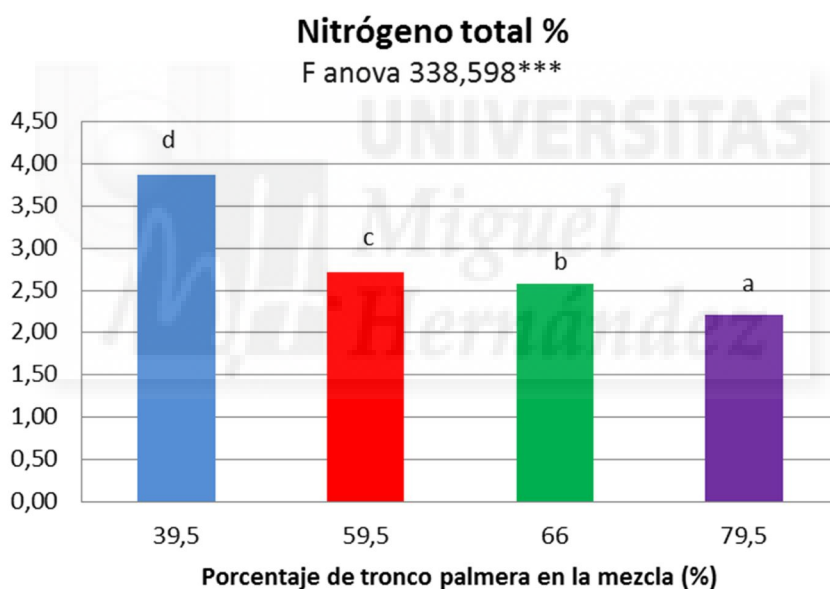
**Tabla 4.10.** Evolución del Nitrógeno total (NT) de las pilas durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	NT (%)
<b>C 1</b> (59,5% L: 39,5% TP : 1% A)	0	3,6a
	16	3,7ab
	35	4,0b
	50	4,0b
	80	3,9ab
<b>F anova</b>		<b>5,28*</b>
<b>C 2</b> (39,5% L: 59,5% TP : 1% A)	0	3,2b
	16	3,0b
	35	2,4a
	50	2,4a
	80	2,6a
<b>F anova</b>		<b>16,9***</b>
<b>C 3</b> (33% L: 66% TP : 1% A)	0	2,8a
	16	2,6a
	35	2,6a
	50	2,5a
	80	2,5a
<b>F anova</b>		<b>1,80 ns</b>
<b>C 4</b> (19,5% L: 79,5% TP : 1% A)	0	2,1a
	16	2,1a
	35	2,2a
	50	2,3a
	80	2,3a
<b>F anova</b>		<b>1,00 ns</b>

L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra



**Figura 4.23.** Influencia del tiempo de compostaje en la concentración de NT.



**Figura 4.24.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la concentración de NT.

#### ***Relación carbono orgánico total - nitrógeno total***

La relación carbono orgánico total / nitrógeno total (COT/NT) de la muestra sólida es uno de los índices más utilizados para estudiar la evolución de la materia orgánica durante el compostaje, ya que por un lado, representa la pérdida de carbono orgánico, como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica, mientras

que por otro, mide el aumento de la concentración de nitrógeno debido a la pérdida de peso. Como resultado se obtiene una disminución de este parámetro, cuyos valores al final del proceso son prácticamente constantes, causados por la estabilización de la materia orgánica.

La importancia de esta relación está en que, para que el proceso de compostaje se desarrolle de forma adecuada, se considera que el material de partida debe de tener una relación COT/NT entre 25-35 (Jhorar y col. 1991). También es sabido que una relación  $C_{ot}/N_T$  demasiado elevada limita la cantidad de nitrógeno disponible para el crecimiento celular a expensas de la materia orgánica, lo que conduce a la inactivación o ralentización del proceso; mientras que lo contrario acelera inicialmente el crecimiento microbiano y la descomposición de la materia orgánica. Esto último, sin embargo, agotaría rápidamente las reservas de oxígeno, dando lugar a condiciones de anoxia. El exceso de nitrógeno además conduce a pérdidas de nitrógeno en lixiviados (nitrato) o en gases (amoníaco).

Los valores de relación carbono orgánico total/nitrógeno total (COTvsNT) obtenidos en el proceso de compostaje se incluyen en la Tabla 4.11 y en las Figuras 4.25 y 4.26 muestran como el tiempo de compostaje y la proporción de materiales iniciales han afectado a la relación COT/NT.

El tiempo de compostaje ha influido en la evolución de este parámetro pero solo en la caso de las pilas C1 y C4. Aunque la proporción del ingrediente tronco de palmera en la composición de la pila influye inicialmente en el valor de la relación, aumentando al incrementarse dicho ingrediente, la no evolución de éste parámetro en las pilas C2 y C3 hace que los compost acabados C1 y C4 presenten menor relación COT/NT.

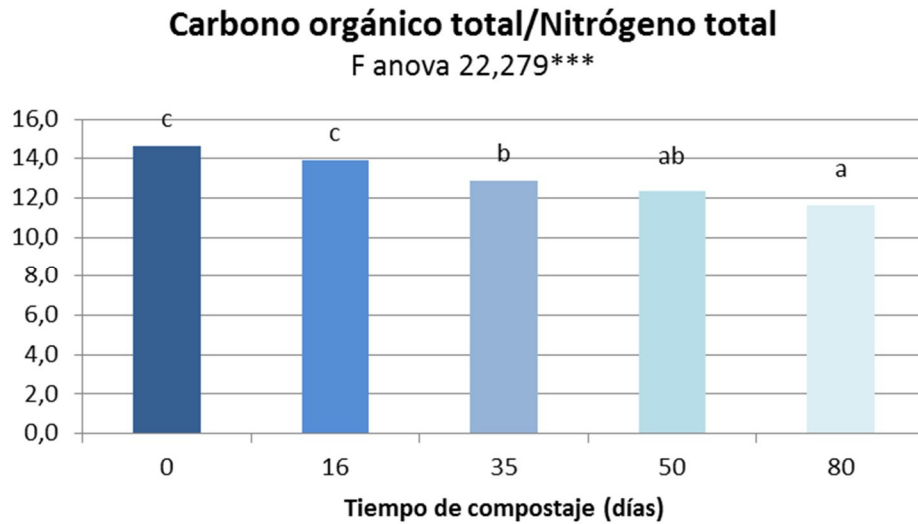
Iglesias Jiménez y Pérez García (1992), para compost de RSU y Bernal y col., (1988) para compost de diversos orígenes, establecen como criterio más seguro de madurez del compost una relación COT/NT inferior a 12. En la legislación española se sugiere valores de dicha relación inferiores a 20 en los compost (BOE, 2013). Según estas consideraciones solo el compost C4, tendrían un grado de madurez adecuado ya

