

Energía de la
Biomasa

Biomasa

Cultivos energéticos



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



Instituto para la
Diversificación y
Ahorro de la Energía

Energía de la
Biomasa

Biomasa

**Cultivos
energéticos**



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



Instituto para la
Diversificación y
Ahorro de la Energía

TÍTULO

“Biomasa: Cultivos energéticos”

DIRECCIÓN TÉCNICA

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía)

ELABORACIÓN TÉCNICA

BESEL, S.A. (Departamento de Energía)

.....

Esta publicación ha sido producida por el IDAE y está incluida en su fondo editorial.

Cualquier reproducción, parcial o total, de la presente publicación debe contar con la aprobación por escrito del IDAE.

Depósito Legal: M-45159-2007

ISBN-13: 978-84-96680-17-3

.....

IDAE

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

C/ Madera, 8

E-28004-Madrid

comunicacion@idae.es

www.idae.es

Madrid, octubre de 2007

Introducción	5
1 Características de los cultivos energéticos	7
2 Tipos de cultivos considerados	9
3 Cultivos forestales	11
3.1 Costes de extracción	11
3.1.1 Saca de pies completos y astillado/triturado fijo (S1) .	12
3.1.2 Saca de restos y astillado/triturado fijo (S2)	12
3.1.3 Astillado móvil en monte (S3)	12
3.1.4 Empacado en monte y astillado en fábrica (S4)	13
3.1.5 Extracción y aprovechamiento de tocones (S5)	13
3.1.6 Costes de obtención de biomasa de monte	15
3.2 Monte bajo tradicional	15
3.2.1 Definición y situación actual	15
3.2.2 Aprovechamiento - Tratamiento	16
3.2.3 Producción	18
3.3 Monte alto	18

3.4 Monte bajo	19
3.4.1 Choperas para aprovechamiento energético	20
3.4.2 Ejemplos de modelos de gestión de choperas	24
3.4.3 Turno corto (3-5 años): eucaliptos	33
3.4.4 Turno corto a medio (15-18 años): quercus	34
4 Especies agrícolas	37
4.1 Especies de la agricultura tradicional	37
4.1.1 Colza	37
4.1.2 Cereales	38
4.2 Nuevas especies	40
4.2.1 <i>Brassica carinata</i>	40
4.2.2 Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	43
4.2.3 Cardo (<i>Cynara cardunculus</i>)	44
5 Glosario	47
6 Bibliografía y fuentes adicionales de información	51



INTRODUCCIÓN

El RD 661/2007 establece el marco legal de producción de electricidad y energía térmica procedente de la biomasa, y amplía las expectativas económicas de todos los eslabones de la cadena de valor de la biomasa como fuente de energía.

La biomasa para energía se obtiene mayoritariamente de las industrias de primera y segunda transformación de los productos agrícolas y forestales, de los residuos de explotaciones ganaderas, de los restos de aprovechamientos forestales, de los residuos de los cultivos y también de cultivos implantados y explotados con el único objetivo de la obtención de biomasa. A estos últimos se les denomina cultivos energéticos, pero no dejan de ser cultivos forestales o agrícolas. La ventaja fundamental de los cultivos es la predictibilidad de su disposición y la concentración espacial de la biomasa, asegurando el suministro.

La predictibilidad de la disposición de la materia prima es fundamental para cualquier industria, y la de la energía no es distinta.

La concentración del recurso permite una gestión mecanizada, poco intensiva en mano de obra, y relativamente barata.

Los cultivos energéticos se pueden clasificar de muchas formas, por el tipo de suelo donde crecen, por el tipo de producto que se cosecha, etc. Según su aprovechamiento final, los cultivos se pueden clasificar en:

- Cultivos oleaginosos para la producción de aceites transformables en biodiésel.

- Cultivos alcoholígenos para la producción de bioetanol a partir de procesos de fermentación de azúcares.
- Cultivos lignocelulósicos, para la generación de biomasa sólida susceptible de su uso para distintas aplicaciones:
 - Térmicas, como climatización de edificios, agua caliente sanitaria, y aplicaciones industriales (preparación de cualquier fluido de proceso).
 - Fabricación de combustibles más elaborados, con un valor añadido a la biomasa bruta, como astillas o pelets.
 - Cogeneración generalmente asociada a una actividad industrial, o generación eléctrica simple.
 - Obtención de biocarburantes de segunda generación.

