



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1638

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Contribución de la biomasa forestal en la bioeconomía circular. Viabilidad técnica y económica en procesos de biorrefinería para promover actuaciones silvícolas de adaptación y restauración forestal en el mediterráneo

CERVERA ZARAGOZA (1) T., BAIGES ZAPATER T. (1), PALERO MORENO N. (1), FÁBREGAS MARTÍNEZ E. (2), MORA SANJUAN M. (2, 3), PUY MARIMÓN N. (2, 3)

(1) Centre de la Propietat Forestal. DARPA, Generalitat de Catalunya.

(2) Universitat Autònoma de Barcelona.

(3) Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya.

Resumen

En el marco del proyecto LIFE BIOEFFORMED (2019-2024), se ha analizado la posibilidad de aprovechar parte de la biomasa forestal generada en actuaciones silvícolas de mejora en una biorrefinería, con dos objetivos principales: i) testar la idoneidad de diversas especies mediterráneas para la obtención de productos químicos renovables, y, ii) explorar la posible contribución de estos productos de alto valor añadido para financiar actuaciones silvícolas de adaptación y restauración. Las tres tipologías de bosque analizadas son: regenerado de pino carrasco post incendio, pinares adultos post perturbación natural y alcornocales de baja producción o vulnerables al cambio climático. Los resultados del proyecto demuestran que el proceso es una alternativa viable y sostenible para los bosques mediterráneos y para todas las especies testadas, arbóreas y arbustivas. Sin embargo, desde el punto de vista económico, las principales barreras son los bajos rendimientos de este tipo de actuaciones y los elevados costes de extracción. Se apuntan líneas de mejora que pasan por agrupar tipologías de diferente productividad, plantear biorrefinerías locales, optimizar las operaciones de extracción, pretratamiento y carga, y establecer una colaboración público-privada de la gestión forestal.

Palabras clave

Valorización forestal, química verde, resiliencia al cambio climático, restauración ambiental.

1. Introducción

La bioeconomía circular utiliza recursos biológicos y renovables para la producción de servicios en todos los sectores económicos. Al mismo tiempo, la bioeconomía circular pretende reducir la dependencia de los productos fósiles y minerales, y fomentar una mejor integración de los servicios ecosistémicos y de la biodiversidad. En este marco, la biomasa forestal primaria es un producto renovable con un alto potencial para contribuir a la transición hacia una bioeconomía inclusiva, que aumente, al mismo tiempo, la resiliencia de los paisajes agroforestales. Dentro de los usos posibles de la biomasa forestal, la obtención de componentes químicos para diferentes industrias mediante procesos de biorrefinería es vista como una alternativa cada vez más viable para sustituir compuestos que hoy son derivados del petróleo.

En el caso de Cataluña, donde la superficie forestal se sitúa en el 64% del territorio, los bosques tienen un papel fundamental en el impulso de la bioeconomía circular



a través de la integración del valor de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos en el desarrollo económico. Los bosques son la mayor fuente de recursos biológicos terrestres que no compiten con la producción de alimentos; son la infraestructura verde más extensa y proporcionan una amplia gama de servicios ecosistémicos, actualmente infravalorados en la economía; y, a través de la gestión forestal, se pueden conseguir sinergias significativas entre diferentes servicios ecosistémicos, como la reducción del riesgo de incendios forestales, la provisión de materiales de alto valor, el control de la erosión y/o la regulación del agua estacional.

Por otro lado, los bosques mediterráneos se encuentran en un momento de transición, con una densificación cada vez mayor, de reducida rentabilidad, y una vulnerabilidad al cambio climático y sus efectos negativos cada vez más patentes. A los grandes incendios, sobre todo a partir de los años ochenta, se le suman los efectos de las sequías prolongadas y las enfermedades y plagas posteriores.

