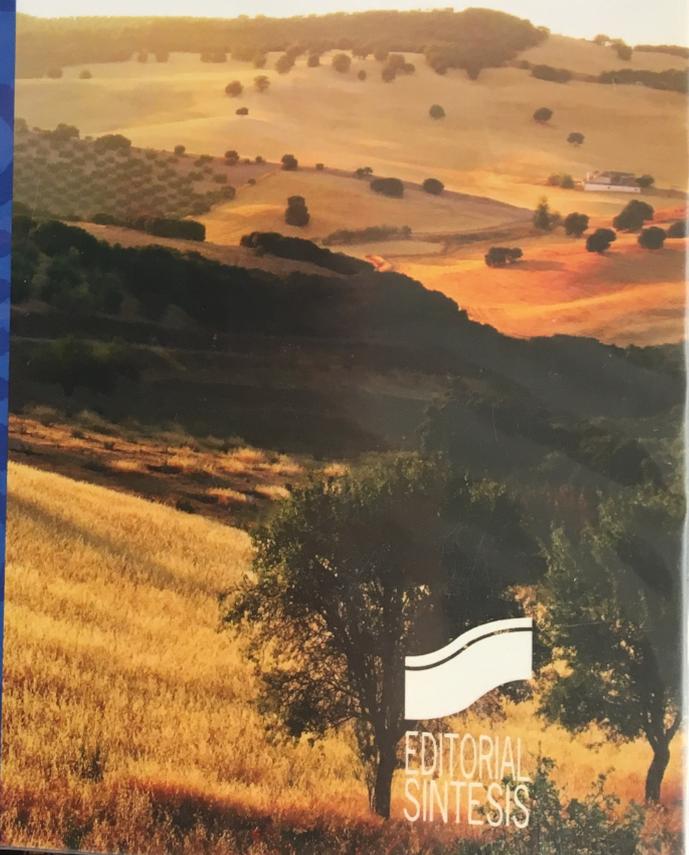


TEXTOS
CIENTÍFICO
TÉCNICOS

EL FUTURO DEL MUNDO RURAL

Javier Sanz Cañada
(editor)



DESARROLLO RURAL

EDITORIAL
SINTESES

Aprovechamiento de residuos: compostaje del alperujo

11

*Juan Cegarra Rosique
José Antonio Alburquerque Méndez
Germán Tortosa Muñoz*

11.1. Introducción: problemática general de los residuos

El presente capítulo tiene por finalidad dar al lector una visión general cualitativa y cuantitativa de los residuos orgánicos generados por las diferentes actividades humanas y sobre los variados métodos de gestión utilizados para reducir o evitar su impacto ambiental, y aprovechar cuando es posible los recursos que tales materiales contienen. El mayor énfasis se hace sobre la transformación de los residuos mediante compostaje y su aprovechamiento agrícola de muy variadas maneras (apartados 11.2 y 11.3).

Sin embargo, el capítulo pronto se adentra en la problemática de los residuos y subproductos generados por el sector productivo del aceite de oliva, insistiendo sobre la importancia del mismo en el apartado 11.4, donde además se describe la evolución tecnológica experimentada por la industria extractora durante las últimas décadas y se enumeran los diferentes materiales residuales derivados de la cadena del aceite de oliva, desde los restos de poda procedentes del cultivo del olivo, hasta los residuos y subproductos sólidos y líquidos generados en el proceso extractivo (orujos, alpechín y aguas de lavado), así como los métodos utilizados para su reciclado y aprovechamiento.

Por último, en los apartados 11.5 y 11.6 se aborda la caracterización agroquímica del orujo obtenido por el método de extracción de aceite mediante centrifugación continua en dos fases, también llamado alperujo, y su aptitud para transformarlo mediante compostaje en enmienda y/o abono orgánico para suelos. Se resume aquí toda la experiencia acumulada por los autores en las experiencias piloto desarrolladas en el CEBAS del CSIC, entre los años 1996 y 2004, financiadas por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología del Ministerio de Educación y Ciencia (proyectos OLI96-2147 y AGL2002-00662) y por la Comisión Europea (proyecto FAIR5-CT97-3620). Se estudia la composición del alperujo y la mejora de sus características físicas,

- y agua necesarios para el metabolismo microbiano, aporta microorganismos endógenos, retiene los residuos metabólicos generados durante su desarrollo y actúa como aislante térmico del sistema (Finstein y Hogan, 1993).
- Se desarrolla a través de una fase termofílica, en la que se registra una fuerte liberación de energía calorífica que eleva la temperatura, principal indicador de la dinámica del proceso, de forma que una lenta o escasa elevación de la misma debe interpretarse como un desarrollo no favorable de éste o un deficiente control de los factores que lo rigen. Estas temperaturas termofílicas, superiores a 40 °C, que se producen en las primeras etapas del compostaje, disminuyen posteriormente durante la llamada fase de estabilización.
 - Genera temporalmente sustancias fitotóxicas, y es la producción generalmente menor y menos duradera con sustratos heterogéneos y bajo condiciones claramente aeróbicas. Una fitotoxicidad persistente durante el compostaje indica un deficiente desarrollo del proceso, generalmente atribuible a una insuficiente oxigenación.
 - Libera dióxido de carbono y agua a la vez que se generan sustancias minerales, como principales productos de la biodegradación. Idealmente, los productos finales de un sistema de compostaje bien manejado son dióxido de carbono, vapor de agua, calor, materia orgánica estabilizada y amoníaco, aunque la proporción de éstos varía con la disponibilidad de carbono y nitrógeno en el residuo y con las condiciones en que se desarrolla el proceso en cada etapa del mismo (Keener *et al.*, 1993).

11.3. Utilización de los residuos orgánicos en agricultura

La adición de materia orgánica al suelo al modo tradicional, en forma de estiércoles u otros residuos orgánicos generados en las propias explotaciones agrícolas y ganaderas, a fin de mejorar la fertilidad del mismo y restituir los elementos nutritivos extraídos por los cultivos, ha ido perdiendo importancia al buscarse mayores rendimientos de producción, relegando así crecientemente al suelo a un mero soporte del cultivo. De este modo, se han ido sustituyendo progresivamente los aportes orgánicos por fertilizantes minerales, produciendo la ruptura del frágil equilibrio de los suelos agrícolas y desembocando en una pérdida paulatina de su calidad biológica. Esto se produce mayoritariamente en la agricultura intensiva, cuya práctica generalmente conlleva reducción de los niveles de materia orgánica en el suelo y degradación de la estructura del mismo con aumento también de su compactación y exaltación de los fenómenos erosivos.

