

# La poda del olivar como materia prima para la producción de biocombustibles

La poda de olivo constituye uno de los residuos agrícolas más importantes de España por su volumen de producción. Hasta el momento, carece de aplicación industrial y su eliminación de los campos, generalmente por quema directa o por trituración y esparcimiento, representa un coste adicional y ocasiona riesgos ambientales. Como alternativa, su naturaleza lignocelulósica y su carácter renovable, convierten esta biomasa de bajo o nulo coste en materia prima para su transformación en productos de interés. En este trabajo se describe de forma sucinta las características del proceso de conversión de la poda de olivo en bioetanol y los principales resultados de los estudios desarrollados en esta línea por la Universidad de Jaén.

**Eulogio Castro, Cristóbal Cara, Encarnación Ruiz, Manuel Moya, Inmaculada Romero •**

Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales. Universidad de Jaén



## La poda del olivar como materia prima

En el mundo se cultivan más de ocho millones de hectáreas de olivar, principalmente en los países de la Cuenca Mediterránea, aunque su cultivo se está extendiendo a otras zonas, debido al interés suscitado por las propiedades saludables del aceite de oliva. En España, la superficie destinada al olivar ascendió en 2005 a cerca de 2,5 millones de hectáreas, que se concentran sobre todo en el Este, Sur y Suroeste peninsular. Por comunidades autónomas, destaca Andalucía, con aproximadamente un millón y medio de hectáreas.

La poda de los olivos se realiza generalmente en años alternos al finalizar el periodo de recolección de la aceituna. La operación tiene como objetivos la eliminación de las ramas improductivas del árbol, el rejuvenecimiento de la planta y su acondicionamiento para la próxima cosecha. La cantidad de biomasa que se produce como consecuencia de la poda es variable, dependiendo de diversos factores como la producción, el tipo de cultivo y las costumbres locales. En Andalucía, se ha estimado que, como término medio, se generan anualmente unas tres toneladas de residuos de poda de olivo por hectárea.

La eliminación de este residuo agrícola, necesaria para prevenir la propagación de plagas en el cultivo, se re-

## El potencial de producción de etanol derivado de este cultivo asciende a unos 400 millones de toneladas anuales

aliza por trituración y esparcimiento en el propio campo o, más comúnmente, por quema directa, con lo que se está desaprovechando una fuente de energía de primera magnitud.

El contenido en azúcares de este residuo agrícola permite considerarlo como una materia prima para la producción de diferentes compuestos, como el bioetanol, que puede emplearse como combustible, sustituyendo o formando mezclas con la gasolina.

Las principales ventajas de la transformación de los restos de la poda del olivar en bioetanol pueden clasificarse en:

- **Económicas:** se aprovecha un residuo cuya eliminación es costosa y se obtiene un producto de cierto valor, lo que puede contribuir a mejorar las rentas agrarias.
- **Ambientales:** el procedimiento común de eliminación ocasiona riesgos ambientales, como el peligro de incendios y el vertido incontrolado a la atmósfera del dióxido de carbono (principal gas responsable del efecto invernadero) procedente de la combustión. Por otra parte, la utilización del bioetanol como combustible generado a partir de la poda de olivo presenta una emisión neta de dióxido de carbono a la atmósfera nula, ya que la misma cantidad liberada en la combustión es fijada por la planta en el proceso fotosintético.
- **Sociales:** el establecimiento de una industria transformadora de la poda de olivo representaría la creación de empleo y el desarrollo de la industria asociada.
- **Político-económicas:** la sustitución de gasolina por bioetanol haría reducir las importaciones de petróleo, disminuyendo la dependencia energética exterior de nuestro país. Adicionalmente, este proceso puede contribuir a alcanzar el objetivo fijado por el Gobierno en el Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010, uno de cuyos objetivos es cubrir con fuentes renovables al menos el 12% del consumo energético nacional en el año 2010, lo que se traduce en un 29,4% de generación eléctrica procedente y un 5,75% de consumo de carburantes para el transporte de origen renovable (**Tabla 1**).