El presente documento se centra en la producción de biomasa lignocelulósica, como materia prima para la preparación de combustibles más elaborados o bien para su utilización directa como combustible, con independencia de la tecnología que se aplique, para su conversión en energía utilizable. Es decir, la biomasa que una vez cosechada o recogida del campo es trasladada con o sin compactación a una instalación de tipo industrial en la que es transformada en un combustible de características especificables, o es transformada directamente en calor y/o electricidad.

Las actividades que se tratan aquí son, por un lado, los cultivos de especies tradicionales agrícolas y forestales, pero desde la nueva óptica de la producción de biomasa, en vez de los enfoques tradicionales de la producción de alimentos o materias primas para industria. Por otro lado, se trata el cultivo de especies con escasa aplicación hasta ahora pero que, como productoras de biomasa, se están revelando de gran interés.

No es objeto de este documento la producción de materia prima amilácea u oleaginosa que tenga como destino la producción de biocarburantes líquidos, como bioalcohol o biodiésel.

1 Características de los cultivos energéticos

Los cultivos lignocelulósicos, tanto agrícolas como forestales, que se realicen para la producción de biocombustibles sólidos para aplicaciones térmicas o para la generación de calor y electricidad, deberían tener o aproximarse lo máximo posible a una serie de características que se relacionan a continuación. Los cultivos energéticos, como cualquier otro, deben sacar partido de la naturaleza pero en ningún caso obviar sus leyes. Por tanto, sería recomendable tener en cuenta lo siguiente:

- Que se adapten a las condiciones edafo-climáticas del lugar donde se implanten: las plantas dan las productividades mayores en aquellos lugares que reúnen condiciones que les sean más favorables.
- Que tengan altos niveles de productividad en biomasa con bajos costes de producción: las explotaciones que requieren mucha atención cultural son complicadas y caras de explotar.
- Que sean rentables, económicamente hablando, para el agricultor.
- Que no tengan, en lo posible, un gran aprovechamiento alimentario en paralelo, con el objetivo de garantizar el suministro, sin una subida de precios que perjudique a la larga tanto a la explotación agrícola en sí como a las industrias alimentaria y energética.
- Que tengan un fácil manejo y que requieran técnicas y maquinarias lo más conocidas y comunes entre los agricultores.
- Que presente balance energético positivo. Es decir que se extraiga de ellos más energía de la que se invierte en el cultivo y su puesta en planta de energía.
- Que la biomasa producida se adecue a los fines para los que va a ser

utilizada: como materia prima para pelets, para producción térmica, para generación o cogeneración de calor y electricidad.

- Que no contribuyan a degradar el medio ambiente (por ejemplo, empobrecer el suelo) y permitan la fácil recuperación de la tierra, para implantar posteriormente otros cultivos en algunos casos. Cuando sea posible, que la rotación sea factible y beneficiosa en todas las etapas.

2 Tipos de cultivo considerados

Sin menoscabo de otros cultivos no reflejados aquí, en este documento se menciona una serie de cultivos energéticos que, para facilitar la organización de las ideas, y por las diferencias entre ellos, se clasifican en una primera instancia atendiendo al origen de la biomasa.

A su vez, dentro de cada grupo, se diferencia lo que es el cultivo de especies sobradamente conocidas por los agricultores y silvicultores de aquellas especies cuyo interés se origina en la producción de biomasa para energía, en contraposición del enfoque tradicional de tipo alimentario e industrial.

Dentro de cada uno de los tipos de cultivos se pueden clasificar como sigue:

- Forestal
 - Monte bajo tradicional
 - Monte alto para aprovechamiento industrial complementario a la silvicultura para madera
 - Nuevos cultivos:
 - Regadío
 - Secano
- Agrícola
 - Secano tradicional:
 - Cereales
 - Brasicas
 - Regadío: sorgo
 - Nuevas especies: *C. cardunculus*





3 Cultivos forestales

Como en el caso del ámbito agrícola, en el forestal existe la posibilidad de realizar aprovechamientos tradicionales de producción de leñas, y del cultivo y explotación de especies que tradicionalmente han sido destinadas a la industria de la madera, papel, tablero, mueble..., pero que ahora pueden ser igualmente explotadas desde la óptica de la producción de combustible. De igual modo, para la producción de biomasa entran en juego nuevas especies que no tenían interés como productoras de materia prima industrial.