Por otra parte, es bien sabido que la materia orgánica adicionada al suelo no puede competir con los fertilizantes minerales ni en la cantidad ni en el grado de asimilabilidad de los nutrientes aportados, ya que los de origen mineral son mucho más solubles y fácilmente disponibles para la planta y, por tanto, satisfacen las necesidades nutricionales puntuales más efectivamente que el aporte orgánico de nutrientes, aunque están también sometidos en mayor grado a fenómenos de pérdida e inmovilización en el suelo.

Por el contrario, una liberación gr...
viación y volatil...
ro, cuya dinám...
debido a que la...
La aplicaci...
nizada mediant...
mo una mejora...
táneamente en...
similares a las...
Según las car...
que actuaría p...
lo, o como ab...
fertilizantes r...
trato en horti...
arbóreas. En...
mostrar baja...
capacidad d...
te a la desco...
de malas hi...
El com...
des de las p...
afectar a la...
apreciado, ...
lógico sob...
del compo...
za el com...
espectro...
do, la adi...
muro de...
utilizarse...
lo, dado...
favorece...
la acció...
nicos de...
malas h...
El...
lo, en s...
son pr...
de bio...
vegeta...
dencia...
2001;

Por el contrario, el aporte de nutrientes por la materia orgánica se produce a través de una liberación gradual, y son así éstos menos sensibles a los fenómenos adversos de lixiviación y volatilización (caso del nitrógeno) o a la fijación, como en el caso del fósforo, cuya dinámica en el suelo viene marcada por su escasa solubilidad y disponibilidad, debido a que la mayoría de los constituyentes del suelo fijan iones fosfóricos.

La aplicación al suelo de la materia orgánica de los residuos, estabilizada e higienizada mediante compostaje, es el uso más adecuado para éstos, ya que confiere al mismo una mejora en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, enriqueciéndolo simultáneamente en elementos nutritivos más disponibles y en compuestos de características similares a las que constituyen las sustancias húmicas naturales (Dick y McCoy, 1993). Según las características del compost, puede emplearse como enmendante orgánico, que actuaría principalmente sobre las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo, o como abono, mejorando además la nutrición mineral de las plantas y ahorrando fertilizantes minerales. Para cultivos sin suelo, puede igualmente utilizarse como sustrato en horticultura y como medio de crecimiento en viveros de plantas hortícolas y arbóreas. En estos usos, el compost debe contener abundante materia orgánica estable, mostrar baja salinidad, mantener un volumen constante, una porosidad adecuada, alta capacidad de cambio catiónico y capacidad tampón, a la vez que debe ser estable frente a la descomposición, no ser fitotóxico ni contener patógenos, parásitos, ni semillas de malas hierbas (Inbar *et al.*, 1993).

El compost puede utilizarse también para el control de determinadas enfermedades de las plantas provocadas por patógenos del suelo, de forma que su adición puede afectar a la incidencia de éstas por distintas vías. A este respecto quizá, el efecto mejor apreciado, pero a la vez menos entendido, sea la influencia del antagonismo microbiológico sobre la incidencia de la enfermedad, al ser el tipo y fuente de la materia prima del compost, el propio proceso de compostaje y el medio ambiente en el cual se utiliza el compost durante el desarrollo de la planta, factores que determinan el amplio espectro de antagonismos frente a los patógenos (Hoitink *et al.*, 1987). En este sentido, la adición de compost puede resultar una alternativa viable a la aplicación de bromuro de metilo para la desinfección del suelo (Trillas *et al.*, 2002). Puede igualmente utilizarse en el control de malas hierbas (Roe *et al.*, 1993) y para el acolchado del suelo, dado el efecto físico de esta última técnica y su incidencia sobre los factores que favorecen el crecimiento de las malas hierbas (luz, temperatura y humedad). Debido a la acción química generada por alguno de los constituyentes del compost (ácidos orgánicos de bajo peso molecular, polifenoles, etc.), éste puede inhibir el crecimiento de las malas hierbas, tal y como señalaron Ozores-Hampton y Obreza (2000).

El compost puede igualmente utilizarse en la lucha contra la degradación del suelo, en su recuperación y prevención (Albadalejo y Díaz, 1990; Pascual *et al.*, 1999) y son prometedores los ensayos dirigidos a evaluar la utilización de compost en técnicas de biorremediación para la descontaminación de suelos, ayudando al desarrollo de la vegetación y a la inactivación o eliminación del contaminante, tal y como se ha evidenciado en la recuperación de suelos contaminados por metales pesados (García Gómez, 2001; Clemente *et al.*, 2006) o por plaguicidas (Cole *et al.*, 1995). Asimismo, el compost

puede ser aprovechado a modo de biofiltro en el control de malos olores y la depuración del aire (Van der Hoek y Oosthoek, 1985) y para la extracción de sustancias solubles con características húmicas con potencial para activar el crecimiento vegetal, siendo cada vez más frecuente encontrar preparados líquidos de estos compuestos en el amplio mercado de los agroquímicos comerciales.

11.4. Importancia del sector extractor de aceite de oliva: tecnologías utilizadas y generación de subproductos

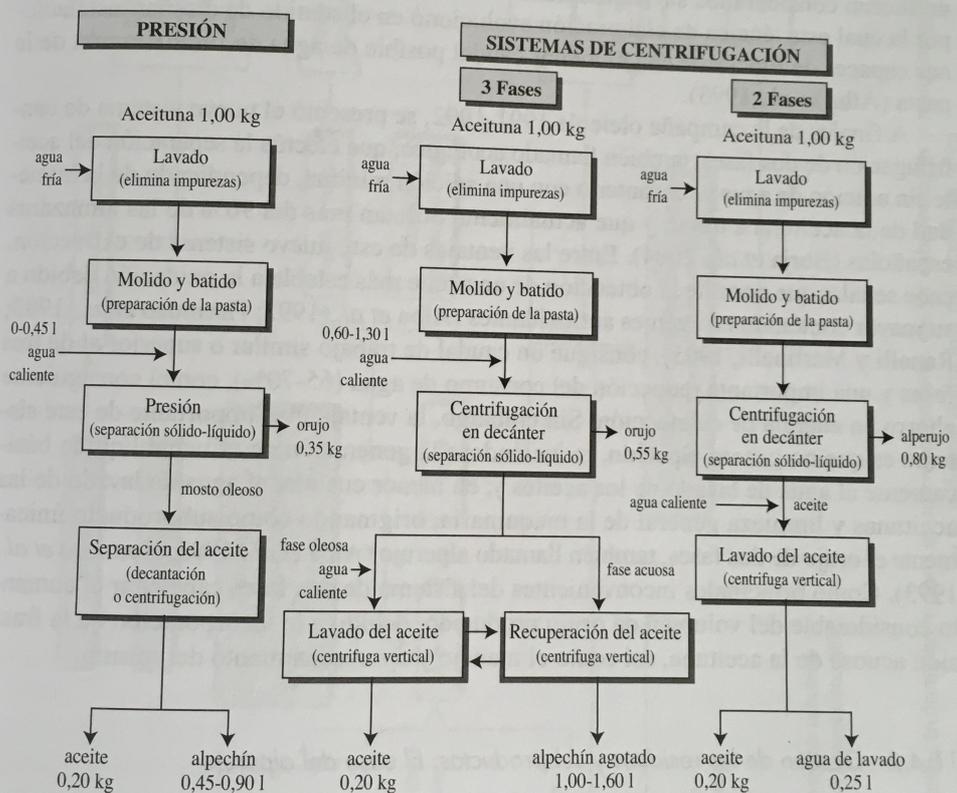
El origen del cultivo del olivo (*Olea europaea* L.) es incierto, probablemente se originó hace más de 6.000 años en Oriente Medio y su difusión se realizó de Oriente a Occidente a través de las dos orillas del Mediterráneo (Barranco, 1998). Tradicionalmente se ha considerado que la introducción del cultivo en España se debe a los fenicios, aunque parece más probable que el antecedente silvestre del olivo (acebuche) fuera utilizado desde mucho antes, ya que existen datos arqueológicos que atestiguan su cultivo hace unos 5.000 años. Durante la dominación romana, el olivar ocupó una importante extensión en la Bética, expandiéndose hacia el centro y el litoral mediterráneo de la Península Ibérica, mientras que los árabes introdujeron sus variedades en el sur de España e influyeron en una mayor difusión del mismo.