que el resto o parte de valores muy próximos al establecido (12) caso del compost C1 o no se cumple el criterio en el compost final.

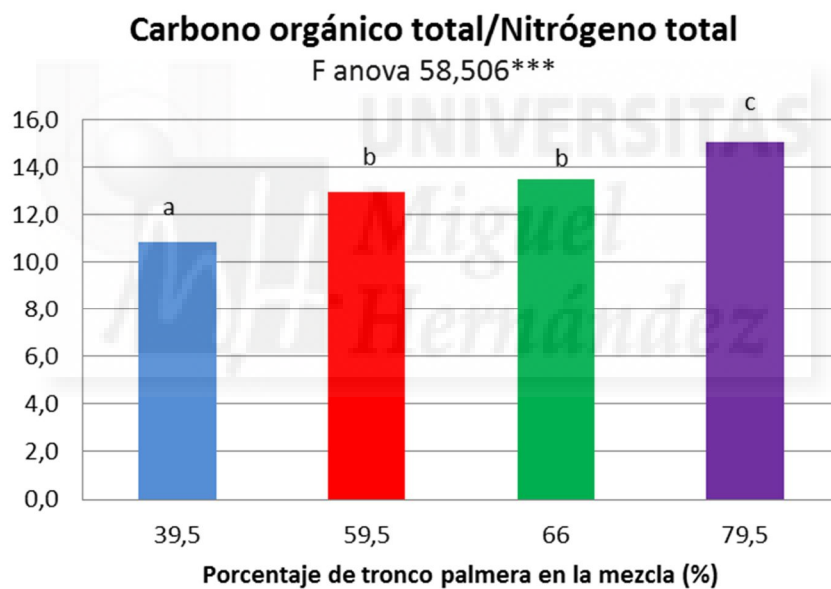
**Tabla 4.11.** Evolución de la relación COT/NT de las pilas durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	COT/NT
<b>C 1</b> (59,5% L: 39,5% TP : 1% A)	0	12,9c
	16	11,2b
	35	10,3ab
	50	10,1ab
	80	9,8a
<b>F anova</b>		<b>19,5 ***</b>
<b>C 2</b> (39,5% L: 59,5% TP : 1% A)	0	13,4a
	16	12,7a
	35	13,5a
	50	12,6a
	80	12,4a
<b>F anova</b>		<b>1,74ns</b>
<b>C 3</b> (33% L: 66% TP : 1% A)	0	14,0a
	16	14,7a
	35	12,6a
	50	12,9a
	80	13,0a
<b>F anova</b>		<b>2,71 ns</b>
<b>C 4</b> (19,5% L: 79,5% TP : 1% A)	0	18,2d
	16	17,0cd
	35	15,0bc
	50	13,7ab
	80	11,5a
<b>F anova</b>		<b>13,8***</b>

L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra



**Figura 4.25.** Influencia del tiempo de compostaje en la relación COT/NT.



**Figura 4.26.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco de palmera en la relación COT/NT.

### **Contenido de fósforo, potasio y sodio**

El P desempeña un papel fundamental en la formación de compuestos celulares ricos en energía, siendo necesario para el metabolismo microbiano. Al igual que el contenido de nitrógeno, el contenido del resto de nutrientes (P y K) y de Na aumenta

durante el proceso de compostaje probablemente debido a un efecto concentración, como consecuencia de la pérdida de peso de la pila por degradación de MO.

Los contenidos de fósforo, potasio y sodio (P, K y Na) obtenidos en el proceso de compostaje se muestran en la Tabla 4.12 y en las Figuras de la 4.27 a la 4.32., se observa como el tiempo de compostaje y la proporción de materiales iniciales han influido en el contenido de P, K y Na de las pilas ensayadas. En el ensayo realizado el tiempo de compostaje influyó de forma significativa aumentando los contenidos de P y K, así como de Na.

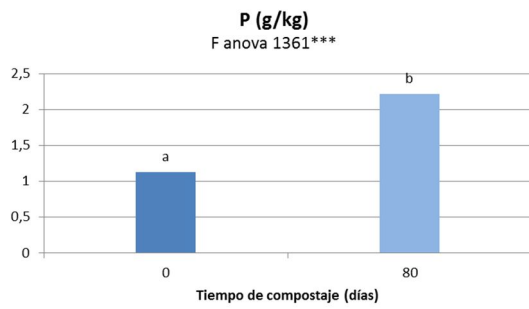
En general, se observa que a mayor presencia del estructurante tronco palmera los contenidos de K y Na aumentan y los de P disminuyen.

La presencia de sodio en los materiales orgánicos no es deseable debido a su no esencialidad para las plantas así como por el impacto negativo de este catión en las propiedades físicas del suelo potencialmente enmendado.

