



Ús de la biomassa forestal en processos de biorefineria

Una oportunitat per posar en valor la biomassa generada en actuacions silvícoles d'adaptació i restauració?

DOCUMENT TÈCNIC PER AL SECTOR FORESTAL



Edita: Centre de la Propietat Forestal. Generalitat de Catalunya. Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona). www.cpf.gencat.cat

Cita recomanada: Baiges, T., Cervera, T., Palero, N., Pedret, M., Puy, N., Rovira, P., Vayreda, J., Fàbregas, E., Gabarrell, X., Ayxela, L. (2024). Ús de la biomassa forestal en processos de biorefineria. Una oportunitat per posar en valor la biomassa generada en actuacions silvícoles d'adaptació i restauració? Resultats del projecte LIFE BIOEFFORMED (2019-2024).

Disseny gràfic i maquetació: CTFC

lifebiorefformed.eu



El projecte LIFE BIOEFFORMED ha estat cofinançat pel Programa LIFE Environment and Resource Efficiency de la Unió Europea



Socis



Cofinançador



ÍNDEX

1/ Ús de la biomassa forestal en processos de biorefineria. Una oportunitat per posar en valor biomassa generada en actuacions silvícoles d'adaptació i restauració?	4
El projecte LIFE BIOREFORMED (2019-2024)	4
Biomassa procedent d'actuacions d'adaptació i restauració de suredes i pinedes mediterrànies	5
Quins productes s'obtenen en una biorefineria?	6
2/ Principals resultats del projecte LIFE BIOREFORMED	8
Procés i productes finals obtinguts	8
Eficiència dels diferents tipus de biomassa forestal testada	9
Rendiment i impacte de l'extracció de biomassa forestal	10
Rendiment i impacte de la biorefineria	11
3/ Aprofitament en biorefineria de biomassa procedent de pinedes denses de regenerat postincendi de pi blanc	12
Actuacions d'adaptació i restauració forestal recomanades	13
Tipus de biomassa disponible per a la biorefineria	13
Rendiments i costos associats a les operacions d'extracció i transport	13
Principals reptes tècnics i logístics	14
Productes de biorefineria obtinguts i rendiments	14
4/ Aprofitament en biorefineria de biomassa procedent de pinedes afectades per perturbacions naturals (biòtiques o abiòtiques)	16
Actuacions d'adaptació i restauració forestal recomanades	17
Tipus de biomassa disponible per a la biorefineria	17
Rendiments i costos associats a les operacions d'extracció i transport	17
Principals reptes tècnics i logístics	18
Productes químics obtinguts i rendiments	18
5/ Aprofitament en biorefineria de biomassa procedent de la gestió d'adaptació de suredes al nou context climàtic	20
Actuacions d'adaptació i restauració forestal recomanades	21
Tipus de biomassa disponible per a la biorefineria	21
Rendiments i costos associats a les operacions d'extracció i transport	22
Principals reptes tècnics i logístics	22
Productes químics obtinguts i rendiments	23

1

Ús de la biomassa forestal en processos de biorefineria. Una oportunitat per posar en valor biomassa generada en actuacions silvícoles d'adaptació i restauració?

La biomassa forestal primària és un producte renovable amb un alt potencial per contribuir a la transició envers una bioeconomia inclusiva, que augmenti, alhora, la resiliència dels paisatges agroforestals. Dins dels usos possibles de la biomassa forestal, l'obtenció de components químics per a diferents indústries mitjançant processos de biorefineria és vista com una alternativa cada cop més viable per substituir compostos que avui són derivats del petroli.

D'altra banda, els boscos mediterranis es troben en un moment de transició: cada cop es fa més palesa la vulnerabilitat de moltes masses forestals al canvi climàtic i als seus efectes (sequeres, plagues, bufaruts, incendis...). Per fer-hi front, hi ha diverses actuacions silvícoles que poden reduir la seva vulnerabilitat, present i futura, o restaurar-ne la funció productiva, social i ambiental. Però aquestes actuacions suposen una inversió econòmica, amb nul o baix retorn a curt termini.

El projecte LIFE BIOREFORMED (2019-2024)

En el marc del projecte LIFE BIOREFORMED (LIFE19 ENV/ES/000544) *Implantació d'una biorefineria mediterrània per impulsar la gestió forestal sostenible a través de l'obtenció de productes de valor afegit* s'ha explorat la possibilitat d'aprofitar en processos de biorefineria part de la biomassa forestal generada en actuacions silvícoles d'adaptació, per a la qual cosa se n'ha analitzat tota la cadena de valor, des de l'extracció al bosc fins a la indústria.

L'objectiu del projecte era doble:

- Testar la idoneïtat de diverses espècies arbòries i arbustives mediterrànies per a ser usades en processos de torrefacció i piròlisi a fi d'obtenir productes químics renovables i biocombustibles.
- Explorar la possible contribució d'aquests productes d'alt valor afegit al finançament d'actuacions silvícoles de millora enfocades a augmentar la resiliència del bosc i de la seva cadena de valor.





Biomassa procedent d'actuacions d'adaptació i restauració de suredes i pinedes mediterrànies

El projecte LIFE BIOREFFORMED ha treballat sobre **tres tipologies de bosc prioritàries**:

- 1. Pinedes joves de regenerat de pi blanc postincendi:** zones on la regeneració natural després de l'incendi ha estat reeixida però que presenten densitats excessives. Si no s'hi apliquen tractaments silvícoles, el creixement s'estanca, s'allarga la fase d'alta vulnerabilitat a nous incendis i, en endarrerir-se la producció de pinyó, es compromet la regeneració futura de l'arbrat en cas d'incendi recurrent.
- 2. Pinedes adultes afectades per una pertorbació natural recent diferent del foc** (dany biòtic o abiòtic). L'augment de l'aridesa debilita la vegetació i la fa més procliu a plagues i malures i a patir-ne efectes més adversos. Això és especialment rellevant en pinedes denses o amb un sotabosc abundant de quercínies. Les afectacions són cícliques i amb un grau i mortalitat difícil de predir. La pertorbació mateixa, o les tallades sanitàries posteriors, poden generar masses desestructurades que comprometen llurs funcions productives i ecològiques.
- 3. Suredes envellides amb una densitat d'arbres excessiva i símptomes de decaïment o suredes molt vulnerables a sequeres o incendis** que cal adaptar a les noves condicions climàtiques. Es considera que, actualment, 2/3 parts de les suredes catalanes en producció estan ubicades en zones que quedaran fora del seu rang ecològic l'any 2050.

Per a cadascuna d'aquestes situacions, s'han definit els tractaments silvícoles més adients des d'un enfocament multifuncional i s'ha cercat optimitzar la restauració de diferents serveis ecosistèmics alhora.

Aquests tractaments s'han aplicat a 9 rodals demostratius, en diferents condicions, per avaluar-ne la viabilitat, tècnica i econòmica, d'utilitzar part de la biomassa generada per obtenir productes d'interès per a la indústria química i identificar-ne les limitacions i oportunitats.

Les espècies i tipus de biomassa de les quals s'ha testat la viabilitat en processos de biorefineria han estat:

1. Pi blanc jove (*Pinus halepensis*): fusta amb escorça fina, branques i fulles.
2. Pi blanc (*Pinus halepensis*): fusta amb escorça.
3. Pi pinyer (*Pinus pinea*): fusta amb escorça.
4. Alzina (*Quercus ilex*): fusta amb escorça.
5. Alzina surera (*Quercus suber*): fusta amb escorça (suro pelut).
6. Castanyer (*Castanea sativa*): fusta de castanyer mort, amb escorça.
7. Bruc (*Erica arborea*): fusta, branques i fulles.
8. Arboç (*Arbutus unedo*): fusta, branques i fulles.

Quins productes s'obtenen a una biorefineria?

De la biorefineria, s'obtenen sempre 3 fraccions: líquida (*bio-oil*), sòlida (*biochar* o biomassa torrefacta, segons la temperatura del procés) i gas.