No obstante, en los casos de nuevo aprovechamiento de especies ya conocidas, las prácticas culturales son distintas, como se verá más adelante.

3.1 COSTES DE EXTRACCIÓN

La extracción masiva de biomasa del monte es una práctica que, como se comenta más adelante, ha caído en desuso durante los últimos treinta años. Por tanto, cualquier valor estimado sobre los costes o ratios producidos en aquellos tiempos, no pueden ser extrapolados a la época presente.

De forma aislada, se han realizado algunas experiencias más recientes que, con todas las salvedades que se pueden hacer cuando se generaliza acerca de costes de trabajos en campo, pueden dar una primera idea, es decir, una aproximación a los costes de saca de biomasa. La obtención de biomasa residual del monte se puede realizar mediante cinco sistemas principales de trabajo.

3.1.1 Saca de pies completos y astillado/triturado (S1)

Consiste en el apeo con un cabezal multifunción de árboles de pequeño porte, su recogida en un autocargador y su posterior apilado en cargadero. Lo ideal es que tras su apilado y, por tanto, tras un breve periodo de presecado, se realice el astillado de la madera sobre un contenedor o con una astilladora o trituradora incorporada a un camión.

Este sistema de obtención de biomasa puede tener una buena aplicación para resalveos de *Quercus* y clareos de especies comerciales (pinos, hayas...).

No es el sistema más barato de extracción de biomasa dado el tamaño del material a manejar.

3.1.2 Saca de restos y astillado o triturado fijo (S2)

Fundamentalmente consiste en la separación de los restos durante el aprovechamiento principal, teniendo cuidado de dejar los residuos concentrados, para abaratar el posterior desembosque a cargadero o borde de pista, para su presecado y astillado fijo en cargadero sobre camión, o con una astilladora incorporada al camión.

La aplicación de este sistema es muy eficiente para cortas a hecho de pinares (Galicia, País Vasco, Burgos...), de eucaliptos (Cornisa Cantábrica y oeste de Andalucía) y de chopos (Granada, Ribera del Duero...).

Este sistema es el más económico en montes grandes y el que mejor se adapta a las condiciones invernales, ya que se pueden sacar los residuos y el material astillado a borde de pista.

3.1.3 Astillado móvil en monte (S3)

El primer requisito es apilar el material residual del aprovechamiento, lo más concentrado posible en monte. Este residuo se astilla bien con una trituradora remolcada por un tractor, o bien por una trituradora integrada en un autocargador, y su posterior desembosque.

Las aplicaciones de este sistema son: cortas a hecho de pinares o eucaliptos, ambas en montes pequeños, con el inconveniente de la dificultad de encontrar cargaderos y el consiguiente aumento del coste del transporte de las máquinas.

3.1.4 Empacado en monte y astillado en fábrica (S₄)

Es el planteamiento más adecuado para grandes cantidades de biomasa, y grandes distancias desde el monte hasta el lugar de utilización energética. Es admisible que se transporten piedras y otras impurezas porque:

- En destino, es fácil que haya instalaciones de separación y triturado
- Los costes de transporte se reducen sensiblemente debido a la compactación

Una de las ventajas es que emplea los mismos métodos y maquinaria que para la madera (trituradoras/astilladoras, camiones, autocargadores) reduciendo problemas logísticos al aumentar la densidad del material.

Este sistema tiene una buena aplicación para cortas a hecho de pinares o de eucalipto, en fincas pequeñas con accesos complejos, siempre y cuando el consumidor sea de tamaño medio o grande con radio de abastecimiento amplio.



Empacado en verde.