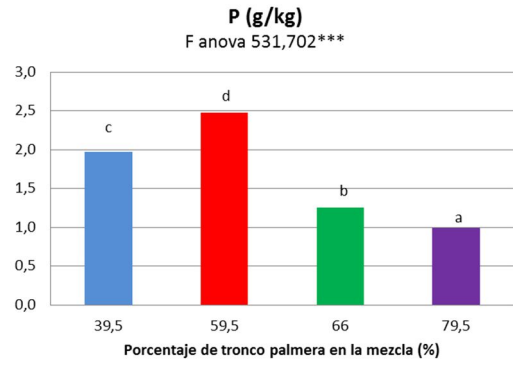
**Tabla 4.12.** Evolución en el contenido de P, K y Na durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	P g/kg	K g/kg	Na g/kg
<b>C 1</b> <i>(59,5% L: 39,5% TP : 1% A)</i>	0	1,4a	21,7a	9,1a
	80	2,5b	26,6b	12,8b
<b>C 2</b> <i>(39,5% L: 59,5% TP : 1% A)</i>	0	1,3a	20,6a	9,7a
	80	3,6b	24,1b	11,4b
<b>C 3</b> <i>(33% L: 66% TP : 1% A)</i>	0	0,9a	20,9a	10,8a
	80	1,6b	29,0b	14,6b
<b>C 4</b> <i>(19,5% L: 79,5% TP : 1% A)</i>	0	0,9a	16,6a	8,6a
	80	1,1b	29,8b	16,6b

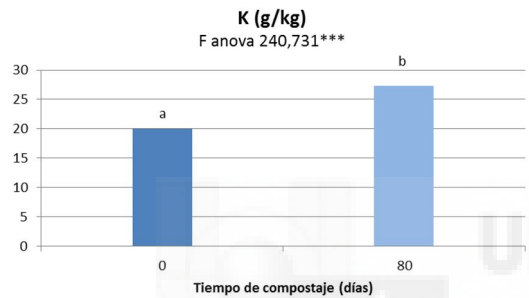
L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra



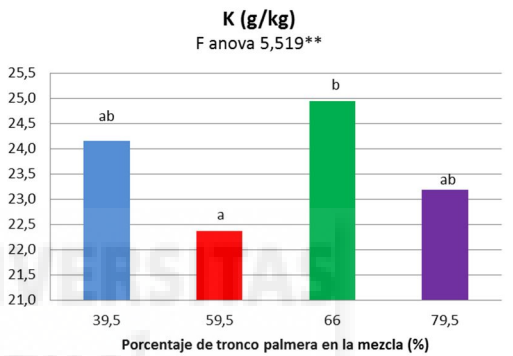
**Figura 4.27.** Influencia del tiempo de compostaje en el contenido de P.



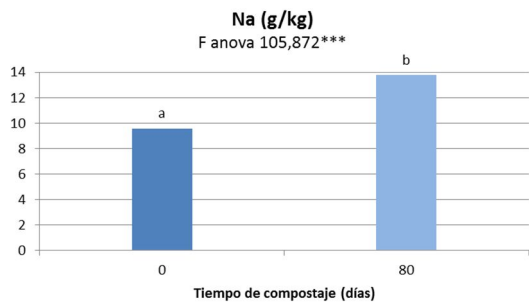
**Figura 4.28.** Influencia de la proporción del ingrediente palmera en el contenido de P.



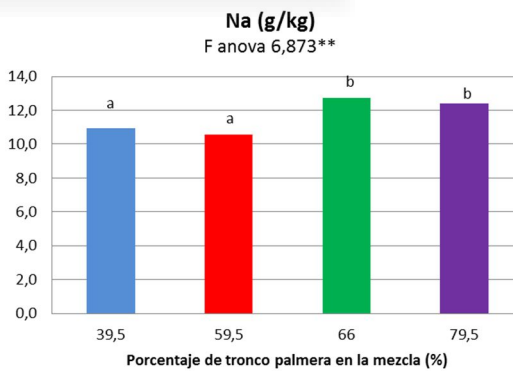
**Figura 4.29.** Influencia del tiempo de compostaje en el contenido de K.



**Figura 4.30.** Influencia de la proporción del ingrediente palmera en el contenido de K.



**Figura 4.31.** Influencia del tiempo de compostaje en el contenido de Na.



**Figura 4.32.** Influencia de la proporción del ingrediente palmera en el contenido de Na.



#### 4.4. PARÁMETROS INDICATIVOS DE LA CALIDAD DEL COMPOST

##### *Capacidad de cambio catiónico*

La capacidad de cambio catiónico es un parámetro indicativo del proceso de compostaje y del grado de humificación de los materiales orgánicos durante el compostaje, así como de la calidad del material final obtenido. Diversos autores (Harada e Inoko (1980) e Iglesias Jiménez y Pérez García (1992) han estudiado la evolución de este parámetro, observando que la capacidad de cambio catiónico en compost aumentaba conforme progresaba el proceso hasta alcanzar un valor estable, concluyendo que si éste se sitúa en el rango de CCC > 60-67 meq/100g sobre materia orgánica en compost elaborado con residuos sólidos urbanos, indicaba que el compost estaba maduro. El grado de humificación de la materia orgánica en el suelo, al igual que ocurre en el compostaje de residuos orgánicos, está estrechamente relacionado con la capacidad de intercambio catiónico, aumentando progresivamente a medida que la humificación de la materia orgánica progresa. Este incremento de la CCC ha sido aceptado universalmente como criterio de madurez e indirectamente como criterio de “humificación” de materiales orgánicos (Roig y col, 1988).

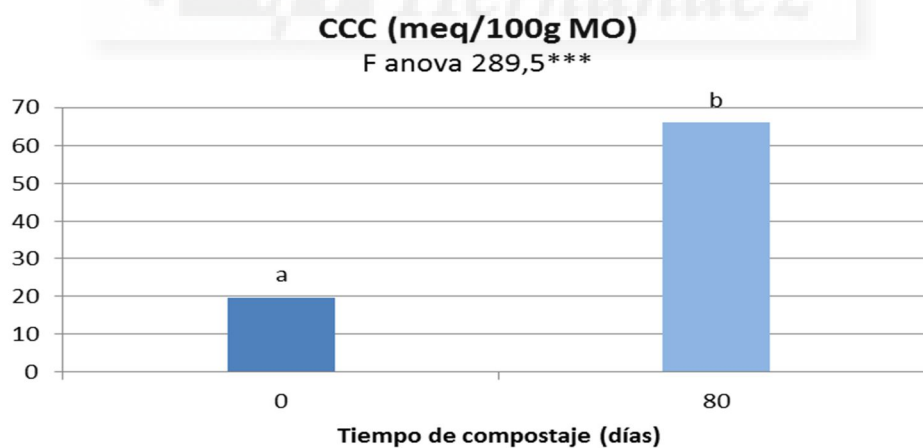
En la Tabla 4.13 se muestran los valores de la capacidad de cambio catiónico (CCC) obtenidos en el proceso de compostaje de las 4 pilas ensayadas. En las figuras 4.33 y 4.34 se muestra la evolución con el tiempo de compostaje y con el incremento de la proporción del ingrediente tronco de palmera.