Para hacer frente a esta problemática, diversas actuaciones silvícolas pueden reducir la vulnerabilidad de los bosques, presente y futura, o restaurar su función productiva, social y ambiental. Sin embargo, estas actuaciones suponen una inversión económica, con nulo o bajo retorno a corto plazo. En este contexto, las biorrefinerías forestales integradas, que producen una gran diversidad de productos y el máximo provecho de los diversos componentes de la biomasa lignocelulósica, pueden permitir maximizar el valor añadido de los productos que se obtienen (biomateriales, biocombustibles, bioproductos y bioenergía) y contribuir a esta mejora ambiental.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es analizar la posibilidad de aprovechar, en procesos de biorrefinería, parte de la biomasa forestal generada en actuaciones silvícolas de adaptación, analizando toda la cadena de valor, desde la extracción en el bosque hasta la industria, en un doble proceso: i) testar la idoneidad de diversas especies arbóreas y arbustivas mediterráneas para ser usadas en procesos de torrefacción y pirólisis, con el fin de obtener productos químicos renovables y biocombustibles, y ii) explorar la posible contribución de estos productos de alto valor añadido a la financiación de actuaciones silvícolas de mejora enfocadas a aumentar la resiliencia del bosque y la restauración de sus funciones y servicios ecosistémicos.

Para explorar las posibilidades de financiación de los tratamientos de adaptación y restauración, a través de la venta de los bioproductos, el objetivo se centra en tres tipos de bosque:

- pinares jóvenes de regenerado de pino carrasco post incendio, con densidades excesivas;
- pinares adultos afectados por una perturbación natural reciente, distinta del fuego (daño biótico o abiótico), masas puras y mixtas desestructuradas, por el paso de la perturbación y la extracción inmediata de los árboles afectados;

- alcornocales envejecidos con una densidad de árboles excesiva y síntomas de decaimiento o alcornocales muy vulnerables a sequías o incendios.

3. Metodología

En el marco del proyecto LIFE BIOEFFORMED (LIFE19 ENV/ES/000544), *Implantación de una biorrefinería mediterránea para impulsar la gestión forestal sostenible a través de la obtención de productos de valor añadido*, se trabajó en diferentes fases que permiten dar respuesta a los dos objetivos planteados en este artículo:

Fase 1.- Identificación e implementación de los tratamientos de adaptación y restauración de los tres bosques objetivo (pinos jóvenes post incendio, pinos adultos post perturbación y alcornocales envejecidos y vulnerables al cambio climático) (Figura 1) y análisis de los costes de implementación.

Paralelamente, se seleccionaron las especies arbóreas y arbustivas y los tipos de biomasa resultante de los aprovechamientos identificados, cuya viabilidad se testaba en procesos de biorrefinería: 1) pino carrasco joven (*Pinus halepensis*), madera con corteza fina, ramas y hojas; 2) pino carrasco adulto (*Pinus halepensis*), madera con corteza; 3) pino piñonero (*Pinus pinea*), madera con corteza; 4) encina (*Quercus ilex*), madera con corteza; 5) alcornoque (*Quercus suber*), madera con corteza; 6) castaño (*Castanea sativa*), madera de castaño muerto, con corteza; 7) brezo (*Erica arborea*), madera, ramas y hojas; y 8) madroño (*Arbutus unedo*), madera, ramas y hojas.



Figura 1. Bosque objetivo, tratamiento en pinares post incendio.

Fase 2.- Transporte y pretratamiento de parte de los productos forestales obtenidos en el bosque, para ser tratados en una biorrefinería piloto, ubicada en el municipio

de Solsona (Cataluña Central), y cálculo de los costes (Figura 2);



Figura 2. Biomasa forestal, producto post incendio, preparada para ser triturada y transportada a la biorrefinería piloto.

Fase 3.- Tratamiento de la biomasa forestal por especies en biorrefinería, con la obtención de tres fracciones: líquida (bio-oil), sólida (biochar o biomasa torrefacta, según la temperatura del proceso) y gas (Figura 3).