La producción de etanol combustible a partir de materias renovables es un hecho

**Tabla 1**

Producción de energías renovables en España

	Producción en términos de energía primaria (ktep)	
	2004	Objetivo 2010
<b>GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD</b>	5973,0	
Hidráulica	2943,0	
Biomasa	680,0	
Residuos Sólidos Urbanos	395,1	300 - 500
Eólica	1683,1	
Solar fotovoltaica	4,8	
Biogás	266,7	
Solar termoeléctrica	--	
<b>USOS TÉRMICOS</b>	3574,0	4445
Biomasa	3487,0	4070
Biogás	28,0	--
Solar térmica de baja temperatura	51,0	376
Geotermia	8,0	--
<b>BIOCARBURANTES (transporte)</b>	228,0	2200
<b>TOTAL ENERGÍAS RENOVABLES</b>	9774,9	20220
<b>CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA</b>	141567	167100
Contribución energías renovables (%)	6,9	12,1

desde hace varias décadas en países como Brasil (a partir de caña de azúcar), Estados Unidos (a partir de maíz) o, más recientemente, España (a partir de cereales). Sin embargo, aún es necesario mejorar los procesos para conseguir que el producto final resulte competitivo en términos de costes de producción frente al combustible de origen fósil que se desea sustituir. En este sentido, el empleo de materias primas, también de origen renovable, pero de menor coste, ha hecho que la atención se centre en el uso de residuos agrícolas o forestales que evitan igualmente la posible competencia de la materia prima (caso, por ejemplo, del grano de cereal) con posibles usos alimentarios.



### El proceso de transformación de los residuos de la poda del olivar en etanol

El aprovechamiento de cualquier residuo agrícola con el objetivo de obtener etanol está basado en su contenido en azúcares o carbohidratos. Todos los vegetales están compuestos mayoritariamente por celulosa (30-50%), hemicelulosa (20%-30%) y lignina (20-25%). La celulosa es un polímero lineal de glucosa, un azúcar fácilmente asimilado por diversos microorganismos, como levaduras o bacterias, que lo convierten en etanol. La hemicelulosa también es un polímero, pero en su composición entran a formar parte diversos tipos de azúcares, también fermentables aunque con más dificultad, como xilosa, manosa, arabinosa u otros, así como otros compuestos. Por último, la lignina actúa como material de unión entre la celulosa y la hemicelulosa y no contiene azúcares.

La composición de la poda de olivo se muestra en el **Gráfico 1**.

Para obtener etanol a partir de la poda de olivo es necesario, por tanto, liberar los carbohidratos (monómeros) que constituyen los polímeros azucarados, operación que recibe el nombre de hidrólisis y, posteriormente, transformarlos por la acción de microorganismos en el producto deseado (fermentación). Como paso previo, se requiere el pretratamiento del residuo, pues especialmente en el caso de la celulosa, las cadenas de glucosa están fuertemente enlazadas entre sí por puentes de hidrógeno, lo que confiere una gran estabilidad al polímero dificultando su ruptura para liberar el monómero. Este hecho está menos acentuado en el caso de la hemicelulosa, por lo que su hidrólisis se realiza con mayor facilidad. Seguidamente se describen brevemente las tres etapas fundamentales del mismo.

### Pretratamiento

El objetivo fundamental de esta etapa es mejorar la eficacia de la hidrólisis enzimática y de las fermentaciones posteriores. Para que las enzimas encargadas de provocar la liberación de la glucosa actúen es preciso favorecer su acceso a la estructura de la celulosa, lo cual puede conseguirse aumentando la superficie de contacto con los agentes hidrolíticos, reduciendo el grado de cristalinidad de la celulosa, eliminando la lignina o disolviendo las hemicelulosas. Puede apreciarse el efecto del pretratamiento sobre la estructura del residuo comparando las **fotografías 1 y 2**.



Fotografía 1. Poda de olivo molida

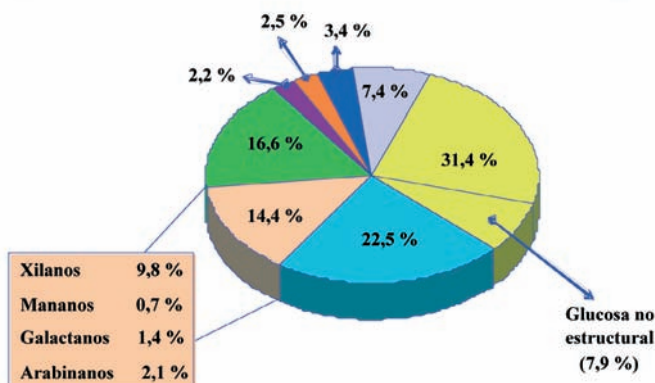


Fotografía 2. Poda de olivo tras pretratamiento por explosión con vapor

#### Gráfico 1

Composición de la poda de olivo

Extractos		Lignina soluble	
Celulosa		Grupos acetilo	
Hemicelulosas		Cenizas	
Lignina insoluble		Otros	



El pretratamiento representa una de las etapas más importantes desde el punto de vista técnico y económico, por lo que puede influir decisivamente en la rentabilidad global del proceso.