3.1.5 Extracción y aprovechamiento de tocones (S₅)

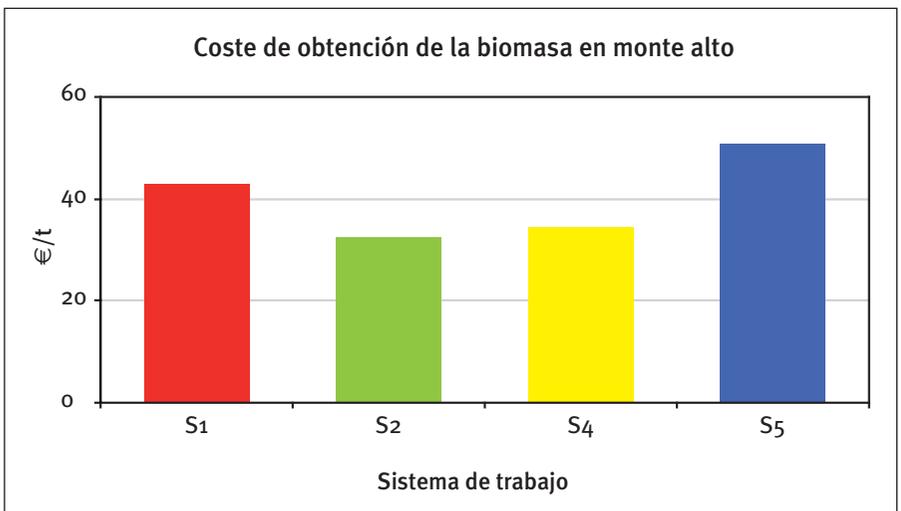
Es el sistema más caro, pero su uso se está extendiendo por la gran demanda de los países nórdicos. La extracción se realiza con una retroexcavadora adaptada y luego se realiza una pretrituración lenta (al no haber maquinaria específica para esta biomasa, la operación es realizada con trituradoras de áridos) e incluso previa al transporte, aunque en algunos casos se transporta en bruto y es tratado en fábrica desde el principio. Normalmente los clientes de esta biomasa dan tratamientos secundarios a la madera (limpieza, triturado/astillado definitivo).

Este sistema es ideal en deforestaciones para infraestructuras (autovías, AVE...), destocoado de eucaliptos con problemas sanitarios o por cambio de cultivo, y en destocoado de choperas.

Es probable que sea el sistema de suministro que más crezca, aun siendo sólo adecuado para grandes consumidores.



Aprovechamiento de restos de corta en monte alto para biomasa sólida.



Fuente: Universidad Politécnica de Madrid, CESEFOR y elaboración propia.

3.1.6 Costes de obtención de biomasa de monte

En determinadas situaciones, y con la precaución necesaria cuando se trata de costes de gestión, desembosque, transporte y procesado de biomasa residual de monte, se pueden presentar unos costes, a modo de referencia, de las tareas principales que configuran cuatro de los sistemas de obtención de biomasa comentados anteriormente (gráfico página anterior).

3.2 MONTE BAJO TRADICIONAL

3.2.1 Definición y situación actual

El monte bajo es el que proviene de una reproducción vegetativa, ya sea por brotes de cepa, de raíz o de ambos. Por tanto, su aplicación se limita a las especies capaces de dar brotes y, en el caso de España, a las frondosas, exceptuando el pino canario (*Pinus canariensis*) que es el único que rebrota entre todos nuestros pinos autóctonos.

En España hay en torno a cuatro millones y medio de hectáreas de lo que se denomina tallar. Es decir, montes bajos que se han venido tratando mediante cortas a hecho y cuyo aprovechamiento habitual ha sido la producción de leña o carbón vegetal. En los últimos 30 años, debido al cambio de hábitos y fuentes de suministro energético de las familias españolas, su explotación no ha sido necesaria y, por tanto, estas masas se han abandonado.

El resultado de no darle el tratamiento adecuado a esas masas es un exceso de existencias que deriva en elevado riesgo de plagas, enfermedades e incendios, además del envejecimiento y degradación de las mismas.

Esta situación es importante por lo que tiene de peligrosa, pero también por la oportunidad manifiesta de poder poner de nuevo en explotación sostenible grandes superficies ya arboladas.