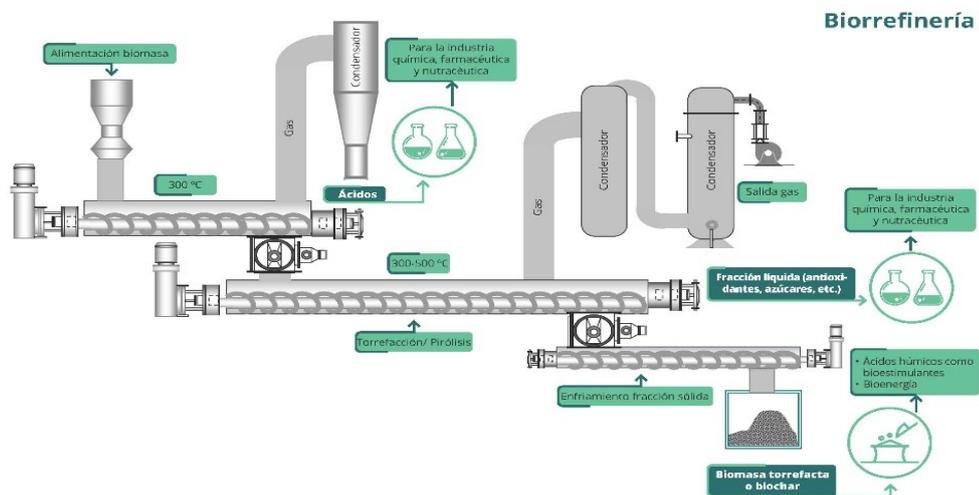


Figura 3. Esquema del proceso de biorrefinería.

A partir de la fracción líquida (*bio-oil* o bioaceite), se pueden extraer una serie de compuestos de interés para la industria nutracéutica, alimentaria, cosmética, farmacéutica y química, como azúcares, antioxidantes (polifenoles), ácidos o resinas fenólicas. Para ello, es necesaria una segunda transformación, que en el proyecto se ha llevado a cabo a escala del laboratorio. Para conseguir implantarlo



a escala industrial, haría falta escalar estas tecnologías. Los resultados referentes al rendimiento y al impacto de la biorrefinería solo hacen referencia a la primera transformación de la biomasa en *bio-oil*.

La fracción sólida obtenida, se conoce como biomasa torrefacta cuando se obtiene a bajas temperaturas (hasta 300°C) o como *biochar* o biocarbón, si se obtiene por encima de los 400°C. A partir de la biomasa torrefacta pueden obtenerse extractos húmicos y fúlvicos, que se utilizan como bioestimulantes en agricultura. El biocarbón, por su parte, puede utilizarse como estructurante del suelo para secuestrar el carbono y mejorar la retención de agua, o como biocombustible.

Fase 4.- Identificación de las principales barreras económicas para la instalación de biorrefinerías locales en el conjunto del territorio. Esta fase incluye el análisis de los costes totales para cada bosque objetivo (costes de los tratamientos silvícolas, de las actuaciones complementarias, astillado, transporte a planta, segundo astillado y tratamiento en biorrefinería) y la producción de cada uno de ellos según tratamiento silvícola seleccionado; identificación de las zonas potenciales a gestionar en el territorio catalán, según afectaciones de los últimos diez años y mapas de los efectos del cambio climático; y, finalmente, la obtención de los precios de entrada de la madera para garantizar la provisión de los productos forestales en planta.

4. Resultados

En cuanto a los tratamientos silvícolas de adaptación y restauración seleccionados según bosque objetivo, los rendimientos y costes finales, son:

- Pinares jóvenes de regenerado de pino carrasco post incendio, zonas donde la regeneración natural después del incendio ha tenido éxito y presentan densidades excesivas. Se estima una superficie cercana a las 28.000 ha repartidas por el litoral y centro de Cataluña, masas puras y mixtas afectadas por incendios entre los años 1986 i 2014. Se prevé realizar: claras del repoblado, tratamiento de los restos de corta, desembosque manual de haces procedentes del margen de la pista (20 metros) y apilado y astillado al borde del camino o a cargador. En este tipo de masas se obtienen unas 10 t/ha con un coste de 2.400 €/ha.
- Pinares adultos afectados por una perturbación natural reciente distinta del fuego (daño biótico o abiótico). El aumento de la aridez debilita la vegetación y la hace más proclive a plagas y enfermedades, y a sufrir efectos más adversos. Esto es especialmente relevante en pinares densos o con un sotobosque abundante de quercíneas. Las afectaciones son cíclicas y con un grado y una mortalidad difíciles de predecir. La propia perturbación, o las cortas sanitarias posteriores, pueden generar masas desestructuradas que comprometen sus funciones productivas y ecológicas. En este caso, la necesidad de actuación está más localizada: masas puras y mixtas de pino carrasco con encina, afectadas por tornados en 2014 y 2015,