En los compost estudiados aumenta el valor de CCC durante el proceso como consecuencia de la humificación de la materia orgánica. El estructurante tronco de palmera tiene menor CCC que el lodo EDARI, por lo que el aumento en las pilas de la cantidad de estructurante tronco de palmera induce al inicio una menor capacidad de cambio catiónico, pero las transformaciones de la MO sufridas durante el proceso de compostaje (incremento de los grupos -OH y -COOH) conlleva un aumento en la CCC en los compost finales al incrementarse la presencia del tronco de palmera. Los compost C3 y C4 alcanzaron un alto nivel de madurez de acuerdo con los valores mínimos de CCC establecido por diversos autores.

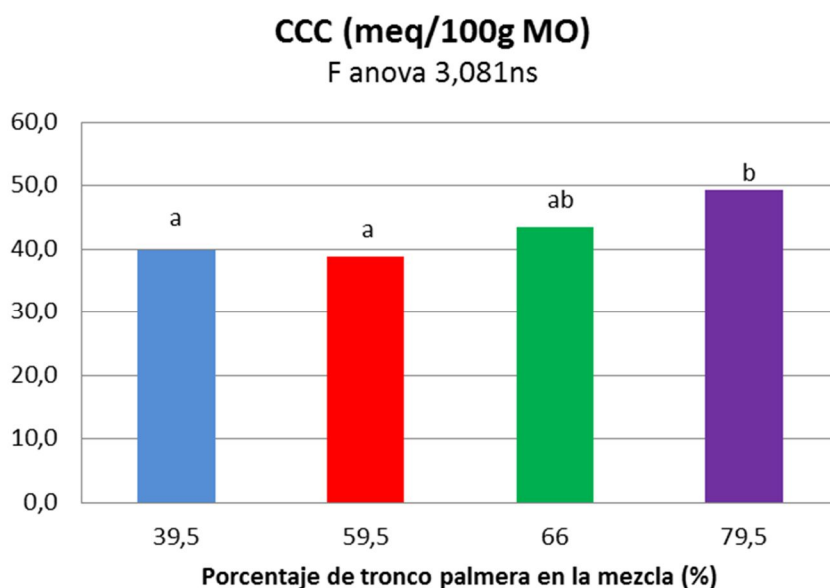
**Tabla 4.13.** Evolución de la capacidad de cambio catiónico (CCC) de las pilas durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	CCC (meq/100g MO)
<b>C 1</b> (59,5% L: 39,5% TP : 1% A)	0	31,9a
	80	47,6b
<b>F anova</b>		<b>24,0**</b>
<b>C 2</b> (39,5% L: 59,5% TP : 1% A)	0	18,2a
	80	59,3b
<b>F anova</b>		<b>57,3**</b>
<b>C 3</b> (33% L: 66% TP : 1% A)	0	15,8a
	80	71,0b
<b>F anova</b>		<b>165***</b>
<b>C 4</b> (19,5% L: 79,5% TP : 1% A)	0	12,8a
	80	85,7b
<b>F anova</b>		<b>88,6**</b>

L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra



**Figura 4.33.** Influencia del tiempo de compostaje en la capacidad de cambio catiónico.



**Figura 4.34.** Influencia de la proporción del ingrediente tronco de palmera en la capacidad de cambio catiónico.

### **Índice de germinación**

El índice de germinación (IG) de semillas es un método biológico que proporciona información precisa y real sobre el grado de madurez alcanzado por un compost. En este estudio, se ha utilizado el IG, propuesto por Zucconi y col. (1981), que consiste en la incubación de semillas de *Lepidium sativum* L., durante 24 horas a 27º C, sobre extracto acuoso del compost. Según éste método el compost está maduro cuando  $IG > 50$ . Se trata de un bioensayo muy sensible a los efectos inhibidores de las fitotoxinas (fenoles, ácidos grasos, amoníaco, etc, resultantes de los procesos de mineralización de la materia orgánica).

En la Tabla 4.14 se muestran los valores del índice de germinación obtenidos en el proceso de compostaje de las 4 pilas ensayadas.

Los compost C3 y C4 con mayor proporción del estructurante tronco palmera mostraron valores aceptables de IG, superiores al 50%, valor mínimo establecido en la bibliografía que indica que un compost está maduro y que no va a producir daños

sobre las plantas una vez que se les aplique como fertilizante, lo cual indica una reducción significativa de la fitotoxicidad en el caso de dicho compost.

**Tabla 4.14.** Evolución del índice de germinación (IG) de las pilas durante el proceso de compostaje.

Compostera	Tiempo de compostaje (días)	IG (%)
<b>C 1</b> <i>(59,5% L: 39,5% TP : 1% A)</i>	0	0a
	80	35,0b
<b>F anova</b>		<b>366***</b>
<b>C 2</b> <i>(39,5% L: 59,5% TP : 1% A)</i>	0	0a
	80	49,1b
<b>F anova</b>		<b>4036***</b>
<b>C 3</b> <i>(33% L: 66% TP : 1% A)</i>	0	0a
	80	57,9b
<b>F anova</b>		<b>885***</b>
<b>C 4</b> <i>(19,5% L: 79,5% TP : 1% A)</i>	0	0a
	80	72,6b
<b>F anova</b>		<b>1684***</b>

L: lodo; TP: tronco palmera; A: cascara de almendra

## 5. CONCLUSIONES

---



## 5. CONCLUSIONES

El compostaje de residuos de la industria agroalimentaria y, en concreto, de los lodos procedentes del tratamiento de las aguas residuales de la industria de procesados vegetales (lodo EDARI) es una práctica de gestión viable que requiere de estudios previos para la estandarización optimizada del proceso.