El cultivo del olivo y la actividad de la industria oleícola tienen una gran importancia económica y social en los países de la Cuenca Mediterránea, siendo España el principal país productor a nivel mundial. El olivar ocupa en España aproximadamente el 18% de la superficie cultivada con 2.423.841 has., correspondiendo a Andalucía el 60% de tal superficie y una producción del 80% del total nacional de aceite de oliva, mientras que el resto se produce principalmente en Castilla-La Mancha, Extremadura, Cataluña y Valencia. En el período comprendido entre los años 1997 y 2005 la producción media anual de aceite en España se estimó en 1.026.822 toneladas y ha sido de 984.393 toneladas en la campaña 2004/2005. En España existen 1.782 almazaras, 843 de las cuales se encuentran en Andalucía (AAO, 2006).

11.4.1. Evolución tecnológica del proceso de extracción

Cuando la aceituna se deposita en la almazara, se clasifica en función de la calidad y se limpia para eliminar las hojas y otras impurezas que pueda contener el fruto. El acondicionamiento o preparación de la pasta se realiza mediante las operaciones de molienda y batido. La molienda consiste en la trituración del fruto con el fin de liberar el aceite alojado fundamentalmente en la pulpa, mientras que la finalidad del batido es romper la emulsión aceite-agua y reunir las gotas de aceite liberadas mediante la molienda. A partir de la masa batida, se separa la fase líquida de la fase sólida mediante dos métodos fundamentalmente: presión y centrifugación (figura 11.1). En la separación por presión (sistema tradicional) la masa se coloca en soportes de filtración denominados capachos que se someten

a presión, reteniendo los sólidos (orujo) y liberando el mosto oleoso (fracción líquida), el cual se somete a decantación posterior para separar la fase oleosa o se centrifuga en los sistemas más modernos. La separación mediante centrifugación en sistema continuo consiste en inyectar la masa batida directamente a un decantador centrífugo horizontal ("decán-ter"), donde la fuerza centrífuga aplicada separa las distintas fracciones por diferencia de densidad. Dependiendo de las salidas que posea el decánter, se distinguen el sistema de tres fases o tres salidas (separa orujo, alpechín y aceite) y el de dos fases o dos salidas (separa el aceite y la mezcla de orujo con las fracciones acuosas). Finalmente y una vez que el aceite ha sido separado por los distintos sistemas, éste arrastra todavía partículas en suspensión y algo de agua, que es necesario eliminar mediante un tamizado previo, decantación o centrifugado posterior (separación líquido-líquido).



Fuente: Alburquerque (2003).

FIGURA 11.1. Esquema de los tres sistemas de extracción del aceite de oliva.

Hasta finales de la década de los sesenta la extracción del aceite de oliva en España se realizaba con el método de prensa, sistema discontinuo que resulta poco racional y operativo, ya que consigue rendimientos horarios bajos, precisa más mano de obra y,