Generalmente, se ha considerado a los montes bajos como masas artificiales generadas por el hombre, sin embargo también han sido generados de forma natural como consecuencia de desastres tales como: incendios, riadas, aludes, dificultades edafoclimáticas, patologías, etc.

Las principales especies tratadas en España como monte bajo son: encina, quejigo, rebollo, castaño, eucalipto y las mimbreras de sauce (*Salix sp.*). Las demás especies de frondosas tienen menor importancia, si bien en alguna zona peninsular hay montes bajos de roble y de haya.

3.2.2 Aprovechamiento - Tratamiento

El producto tradicional de los montes bajos han sido las leñas para la quema directa o para la obtención de carbón vegetal, ya que los frutos son aprovechados por el ganado y la fauna silvestre.

En la actualidad es planteable un aprovechamiento energético de los montes bajos a turnos cortos cuyo único destino es la producción de biomasa lignocelulósica, aunque en algunos casos se puede compatibilizar con la ganadería.



Aprovechamiento y regeneración natural de monte bajo de rebollo (*Quercus pyrenaica*), en Riaza (Segovia).

La explotación a turnos cortos de biomasa de pequeño grosor, y con extracción de elevadas cantidades de materia seca por hectárea y año, da lugar a una gran retirada de nutrientes del suelo. Por lo tanto, los suelos de los montes bajos deben de ser de elevada fertilidad, para evitar las degradación continua de la reserva de sus nutrientes.

Una de las ventajas del monte bajo frente al monte alto es que no es muy exigente en volumen de suelo accesible, pudiendo desarrollarse en lugares con fondo edáfico insuficiente para un monte alto, suelos muy pedregosos y con escaso volumen útil para el buen desarrollo radicular. Esta es una de las cualidades de los montes bajos: el uso de los suelos inhábiles para los montes altos de frondosas.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, las principales características del monte bajo son:

- Rápido crecimiento inicial de los brotes (chirpiales). La producción media por hectárea y año de materia seca es muy elevada, aproximadamente el doble que en monte alto de la misma especie y edad.
- La espesura se recupera muy rápidamente tras la corta, lo cual es positivo para la protección contra la erosión y para la fauna silvestre. Este proceso es más lento en las especies que sólo rebrotan de cepa.

En cuanto al tratamiento del monte bajo energético, no difiere mucho del tradicional, tan sólo se observa en algunos lugares el hecho de dejar algunos árboles padre, los de mejor porte, quizá para intentar una reproducción por semilla, cuestión esta no muy probable dado el vigor de los brotes que no permitiría la emergencia de los brinzales. El método para calcular el turno del monte bajo energético es sencillo en objetivos, quedando reducido al aprovechamiento de la máxima materia a extraer a un coste razonable.

En cuanto a la estrategia y prácticas de corta es recomendable:

- Realizar la corta durante la parada vegetativa, excepto si hay riesgos ciertos de heladas, plagas y enfermedades. La ventaja de realizarla en esta época es la disponibilidad de maquinaria y mano de obra y, por tanto, a un coste menor. Por tanto, si en la zona de interés, en tal época hay fuerte demanda de personal y maquinaria para otras actividades, habrá que reconsiderar el momento de la corta, pues el coste de la mano de obra de esta operación es significativo sobre el coste de obtención de la biomasa, hasta el punto de merecer la pena perder el crecimiento de la época de hoja a cambio de una salarios más contenidos.
- Cortar el tronco lo más a ras de tierra posible, para que los rebrotes puedan independizarse mejor así de la cepa madre, y para aprovechar cuanta más biomasa mejor, dado que la parte más gruesa del pie es junto al cuello de la raíz.
- Dar el corte inclinado para que la humedad escurra, eliminando la necesidad de aplicar protectores contra las pudriciones en los cortes.

El turno o edad de corte recomendable es entre $1/4$ - $1/5$ de la edad de corta típica de la misma especie en monte alto:

- Los turnos demasiado cortos debilitan las cepas por agotamiento, dando como producto leñas de pequeña dimensión.
- Los turnos excesivamente largos reducen el número de cepas, dando productos de dimensión tal vez excesiva.
- En general, la producción de biomasa en relación al turno se optimiza normalmente por hectárea y año. Lo ideal es encontrar un turno con el que se consiga la mayor proporción y cantidad de leña gruesa (7-12 cm de diámetro).