En este experimento, se han ensayado diferentes proporciones de lodo EDARI y tronco de palmera triturado como agente estructurante. Los resultados obtenidos han permitido debatir sobre la optimización de las condiciones de compostaje para su adecuado start-up, la consecución de una adecuada higienización y sobre las características del compost final.

Los dos materiales residuales utilizados en el co-compostaje mostraron propiedades diferenciales y a la vez complementarias para el buen desarrollo del proceso. Así, el fango procedente de la EDARI presentó un alto contenido en materia orgánica, carbono orgánico y nutrientes NPK y como factores limitantes presentó una baja relación C/N, un pH ácido, una alta humedad y un alto contenido en polifenoles. El estructurante tronco de palmera presentó también un alto contenido en materia orgánica y carbono orgánico, pero además, su baja humedad, su pH cercano a la neutralidad y su mayor relación C/N y menor contenido de polifenoles respecto al lodo EDARI, hace que se complemente en el proceso de co-compostaje. Ambos materiales presentaron alta salinidad.

La estrategia de presencia creciente de tronco de palmera ha generado una activación más rápida de las temperaturas de las pilas y con mayor intensidad, con mayores incrementos térmicos al inicio de la fase termófila. Así, la pila con mayor proporción de tronco de palmera (C4), que aporta menor cantidad de polifenoles, menor acidez y mayor porosidad presentó una mayor termófila, con mayor acumulación térmica (índice EXI 1051 °C), pero con menor número de días en fase termófila ( $T^a > 40$ ), siendo también la pila que indujo menores pérdidas de MO (< 30%).

En las pilas C2, C3 y C4, con proporciones crecientes de tronco de palmera, se consiguieron la intensidad térmica (niveles de temperatura y duración de dicha temperatura) necesaria para asegurar la higienización de los compost obtenidos, no siendo así en la pila C1 con menor proporción tronco de palmera.

La mayor presencia de tronco de palmera en las pilas indujo en los compost finales un menor contenido de materia orgánica total aunque todos ellos presentaron valores finales superiores al 50%, así como un mayor contenido de K y Na y un menor contenido de P.

De la evolución de la capacidad de intercambio catiónico y del índice de germinación como parámetros asociados a la calidad del compost final, se deduce que los compost C3 y C4 son los que han alcanzado un grado de madurez y estabilidad mayor, mostrando una materia orgánica humificada y con ausencia de fitotoxicidad.

Aunque todos los compost finales mostraron valores de pH y densidad aparente adecuados para su uso agrícola, los valores elevados de salinidad medidos a través de la conductividad eléctrica (6,8-7,6 mS/cm) nos indican que los materiales de partida son ya muy salinos, hecho que unido a una intensa degradación y por tanto concentración de sales en el proceso de compostaje, origina una limitación para la utilización de estos compost como enmienda orgánica en usos sensibles a la salinidad, y especialmente como sustrato o componente de sustrato de cultivo.

En conclusión, las mezclas de lodo EDARI: tronco palmera 33:66 y 19:80 % (correspondientes a los compost C3 y C4), parecen óptimas para desarrollar un buen proceso de co-compostaje, con una alta termófila, una correcta higienización, alto contenido en materia orgánica humificada y nutrientes y ausencia de fitotoxicidad.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

---





**Barreno y col 2011:** De Residuo a Recurso, 2015

**Bedoga etal 2008** De Residuo a Recurso, 2015

**Bernal, M.P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A. y Cegarra, J. 1998.** Maturity and stability parameters of compost prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technol.* 63, 91-99.

**Bernal, M.P., Gondar, D.M. 2008.** Producción y gestión de residuos orgánicos: situación actual a nivel mundial, comunitario y estatal. En: Moreno casco, J. y Moral, R. (2008). *Compostaje.* Mundi-Prensa. Madrid.

**Biddlestone, A.J. y Gray, K.R. 1991.** Aerobic processing of solid organic wastes for the production of a peat alternative: a review. *Process. Biochem.*, 26, 275-279.

**B.O.E Real Decreto 506/2013, de 28 de junio,** sobre productos fertilizantes.

Disponible en: [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-7540](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-7540) (Acceso Octubre 2014).

**Bustamante, M.A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F.C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M.P., Moral, R. 2008.** Co-composting distillery wastes with animal manure: Carbon and nitrogen transformations and evaluation of compost stability. *Chemosphere* 72, 551-557.

**Bustamante, M.A.; Restrepo, A.P.; Albuquerque, J:A; Pérez-Murcia, M.D.; Paredes, C. Moral, R. Bernal, M.P. 2013.** Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used. *Juornal of Clean Production*, 47: 61-69.

**Cárdenas, R.R. y Wang, L.K. 1980.** Composting process. En: *Handbook of Environmental Engineering.* Vol. II. The Human Press. New York. pp. 269-327.

**Chen, Y. e Inbar, Y. 1993.** Chemical and spectroscopical analyses of organic matter transformations during composting in relation to compost maturity. En: *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects.* Ed.: H.A.J. Hoitink y H.M. Keener. Renaissance Publications. Ohio. pp. 551-600.

**Costa, F., García, C., Hernández, T. y Polo, A. 1991.** Residuos Orgánicos Urbanos. Manejo y Utilización. Ed.: CSIC-CEBAS. Murcia.

**Croteau, G., Alpert, J., 1994.** Problem Prevention Strategies - Low-tech Approaches to Composting Supermarket Organics. *Biocycle* 35, 74-80.