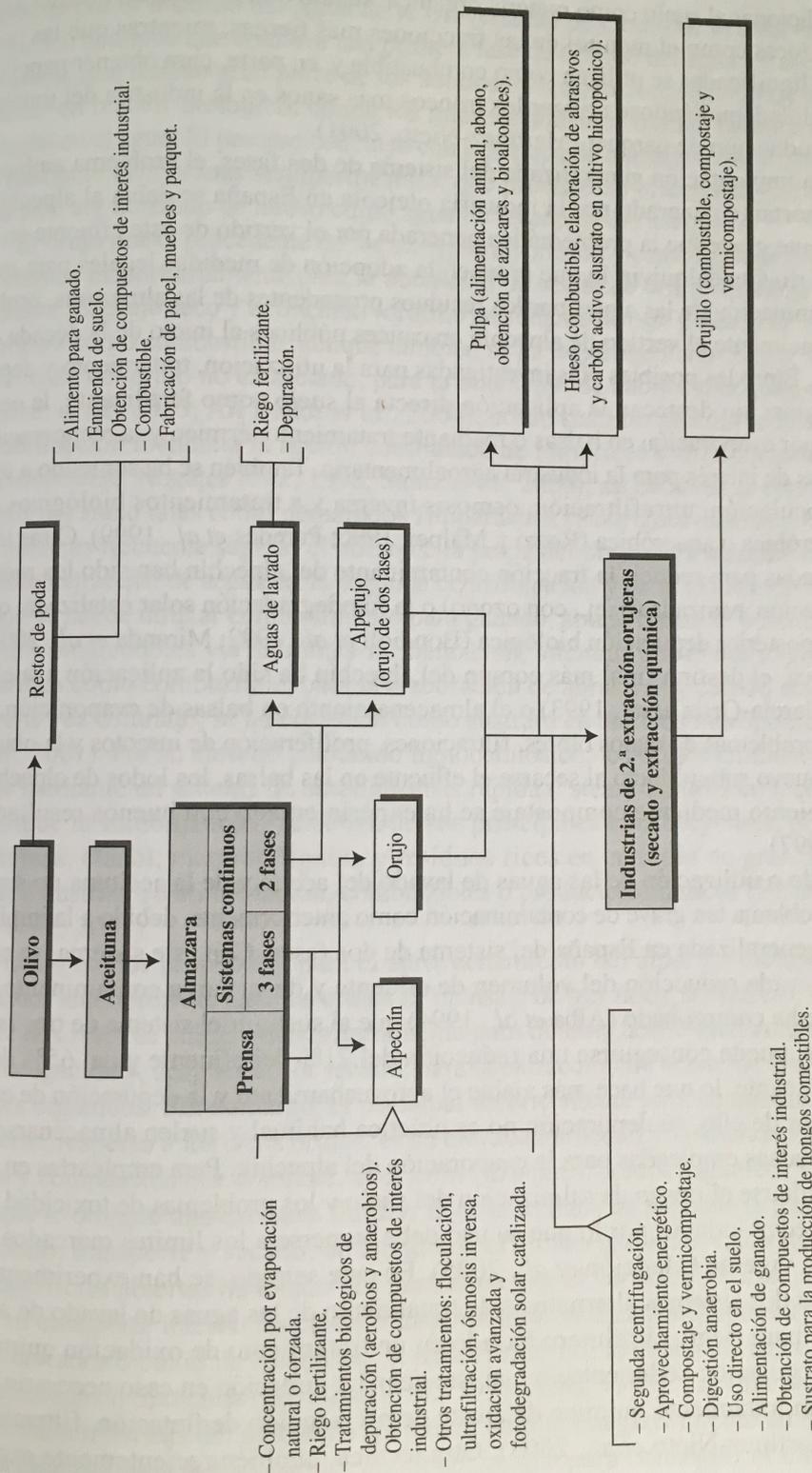
por lo general, la limpieza e higiene son difíciles de conseguir (Tardáguila *et al.*, 1996), a la vez que se pueden producir problemas derivados de fermentaciones que alteran la calidad del aceite obtenido (Uceda, 1999). En la década de los setenta, este sistema se sustituyó por las nuevas técnicas de centrifugación en sistema continuo, mejorando el control de los procesos y la calidad del aceite. La correcta separación de la fase sólida de las líquidas por las centrífugas de tres fases se realiza mediante la adición de agua a la pasta de aceituna con el fin de fluidificarla y lograr así un funcionamiento óptimo de la centrífuga, si bien se incrementa así el consumo de agua y también el vertido final de alpechín, residuo líquido de alto potencial contaminante y principal inconveniente de este sistema de extracción. El sector intentó paliar la problemática generada por el alpechín, buscando medios para su aprovechamiento y depuración, si bien no fueron considerados suficientemente eficaces ni económicamente viables, razón por la cual esta técnica de elaboración evolucionó en el sentido de diseñar instalaciones capaces de funcionar con el menor caudal posible de agua de fluidificación de la pasta (Alba *et al.*, 1993).

A finales de la campaña oleícola 1991-1992, se presentó el nuevo sistema de centrifugación de dos fases, también llamado ecológico, que efectúa la separación del aceite sin adición de agua al decanter o con una adición mínima, dependiendo de la humedad de la aceituna a tratar, y que actualmente utilizan más del 90% de las almazaras españolas (Borja *et al.*, 2004). Entre las ventajas de este nuevo sistema de extracción, cabe señalar que permite la obtención de un aceite más estable a la oxidación debido a su mayor contenido en agentes antioxidantes (Alba *et al.*, 1993; Hermoso *et al.*, 1993; Ranalli y Martinelli, 1995), consigue un caudal de trabajo similar o superior al de tres fases y una importante reducción del consumo de agua (65-70%), con el consiguiente ahorro en energía de calefacción. Sin embargo, la ventaja más importante de este sistema es que no genera alpechín, reduciéndose la generación de efluente líquido básicamente al agua de lavado de los aceites y, en menor cuantía, al agua de lavado de las aceitunas y limpieza general de la maquinaria, originando como subproducto únicamente el orujo de dos fases, también llamado alperujo (Alba *et al.*, 1993; Hermoso *et al.*, 1993). Como principales inconvenientes del sistema de dos fases cabe citar el aumento considerable del volumen de orujo producido, debido a la incorporación de la fracción acuosa de la aceituna, así como el manejo y aprovechamiento del mismo.

11.4.2. Gestión de los residuos y subproductos. El caso del alperujo

En la figura 11.2 se resumen los distintos modos de aprovechamiento de los residuos y subproductos generados por el cultivo del olivo y la industria extractiva del aceite de oliva, si bien parte de ellos sólo se han utilizado en fase experimental sin que su uso se haya afianzado posteriormente en el sector.

El cultivo del olivo genera gran cantidad de restos de poda, cuyas partes menos lignificadas denominadas "ramón de poda" (formadas principalmente por tallos y hojas verdes) se utilizan principalmente como alimento para el ganado. También se suelen



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 11.2. Diferentes tratamientos para el aprovechamiento de los subproductos y residuos generados por el cultivo del olivo y la industria extractiva del aceite de oliva.

miento debe secarse hasta valores próximos al 8%. La presencia fundamentalmente de azúcares que en el sistema de tres fases se quedaban en el alpechín, determina que éstos se caramelicen en los secaderos como consecuencia de las altas temperaturas, y se apelmaza la masa de alperujo y se forman bolas que se secan sólo superficialmente, lo que incide negativamente en el proceso de reducción de la humedad. Además, los componentes orgánicos solidificados en el alperujo seco crean películas envolventes que impiden o dificultan el paso del disolvente, al originar problemas de percolación que redundan en peores agotamientos (Alba, 1994). Por otra parte, durante el proceso de evaporación en los extractores, el vapor abre vías selectivas donde se acumulan bolsas de hexano sin evaporar, con el consiguiente riesgo de explosión al descargar el extractor (Pina, 1997). Toda esta problemática ha obligado a las orujeras a realizar costosas modificaciones en sus instalaciones, para adaptarse a las características del nuevo subproducto generado por la implantación del sistema de extracción de dos fases. Además, la detección de hidrocarburos policíclicos aromáticos en el aceite extraído del alperujo por vía química ha obligado a un estricto refinado del mismo, lo que ha incrementado los costes de producción.

La alternativa de aprovechamiento energético de los subproductos del olivar está bien afianzada en el sector, al beneficiarse de las primas por la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Se ha estimado que tales subproductos en Andalucía (cultivo e industria extractiva) aportan un 38% del potencial total de la biomasa generada, y se puede estimar su potencial energético en 1.264.260 tep/año. El aprovechamiento energético contempla la combustión directa del orujillo y del hueso de aceituna (se pueden quemar directamente en calderas para la obtención de energía térmica), la generación de energía eléctrica en ciclos de vapor (a partir de orujo húmedo, graso o desengrasado, orujo seco u orujillo que se queman para producir vapor con el que se genera electricidad mediante turbinas), la metanización por procedimientos de digestión anaeróbica y la gasificación que utiliza orujo seco, orujillo o hueso. Algunas industrias del sector suelen utilizar la cogeneración en su proceso productivo, bien mediante motor alternativo o turbina de gas, se genera de forma simultánea energía eléctrica y térmica y se aprovecha esta última en el secado del orujo (SODEAN, 2005).