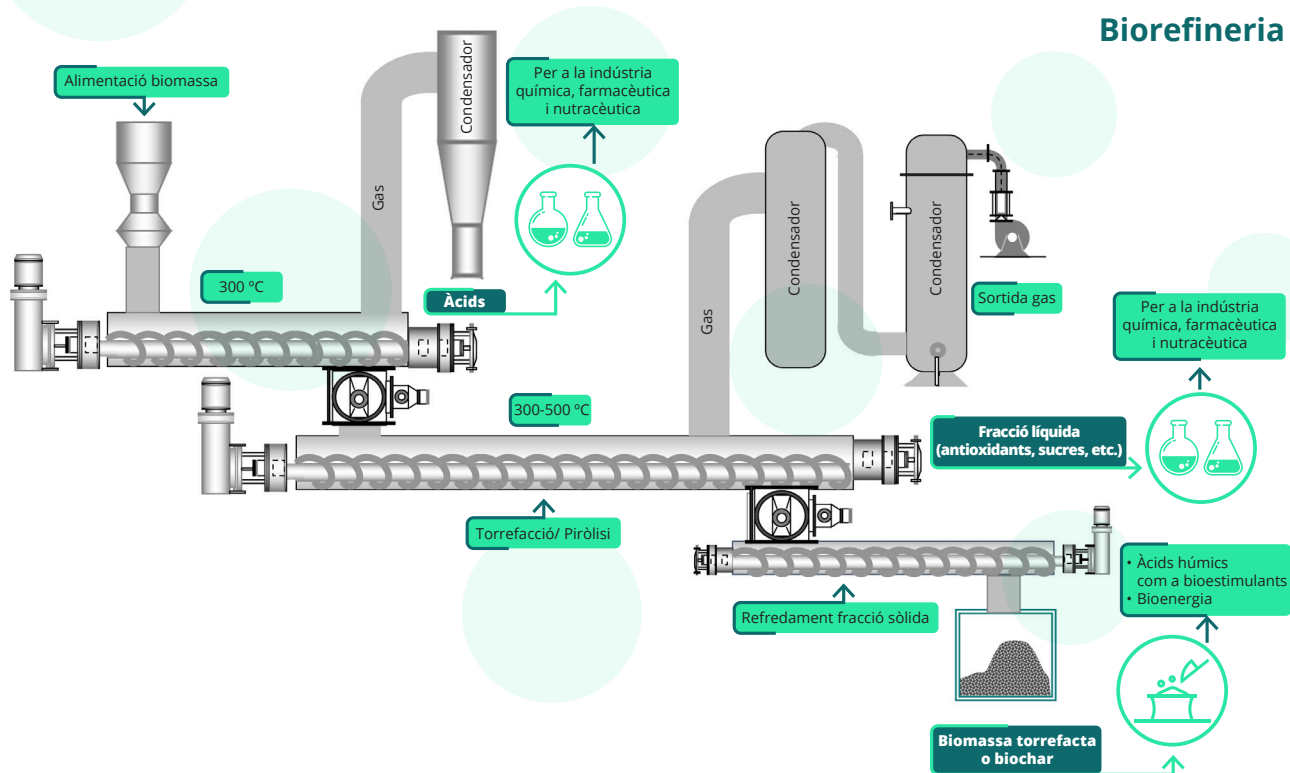


Figura 1. Esquema del procés de biorefineria.

A partir de la **fracció líquida** (*bio-oil*), es pot extreure una sèrie de compostos d'interès per a la indústria nutricional, alimentària, cosmètica, farmacèutica i química com ara sucres, antioxidants (polifenols), àcids o resines fenòliques. Per fer-ho, cal una segona transformació, que al projecte s'ha dut a terme a escala del laboratori. Per aconseguir-lo implantar a escala industrial, cal un escalat d'aquestes tecnologies. Els resultats referents al rendiment i l'impacte de la biorefineria fan referència només a la primera transformació de la biomassa en *bio-oil*.

La **fracció sòlida** obtinguda es coneix com a biomassa torrefacta quan s'obté a baixes temperatures (fins a 300° C) o com a *biochar* (biocarbó) si s'obté a partir de 400° C. A partir de la biomassa torrefacta, es poden obtenir extractes húmics i fúlvics, que s'utilitzen com a bioestimulants en agricultura. El biochar, per la seva banda, pot utilitzar-se com a estructurant del sòl per a segrest de carboni i millora de la retenció d'aigua o com a biocombustible.