Existen varios tipos de pretratamientos que se han ensayado con éxito sobre diferentes materias primas. Los pretratamientos hidrotérmicos no utilizan agentes químicos, lo que representa una ventaja desde el punto de vista ambiental y económico. Dentro de esta categoría, los dos procedimientos más empleados en residuos agrícolas reciben el nombre de explosión por vapor y tratamiento con agua caliente a presión. En esencia, consisten en someter al residuo a la acción de altas temperaturas durante un determinado tiempo; mientras que en el primer procedimiento se trata el residuo con vapor, provocando después la expansión súbita (explosión), en el segundo se mantiene el agua en fase líquida por efecto de la presión. Como una variante de este tipo

de pretratamientos, se han utilizado también disoluciones diluidas de ácido sulfúrico (en concentraciones del orden del 1%), que en determinadas condiciones mejoran los rendimientos.

**Hidrólisis enzimática**

Una vez que la estructura lignocelulósica del residuo ha sido modificada por la acción del pretratamiento, las enzimas encargadas de romper los polímeros azucarados encuentran mayor accesibilidad a aquella, con lo que el rendimiento en glucosa aumenta.

Las principales dificultades para hidrolizar por vía enzimática los materiales lignocelulósicos están relacionadas, por un lado, con la baja actividad específica de las enzimas de las que se dispone en la actualidad y por tanto con la necesidad de un elevado consumo de las mismas durante el proceso, y por otro, con la propia estructura de los sustratos lignocelulósicos nativos. A pesar de ello, la hidrólisis enzimática de residuos celulósicos parece ser uno de los caminos más prometedores. El alto coste de las enzimas celulolíticas es, sin embargo, la principal barrera para hacer competitivo un proceso de obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos, frente a los procesos basados en materias primas ricas en almidón.

En el marco del proceso de obtención de etanol a partir de biomasa, la hidrólisis enzimática puede realizarse antes de la fermentación (hidrólisis y fermentación secuenciales) o simultáneamente (sacarificación y fermentación simultáneas).

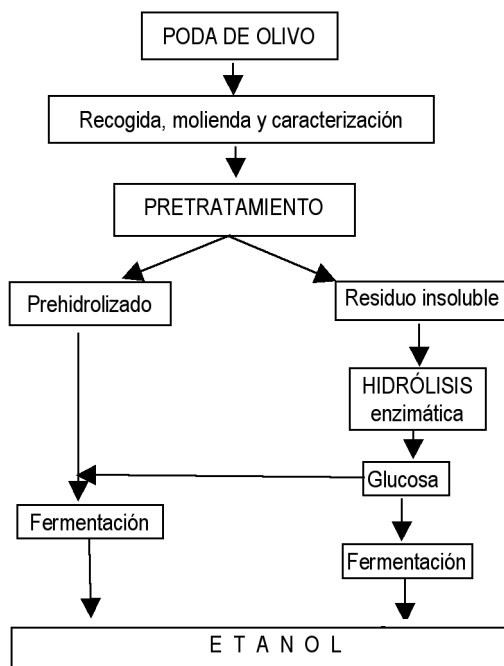
**Fermentación**

La transformación de la glucosa generada por las enzimas a partir de la celulosa del residuo de poda de olivo se consigue mediante fermentación, utilizando levaduras, en un proceso similar al de la panificación. Para esta operación, se suelen utilizar levaduras del género *Saccharomyces cerevisiae* que presentan elevados rendimientos de conversión.

Un esquema simplificado del proceso de transformación de la poda de olivo en etanol se muestra en el **Gráfico 1**. Después de su recolección, el residuo se somete a una molienda y se determina su composición. Seguidamente se realiza el pretratamiento en las condiciones de operación seleccionadas. Como resultado del mismo, se separan por filtración dos fracciones:

- El prehidrolizado, que es la fracción líquida y que contiene principalmente los azúcares procedentes de la degradación de la hemicelulosa del residuo, junto con productos de degradación de los mismos azúcares y de la lignina. El aprovechamiento de estos azúcares resulta de especial importancia para la economía del proceso, puesto que pueden representar un porcentaje considerable del total de azúcares que contiene el residuo. Para el caso de la poda de olivo, esto es especialmente importante debido a la presencia de una elevada cantidad de azúcares no estructurales (es

**Gráfico 1**  
Composición de la poda de olivo



decir, que no forman parte de los polímeros), que esta materia prima contiene y que se encontrarán en los prehidrolizados tras el pretratamiento. Sin embargo, los azúcares de los líquidos, como se dijo anteriormente, se fermentan con mayor dificultad; a esto hay que añadir la presencia de productos de degradación que pueden ser inhibidores para la acción de las levaduras. En resumen, la utilización de los azúcares de los líquidos, en el momento actual, constituye un problema no resuelto en el que se continúa realizando una intensa investigación.