Otras vías alternativas para el aprovechamiento del alperujo se basan en ensayos para evaluar su empleo en alimentación animal (Molina *et al.*, 2001), para aplicación directa al suelo determinando sus efectos sobre las propiedades del mismo (Tejada *et al.*, 1997; Ordóñez *et al.*, 1999; Saviozzi *et al.*, 2001), como enmienda orgánica en el control de la erosión (Giráldez *et al.*, 1999) y como sustrato para la producción de hongos comestibles (Pardo Núñez y López Mondéjar, 2001). Igualmente se ha ensayado como sustrato para la obtención de polímeros de origen microbiano (Ramos-Correnzana *et al.*, 2001) y se ha sometido a procesos biológicos, como el vermicompostaje (Labrador *et al.*, 2001) y el compostaje (Amirante y Montel, 1998; Madejón *et al.*, 1998; Catalano *et al.*, 2000; Labrador *et al.*, 2001; Filippi *et al.*, 2002; Cayuela *et al.*, 2004; Baeta Hall *et al.*, 2005; Alburquerque *et al.*, 2006). En particular, esta última alternativa puede resultar atractiva para zonas geográficas mal comunicadas, con elevados costes de transporte del alperujo hasta las extractoras, y todavía puede serlo más para

elaborar abonos orgánicos utilizables en las propias explotaciones de olivo ecológico, ya que éstas soportan los elevados costes derivados de la utilización de abonos producidos a partir de materias primas "limpias" procedentes de explotaciones ecológicas agrícolas y ganaderas (Cegarra, 2001). También, ensayos recientes (Caravaca *et al.*, 2006) han demostrado la utilidad del uso de extractos solubles de compost de alperujo en el cultivo de leguminosas.

11.5. Composición del alperujo y aptitud para su compostaje. Utilización de agentes estructurantes

11.5.1. Composición

Un amplio muestreo realizado mayoritariamente en Andalucía (Alburquerque *et al.*, 2004) indicó que el alperujo posee un elevado contenido de agua, superior al 56%, lo que le confiere una escasa consistencia como sólido y, en conjunción con su reducido tamaño de partícula, determina una porosidad muy limitada que dificulta la correcta aireación del material durante su compostaje.

Es también un material ácido (pH medio 5,32), cercano al límite inferior considerado óptimo para el compostaje (5,50), con una conductividad eléctrica variable (0,88-4,76 dS/m) de valor medio 3,42 dS/m, lo que da idea de su contenido salino. Tiene una proporción muy elevada de su materia seca como materia orgánica (valor medio 93,3%), siendo gran parte de la misma de naturaleza lignocelulósica, y también como carbono orgánico (52,0%), pero contiene poco nitrógeno por lo que la relación C/N es generalmente elevada, con un valor medio de 48 demasiado alejado del óptimo generalmente establecido para el compostaje (25-35). También contiene bastante potasio, pero poco fósforo y micronutrientes, así como carbohidratos y polifenoles hidrosolubles y un contenido graso cuyo valor medio se estableció en 12,1%.

Las fracciones lipídica y fenólica por su efecto antimicrobiano (González *et al.*, 1990; Capasso *et al.*, 1992; Pérez *et al.*, 1992), el elevado contenido en lignina, los valores descompensados de la relación C/N y la deficiente estructura física del alperujo, lo hacen poco apto como sustrato para la actividad de los microorganismos aerobios propia del compostaje, razón por la cual la viabilidad del proceso depende en gran medida de la adición al mismo de los llamados agentes estructurantes o esponjantes que contribuyen a mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

11.5.2. Agentes estructurantes

Estos materiales deben contener menos agua y tener mayor tamaño de partícula que el alperujo, a fin de que puedan absorber el exceso de humedad del mismo e incrementar su porosidad, facilitando así su aireación. Debe tenerse también en cuenta la disponibilidad de los mismos, su coste ha de ser bajo y cercana la zona donde se producen a la planta de

compostaje. De entre los numerosos materiales orgánicos residuales de diversos procesos agroindustriales y de actividades agrícolas y ganaderas, se seleccionaron los cuatro siguientes: un residuo de desmotadora de algodón (RA) constituido fundamentalmente por los restos de fibra y la cápsula que envuelve la flor, raspajo de uva (RU) formado por los tallos y ramificaciones del racimo, hoja de olivo (HO) procedente de la limpieza de la aceituna antes de su molienda y cama fresca de vaca (CV) formada por las deyecciones sólidas y líquidas de los animales en estabulación junto con abundante paja de cereales.

Los cuatro tienen alto contenido de materia orgánica y menor humedad que el alperujo, correspondiendo los menores valores de pH y los mayores de C/N a RU y HO, mientras que CV mostró el mayor contenido de nutrientes y el valor más alto de conductividad eléctrica (cuadro 11.1).

CUADRO 11.1
Características de los alperujos (AL1, AL2 y AL3) y los agentes estructurantes utilizados en los ensayos de compostaje

Parámetro (s.m.s.) ¹	AL1	AL2	AL3	RA	RU	HO	CV
Humedad (% s.m.f.) ²	71,3	63,9	55,6	11,5	5,9	7,3	46,1
pH	5,0	5,2	5,1	6,8	4,4	5,6	7,5
Conductividad eléctrica (dS/m)	3,01	4,12	4,76	4,12	4,24	1,74	7,53
Materia orgánica (g/kg)	953	948	942	933	934	906	664
Nitrógeno total (g/kg)	12,2	8,9	13,2	21,3	8,0	13,3	19,4
Relación carbono/nitrógeno	44,2	57,9	39,6	22,4	60,1	39,4	19,0
Fósforo (g/kg)	0,9	1,1	0,8	1,8	0,6	0,8	2,5
Potasio (g/kg)	15,9	25,3	27,3	17,4	20,0	5,7	35,8

Fuente: Elaboración propia a partir de experiencias piloto.

¹ Sobre materia seca.

² Sobre materia fresca.

11.6. Experiencias piloto de compostaje de alperujo

11.6.1. Características de los ensayos: preparación de las mezclas y manejo del compostaje

Se prepararon seis pilas trapezoidales de aproximadamente 2 m de ancho y 1,5 m de alto, cuya composición, peso y manejo se especifican en el cuadro 11.2, mezclando los tres alperujos y los cuatro agentes estructurantes descritos en el cuadro 11.1. El compostaje se efectuó en planta piloto, constituida por 4 módulos cubiertos de 2,0 m de ancho, 3,5 m de fondo y 2,5 m de alto, con base de hormigón en ligera pendiente para facilitar la salida de lixiviados.