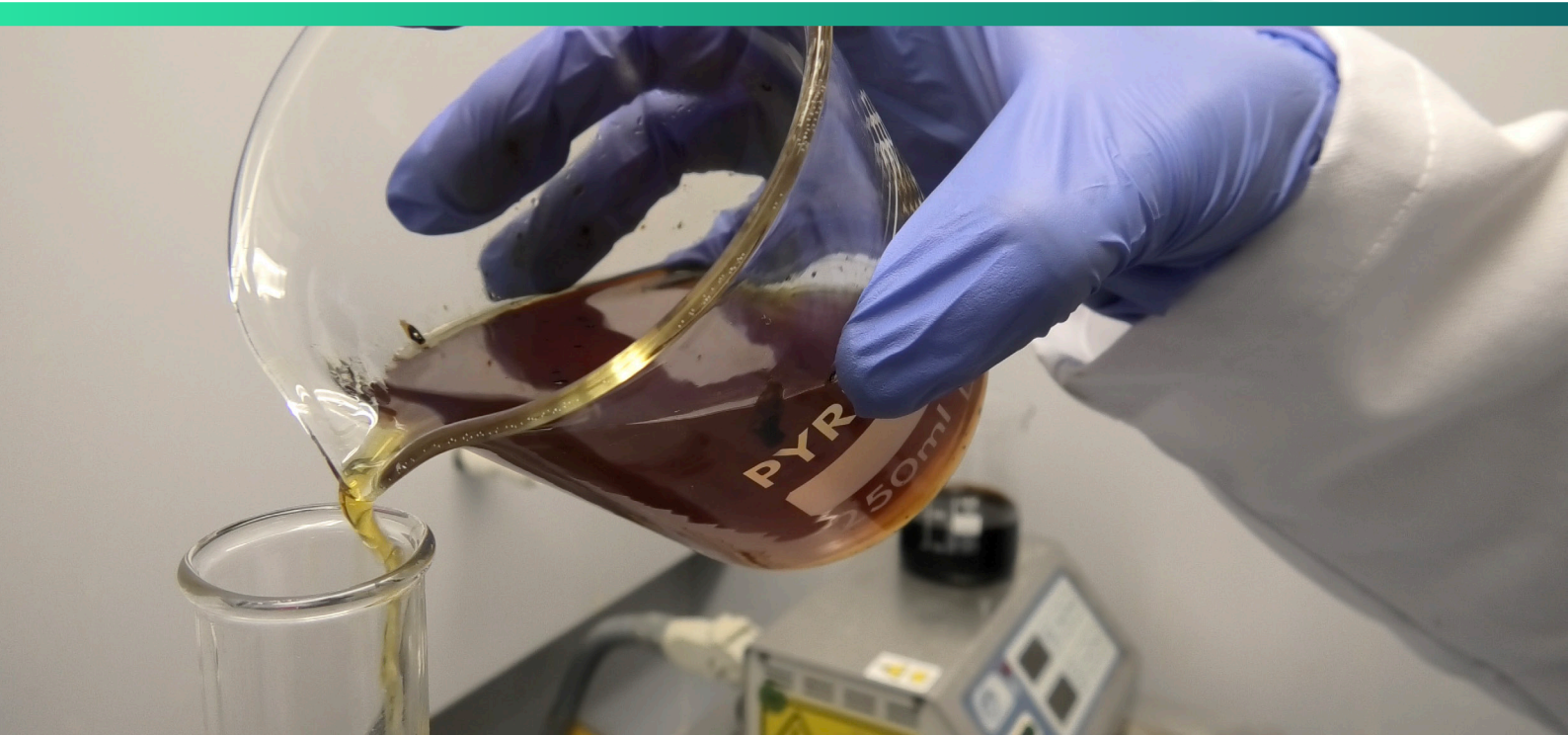


2

Principals resultats del projecte LIFE BIOREFORMED

Procés i productes finals obtinguts

- La biomassa forestal s'ha transformat mitjançant el procés de la piròlisi i s'ha obtingut **biochar (sòlid)** i **bio-oil (líquid)**, amb diferents usos segons les seves propietats.
- S'ha observat que la **temperatura òptima** per produir bio-oil i per obtenir compostos d'interès de major qualitat i biochar (biocarbó), a partir de biomassa forestal, **són els 450° C**. En canvi, per a la producció de bioestimulants a partir de la fracció sòlida, d'interès en l'agricultura, la temperatura òptima ha estat de 300° C.
- Els **productes obtinguts del bio-oil a 450 °C** del pi blanc han estat compostos **antioxidants** (4 g per kg de biomassa), **sucres** (11 g per kg de biomassa), **àcids** (35 g per kg de biomassa) i **resines fenòliques**.
- S'ha desenvolupat amb èxit un **procés integral multiobjectiu** d'extracció i separació basat en tècniques de **biorefineria** de compostos de valor afegit a partir del bio-oil, de forma que amb un sol procés es pot obtenir tots els productes químics descrits, amb una puresa igual o superior a l'esperada.
- El **biochar** generat en aquest procés ha demostrat no tenir cap efecte inhibidor de l'activitat microbiana al sòl, per la qual cosa pot utilitzar-se com a **estructurant del sòl** i amb interès per a la **retenció d'aigua**. Aquest biochar també es pot utilitzar com a **biocombustible** amb un rang de poder calorífic inferior entre 23 i 30 MJ/kg.
- Els **bioestimulants obtinguts a partir de la biomassa forestal torrefacta a 300° C** són d'**alta qualitat** i similars als obtinguts a partir de compost vegetal.



Eficiència dels diferents tipus de biomassa forestal testada

- Dels diferents tipus de biomassa forestal processada en el projecte, s'han obtingut quantitats similars de compostos d'interès. Per tant, es pot concloure que **no hi ha diferències importants entre les espècies arbòries de fustes dures o toves, ni entre aquestes ni les espècies arbustives**.
- Això suggereix, d'una banda, la **viabilitat de l'ús de totes les espècies forestals testades en aquest tipus de biorefineria**, i, de l'altra, la **possibilitat de barrejar-les i de donar sortida a biomassa de difícil aprofitament alternatiu**, com ara i) matollar o arbrat petit amb escorça i fulles procedent d'estassades o aclarides de plançonedes, ii) suro pelut (fusta i suro) procedent de tallades de selecció en suredes, o iii) fusta barrejada de diferents espècies i característiques procedent d'actuacions postpertorbació que generen poc volum de fusta.
- Entre les **espècies arbòries** estudiades, els **pins** (sobretot el pi blanc) han estat els millors per a la producció de compostos antioxidants (com el guaiacol, catecol, fenol i vanil·lina, entre d'altres). El **castanyer** i l'**alzina surera** són els que han donat millors resultats en la producció d'extractes húmics com a estimulants de l'activitat microbiana del sòl i del creixement vegetal. Les **espècies arbustives**, com el bruc, han donat molt bons resultats, sobretot pel que fa a la producció d'àcids, com ara l'àcid acètic.

Taula 2.1. Rendiments a 400 °C (g producte/kg biomassa) i ús potencial dels productes obtinguts en el processament de la biomassa procedent dels rodals demostratius a la biorefineria del LIFE BIOREFORMED

Bio-productes extrets		Regenerat pi blanc	Pi blanc	Pi pinyer	Alzina	Alzina surera	Castanyer	Arboç	Bruc	
Fracció líquida	Àcids Àcid acètic Àcid fòrmic	21,1	17,6	16,0	19,8	17,6	11,5	11,9	25,6	Productes químics, farmacèutics o additius alimentaris
	Sucres Levoglucosa	8,3	9, 5	6,9	5,9	2,7	5,9	2,9	9,6	Compost d'alt valor econòmic amb aplicacions en la indústria química i alimentària pel seu ús com a plataforma química
	Aldehids i cetones Hidroxiacetona Metilciclopentenolona Furfural, 5HMF	6,4	5,4	3,8	6,0	2,9	2,1	2,4	5,4	Diversitat d'aplicacions en la indústria química i alimentària, des d'aromatitzants fins a plataforma química
	Antioxidants Fenol, Catecol, Vanil·lina, Guaiacol p-cresol, p-cresol	4,4	4, 6	4,0	2,5	1,1	0,7	0,6	2,3	Indústria cosmètica, farmacèutica, nutricèutica, química i alimentària, pel seu ús com a antioxidants, aromatitzants, i reactius per la síntesi de resines fenòliques
	Resines fenòliques	2,38	1,43	3,33	2,01	1,34	2,33	1,67	2,01	Adhesiu o additiu en pintures
	Lignina pirolítica	13,5	8,1	18,9	11,4	7,60	13,20	9,50	11,40	Combustible, precursor de materials carbonosos i síntesi d'adhesius i additius
Fracció sòlida	Àcids húmics (g/ 100mL) Extracció a 300 °C	1,37	1,19	1,46	1,55	2,31	2,37	1,63	1,43	Adobat de sòls agrícoles
	Biochar (M J/ kg) Extracció a 450 °C	25,8	26,2	29,9	24,2	16,6	22,7	22,1	23,1	Esmena de sòl agrícola o bio-combustible

Rendiment i impacte de l'extracció de biomassa forestal

- **L'aprofitament de la biomassa en biorefineries pot justificar l'extracció parcial de la biomassa procedent de tractaments d'adaptació/restauració**, biomassa que, en moltes ocasions, queda trossejada al bosc.
- **És important que en l'extracció de biomassa per biorefineria en boscos adults es deixin les capçades al bosc**, ja que la capçada (branques i fulles) conté un 60% del nitrogen i potassi de la part aèria i fins a un 50% del fòsfor, de molt difícil recuperació natural. **Només en l'extracció de biomassa de regenerat de pi blanc o matollar es proposa arreu i amb l'extracció de l'individu sencer**, però l'aprofitament es concentra **a les zones accessibles** (franges a banda i banda dels camins), cosa que a escala de rodal **representa un 10% de la biomassa total** i contribueix, alhora, a la prevenció dels incendis forestals.
- **Els colls d'ampolla de l'aprofitament de biomassa procedent d'actuacions d'adaptació/restauració són els baixos rendiments/ha** (el rendiment mitjà als rodals demostratius ha estat de 13 t/ha) **i els alts costos d'extracció**, que actualment és manual. Caldria compensar els baixos rendiments en tones, per exemple, reduint els costos de transport amb biomassa local, de proximitat a la planta, o amb l'ús combinat de biomassa procedent d'altres actuacions més productives.
- Després de les actuacions, l'estoc de carboni aeri és, lògicament, menor a causa de la tallada i extracció de part de la biomassa, però **la reducció en l'estoc de CO₂ només es pot comptabilitzar com a emissió neta de CO₂ si a curt termini el material es destina a biocombustible**. S'espera un **efecte embornal de CO₂** a causa d'un augment del creixement com a conseqüència del tractament, però encara és imperceptible pel poc temps transcorregut.
- Una gestió forestal que s'acompanyi de la **valorització del patrimoni socioecològic històric** (tangibles i intangibles) lligat a aquell bosc pot promoure els **Serveis Ecosistèmics Culturals** que ofereixen les finques forestals. En aquest sentit, accions com ara el manteniment d'expressions orals o **coneixement tradicional sobre el bosc i la seva gestió** fomenten la transmissió de coneixement, que **és alhora una estratègia de resiliència**.