• El sólido pretratado, está formado casi exclusivamente por celulosa y una pequeña fracción de lignina. Este sólido se somete a la acción enzimática, con lo que se obtiene una disolución de glucosa.

Posteriormente, la disolución de glucosa es transformada en etanol por fermentación. Alternativamente, se puede realizar la hidrólisis enzimática y la fermentación en una sola etapa, con lo que se reducirían los costes de operación; como contrapartida, las dos operaciones no presentan la misma temperatura óptima, con lo que es preciso adoptar un compromiso entre ambas que incide negativamente en el rendimiento. Un balance económico determinará la configuración más aconsejable.

**La utilización de los azúcares de los líquidos, en el momento actual, constituye un problema no resuelto en el que se continúa realizando una intensa investigación**



**Principales resultados en la transformación de poda de olivo a etanol**

El grupo de investigación "Ingeniería Química y Ambiental" de la Universidad de Jaén desarrolla sus trabajos en el aprovechamiento de residuos agrícolas, con especial atención a la poda de olivo con vistas a su conversión en etanol. La investigación, realizada en colaboración con el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) de Madrid, está siendo financiada por el Ministerio de Educación y Ciencia, incluyendo fondos FEDER de la Unión Europea, así como por la empresa Azucareras Reunidas de Jaén, SA.

Los resultados obtenidos hasta el momento, a partir de los ensayos con múltiples condiciones de operación para las tres etapas básicas del proceso (pretratamiento, hidrólisis enzimática y fermentación), muestran que es posible obtener un litro de etanol a partir de nueve kilogramos de poda de olivo (en base seca), considerando exclusivamente el

aprovechamiento de la fracción sólida obtenida después del pretratamiento.

Si se tiene en cuenta la superficie de olivar existente en España (unos 2,5 millones de hectáreas) y la generación anual media de poda de olivo por hectárea (unas tres toneladas), se puede concluir que el potencial de producción de etanol derivado de este cultivo asciende a unos 400 millones de toneladas anuales, cifra que se duplicaría si se consiguiese también la transformación de los azúcares contenidos en la frac-

ción líquida de los pretratamientos.

Aunque estos resultados se derivan de investigaciones de laboratorio, es evidente que la conversión de la poda de olivo en un combustible de origen renovable como el bioetanol convierte a este residuo en una fuente energética de primera magnitud, que hasta el momento, está siendo desaprovechada.

La traslación de estos resultados a escala industrial presenta, lógicamente, numerosas incertidumbres que deberían ser resueltas antes de que este paso pueda abordarse con garantías, resultando esencial una cuidadosa eva-

luación económica de todas las etapas involucradas en el proceso, así como la participación de organismos públicos y de empresas en el apoyo de la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación en este prometedor campo. El reto, sin duda, merece ser afrontado.

**Bibliografía**

Información detallada sobre diferentes aspectos de la conversión de la poda de olivo en etanol puede consultarse en las siguientes publicaciones científicas especializadas:

Cristóbal Cara, Encarnación Ruiz, Ignacio Ballesteros, María José Negro, Eulogio Castro. Enhanced enzymatic hydrolysis of olive tree wood by steam explosion and alkaline peroxide delignification. *Process Biochemistry* 41, 423-429, 2006.

Encarnación Ruiz, Cristóbal Cara, Mercedes Ballesteros, Paloma Manzanares, Ignacio Ballesteros, Eulogio Castro. Ethanol production from pretreated olive tree wood and sunflower stalks by an SSF process. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 129-132, 631-643, 2006.

Cristóbal Cara, Inmaculada Romero, José Miguel Oliva, Felicia Sáez, Eulogio Castro. Liquid hot water pretreatment of olive tree pruning residues. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 136-140, 379-394, 2007.

Cristóbal Cara, Encarnación Ruiz, José Miguel Oliva, Felicia Sáez, Eulogio Castro. Conversion of olive tree biomass into fermentable sugars by dilute acid pre-treatment and enzymatic saccharification. *Bioresource Technology*, 2007 (en prensa).

Cristóbal Cara, Manuel Moya, Ignacio Ballesteros, María José Negro, Alberto González, Encarnación Ruiz. Influence of solid loading on enzymatic hydrolysis of steam exploded or liquid hot water pretreated olive tree biomass. *Process Biochemistry*, 2007 (en prensa).

Cristóbal Cara, Encarnación Ruiz, Mercedes Ballesteros, Paloma Manzanares, María José Negro, Eulogio Castro. Production of fuel ethanol from steam-explosion pretreated olive tree pruning. *Fuel*, 2007 (en prensa).

**El potencial de producción de etanol derivado de este cultivo asciende a unos 400 millones de toneladas anuales**