**De Vleeschauwer, D., Verdonck, O. y Van Assche, P. 1981.** Phytotoxicity of refuse compost. *BioCycle*, 22, 44-46.

**EUROSTAT, 2013.** Disponible en:

[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY\\_PUBLIC/8-04032013-BP/EN/8-04032013-BP-EN.PDF](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_PUBLIC/8-04032013-BP/EN/8-04032013-BP-EN.PDF) (Acceso Noviembre 2014).

**Fassbender, H.W. 1972.** Química del suelo. Ed. Turrialba. Costa Rica.

**Felipó 2001** De Residuo a Recurso, 2015

**Gagnon, B., Rioux, C. y Chagnon, J. 1993.** Evolution of chemical composition and microbial activity during storage of compost-based mixes. *Compost Science and Utilization*, 1 (3), 15-21.

**García, C., Hernández, T., Costa, F. y Ayuso, M. 1992.** Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters. *Commun Soil Sci. Plant Anal.*, 23 (13 y 14), 1501-1512

**Golueke, C.G. 1981.** Principles of biological resource recovery. *BioCycle*, 22, 36-40.

**Harada, Y. e Inoko, A. 1980.** The measurement of the cation-exchange capacity of composts for estimation of degree of maturity. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 26, 127-134.

**Harada, Y., Inoko, A., Tadaki, M. e Izawa, T. 1981.** Maturing process of city refuse compost during piling. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 27, 357-364.

**Hargreaves, J.C.; Adl, M.S.; Warman, P.R. 2008.** A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123: 1-14.

**He, X.; Logan, T.; Traina, S. 1995.** Physical and chemical characteristics of selected U.S. municipal solid waste composts. *J. Environ. Qual.*, 24: 543–552.

**Hernández-Apolaza y Guerrero, 2008:** L. Hernández-Apaolaza and F. Guerrero. Comparison between pine bark and coconut husk sorption capacity of metals and nitrate in mixtures with sewage sludge. *Bioresource Technology* 99: 1544-1548. 2008

**Hernández, M.T., Cegarra, J. y Costa, F. 1983.** Adición de residuos vegetales a suelos calizos. IV. Influencia sobre la dinámica del manganeso en el suelo y respuesta de cultivos.

**Hue, N.V. y Liu, J. 1995.** Predicting compost stability. *Compost Science and Utilization*, 3 (2), 8-15.

**Iglesias Jiménez, E. y Pérez García, V. 1989.** Evaluation of city refuses compost maturity: a review. *Biol. Wastes*, 27, 115-142.

**Iglesias Jiménez, E. y Pérez García, V. 1991.** Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 45-60.

**Iglesias Jiménez, E. y Pérez García, V. 1992 a.** Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some “humification” indexes. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 243-257.

**Iglesias Jiménez, E. y Pérez García, V. 1992 b.** Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 38, 331-343.

**Jann, G.J., Howard, D.H. y Salle, A.J. 1959.** Method for the determination of completion of composting. *Appl. Microbiol.*, 7, 271-275.

**Jenkinson, D.S. y Ladd, J.N. 1981.** Microbial biomass measurement in soil: measurement and turnover. En: *Soil Biochemistry* (vol. 5). (Eds.) Paul, E.A., Ladd, J.N. Marcel Dekker, New York.

**Jhorar, B. S., Phogat, V y Malik, E. (1991).** Kinetics of composting rice straw with glue

waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Rest. Rehabil.*, 5:297-306.

**Juste, C. 1980.** Avantages et inconvenients de l'utilisation des composts d'ordures ménagères comme amendement organique des sols on support. *Jornadas Internacionales sobre el Compost.* Madrid.

**Kitson, R.E. y Mellon, M.G. 1944.** Colorimetric determination of P as a molybdovanadato phosphoric acid. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, 16, 379-383.

**Labrador-Moreno, J. 1996.** La materia orgánica en los agrosistemas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación-Mundi- Prensa. Madrid.

**Lasaridi, K.; Protopapa, I.; Kotsou, M.; Pilidis, G.; Manios, G.; Kyriacoua, A. 2006.** Quality assessment of composts in the Greek market: The need for standards and quality assurance. *Journal of Environmental Management*, 80: 58-65.

**Lidón Noguera, Vicente.2012.** Apuntes de Jardinería, Cultivos Ornamentales e Ingeniería de Áreas Verdes. Universidad Miguel Hernández.

**MAGRAMA (2014).** Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Anuario Lodos su procedencia y Destino. (2012).  
<http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2012/default.aspx> (Acceso Noviembre/2014)

**MAGRAMA (2014).** Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Requisitos para la certificación de fabricantes de productos fertilizantes conforme al Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.  
<http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/productos-fertilizantes/certificacion-de-fabricantes/> (Acceso Noviembre 2014)

**MAGRAMA (2014).** Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España.

<http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/lodos.aspx>  
(Acceso Octubre 2014)

**MAGRAMA (2014).** Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Lodos de depuración de aguas residuales (Acceso 17/12/2014).

<http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujo/lodos-depuradora/#para8> (Acceso Octubre 2014)

**MAGRAMA (2014).** Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Informe industrial Alimentario 2013-2014

[http://www.magrama.gob.es/es/alimentacion/temas/industria-agroalimentaria/\\_informeindustriaalimentaria2013-2014\\_tcm7-156934.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/alimentacion/temas/industria-agroalimentaria/_informeindustriaalimentaria2013-2014_tcm7-156934.pdf)

**M.A.P.A, 1994.** Métodos oficiales de análisis. Volumen III. Ed. Secretaría Técnica General, Madrid

**Montemurro y col., 2009** De Residuo a Recurso, 2015

**Morel, J., Jacquin, F., Guckert, A. y Barthel, C. 1979.** Contribution a la détermination de test de la maturité des composts urbains. C.R. Contrat, 75-124. Ministère de l'Environnement et Du Cadre Vie E.N.S.A.I.A. Nancy, 32 pp.

**Moreno, C. y Moral, Herrero, R. 2008.** Compostaje. -Mundi- Prensa. Madrid.

**Navarro, A.F., Cegarra, J., Roig, A. y Bernal, M.P. 1991.** An automatic microanalysis method for the determination of organic carbon in wastes. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 22, 2137-2144.