Rendiment i impacte de la biorefineria

- Perquè la biorefineria comenci a ser rendible, cal una alimentació d'1-2 t d'estella/hora, cosa que suposa aproximadament de 6.000 a 10.000 t de biomassa a l'any. **L'escenari òptim seria fer rendible la biorefineria amb plantes petites**, fet que permetria reduir els costos, operatius i d'inversió inicial, i l'impacte del transport i obriria la porta a la possibilitat que la planta fos mòbil.
- Tant per millorar la rendibilitat econòmica com per reduir l'impacte ambiental de tot el procés, caldria optimitzar les operacions d'extracció de la biomassa i el seu transport, fet que implica **situar les biorefineries de manera estratègica al territori i optimitzar les operacions de pretractament** (emmagatzematge i segon estellat) i la càrrega de producte a processar.
- Dins dels costos operatius de la biorefineria, **el cost més elevat és la compra de biomassa seguit del cost d'electricitat**. L'alt consum d'electricitat en dificulta la ubicació en zones amb difícil accés a la xarxa i cal explorar alternatives per generar energia com ara l'ús de la pròpia biomassa o el biocarbó o l'energia solar.
- **Buscar la producció de bio-oil a partir de la biomassa té sentit, des del punt de vista ambiental**. La biorefineria, amb una temperatura de piròlisi de 400°C, ha resultat ser una alternativa viable i sostenible: la producció de bio-oil i àcids és **3,7 vegades menys impactant que la producció combinada dels mateixos productes mitjançant processos industrials**. Quant a emissions de CO₂eq, **l'impacte global és de 0,5 kg de CO₂eq/kg de biomassa entrada per a la majoria dels productes**, amb la major part associada a l'estellat, seguit dels treballs forestals i el transport.
- En funció de com s'acabi tancat el 2026 la regulació europea de certificació d'emissions de CO₂, podria ser factible complementar la venda dels productes generats amb la **venda de crèdits de CO₂ lligats a la producció de biochar** com a embornal de carboni, el que contribuiria a millorar la rendibilitat de la biorefineria i el seu impacte global.



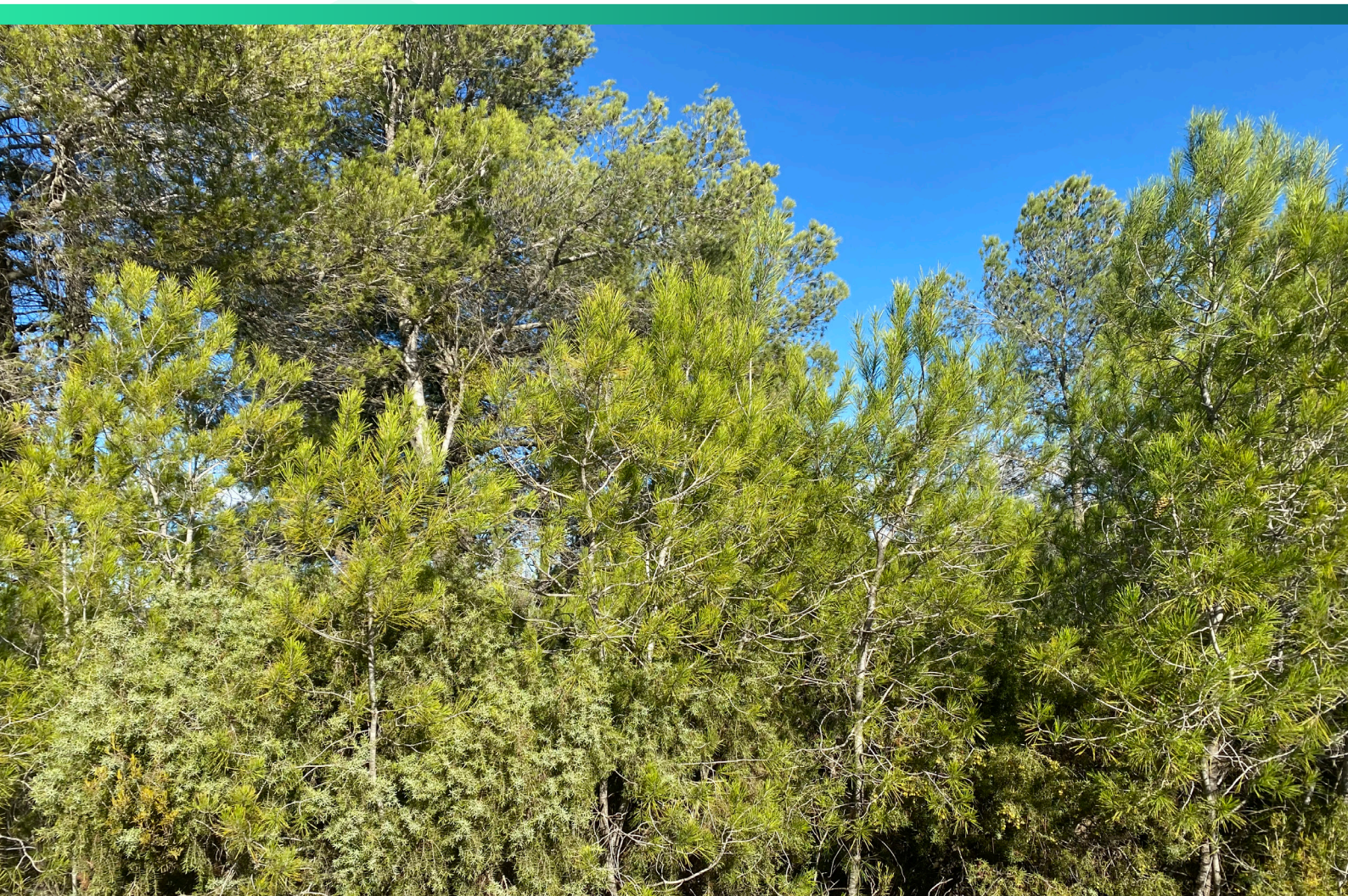
3

Aprofitament en biorefineria de biomassa procedent de pinedes denses de regenerat postincendi de pi blanc

El pi blanc és una espècie extremadament adaptada al foc i al clima per la seva gran capacitat de colonització de sòls pobres; una alta resistència als períodes de sequera; la presència d'un banc de llavors de dosser (pinyes de seròtina) que es dispersen després d'un incendi, i la seva precocitat en la producció de llavors viables. Aquestes dues últimes característiques mostren l'adaptació de l'espècie a una elevada recurrència del foc.

A Catalunya, els boscos dominats pel pi blanc (*Pinus halepensis*) cobreixen aproximadament 315.000 hectàrees. Durant el període entre els anys 1986 i 2020, s'han cremat un total de 40.000 hectàrees d'aquesta espècie, de les quals s'estima que més de la meitat (unes 28.000) tenen un regenerat de pi sobre el qual ja es podrien aplicar tractaments silvícoles. La densitat del regenerat natural de pi blanc després d'un incendi sol ser alta, encara que, si la recurrència d'incendis és elevada, la regeneració de l'arbrat es pot veure compromesa.

El període que va des del reclutament de plançons fins a l'establiment d'un bosc adult (fase de regeneració) és el període amb major risc ambiental i socioeconòmic. És durant aquest període que la baixa rendibilitat i els elevats costos d'inversió, juntament amb la falta d'ingressos, porten a l'abandonament de la gestió forestal, cosa que suposa una amenaça per a la conservació del bosc, la seva biodiversitat i la seva cadena de valor associada.



Actuacions d'adaptació i restauració forestal recomanades

La regulació ràpida de l'elevada densitat de peus disminueix, a mitjà termini, la vulnerabilitat al foc, permet el desenvolupament dels arbres sense limitacions quant als recursos a causa de la competència, evita l'estancament en el desenvolupament dels arbres i accelera l'aparició de pinyes que assegurin la continuïtat de la massa si es torna a produir un incendi. Les actuacions recomanades són:

- **Aclarida de plançoneda.** Es redueix considerablement la densitat d'arbres deixant tots els peus a una distància similar els uns dels altres i ajustant la densitat final a l'òptim segons el model de gestió triat. Segons l'estadi de desenvolupament, es pot fer una aclarida baixa (manual o mecanitzada) o una aclarida selectiva eliminant la competència directa als arbres que ja s'hagin diferenciat.
- **Tractament de les restes de tallada.** Es trosseja l'abundant quantitat de peus sencers tallats i es reparteix de manera uniforme per evitar l'acumulació de biomassa seca i accelerar-ne la descomposició. Aquesta pràctica redueix també el risc d'incendis, aporta nutrients al sòl i millora la retenció d'aigua.