Las pilas se humectaron periódicamente mediante un sistema móvil de aspersión y se airearon con un sistema automatizado de ventilación forzada con funcionamiento periódico, el cual se activaba en continuo cuando la temperatura superaba un cierto umbral prefijado (método Rutgers: Finstein *et al.*, 1985).

CUADRO 11.2
Composición inicial, peso y manejo de las pilas de compostaje

Mezclas	Composición (%)		Peso (kg)	Número volteos	Ventilación forzada
	Peso fresco	Peso seco			
Pilas 1 y 2	92,6 AL1 + 7,4 RA	(80/20)	2.700	1	Sí
Pila 3	94,6 AL2 + 5 RU + 0,4 urea	(87/12/1)	2.600	3	Sí
Pila 4	94,6 AL2 + 5 HO + 0,4 urea	(87/12/1)	2.600	3	Sí
Pilas 5 y 6	90 AL3 + 9 CV + 1 Compost pila 4	(87/11/2)	4.000	14	5(No) 6(Sí)

Fuente: elaboración propia a partir de experiencias piloto.

Durante el proceso se controlaron la temperatura, humedad y aireación de los sustratos y se analizaron periódicamente los siguientes parámetros: contenido total de materia orgánica, fracción hidrosoluble, contenido de nitrógeno y relación C/N, contenido de grasa y potencial fitotóxico.

Finalmente, dos de los composts obtenidos se evaluaron agrónomicamente: el de la pila 2 mediante cultivo de ryegrass (*Lolium perenne*) en cámara de crecimiento controlado, estudiando el crecimiento de las plantas y su estado nutricional a lo largo de tres cosechas consecutivas y el de la pila 1 con un cultivo comercial de pimiento (*Cap-sicum annum cv Orlando*) bajo invernadero en condiciones de fertirrigación, comparando el compost de alperujo con dos abonos orgánicos de uso común en la zona de cultivo (un estiércol vacuno y un compost de lodo de aguas residuales urbanas).



FIGURA 11.3. Vista general de unas pilas de compostaje con las sondas de temperatura.

11.6.2. Resultados del proceso

La adición de los agentes estructurantes al alperujo, junto con la ventilación forzada y los volteos, propiciaron condiciones aeróbicas en las pilas, siendo este efecto mayor en los sustratos preparados con RA y CV. La homogeneización inducida por los volteos fue siempre eficaz y a veces decisiva para su compostaje (pilas 3 y 4), mientras que la conjunción de éstos con la ventilación forzada (pila 6) acortó la fase termofílica en comparación con la sola utilización de volteos (pila 5). En estas dos últimas pilas se registraron inicialmente aumentos muy importantes de temperatura seguramente por la mejora de estructura, pero también debido al efecto inoculante y la fácil asimilabilidad de la materia orgánica aportada por el estiércol (CV). Además, los numerosos volteos efectuados en este caso debieron contribuir grandemente a homogeneizar, airear y reinocular los sustratos.

A) Contenido de materia orgánica

La biodegradación inherente al compostaje provocó pérdidas importantes de materia orgánica total, cuyos principales componentes, lignina, celulosa y hemicelulosa, también sufrieron pérdidas sustanciales en todas las pilas, siendo éstas particularmente intensas en la fase termofílica y dependiendo frecuentemente de la eficiencia en la oxigenación de los sustratos. Las pérdidas mayores de materia orgánica se observaron en las pilas 5 y 6 (54 y 61%, respectivamente) y las menores en la pila 4 (34%), apreciándose una ralentización de las mismas en los períodos de persistente acidez.

B) Fracción hidrosoluble

En las primeras semanas de compostaje el pH aumentó hasta valores finales claramente alcalinos ($> 8,5$), indicando el correcto avance del proceso, ya que, cuando este parámetro permaneció ácido o cerca de la neutralidad en algunas pilas, indicó deficiencias en la oxigenación de las mismas. El contenido de materia orgánica en la fracción hidrosoluble disminuyó claramente durante el proceso, y también el de carbohidratos y polifenoles, alcanzándose valores finales muy parecidos entre las distintas pilas para cada uno de estos parámetros, independientemente de las diferencias entre sus valores iniciales.

C) Contenido de nitrógeno y relación C/N

Con el avance del compostaje se observó un incremento del contenido de nitrógeno debido al efecto de concentración provocado por la biodegradación de la materia orgánica, mucho más rica en carbono que en nitrógeno. Sin embargo, se apreciaron

pérdidas de nitrógeno principalmente como amoníaco, que generalmente coincidieron con incrementos de pH, temperaturas altas y períodos prolongados de ventilación forzada. Consecuentemente, la relación C/N disminuyó, alcanzándose valores finales de este parámetro relativamente elevados en los composts maduros, debido a la naturaleza lignocelulósica predominante de los sustratos.

D) *Contenido graso y potencial fitotóxico*

En todas las pilas se registró una drástica reducción del contenido graso, descendiendo hasta valores inferiores al 2% en los composts maduros. La degradación de las grasas, sin embargo, se ralentizó en las pilas 3 y 4, y temporalmente también en la pila 5 comparativamente a la pila 6, coincidiendo con un débil aumento del pH y con dificultades para la aireación de estas pilas en ciertas fases del proceso, lo que sugirió una clara interdependencia entre la oxigenación de los sustratos y la escasa biodegradación de las grasas. Otro efecto claramente constatado fue que la fuerte fitotoxicidad inicial de los sustratos desapareció progresivamente durante el compostaje, si bien ello estuvo también limitado temporalmente en las pilas con condiciones de aireación relativamente deficientes (pilas 3 y 4).

E) *Características de los composts*

Los composts obtenidos, exentos de fitotoxicidad, son más ricos en materia orgánica que los estiércoles (cuadro 11.3), si bien cabe suponer que ésta sea menos biodegradable en los composts de alperujo, debido a su elevada riqueza en lignina. Los composts también muestran contenidos considerables de potasio y nitrógeno, de cuantía parecida a los valores típicos de los estiércoles, si bien es menor la disponibilidad inmediata del nitrógeno en los composts de alperujo. El resto de macro y micronutrientes fue menor en los composts de alperujo, mientras que la relación C/N muestra valores comparativamente mayores que en los estiércoles, debido a la ya aludida importante proporción de lignina presente en los mismos.

F) *Evaluación agronómica*

La adición del compost de la pila 2 a un suelo calizo de textura franco-arcillosa y escasa fertilidad, para cultivar ryegrass, estimuló el crecimiento vegetal sin que se evidenciara en ningún caso signos aparentes de fitotoxicidad, si bien la escasa disponibilidad del nitrógeno del compost ocasionó que los menores rendimientos se obtuvieran en los tratamientos que no habían recibido aporte adicional de nitrógeno mineral.