**Navarro, A.F.; Cegarra, J.; Roig, A.; García, D. 1993.** Relationships between organic-matter and carbon contents of organic wastes. Biosource Technology, 44: 203-207.

**Navarro Pedreño, J., Moral, R., Gómez, I. y Mataix, J. 1995.** Residuos orgánicos y agricultura. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Alicante. Alicante.

**ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero,** por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.

Disponible en: [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-3285](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-3285)(Acceso Octubre 2014)

**Paredes, C., Bernal, M.P., Cegarra, J. y Roig, A. 2002.** Bio- degradation of olive mill wastewatersludge by its co-composting whit agricultural wastes. *Bioresource Technology* 85,1-8.

**Pérez Espinosa, A., Moral, R. y Pérez Murcia, M. 2013.** Apuntes de Gestión de residuos. Universidad Miguel Hernández.

**Poincelot, R.P. 1974.** A scientific examination of the principles and practice of composting. *Compost Sci.*, 15, 24-31.

**Porta, J.; López-acebedo, M.; Raquero, C. 1994.** Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

**Reuss, J.O. y Johnson, D.W, 1986.** Acid Deposition and the Acidification of Soils and Waters. Spring-Verlag. New York.

**Roig, A.; Lax, A.; Cegarra, J.; Costa, F.; Hernández, M.T. (1988).** Cation-exchange capacity as a parameter for measuring the humification degree of manures. *Soil science*, 146: 311-316.

**Roletto, E., Barberis, R., Consiglio, M. y Jodice, R. 1985.** Chemical parameters for evaluating compost maturity. *BioCycle*, 26 (2), 46-47.

**Saña, J. y Soliva, M. 1987.** El Compostatge. Procés, Sistemes i Aplicacions. Ed.: Diputació de Barcelona. Servei del Medi Ambient. Barcelona.

**Stentiford, E.I., Mara, D.D. y Taylor, P.L. 1985.** Forced aeration co-composting of domestic refuse and sewage sludge in static piles. En: *Composting of Agricultural and Other Wastes*. Ed.: J.K.R. Gasser. Elsevier. Barking. pp. 42-54.

**Stentiford, E.I. 1987.** Recent developments in composting. En: *Compost: Production, Quality and Use*. Ed.: M. de Bertoldi, M.P. Ferranti, P. L'Hermite y F. Zucchini. Elsevier. Barking. pp. 52-60.

**Stevenson, F.J. 1982.** Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions. John Wiley and Sons. New York.

**Stickelberger, D. 1975.** Survey of city refuse composting. En: Organic Matters as Fertilizers. Swedish International Development Authority. FAO. Soils Bulletin. 27. Rome. pp. 185-209.

**Sugahara, K., Harada, Y. e Inoko, A. 1979.** Color change of city refuse during composting process. Soil Sci. Plant Nutr., 25, 197-208.

**Spohn, E. 1978.** Determination of compost maturity. Compost Sci., 19, 26-27.

**Tate, R.L. 1987.** Soil Organic Matter. Biological and Ecological Effects. John Wiley and Sons. New York.

**Vaughan, D. y Ord, B.G. 1985.** Soil organic matter. A perspective on its nature, extraction, turnover and role in soil fertility. En: Soil Organic Matter and Biological Activity. Ed.: D. Vaughan y R.E. Malcolm. Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publishers. Dordrecht. pp. 1-35

**Viel, M., Sayag, D., Peyre, A. y André, L. 1987.** Optimization of in-vessel co-composting through heat recovery. Biol. Wastes, 20, 167-185.

**Zhang, M.; Heaney, D.; Henriquez, B.; Solberg, E.; Bittner, E. 2006.** A fouryear study on influence of biosolids/MSW cocompost application in less productive soils in Alberta: nutrient dynamics. Compost Sci. Util., 14: 68–80.

**Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. y de Bertoldi, M. 1981.** Evaluating toxicity of immature compost. BioCy

**Zucconi, F., Monaco, A. y Forte, M. 1985.** Phytotoxins during the stabilization of organic matter. En: Composting of Agricultural and Other Wastes. Ed.: J.K.R. Gasser. Elsevier. Barking. pp. 73-85.

**Zucconi, F. y de Bertoldi, M. 1987.** Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. En: Compost: Production,

Quality and Use. Ed.: M., de Bertoldi, M.P., Ferranti, P., L'Hermite y F., Zucconi. Elsevier. Barking. pp. 30-50.

**Saviozzi A, Riffaldi R, Levi-Minzi R (1987).** Compost maturity by water extract analyses. In: de Bertoldi M, Ferranti MP, L'Hermite P, Zucconi F (eds.) Compost: Production, Quality and Use. Elsevier, Barking, pp. 359-367.





---

## 7. ANEXOS

---



## ANEXOS

### ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Riesgos que debemos cuestionar relacionados con los residuos orgánicos (Navarro y col., 1995). .....	9
<b>Tabla 1.2.</b> Conductividad eléctrica de diferentes residuos (Navarro y col., 1995).....	12
<b>Tabla 1.3.</b> Cantidad de residuos urbanos recogidos en España en 2012 (MAGRAMA 2015a).....	16
<b>Tabla 1.4.</b> Características de residuo de poda y jardinería (Montemurro y col., 2009; Barrena y col.,2011b; Hernández-Apolaza y Guerrero, 2008) .....	17
<b>Tabla 1.5.</b> Principales características analíticas de Residuos Vegetales individuales recogidos en plantas de compostaje de restos verdes.....	18
<b>Tabla 1.6.</b> . Etapas de mayor impacto en la generación de aguas residuales y principales características de los vertidos en la industria de transformados vegetales....	21
<b>Tabla 1.7.</b> Caudal y carga contaminante en subsectores. BREF Mayo 2003.....	22
<b>Tabla 1.8.</b> . Residuos sólidos más comunes de la industria de transformados vegetales.....	24
<b>Tabla 1.9.</b> Directiva 86/278/CEE y Real Decreto 1310/1990 de 29 de Octubre, donde se regula la normativa actualmente vigente sobre metales pesados en el entorno suelo-lodo.....	28
<b>Tabla 1.10.</b> Condiciones deseables durante el proceso de compostaje (Fermor,1993; Rynk et al., 1992).....	34
<b>Tabla 1.11.</b> Ventajas y desventajas de los sistemas de compostaje (FAO).....	36