Tipus de biomassa disponible per a la biorefineria

En les aclarides de plançoneda, no hi ha un aprofitament forestal comercial: els pins, de diàmetres sovint no inventariables (<7,5 cm) i fins a diàmetres no superiors a 15 cm, es tallen i tracten com a restes, se'ls trosseja i se'ls deixa *in situ*.

En aquest projecte, es proposa l'**extracció dels pins tallats a banda i banda de les pistes principals** per a la seva revaloració econòmica a través del seu aprofitament en una biorefineria. Es tracta de **feixos de pi blanc jove** que es trituraran sencers, de manera que l'estella generada inclourà **biomassa de fusta prima de pi amb escorça, branques i fulles**.

Per a aquest tipus de tractament, acotat al marge dels camins, als rodals demostratius del projecte s'ha estimat un rendiment d'unes 10 t/ha.

Rendiments i costos associats a les operacions d'extracció de biomassa

Per a l'aprofitament de pins de diàmetre petit, es recomana tallar els pins a la base del peu i **extreure els arbres sencers per maximitzar la quantitat de producte i facilitar l'extracció mitjançant feixos**. El desembosc dels feixos és una tasca costosa. Per això, es proposa únicament extreure feixos vora pista i aprofitar que, segons la normativa vigent, s'han de deixar 20 m a banda i banda de les pistes lliures de restes vegetals. Les operacions i els costos dels treballs recomanats es mostren a la taula 3.1.

Taula 3.1. Cost unitari¹ de cada operació o treball forestal (sense IVA) en la gestió postincendi

Operació	Cost unitari (€/ha)
Aclarida de plançoneda manual amb motoserra	1.250
Tractament de restes amb motoserra	650
Desembosc manual de feixos procedents del marge de la pista (€/ha)	360
Estellat i apilat vora camí o a carregador amb tractor amb estelladora	150 ²

¹ Els valors s'han obtingut a partir de l'anàlisi de diferents tarifes publicades per l'Administració forestal (preus de referència en publicacions de Forestal Catalana i en la valoració dels costos en la redacció d'IOF i ajuts a la GFS 2024 del CPF), i d'altres segons estimacions i resultats dels treballs del projecte.

² Considerant un aprofitament de 10 t/ha i un cost d'estellat de 15 €/t.

Principals reptes tècnics i logístics

Els tractaments típics no inclouen l'obtenció de productes comercials, per això la seva extracció i transport planteja nous aspectes tècnics a considerar:

- L'aprofitament de pins sencers de petit diàmetre (menor de 15 cm) vora pista altera la dinàmica d'execució de l'aclarida de plançonada.
- L'extracció manual de feixos és inviable econòmicament i feixuga. Quant a la possible mecanització, un estudi anterior sobre l'aprofitament potencial d'aquest tipus de biomassa amb finalitats energètiques (Lopez, 2014, revista Silvicultura 70; <https://shote.nl/IIVvgo>) recomanava l'ús d'una grapa acoblada al tractor més que el desembosc amb cabrestant perquè dona millors rendiments a igual cost horari. Respecte a la tallada, Alcoverro *et al* (2024; revista Silvicultura, 92: <https://shorturl.at/sTKlm>) en proves fetes amb maquinària petita en aquest tipus de regenerat no han trobat millors rendiments que en la tallada manual, però apunten a l'ús de capçals-cisalla i l'aplicació de tallades sistemàtiques com a possible alternativa (<https://tuit.cat/o7lBf>)
- Quant al transport, els feixos de regenerat ocupen molt espai i tenen poc pes; per aquest motiu, l'estellat in situ sembla l'opció més viable.
- La infraestructura ha d'estar condicionada per al pas de camions de transport dels productes forestals, i si s'escau, per a la instal·lació d'una estelladora a peu de pista o carregador.

Productes de biorefineria obtinguts i rendiments

L'aprofitament de biomassa de pi blanc procedent d'aclarides de plançonada en una biorefineria ha permès obtenir compostos químics com ara **antioxidants** (amb un 90% de puresa), **resines fenòliques** (mínim de 30% de substitució del fenol), sucres (mínim de 40% de puresa) i **àcids** (70% de puresa), a més de **biochar**. També s'ha testat la producció de **bioestimulants (esmenes húmiques)** per a l'agricultura a partir de biomassa torrefacta (a 300° C). La taula 3.2 mostra els principals resultats obtinguts als rodals demostratius del projecte.



Taula 3.2. Rendiments a 400 °C (g producte/kg biomassa) i ús potencial dels productes obtinguts en el processament de la biomassa de regenerat de pi blanc a la biorefineria del LIFE BIOREFORMED

Bioproductes extrets		Quantitat de producte obtingut (g/kg de biomassa)	Aplicacions
Regenerat de pi blanc			
Fracció líquida	Àcids	21,10	Productes químics i farmacèutics o additius alimentaris
	Sucres	8,30	Compost d'alt valor econòmic amb aplicacions en la indústria química i alimentària
	Aldehids i cetones	6,40	Diversitat d'aplicacions en la indústria química i alimentària
	Antioxidants	4,40	Indústria cosmètica, farmacèutica, nutricional, química i alimentària, com a antioxidants, aromatitzants i reactius per a la síntesi de resines fenòliques
	Resines fenòliques	2,38	Adhesiu o additiu en pintures
	Lignina pirolítica	13,50	Combustible, precursor de materials carbonosos i síntesi d'adhesius i additius
Fracció sòlida	Bioestimulants (300° C) (g/100 mL)	1,37	Indústria dels agronutrients
	Biochar (450° C) (MJ/kg)	25,80	Biocombustible Esmena de sòl agrícola

D'aquests resultats, cal destacar-ne:

- ✓ **El pi blanc ha estat l'espècie que ha mostrat millor rendiment per a la producció de compostos antioxidants** (com ara guaiacol, catecol, fenol i vanil·lina, entre d'altres) entre totes les espècies testades en aquest projecte.
- ✓ **La biomassa composta per estella de fusta d'arbres petits amb escorça i fulles**, de difícil aprofitament alternatiu, **no suposa un problema per al seu ús en biorefineria**, cosa que obre una porta a l'aprofitament de la biomassa generada en les aclarides de plançonedes de pi blanc postincendi.