Ante la duda respecto a la edad aconsejable de corta, es recomendable a edad mayor para la protección del suelo y, al producir leñas de mayores dimensiones, se extrae una cantidad más pequeña de nutrientes.

Como un factor a tener en cuenta es el elevado coste de mano de obra, un criterio para elegir el turno es aquel con el que se consiguen mayores ingresos por jornada de trabajo.

3.2.3 Producción

Los montes bajos se mantienen productivos durante muchos años, incluso sin una verdadera regeneración sexual intermedia, debido a la corta de las cepas.

La producción media por hectárea y año varía relativamente poco y lo hace entre un 20-25% arriba o abajo respecto a la del turno ideal.

La productividad puede ser muy elevada. Algunas experiencias han dado como resultado valores de hasta 4 t/ha y año.

El rendimiento de apeo puede alcanzar entre 3.400 y 5.100 kg/día, dependiendo de la densidad del monte y de las características del terreno. La saca viene a precisar de $1/3$ de día por día de trabajo de motoserrista.

3.3 MONTE ALTO

El monte alto es el que está formado por plantas que son el resultado de la reproducción sexual que proviene de semilla. Al monte alto, al que tradicionalmente se ha orientado hacia labores protectoras o productoras, hoy se le puede añadir un aprovechamiento que es complementario a todas las tareas de apeo y podas, que se realizan como parte del tratamiento de las masas.

Hasta la pasada década de los 70, el aprovechamiento parcial de los residuos del apeo de árboles y otros residuos de los tratamientos forestales, se utilizaba para

calefacción en zonas rurales. Ese aprovechamiento marginal, ya casi abandonado por varias decenas de años, vuelve a cobrar interés en el actual marco económico y normativo de la biomasa, sobre la base de unos elevados precios de los combustibles y de una garantía de retribución razonable de la energía de la biomasa. Esta nueva versión del tradicional negocio de las leñas se ve reforzada por la disponibilidad comercial de una maquinaria eficaz y versátil que casi elimina los trabajos manuales pesados de antaño.

Casi de forma coetánea al inicio del abandono de la leña como combustible principal en las zonas rurales, en los años sesenta del pasado siglo se realizaron grandes repoblaciones cuyo turno ya está cercano. Sin embargo, no es previsible el aprovechamiento maderable de tales masas por razones técnicas, de calidad y económicas. Al igual que en grandes superficies de monte bajo, la falta de un tratamiento adecuado está haciendo envejecer y deteriorarse prematuramente esos bosques. Por tanto, habría que considerar la posibilidad de dar un tratamiento adecuado a dichas masas, pensando en recuperar gran cantidad de la biomasa producida con fines energéticos. Las técnicas y los costes se han comentado anteriormente.

El monte alto energético crea una paradoja: se implanta como monte alto, pero el mero aprovechamiento lo transforma en monte bajo, ya que tras el primer rebrote, los ejemplares ya no proceden de semilla.

3.4 MONTE BAJO

Entre las posibles elecciones de especie para su cultivo a rotación corta se encuentran:

- Sauces: cultivados en países europeos más fríos y húmedos. En España no alcanza grandes producciones, resiste mal la sequía. Caso particular son las mimbreras, sauce cultivado en España en regadío para usos muy concretos (cestería).
- Eucaliptos: no autóctonos pero adaptados al clima español. No precisan riegos y pueden usarse como filtros verdes. Cultivo muy conocido. Clara opción para producción bioenergética.
- Chopo: cultivado en Francia a rotación corta para producción de celulosa. Ampliamente cultivado y conocido en España en su cultivo como monte alto. Pocas experiencias como cultivo en tallar pero grandes posibilidades.
- Quercus.

Otras especies consideradas por ser cultivadas en otros países han sido *Robinea pseudoacacia*, *Acacia dealbata*, *Acacia melanoxylon*, *Paulownia* y *Ulmus pumila*.