Cuando se comparó el compost de la pila 1 con estiércol vacuno y compost de lodo de aguas residuales urbanas, sobre un cultivo de pimiento bajo invernadero y condiciones

CUADRO 11.3
Composición de estiércoles de distinto origen (n=10) y de los composts de alperujo (n=6)

Parámetro (s.m.s.)	Estiércoles		Composts	
	Media	Rango	Media	Rango
pH	7,8	6,5-9,1	8,8	8,5-9,0
Conductividad eléctrica (dS/m)	4,56	3,56-6,20	3,60	2,96-4,81
Materia orgánica (g/kg)	756	545-859	868	793-912
Relación C/N	12,5	8,7-19,2	20,0	16,6-22,7
Nitrógeno total (g/kg)	31,7	17,7-46,0	23,7	21,7-26,3
Fósforo (g/kg)	3,2	1,0-5,1	1,6	1,4-1,9
Potasio (g/kg)	20,9	11,0-35,9	35,1	24,9-42,7
Calcio (g/kg)	56,4	29,5-102,2	16,8	9,4-29,7
Magnesio (g/kg)	9,8	5,1-15,9	3,5	1,9-5,7
Hierro (mg/kg)	3.180	1.000-6.900	937	525-1.468
Cobre (mg/kg)	256	15-492	28	21-36
Manganeso (mg/kg)	280	112-402	59	38-98
Cinc (mg/kg)	231	20-576	72	38-138

Fuente: Elaboración propia a partir de experiencias piloto.

reales de fertirrigación, apenas se apreciaron diferencias ni sobre el rendimiento de cultivo ni sobre el estado nutricional de las plantas. Sin embargo, la materia orgánica aportada por los tres enmendantes al suelo, que se degradó parcialmente durante el ciclo del cultivo, permaneció casi inalterada en las parcelas tratadas con el compost de alperujo, de acuerdo con la naturaleza lignocelulósica de éste, fuertemente resistente a la biodegradación edáfica.

11.7. Reflexiones finales

El cultivo del olivo y la industria extractiva oleícola han sido tradicionalmente fuente de generación de residuos y subproductos cuya potencialidad de impacto ambiental ha ido creciendo conforme tales actividades se vienen efectuando de forma más intensiva. La evolución tecnológica del proceso extractivo, desde los primitivos sistemas de prensa todavía utilizados en muchos países productores hasta las modernas técnicas de centrifugación en sistema continuo de dos fases extensivamente implantadas en España, ha conducido a generar residuos que, como el alpechín, todavía causan graves problemas ambientales en ambas riberas del mar Mediterráneo, o el alperujo, principal subproducto de la industria oleícola española y que se aprovecha principalmente para la generación de energía, dado el alto coste actual de los combustibles fósiles.

Sin embargo, la transformación del alperujo en abonos y enmiendas orgánicas mediante compostaje, contribuye a restituir nutrientes y materia orgánica a los suelos agrícolas y constituye una alternativa tecnológicamente viable tanto como fuente

adicional de agregación de valor en el sistema agroalimentario del aceite de oliva como para reducir su impacto ambiental. Los composts de alperujo son muy ricos en materia orgánica de lenta biodegradación y contienen abundante potasio y nitrógeno, si bien este último es sólo parcialmente disponible para los cultivos a corto plazo. Estos resultados, obtenidos en planta-piloto y mediante ensayos agronómicos limitados, están siendo transferidos a través de la OTT del CSIC a diferentes empresas del sector de la gestión de residuos y de la fabricación de abonos orgánicos para su desarrollo a escala industrial, con resultados muy prometedores.

Bibliografía

- AAO (2006): Agencia para el aceite de oliva. Disponible en la página web: <<http://www.mapya.es/aao/default.htm>>
- Abad, M. y Puchades, R. (2002): Compostaje de residuos orgánicos generados en La Hoya de Buñol (Valencia) con fines hortícolas. Asociación para la promoción socioeconómica interior Hoya de Buñol, Valencia.
- Agencia Europea de Medio Ambiente (2000): La Unión Europea apuesta por la gestión de residuos. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.
- Ait Baddi, G.; Albuquerque, J. A.; González, J.; Cegarra, J. y Hafidi, M. (2004): Chemical and spectroscopic analyses of organic matter transformations during composting of olive mill wastes. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 54, pp. 39-44.
- Alba Mendoza, J. (1994): El orujo de aceituna. Evolución, estado actual y perspectivas. *Agricultura*, 746, pp. 812-814.
- (1997): El orujo de aceituna. Un reto para la Investigación y la Tecnología. Foro de la Industria Oleícola y la Calidad, Ponencia. VIII Simposium Científico-Técnico Expoliva '97, 2-3 de octubre de 1997. Jaén (España).
- Alba Mendoza, J.; Hidalgo Casado, F.; Martínez Román, F.; Ruiz Gómez, M.^a A. y Moyano Pérez, M.^a J. (1993): Procesos de elaboración: nuevas técnicas de centrifugación. VI Simposium Científico-Técnico Expoliva 93. Dossier Oleo, Jaén. 2, pp. 40-59.
- (1994): Impacto ecológico y ambiental originado por el nuevo proceso de elaboración de aceite de oliva, III Fórum Internacional del Aceite. SIO, 94. Reus, pp. 47-56.
- Albadalejo, J. y Díaz, E. (1990): Degradación y regeneración del suelo en el litoral mediterráneo español: experiencias en el proyecto LUCDEME, en: Degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas. Albadalejo, J.; Stocking, M. A. y Díaz, E. (eds.): Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), pp. 191-213.
- Albuquerque, J. A. (2003): "El compostaje de orujo de oliva de dos fases. Estudio del proceso y evaluación de los productos obtenidos". Tesis Doctoral, Universidad de Murcia.
- Albuquerque, J. A.; González, J.; García, D. y Cegarra, J. (2004): "Agrochemical characterization of 'alperujo', a solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction". *Bioresource Technology*, 91, pp. 195-200.
- (2006): "Effects of bulking agent on the composting of 'alperujo', the solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction". *Process Biochemistry*, 41(1), pp. 127-132.
- Amirante, R. y Montel, G. L. (1998): Composting of oil extraction by-product: legislative, technological aspects and experimental results. I Jornadas Mediterráneas de Olivar Ecológico. Ecoliva '97. Puente de Génave, Jaén (España), 14-16 de noviembre de 1997, t. I, pp. 161-173.