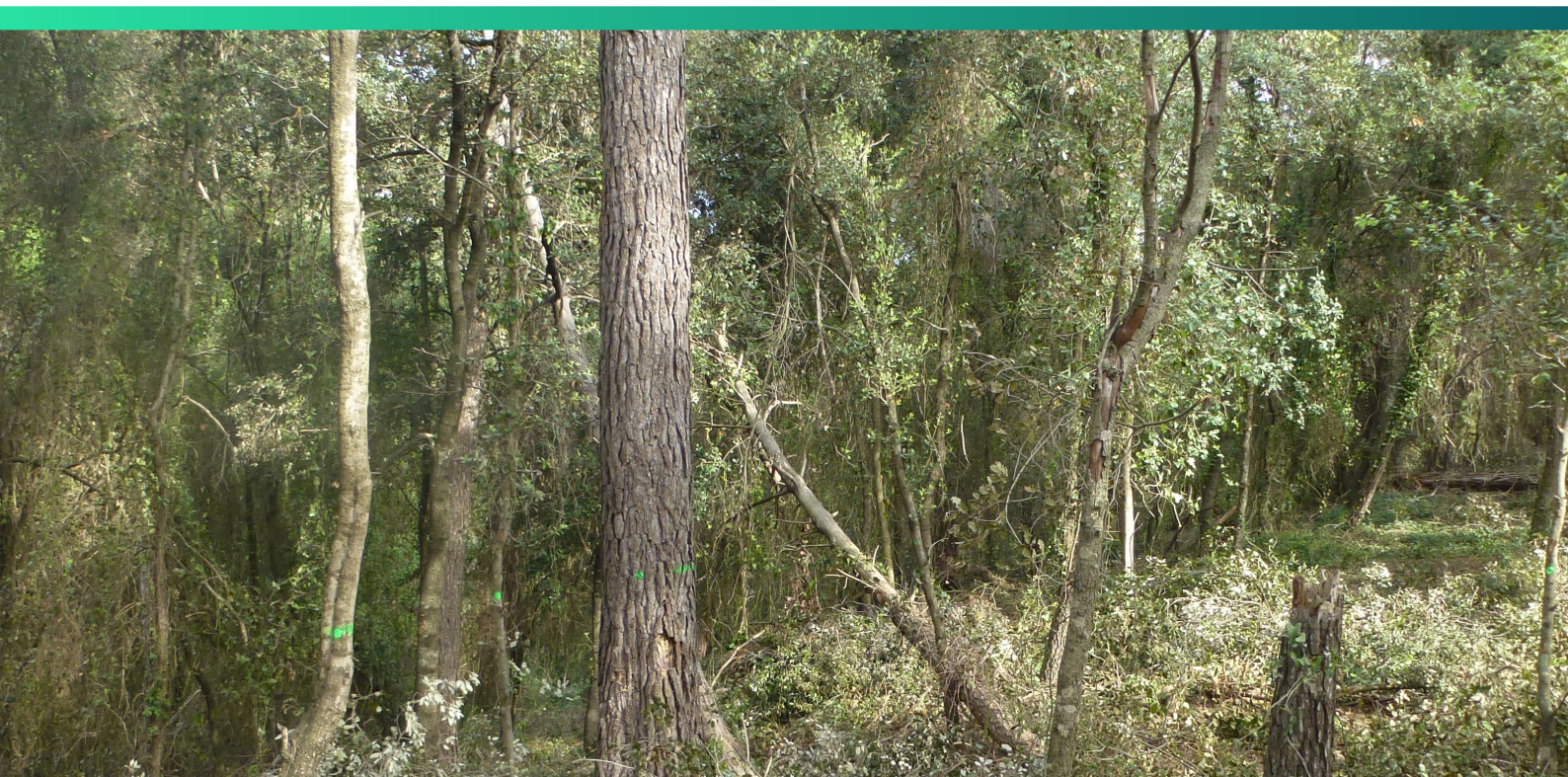
4

Aprofitament en biorefineria de biomassa procedent de pinedes afectades per pertorbacions naturals (biòtiques o abiòtiques)

Les pinedes mediterrànies (*Pinus halepensis*, *Pinus pinea* i *Pinus pinaster*) estan sotmeses a l'efecte de les pertorbacions. A més del foc, que sempre ha estat un element propi d'aquests ecosistemes, els darrers anys aquestes masses s'han vist afectades per períodes de sequera recurrents i més llargs i (o, en combinació) per altres pertorbacions com ara tempestes de vent i atacs de plagues, que n'han reduït notablement la superfície.

Alguns dels **episodis de ventades/nevades** més rellevants dels últims anys a Catalunya han estat els dels anys 2008-09 o 2014 que van afectar milers d'hectàrees i van deixar algunes zones totalment arrasades. L'hivern de 2008-09, els boscos catalans van patir una pertorbació de neu que va causar destrosses a més de 25.000 ha i una altra de vent, en poc més d'un mes de diferència, que va afectar de manera greu o molt greu més de 1.000 ha i va generar entre 150.000 i 180.000 m³ de fusta. L'hivern 2014-15, a les comarques del Vallès Oriental i Occidental, una tempesta de vent va afectar 650 hectàrees, de les quals 520 eren masses de pi blanc i alzina.

Quant als **danyos biòtics**, la recurrència i durada dels períodes de sequera faciliten l'aparició de plagues d'**escolítids**, com el *Tomicus destruens* que va causar una forta afectació entre els anys 2016 i 2018 en masses de pi pinyer del Maresme (un estudi de la DIBA i l'ICGC va estimar que unes 1.500 hectàrees van quedar-ne greument afectades, l'11% del total afectat); de **fongs**, com *Thyriopsis halepensis* que afecta principalment el pi blanc i pi pinyer, o *Diplodia sapinea* i *Dothistroma* sp. que ha experimentat un important brot l'any 2022 després d'una forta pedregada en boscos de pi blanc, pi roig i pinassa, a més d'**altres patògens** que generen grans pèrdues econòmiques i ecològiques.



Actuacions d'adaptació i restauració forestal recomanades

El resultat d'aquestes pertorbacions són pinedes desestructurades i poc capitalitzades que requereixen una sèrie d'intervencions si es vol accelerar la restauració de llurs funcions productives i ecològiques. Just després de l'afectació, es retira part de la fusta afectada de valor comercial i els anys següents convé fer diferents intervencions d'estructuració del bosc en què els productes obtinguts seran pocs i de baix valor econòmic.

Els tipus d'actuacions proposades per millorar el potencial productiu d'una massa afectada per danys biòtics o abiòtics són els següents:

- **Aclarides de millora/tallades selectives/tallades sanitàries:** durant els anys següents a l'afectació, per estructurar la massa i fer-la més resistent i resilient als canvis.
- **Selecció de tanys / estassades selectives:** com a conseqüència de l'obertura a llum després d'una pertorbació, és freqüent la proliferació del matollar i/o del rebrot de quercínies o fulloses que ocupaven el subsòl de la pineda i que, tot i ser una oportunitat per avançar cap a masses mixtes, cal tractar per reduir-ne la vulnerabilitat al foc i la competència o facilitar el regenerat de pi, si es vol mantenir l'espècie.
- **Plantacions d'enriquiment:** si la densitat d'arbres és deficient, es pot plantejar introduir nous plançons per densificar-la o, fins i tot, introduir altres espècies per millorar la biodiversitat del rodal i la seva resiliència.

En boscos adults, aquestes actuacions poden **integrar explícitament criteris de protecció i restauració de la biodiversitat** en els objectius de gestió. Això implica conservar els elements que aporten capacitat d'acollir biodiversitat: espècies arbòries esporàdiques, arbres vius amb microhàbitats o arbres de grans dimensions, i, si s'escau, conservar part de la fusta morta de gran diàmetre conseqüència de la pertorbació.

Tipus de biomassa disponible per a la biorefineria

La biomassa generada en les actuacions de restauració postpertorbació està formada per petits volums de fusta de diferents espècies, de diàmetres heterogenis i de diferent destinació en els mercats actuals (llenya d'alzina i fusta de pi per a trituració, principalment), cosa que suposa un alt cost d'extracció i transport per tona que, sovint, fa inviable la seva comercialització. En el projecte, s'ha volgut testar la viabilitat tècnica i econòmica d'aprofitar en processos de biorefineria part de la fusta generada en aquestes actuacions. En concret, s'ha testat:

- **Fusta de pi blanc i pi pinyer amb escorça, de mides diverses.**
- **Llenya de roure i/o alzina amb escorça.**

Quant a volums, en els tractaments postbufarut i afectació biòtica, passats uns anys des de l'afectació, s'estimen uns rendiments entre 15 i 20 t/ha.

Rendiments i costos associats a les operacions d'extracció de biomassa

Les feines a executar per a l'aprofitament d'aquesta biomassa i els principals costos associats són:

- Extracció i desembosc de fusta de baixa qualitat i en volums reduïts.
- Trossejament de les capçades, que es mantenen al rodal.
- Transport a indústria.
- Plantacions manuals de pocs exemplars repartits en l'espai.

Els costos derivats dels tractaments aplicats es poden veure a taula 4.1.

Taula 4.1. Cost unitari¹ de cada operació o treball forestal (sense IVA) en la gestió de masses de pi blanc i alzina afectades per bufaruts i de masses de pi pinyer i alzina afectades per escoltids, a partir de tarifes existents i resultats del projecte

Operació	Cost unitari (€/ha)
Aclarida/tallada selectiva, selecció de tanys i desembosc	1.300-1.400
Tallada sanitària i desembosc (afectacions biòtiques)	1.450
Estassada selectiva manual	1.050
Tractament de restes amb motoserra	650
Plantació d'enriquiment amb protectors	1.800
Estellat a bosc	300 ²

¹ Els valors s'han obtingut a partir de l'anàlisi de diferents tarifes publicades per l'Administració forestal (preus de referència en publicacions de Forestal Catalana i en la valoració dels costos en la redacció d'IOF i ajuts a la GFS 2024 del CPF), i d'altres segons estimacions i resultats dels treballs del projecte.