3.4.1 Choperas para aprovechamiento energético

3.4.1.1 Características generales

La madera de sierra para celulosa y para desenrollo han sido los aprovechamientos más tradicionales de las choperas, normalmente a turnos cortos, con el límite inferior relacionado con el diámetro de la leña que se deseaba cortar y trocear. A día de hoy, se plantean cultivos para la obtención de energía, con el mayor aprovechamiento posible de la biomasa aérea a turnos aún más cortos. Es decir, los turnos aplicados para conseguir ciertos diámetros en las leñas, que tienen sentido para facilitar su manejo hasta el consumo final, no tiene sentido cuando se trata de triturar la biomasa en monte o pista. La razón es que se debe perseguir el máximo rendimiento en biomasa, sin importar el diámetro o la forma que tenga la masa cosechada.

Las características de los talleres de los chopos no son distintas de los montes bajos de otras frondosas, es decir, en producción para biomasa, el diseño de la densidad de plantación y los turnos de corta son fundamentales para conseguir una optimización económica, ya que unas existencias mayores de lo debido reducen la duración del cultivo, además de reducir el crecimiento de la masa.



Cultivo energético de chopo junto a cereal de verano.

No obstante, existen razones que hacen pensar que el chopo aventaja a otras especies como, por ejemplo:

- Alcanza producciones elevadas en cortos periodos de tiempo, a base de un rápido crecimiento inicial y una alta capacidad de ocupación del terreno.
- Las choperas pueden actuar como filtros verdes, pues pueden regarse con aguas contaminadas.
- Posibilidad de turnos cortos. Flexibilidad.
- Se cultiva en parcelas llanas, accesibles. La producción está concentrada y cercana a carreteras.
- Es fácil la obtención de estaquillas y con gran capacidad para enraizar.
- El cultivo es fácil. Las labores necesarias coinciden con periodos de baja actividad agrícola, lo que reduce los costes de oportunidad de maquinaria y mejora la disponibilidad de mano de obra.

3.4.1.2 Cultivo

Las labores previas a la implantación de una chopera energética son básicamente las tres siguientes:

- Alzado, con una profundidad de 40 cm, a realizar con meses de anterioridad al gradeo, y con el objetivo de enterrar la vegetación herbácea competidora.
- Subsulado pleno de 60-80 cm de profundidad que se efectuará tras el alzado, y con el objetivo de hacer la ruptura de cualquier capa impenetrable, apertura de canales de accesos a la búsqueda de la humedad del suelo.
- Gradeo cruzado de 15-20 cm, que se debe realizar justo antes de la plantación. Su finalidad es facilitar el estaquillado y el contacto de la planta con el suelo.

La plantación del chopo para fines energéticos se realiza con altas densidades con el objetivo de disminuir los costes de plantación, de cultivo y de cosecha. Los compromisos entre diámetros deseados a la corta y el marco de plantación se muestran en la siguiente tabla.

Marcos de plantación de chopo para biomasa					
Diámetro ideal de corta en cm	10	11,25	12,25	13,75	15
Número ideal de pies por hectárea	2.603	2.155	1.820	1.562	1.333
Metros cuadrados por pie	3,8	4,6	5,5	6,4	7,5
Marco recomendable en metros	No útil	No útil	2,1 x 2,6	2,3 x 2,8	2,5 x 3

Marco ideal de plantación del chopo. Fuente: Montoya, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid.

Desde el punto de vista económico, un factor a tener en cuenta es la cantidad de biomasa acumulada en el momento de la corta final. Es importante destacar que, a partir de una determinada acumulación de biomasa, las cepas comienzan a deprimirse produciéndose el estancamiento, poniendo en riesgo la producción media, la capacidad de rebrote y su propia duración. En conclusión, no se debería superar un determinado límite de carga en biomasa.

Los cuidados posteriores a la plantación son:

- Escardas, que se realizan tras la plantación, tras la primera corta y tras cada corta de tallar.
- Abonado: para reponer y conservar las cepas tras la corta.
- Desmamonado, que consiste en la selección de los brotes de cepa. Esta operación incrementa la producción pero mantiene la densidad prevista y un tamaño razonable en las trozas.
- Los riegos del chopo a rotación muy corta (en tallar) según el déficit hídrico local. Las cifras están entre 4.000 y 6.000 m³/ha/año a monte alto, bastando un 10-20% menos en el caso del tallar, distribuidos entre 4 y 6 veces al año.