en un total de 520 ha (comarca del Vallès Occidental); y masas puras y mixtas de pino piñonero con encina afectadas por una plaga de coleópteros, entre 2015 y 2017, en un total de 15.000 ha (comarca del Maresme). Las actuaciones identificadas a realizar son: diferentes tipos de cortas según estructura y volumen existente después de unos años del paso de la perturbación (en algunos casos sanitarias), el desembosque de la madera, desbroces selectivos, tratamiento de los restos vegetales, plantación de enriquecimiento y astillado de los productos. Se obtienen unas 20 t/ha i un coste de 3.350 €/ha (al que se añadiría el coste de la plantación según densidad final deseada).

- Alcornocales envejecidos con una densidad de árboles excesiva y síntomas de decaimiento o alcornocales muy vulnerables a sequías o incendios que es necesario adaptar a las nuevas condiciones climáticas. Se considera que, actualmente, dos tercios de los alcornocales catalanes en producción están ubicados en zonas que quedarán fuera de su rango ecológico en el año 2050. En este caso, se plantean los tratamientos en las zonas ecológicamente más aptas, centrando o priorizando los esfuerzos de mantenimiento y regeneración en unas 29.300 ha, masas puras y mixtas de alcornoque y encina y matorral muy denso de brezo y madroño. En este tipo de bosques se plantea realizar: cortas selectivas y desembosque, desbroce selectivo manual y tratamiento de los restos vegetales, extracción manual del matorral en la franja cercana de la pista, apilado y astillado del material y plantación de densificación. Se considera la obtención de unas 15 t/ha de la parte aérea y unas 10 t/ha de la parte arbustiva, y un coste de 2.690 €/ha (al que se añadiría el coste de la plantación posterior).

Una vez implementados los tratamientos de adaptación y restauración forestal en los bosques objetivo, la biomasa resultante se transporta a la planta biorrefinería para el procesado de los productos. En el proyecto LIFE BIOREFFORMED, la planta piloto estaba ubicada a una distancia media de los bosques objetivo entre 100 y 200 km, si bien a partir del estudio realizado, se plantea la ubicación de las futuras plantas de procesado a unos 40-80 km de distancia máxima del bosque para reducir los costes de transporte.

En la biorrefinería piloto, se ha transformado la biomasa forestal mediante el proceso de pirólisis y se ha separado la fracción líquida y la fracción sólida. Para producir *bio-oil* y para obtener compuestos de interés de mayor valor añadido y *biochar*, la temperatura óptima de pirólisis ha sido de 450°C. Para la producción de bioestimulantes a partir de la fracción sólida, de interés en la agricultura, la temperatura de torrefacción óptima ha sido de 300°C.

Los productos obtenidos del *bio-oil* han sido compuestos antioxidantes (polifenoles) (5g por kilogramo de biomasa), azúcares (10 g por kilogramo de biomasa), ácidos (25g por kilogramo de biomasa) y resinas fenólicas. De la fracción sólida se ha obtenido ácidos húmicos y biochar.



Los bioproductos y las posibles aplicaciones se pueden observar en la Tabla 1. Los ácidos son los bioproductos de la fracción líquida de mayor rendimiento, se pueden obtener entre 12 y 26 g de producto por cada kg de biomasa. Los rendimientos por especie han sido muy parecidos. Entre las especies arbóreas, los pinos (sobre todo el pino carrasco) han sido los mejores para la producción de compuestos antioxidantes (como el guayacol, catecol, fenol y vainillina, entre otros). El castaño y el alcornoque son los que han dado mejores resultados en la producción de extractos húmicos como estimulantes de la actividad microbiana del suelo y del crecimiento vegetal. Las especies arbustivas, como el brezo, han dado muy buenos resultados, sobre todo en lo que se refiere a la producción de ácidos, como el ácido acético.

Tabla 1. Rendimientos (g producto/kg biomasa) y uso potencial de los productos obtenidos en el procesado de la biomasa de los bosques objetivo.