² Considerant un aprofitament de 20 t/ha i un cost d'estellat de 15 €/t.

Principals reptes tècnics i logístics

En aquest tipus de massa, alguns dels elements que dificulten les actuacions i n'augmenten els costos són:

- La presència de restes de la ventada/nevada que no es van tractar en l'actuació prèvia i, en estar enganxades, mig tombades, etc., aporten un plus de perillositat tant a la tallada com al desembosc.
- L'heterogeneïtat en la distribució de peus. La massa presenta clapes més denses i zones molt esclarissades (de major afectació). Aquest fet fa que el pes de la tallada/estassada canviï constantment i fa que l'equip que fa els treballs hagi d'adaptar el tipus i el pes de l'actuació a mesura que avança. Igualment, l'extracció de peus aïllats repartits pel rodal alenteix el procés de desembosc i en dificulta la mecanització.
- Els productes que s'obtenen també són molt heterogenis (llenya, fusta de trituració, fusta de serra) i en baixes quantitats, fet que encareix la manipulació i transport.
- La tallada puntual de peus sans en zones afectades per agents biòtics pot ser necessària tant per regular la competència i augmentar la vitalitat com per evitar l'expansió de la plaga o malaltia.
- En les masses afectades per algun agent biòtic, cal fer un seguiment constant de la possible aparició de nous peus decaiguts per evitar rebrots de l'afectació. Si l'aparició de peus secs és constant, és recomanable apostar per un canvi d'espècie.
- Si s'opta per fer una plantació d'enriquiment, ha de ser manual.

Productes químics obtinguts i rendiments

L'aprofitament a la biorefineria del LIFE BIOREFORMED de biomassa procedent de boscos gestionats postpertorbació ha permès obtenir diferents bioproductes a partir de la fusta de pi pinyer, pi blanc i alzina, com ara **antioxidants** (amb un 90% de puresa), **resines fenòliques** (mínim del 30% de substitució del fenol), **sucre** (mínim del 40% de puresa) i **àcids** (70% de puresa), a més de **biochar**. També s'ha testat la producció de **bioestimulants (esmenes húmiques)** per a l'agricultura a partir de biomassa torrefacta (a 300° C). La taula 4.2 mostra els principals resultats de la biomassa obtinguda als rodals demostratius del projecte.

Taula 4.2. Rendiments a 400 °C (g producte/kg biomassa) i ús potencial dels productes obtinguts en el processat de la biomassa de pinedes postpertorbació a la biorefineria del LIFE BIOREFORMED

Fracció	Compost químic final	Quantitat de producte obtingut (g/kg de biomassa)			Aplicació
		Pi blanc	Alzina	Pi pinyer	
Fracció líquida	Àcids	17,6	19,8	16	Productes químics i farmacèutics o additius alimentaris
	Sucres	9,5	5,9	6,9	Compost d'alt valor econòmic amb aplicacions en la indústria química i alimentària
	Aldehids i cetones	5,4	6,0	3,8	Diversitat d'aplicacions en la indústria química i alimentària (p.e., aromatitzants)
	Antioxidants	4,6	2,5	4,0	Indústria cosmètica, farmacèutica, nutricional, química i alimentària, com a antioxidants, aromatitzants i reactius per a la síntesi de resines fenòliques
	Resines fenòliques	1,43	2,01	3,33	Adhesius o additius en pintura
	Lignina pirolítica	8,1	11,4	18,9	Combustible, precursor de materials carbonosos i síntesi d'adhesius i additius
Fracció sòlida	Bioestimulants (300° C) (g/100 mL)	1,19	1,55	1,46	Indústria dels agronutrients
	Biochar (450° C) (MJ/kg)	26,2	24,2	29,9	Biocombustible Esmena de sòl agrícola

D'aquests resultats, cal destacar-ne:

- ✓ L'ús en biorefineria pot ser una opció per donar sortida a biomassa de difícil aprofitament alternatiu procedent de la gestió adaptativa de pinedes afectades per perturbacions en possibilitar l'ús de **fusta barrejada de diferents espècies i característiques**, sense que això suposi una disminució de la qualitat del producte final.
- ✓ **Els pins** (el pi pinyer, i especialment el pi blanc) **han mostrat un millor rendiment per a la producció de compostos antioxidants** (com ara guaiacol, catecol, fenol i vanil·lina, entre d'altres) **que l'alzina i**, en general, que la resta d'espècies testades al projecte.

5

Aprofitament en biorefineria de biomassa procedent de la gestió d'adaptació de suredes al nou context climàtic

Les suredes de *Quercus suber* L. són un hàbitat d'interès comunitari (9330) amb una llarga història econòmica i sociocultural, amb el suro com a producte de major valor, que torna a créixer després de l'extracció. A Catalunya, els boscos dominats per alzines sureres ocupen 69.000 hectàrees, i l'alzina surera apareix com a espècie secundària en aproximadament 55.000 hectàrees més, el 95% de les quals són de propietat privada.

El canvi climàtic representa una greu amenaça per a la conservació de les suredes, la producció sostenible de suro a llarg termini i la cadena de valor associada. Els tres grans impactes del canvi climàtic sobre les suredes són: i) l'increment de l'aridesa, que comporta una menor vitalitat i creixement i, finalment, la substitució de l'alzina surera per altres espècies més competitives, ii) les plagues, entre les quals destaca el corc del suro (*Coraebus undatus*) que impedeix la producció de suro de qualitat, i iii) els incendis. En el marc del projecte LIFE SUBER, es va analitzar la vulnerabilitat de les suredes a la restricció hídrica i es va concloure que aproximadament 2/3 parts de les suredes (unes 30.000 hectàrees) s'ubiquen actualment en localitzacions que l'any 2050 estaran fora del seu rang ecològic.



Des del punt de vista biogeogràfic, a Catalunya hi ha 2 grans tipologies de suredes:

a) **Suredes mediterrànies humides (la Selva i l'Alt Empordà)**: boscos ben conservats, densos i majoritàriament purs. El suro s'extreu cada 12-16 anys seguit d'una aclarida suau. Aquesta gestió sostinguda durant 150 anys ha fet que actualment hi hagi suredes molt denses i envellides, de productivitat limitada i amb una manca de regeneració viable. És a dir, amb pocs arbres joves i vitals disponibles per substituir rodals envellits o recuperar-se després d'un incendi.

b) **Suredes mediterrànies seques (les Gavarres i el Montnegre)**: boscos generalment mixtos amb pins (pi pinyer, pi marítim), alzines o arboços, tots amb avantatge competitiu sobre les sureres i un sotabosc molt desenvolupat. Les zones mediterrànies seques són més propenses a l'atac de *Coraebus undatus* i mostren una gestió limitada, especialment en zones postincendi, a causa de la baixa rendibilitat.

Actuacions d'adaptació i restauració forestal recomanades

Per fer front a aquests diferents reptes, el projecte LIFE SUBER (2012-2018) va definir una sèrie de tractaments amb els objectius següents:

1. **Aclarides més intenses** per augmentar la vitalitat individual, en reduir competència a les sureres productores, i **estassades selectives** (i no arreu) per augmentar la vitalitat col·lectiva, aprofitant la humitat ambiental com a recurs hídric complementari.
2. **Fomentar la regeneració de les sureres en rodals envellits** per permetre la millora forestal i la ràpida renovació en cas d'incendi.
3. **Promoure l'espècie als llocs més humits** en rodals mixtos o en rodals ocupats per espècies més productives, i accelerar l'adaptació de la surera a les noves condicions climàtiques mitjançant plantació de densificació o reforestació.
4. **Reduir el volum i la continuïtat del combustible** per millorar la resistència a grans incendis forestals sense comprometre la conservació d'humitat ambiental.