<b>Tabla 1.12.</b> Legislación y directrices referentes al uso de compost en agricultura.....	47
<b>Tabla 1.13.</b> Requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost según el real Decreto 506/2013.....	50
<b>Tabla 1.14.</b> Propuesta de los requerimientos de calidad del compost. Posibles parámetros y valores límite de los requisitos de calidad mínima del producto. Informe “Fin de la condición de residuos” (Comisión Europea, 2014).....	51
<b>Tabla 1.15.</b> Características de los compost como sustratos de cultivo o componente de los sustratos de cultivo, según el RD 865/2010.....	53
<b>Tabla 1.16</b> Niveles máximos de microorganismos en sustratos de cultivo de origen orgánico, anexo VI RD 865/2010.....	54
<b>Tabla 1.17</b> Niveles máximos de metales pesados en sustratos de cultivo, anexo VI RD 865/2010.....	54
<b>Tabla 3.1</b> Características de los materiales utilizados como ingredientes en las composteras.....	67
<b>Tabla 3.2</b> Proporciones de materiales en las pilas de compostaje EDARI, en peso seco.....	71
<b>Tabla 4.1</b> Índice exotérmico (EXI), T máxima y mínima promedio del proceso y nº de días con fase termófila (T>40°C).....	80
<b>Tabla 4.2.</b> Evolución de la altura y volumen de la pila durante el proceso de compostaje .....	82
<b>Tabla 4.3.</b> . Evolución de la densidad aparente durante el proceso de compostaje.....	84
<b>Tabla 4.4</b> Evolución del pH durante el proceso de compostaje.....	87
<b>Tabla 4.5.</b> Evolución de la conductividad eléctrica durante el proceso de compostaje .....	90
<b>Tabla 4.6.</b> Evolución de la concentración de polifenoles de las pilas durante el proceso de compostaje.....	93

<b>Tabla 4.7.</b> Evolución del contenido de materia orgánica (MO) de las pilas durante el proceso de compostaje .....	96
<b>Tabla 4.8.</b> . Evolución de la pérdida de MO de las pilas durante el proceso de compostaje.....	99
<b>Tabla 4.9</b> Evolución del carbono orgánico total (COT) de las pilas durante el proceso de compostaje.....	101
<b>Tabla 4.10.</b> Evolución del Nitrógeno total (NT) de las pilas durante el proceso de compostaje.....	104
<b>Tabla 4.11.</b> Evolución de la relación COT/NT de las pilas durante el proceso de compostaje.....	107
<b>Tabla 4.12.</b> Evolución en el contenido de P, K y Na durante el proceso de compostaje.....	109
<b>Tabla 4.13.</b> Evolución de la capacidad de cambio catiónico (CCC) de las pilas durante el proceso de compostaje.....	112
<b>Tabla 4.14.</b> Evolución del índice de germinación (IG) de las pilas durante el proceso de compostaje.....	114

#### ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Clasificación de los biorresiduos de competencia Municipal (MAGRAMA, 2015).....	12
<b>Figura 1.2.</b> Procesos y técnicas aplicadas a los procesados vegetales .....	19
<b>Figura 1.3.</b> Distribución de residuos sólidos de la industria de transformados vegetales. ....	22
<b>Figura 4.1.</b> . Evolución de la temperatura de las pilas, durante el proceso de compostaje.....	77
<b>Figura 4.2</b> Evolución del incremento térmico experimentado en la pilas, durante el proceso de compostaje.....	77
<b>Figura 4.3.</b> Influencia del tiempo de compostaje en el pH.....	82

<b>Figura 4.4.</b> Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en el pH.....	82
<b>Figura 4.5.</b> Influencia del tiempo de compostaje en la CE.....	85
<b>Figura 4.6.</b> Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la CE.....	85
<b>Figura 4.7.</b> Influencia del tiempo de compostaje en la concentración de polifenoles.....	88
<b>Figura 4.8.</b> Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la concentración de polifenoles.....	88
<b>Figura 4.9.</b> Influencia del tiempo de compostaje en la concentración de MO.....	91
<b>Figura 4.10.</b> Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la concentración de MO.....	91
<b>Figura 4.11.</b> Influencia del tiempo de compostaje en la pérdida de MO.....	94
<b>Figura 4.12.</b> Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la pérdida de MO.....	94
<b>Figura 4.13.</b> Influencia del tiempo de compostaje en el contenido de carbono orgánico total.....	96
<b>Figura 4.14.</b> Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en el contenido de carbono orgánico total.....	96
<b>Figura 4.15.</b> Influencia del tiempo de compostaje en la concentración de NT.....	99
<b>Figura 4.16.</b> Influencia de la proporción del ingrediente tronco palmera en la concentración de NT.....	99
<b>Figura 4.17.</b> Influencia del tiempo de compostaje en la relación COT/NT.....	102
<b>Figura 4.18.</b> Influencia de la proporción del ingrediente palmera en la relación COT/NT.....	102
<b>Figura 4.19.</b> Influencia del tiempo de compostaje en el contenido de P.....	104

---

**Figura 4.20.** Influencia de la proporción del ingrediente palmera en el contenido de P  
.....104

**Figura 4.21.** Influencia del tiempo de compostaje en el contenido de K.....104

**Figura 4.22.** Influencia de la proporción del ingrediente palmera en el contenido de K  
.....104.

**Figura 4.23.** Influencia del tiempo de compostaje en el contenido de Na.....104

**Figura 4.24.** Influencia de la proporción del ingrediente palmera en el contenido de Na  
.....104