Rendimientos	(g/kg)	Bioproductos	Regenerado pino carrasco	Pino carrasco	Pino piñonero	Encina	Alcornoque	Castaño	Madroño	Brezo	Aplicaciones		
Fración	Líquida	Ácidos	Ácido acético	ácido fórmico	21,1	17,6	16	19,8	17,6	11,5	11,9	25,6	Productos químicos, farmacéuticos o aditivos alimentarios.
Azúcares	Levoglucosa	8,3	9,5	6,9	5,9	2,7	5,9	2,9	9,6	Compost de alto valor en industria química y alimentaria.			
Aldehídos y cetonas	Hidroxicetona	Metilciclopentolona	Furfural, 5HMF	6,4	5,4	3,8	6,0	2,9	2,1	2,4	5,4	Diversidad de aplicaciones en la industria química y alimentaria.	
Antioxidantes	Fenol, Catecol, Vainillina, Guayacol	p-cresol, p-cresol	4,4	4,6	4,0	2,5	1,1	0,7	0,6	2,3	Industria cosmética, farmacéutica, nutracéutica, química y alimentaria.		
Resinas fenólicas	2,4	1,43	3,3	2,0	1,3	2,3	1,7	2,0	Adhesivo o aditivo en pinturas				
Lignina pirolítica	13,5	8,1	18,9	11,4	7,6	13,2	9,5	11,4	Combustible, precursor de materiales carbonosos y síntesis de adhesivos i aditivos				
Fración	sólida	Ácidos húmicos	(g/100 ml)	Extracción a 300°C	1,4	1,2	1,5	1,55	2,3	2,4	1,6	1,4	Compost agrícola
Biochar	(MJ/kg)	Extracción a 450°C	25,8	26,2	29,9	24,2	16,6	22,7	22,1	23,1	Compost agrícola o biocombustible		



En cuanto a los costes operativos de la biorrefinería, el coste más elevado es la compra de biomasa seguido del coste de electricidad. Para poder cubrir los costes de producción y transporte se necesitaría poder financiar la materia prima a 200 €/t, según tratamiento silvícola, que podría reducirse según la ubicación de la planta, y al que debería añadirse el margen de beneficio a las personas gestoras del bosque. El alto consumo de electricidad dificulta su ubicación en zonas con difícil acceso a la red y hay que explorar alternativas para generar energía como el uso de la propia biomasa o el *biochar* o la energía solar.

Para que la biorrefinería empiece a ser rentable, a partir del pago de la materia prima a 80 €/t, se ha estimado una alimentación mínima de 1-2t de astilla/hora, lo que supone aproximadamente de 6000 a 10.000t de biomasa al año.

5. Discusión

Se ha desarrollado con éxito un proceso integral multiobjetivo de extracción y separación basado en técnicas de biorrefinería de compuestos de valor añadido a partir del *bio-oil*, de forma que con un solo proceso en cascada se puede obtener todos los productos químicos descritos, con una pureza igual o superior a la esperada.

El *biochar* generado en este proceso ha demostrado no tener ningún efecto inhibitorio de la actividad microbiana en el suelo, por lo que puede utilizarse como estructurante del suelo y con interés para la retención de agua. Este *biochar* también puede utilizarse como biocombustible con un rango de poder calorífico inferior, entre 23 y 30MJ/kg.

Los bioestimulantes obtenidos a partir de la biomasa forestal torrefacta a 300°C son de alta calidad y todavía tienen margen de mejora. Sus propiedades son similares a los bioestimulantes obtenidos a partir de compost vegetal.

De los distintos tipos de biomasa forestal procesada en el proyecto, se han obtenido cantidades similares de compuestos de interés. Por tanto, se puede concluir que no hay diferencias importantes entre las especies arbóreas de maderas duras o blandas, ni entre estas y las especies arbustivas. Por otro lado, existe la posibilidad de mezclarlas y dar salida a la biomasa de difícil aprovechamiento alternativo, tales como i) matorral o arbolado pequeño con corteza y hojas procedentes de desbroces o claras de repoblado, ii) leña (madera y corcho) procedente de cortas de selección en alcornoques o iii) madera mezclada de diferentes especies y características procedente de actuaciones post perturbación que generan poco volumen de madera.