Tipus de biomassa disponible per a la biorefineria

L'execució de les mesures per a l'adaptació de les suredes al canvi climàtic genera una sèrie de subproductes de difícil valorització als mercats actuals. En el marc del projecte, s'han testat els següents per a ser aprofitats en processos de biorefineria:

1. **Fusta d'alzina surera sense llevar (suro pelut: fusta i suro)**. Per utilitzar la llenya d'alzina surera com a combustible, cal la preextracció de la seva escorça (el suro), que és un tractament costós. En proves prèvies, es va destacar que el suro pot proporcionar resultats molt interessants en biorefineries però que la producció de gas excessiu s'ha de compensar cremant-lo juntament amb un altre material, cosa que obre una oportunitat per a l'ús en biorefineries de fusta de surera sense llevar.
2. **Espècies arbustives (*Erica arborea* i *Arbutus unedo*)**: arbustos procedents de la retirada selectiva de matolls. Les restes de matoll sovint es deixen trossegades a bosc per al reciclatge de nutrients i la conservació de la humitat, però es pot plantejar la seva extracció a banda i banda de les pistes de desembosc per a prevenció d'incendis.
3. **Fusta de castanyer mort en un rodal productiu** on es vol instal·lar o promoure alzina surera (afavorint el regenerat incipient o plantant). En aquest cas, se sol dur a terme una tallada arreu amb aprofitament posterior de tot el volum de fusta generat, que sol ser rendible, malgrat que el castanyer afectat per xancre té poca sortida comercial de valor.

D'acord amb aquests tractaments i segons el tipus de bosc, es poden obtenir unes 15 t/ha corresponents a la part arbòria i unes 10 t/ha de biomassa arbustiva en els marges dels camins. En el cas de la castanyeda postpertorbació (tallada arreu), s'han obtingut unes 85 t/ha.

Rendiments i costos associats a les operacions d'extracció i transport

Si el producte extret és fusta, pot ser viable fer la trituració directament a la biorefineria, mentre que si és matoll és recomanable la trituració a peu de pista, un cop s'ha deixat assecar el material. Les operacions requerides i els costos es mostren a la taula 5.1.

Taula 5.1. Cost unitari¹ de cada operació de millora o treball forestal recomanat en les suredes (sense IVA) segons tarifes existents i resultats del projecte

Operació	Cost unitari
Tallada selectiva d'alzina surera i desembosc (€/ha)	650
Estassada selectiva i manual del matoll i tractament de restes (€/ha)	1.470
Extracció manual de matoll d'una franja a banda i banda de la pista (€/ha)	420
Apilat i estellat vora camí o a carregador amb tractor amb estelladora (€/t)	150-1.275 ²
Plantació de densificació amb protectors (€/ha)	250

¹ Els valors s'han obtingut a partir de l'anàlisi de diferents tarifes publicades per l'Administració forestal (preus de referència en publicacions de Forestal Catalana i en la valoració dels costos en la redacció d'IOF i ajuts a la GFS 2024 del CPF), i d'altres segons estimacions i resultats dels treballs del projecte.

² Considerant un aprofitament de 10 t/ha en les suredes i de 85 t/ha en la tallada arreu de castanyer afectat per xancres, amb un cost d'estellat de 15 €/t.

Principals reptes tècnics i logístics

- Una direcció d'obra acurada: l'alliberament de peus joves, la tallada de peus envellits però que encara produeixen i l'estassada selectiva (especialment si se cerca conservar la humitat al rodal) requereixen un canvi de criteri respecte de les actuacions habituals i un cert "sacrifici de tallada" de sureres encara productores en favor de la vitalitat dels arbres restants.
- La possibilitat de mecanitzar l'extracció i desembosc de material arbustiu de les vores de les pistes, que actualment és una feina molt costosa: en un dels rodals ubicat a una sureda seca a les Gavarres, l'abundant presència d'arítjol ha duplicat la duresa i cost dels treballs.
- Optimitzar els costos de transport: Caldria compensar els baixos rendiments en tones, per exemple, reduint els costos de transport amb biomassa local, de proximitat a la planta, o amb l'ús combinat de biomassa procedent d'altres actuacions més productives.
- En les plantacions de suro, es pot aprofitar la biomassa extreta per usar-la en tècniques d'adaptació a condicions de sequera: ús de part de l'estella forestal generada (si es tritura in situ) o del biochar subproducte de la biorefineria com a estructurants de sòls. En la tallada arreu de substitució, conservar espècies secundàries aporta ombra inicial que afavoreix els plançons d'alzina surera i la biodiversitat.



Productes químics obtinguts i rendiments

L'ús de biomassa procedent d'actuacions d'adaptació en suredes, a la biorefineria del LIFE BIOREFORMED ha permès obtenir diferents bioproductes com ara **antioxidants** (amb un 90% de puresa), **resines fenòliques** (mínim del 30% de substitució del fenol), **sucres** (mínim del 40% de puresa) i **àcids** (70% de puresa), a més de **biochar**. També s'ha testat la producció de **bioestimulants (esmenes húmiques)** per a l'agricultura a partir de biomassa torrefacta (a 300° C). La taula 5.2 mostra els principals resultats obtinguts als rodals demostratius del projecte.

Taula 5.2. Rendiments a 400 °C (g producte/kg biomassa) i ús potencial dels productes obtinguts en el processament de la biomassa procedent de la gestió adaptativa de suredes a la biorefineria del LIFE BIOREFORMED

	Bioproductes extrets	Quantitat de producte obtingut (g producte / kg de biomassa)				Aplicacions
		Surera	Castanyer	Arboç	Bruc	
Fracció líquida	Àcids	17,6	11,5	11,9	25,6	Productes químics i farmacèutics o additius alimentaris
	Sucres	2,7	5,9	2,9	9,6	Compost d'alt valor econòmic. Aplicacions en la indústria química i alimentària
	Aldehids i cetones	2,9	2,1	2,4	5,4	Diversitat d'aplicacions en la indústria química i alimentària (p.e., aromatitzants)
	Antioxidants	1,1	0,7	0,6	2,3	Indústria cosmètica, farmacèutica, nutricional, química i alimentària, com a antioxidants, aromatitzants i reactius per a la síntesi de resines fenòliques
	Resines fenòliques	1,34	2,33	1,67	2,01	Adhesiu o additiu en pintures
	Lignina pirolítica	7,60	13,20	9,50	11,40	Combustible, precursor de materials carbonosos i síntesi d'adhesius i additius
Fracció sòlida	Bioestimulants a 300° C (g/100 mL)	2,31	2,37	1,63	1,43	Adobat de sòls agrícoles
	Biochar a 450° C (MJ/kg)	16,6	22,7	22,1	23,1	Esmena de sòl agrícola o biocombustible

D'aquests resultats, cal destacar-ne:

- ✓ **L'ús en biorefineria permet donar sortida a biomassa de difícil aprofitament alternatiu en la gestió adaptativa de suredes**, com ara matollar amb branques i fulles procedent d'estassades vora pistes; suro pelut (fusta i suro) procedent de tallades de selecció; o fusta barrejada de diferents espècies i característiques procedent d'aclarides en suredes mixtes, així com l'aprofitament barrejat de totes plegades, sense que això suposi una minva en la qualitat del producte final.
- ✓ **Les espècies arbustives** més abundants en suredes seques, com el bruc, **han donat molts bons resultats** en la biorefineria, **sobretot pel que fa a la producció d'àcids**, com ara l'àcid acètic, a partir del bio-oil obtingut a 450° C.
- ✓ **El castanyer i l'alzina surera són les espècies que han donat millors resultats en la producció d'extractes húmics** a partir de biomassa torrefacta (a 300° C) com a estimulants de l'activitat microbiana del sòl i del creixement vegetal, i poden arribar a ser superiors a bioestimulants comercials d'origen fòssil, com ara la leonardita.

LIFE **Bioreformed**



@bioreformed



<https://lifebioreformed.eu/>



info@lifebioreformed.eu



Més informació