- Resultados preliminares". I Encuentro Internacional. Gestión de Residuos orgánicos en el Ámbito Rural Mediterráneo, 22-23 febrero, Pamplona (España).
- Miranda, M. A.; Amat, A. M.; Arques, A.; Marín, M. L. y Sequi, S. (2002): "Pyrylium salt-photosensitized degradation of phenolic contaminants presents in olive oil wastewaters with solar light: Part III. Tyrosol and p-hydroxyphenylacetic acid". *Applied catal. B: (Environmental)*, 28, pp. 127-133.
- Molina, E.; Nogales, R.; Martín, A. I.; Yáñez, D. R. y Moumen, A. (2001): "Reutilización de los orujos procedentes de las nuevas tecnologías de extracción en dos fases del aceite de oliva de aceituna en alimentación de rumiantes". I Encuentro Internacional. Gestión de Residuos orgánicos en el Ámbito Rural Mediterráneo, 22-23 febrero, Pamplona (España).
- Nogales, R.; Gómez, M.; Benítez, E.; Calmet, A. y Elvira, C. (1998): "El vermicompostaje como tratamiento biológico para la revalorización de los subproductos generados por la industria del olivar. Resultados preliminares". Primeras jornadas mediterráneas de olivar ecológico. *Ecoliva'97*. Puente de Génave, Jaén (España), 14-16 de noviembre de 1997, t. II, pp. 125-135.
- Ordóñez, R.; González, P.; Giráldez, J. V. y García-Ortiz, A. (1999): "Efecto de la enmienda con alperujo sobre los principales nutrientes de un suelo agrícola", en *Estudios de la zona no saturada del suelo*. Muñoz-Carpena, R.; Ritter, A. y Tascón, C. (eds.). ICIA: La Laguna, pp. 123-126.
- Ozores-Hampton, M. y Obreza, T. A. (2000): "Composted waste use on Florida vegetable crops: A review", en *Proceedings of the International Composting Symposium (ICS'99)*. Warman, P. R. y Taylor, B. R. (eds.). Halifax, Canada, vol. 2, pp. 827-842.
- Pardo Núñez, J. y López Mondejar, C. (2001): "Aprovechamiento del alperujo de la industria del aceite de oliva para la producción de hongos comestibles", en III Jornadas Técnicas del champiñón y otros hongos comestibles en Castilla-La Mancha. 7-8 noviembre, Iniesta (Cuenca).
- Paredes, C. (1997): "Compostaje del alpechín mediante el sistema Rutgers y evaluación agronómica de los composts". Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Paredes, C.; Cegarra, J.; Roig, A.; Sánchez-Monedero, M. A. y Bernal, M. P. (1999): "Characterization of olive mill wastewater (alpechin) and its sludge for agricultural purposes". *Biore-source Technology*, 67, pp. 111-115.
- Pascual, J. A.; García, C. y Hernández, T. (1999): "Comparison of fresh composted organic waste in their efficacy for the improvement of arid soil quality". *Bioresource technology*, 68, pp. 255-264.
- Pérez, J.; De la Rubia, T.; Moreno, J. y Martínez, J. (1992): "Phenolic content and antibacterial activity of olive oil waste waters". *Environmental Toxicology and Chemistry*, 11, pp. 489-495.
- Pina Artal, T. (1997): "El orujo de almazara. Foro de la Industria Oleícola y la Calidad". Ponencia. VIII Simposium Científico-Técnico Expoliva'97, 2-3 de octubre de 1997, Jaén (España).
- Ramos-Cormenzana, A.; Aguilera, M. A. y Monteoliva-Sánchez, M. (2001): "*Paenibacillus jami-lae* una solución en la biorremediación de los residuos de la molturación de la aceituna". Actas-Workshop Improlive 2000, en *Improlive 2000. Presente y futuro del alpeorujo*. Editorial Com-plutense, S. A.
- Ranalli A. y Martinelli N. (1995): "Integral centrifuges for olive oil extraction, at the third millennium threshold". *Transformation yields. Grasas y aceites*, 46 (4-5), pp. 255-263.
- Rodríguez-Kábana, R.; Pinochet, J. y Calvet, C. (1992): "El orujo de aceituna para el control de nematodos fitoparásitos". *Nematropica*, 22 (2), pp. 149-158.
- Roe, N. E.; Stoffella, P. J. y Brian, H. H. (1993): "Municipal solid waste compost supresses weeds in vegetable crop alleys". *Hortscience*, 28 (12), pp. 1171-1172.
- Rozzi, A. y Malpei, F. (1996): "Treatment and disposal of olive mill effluents". *International Bio-deterioration & Biodegradation*, 38 (3-4), pp. 135-144.
- Sainz, H.; Benítez, E.; Melgar, R.; Alvarez, R.; Gómez, M. y Nogales, R. (2000): "Biotransfor-mación y valorización agrícola de subproductos del olivar -orujos secos y extractados

- mediante vermicompostaje". *Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del suelo*, 7-2, pp. 103-111.
- Saviozzi, A.; Levi-Minzi, R.; Cardelli, R.; Biasci, A. y Riffaldi, R. (2001): "Suitability of moist olive pomace as soil amendment". *Water, Air and Soil Pollution*, 128, pp. 13-22.
- SODEAN (2005): "Potencial aprovechamiento energético de la biomasa del olivar en Andalucía". Disponible en la página web: <www.sodean.es/publicaciones/potencialyaprovechamiento.pdf>
- Tardáguila, J.; Montero, F.; Olmeda, M.; Alba, J. y Bernabéu, R. (1996): "Análisis del sector del aceite de oliva". *Alimentación, Equipos y Tecnología*. Abril.
- Tejada, M.; Ruiz, J. L.; Dobao, M.; Benítez, C. y González, J. L. (1997): "Evolución de parámetros físicos de un suelo tras la adición de distintos tipos de orujos de aceituna". *Actas de Horticultura*, 18, pp. 514-518.
- Trillas, I.; Avilés, M.; Ordovás, J.; Bello, A. y Tello, J. (2002): "Evaluation of composted agricultural wastes as a methyl bromide alternative for plant disease control", en *Proceedings of the International Symposium Composting and Compost Utilization*. Michel, F. C.; Rynk, R. F. y Hoitink, H. A. J. (eds.). Columbus, Ohio, USA.
- Uceda, M. (1999): "Calidad en el aceite de oliva. Influencia de la elaboración. El olivar y el aceite de oliva". Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, Delegación Provincial de Albacete de la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente, pp. 147-199.
- UE-Dirección General para la Agricultura y el Desarrollo Rural (2005): "The 2004 Agricultural Year", en *Agriculture in the European Union-Statistical and economic information 2004*. Disponible en la página web: <http://europa.eu.int/comm/agriculture/agrista/2004/table_en/index.htm>
- Van der Hoek, K. W. y Oosthoek, J. (1985): "Composting: odour emissions and odour control by biofiltration", en *Composting of Agricultural and other wastes*. Gasser, J. K. R. (ed.). Elsevier Applied Science Publishers. Barking, pp. 271-281.
- 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*. Bertoldi, M. de; Ferranti, M. P.; Hermite, P. L. y Zucconi, F. (eds.). Elsevier Applied Science Publishers. Barking, pp. 30-50.