El aprovechamiento de la biomasa en biorrefinerías puede justificar la extracción parcial del conjunto de los recursos procedentes de tratamientos de adaptación y



restauración, si bien los costes de extracción, poco mecanizados, son muy elevados y los rendimientos son reducidos, una media de 13t/ha. Para reducir el coste a la entrada de la biorrefinería y aproximarlos a los 100€/t sería necesario conseguir valores de producción agrupada, de diferentes bosques y rendimientos, alrededor de las 35 t/ha.

El escenario óptimo sería hacer rentable la biorrefinería con plantas pequeñas, locales, lo cual permitiría reducir los costes y el impacto del transporte. Tanto para mejorar la rentabilidad económica como para reducir el impacto ambiental de todo el proceso, habría que optimizar las operaciones de extracción de la biomasa y su transporte, lo que pasa por situar las biorrefinerías de forma estratégica en el territorio y optimizar las operaciones de pretratamiento (almacenamiento y segundo astillado) y la carga de producto a procesar.

6. Conclusiones

Es viable técnicamente el uso de las principales especies forestales testadas en este tipo de biorrefinería, pero sería necesario analizar el producto de segunda transformación para concretar el producto de sustitución a obtener y valorar la viabilidad económica de la instalación de este tipo de procesos.

En cada territorio y para las diferentes tipologías forestales existentes se podría analizar el impacto de la implementación de una biorrefinería local, desde el punto de vista ambiental, económico y social, buscando la mejor propuesta de gestión forestal adaptada a las necesidades de este. La instalación de biorrefinerías locales podría mejorar la economía de cada territorio y los futuros servicios ecosistémicos a proveer.

En el caso de los tratamientos de adaptación y restauración, la rentabilidad de todo el proceso pasaría por obtener productos a la salida de la biorrefinería de gran valor comercial y al mismo tiempo cofinanciar con dinero público las actuaciones de mayor inversión y menor rentabilidad, como en las actuaciones post incendio.

Este tipo de plantas permitiría contribuir de forma clara en las estrategias europea, estatal y regional de bioeconomía y en la adaptación de los bosques a los efectos negativos, cada vez más importantes, del cambio climático.

7. Agradecimientos

Al proyecto LIFE BIOREFORMED (LIFE 19 ENV/ES/000544), cofinanciado por la Comisión Europea, y todas las personas socias y colaboradoras que han participado en la redacción de los informes de los resultados expuestos en este artículo.

8. Bibliografía



BAIGES, T.; CERVERA, T.; PALERO, N.; PEDRET, M., Puy, N. ROVIRA, P., VAYREDA, J., FÁBREGAS, E., GABARRELL, X., AYXELA, L.; 2024. Uso de la biomasa forestal en procesos de biorrefinería. ¿Una oportunidad para poner en valor la biomasa generada en actuaciones silvícolas de adaptación y restauración? Resultados del proyecto LIFE BIOEFFORMED (2019-2024). Centre de la Propietat Forestal. 23. Santa Perpetua de Mogoda.

CENTRE DE CIÈNCIA I TECNOLOGIA FORESTAL DE CATALUNYA; 2024. LAYMAN'S REPORT: Implementing a Mediterranean biorefinery to boost forest management through the production of value-added products (LIFE 19 ENV/ES/000544). LIFE BIOEFFORMED (2019-2024). 13. Solsona.

CENTRE DE CIÈNCIA I TECNOLOGIA FORESTAL DE CATALUNYA I UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA; 2024. Deliverable B4: Report on the analytical characterisation of the products obtained from the different types of biomasses. LIFE BIOEFFORMED (2019-2024). 21. Bellaterra.

CENTRE DE LA PROPIETAT FORESTA; 2024. Report on the socio-economic impact of forest biomass in biorefinery uses. LIFE BIOEFFORMED (2019-2024). 25. Santa Perpètua de Mogoda.

ENERGIES TÈRMiques Bàsiques, SL: 2023. Implementing a Mediterranean biorefinery to boost forest management through the production of value-added products. LIFE BIOEFFORMED (2019-2024). 35. Solsona.