En caso de crisis de abastecimiento hídrico podrían aplicarse únicamente riegos de mantenimiento. Los cultivos alimentarios (maíz, alfalfa, remolacha, etc.) precisan en torno a 8.000 m³/ha/año.

Respecto a los riegos, el chopo tiene unas cualidades que es preciso conocer:

- Capacidad de superar crisis anuales con riegos menores (50%).
- Capacidad de soportar riegos mucho menos frecuentes y precisos en su fecha de aplicación (cada 20-30 días), sin perjuicios productivos.
- Mejor aprovechamiento de los riegos a manta, por un sistema radical profundo.
- Posibilidad de abastecerse directamente de agua en las riberas a partir de capas freáticas situadas a 50-150 cm de profundidad.
- Posibilidad de usar para el riego aguas contaminadas o de ínfima calidad.

3.4.1.3 Aprovechamiento

Lo más recomendable es la corta un año antes del máximo rendimiento medio en biomasa, acarreado una pequeña pérdida de producción media por hectárea y año, a cambio de mantener la longevidad y el vigor de las cepas de chopo a largo plazo.

El crecimiento de los rebrotes es mayor, llegándose antes a la cantidad de biomasa máxima admisible. En España el incremento de la producción entre el

primer recepe y los siguientes es del orden de $2/3$. A la edad de máximo rendimiento (4 años), el rendimiento en materia seca por hectárea y año es $5/3$ del alcanzado en la primera rotación de monte alto.

Lo aconsejable es que la biomasa acumulada no supere la indicada en el primer recepe, lo que obliga a un turno de corta más corto.



Turnos de corta de una chopera.

Tras la corta, la humedad de la madera de chopo es del 50% con una densidad de 700 kg/m^3 . Pocos días después, una vez que se oreo, pierde un 15% de humedad pasando su densidad a ser de 595 kg/m^3 . Una vez que queda totalmente seca al aire, su humedad residual es del 25%, con una densidad final de 525 kg/m^3 . El poder calorífico inferior (PCI) de la madera seca de chopo (0% de humedad) es de 4.100 kcal/kg .

El tratamiento selvícola tradicional opta por la corta en la época de paro vegetativo, por razones más que obvias: de crecimiento, sanitarias y de calidad del producto. Pero, como se ha podido comprobar en lo que se refiere a producción de biomasa, entre cortar dentro de la época vegetativa y fuera de ella las diferencias no son demasiadas, incluso en el ámbito sanitario.

La gran ventaja de la corta en cualquier estación es el abastecimiento regular de biomasa a las industrias. Sin embargo, el único inconveniente es la disponibilidad,

de la mano de obra y la maquinaria, siendo mayor en invierno por el habitual paro de sector agrícola. También estas fechas son más favorables para el aprovechamiento de leñas.



Diferentes estados y prácticas en choperas energéticas.

Aun así, lo más recomendable es la corta en la época de paro vegetativo, en la que los costes de almacenamiento u otros factores como la falta de agua pueden hacer proponer la corta en periodos de baja actividad, teniendo en cuenta siempre que no se dañe en exceso el crecimiento posterior de los brotes.

El periodo de corta menos aconsejable es el que se extiende desde que el árbol brota hasta mediados de septiembre. Pero habría que estudiar si estos perjuicios son o no mayores que los costes de almacenamiento de la materia prima durante este periodo de “no corta”. Si se quiere seguir el criterio biológico estricto la corta se realizará sin hojas ni savia.

En el ámbito de producción de biomasa foliar, la utilización mixta de tipo silvopastoral de doble aprovechamiento (ganado e industria trituradora de madera), no es muy aconsejable e incluso debería prohibirse en las choperas a rotación muy corta.

3.4.2 Ejemplos de modelos de gestión de choperas

En este epígrafe se desarrolla, a modo de mero ejemplo, el estudio de retorno económico de la producción de biomasa a partir de un tallar de chopo.

Por ejemplo, se puede constituir una sociedad (en adelante el operador), que financia, cultiva y comercializa la madera del chopo producido en monte bajo. La primera decisión se refiere a decidir el modelo de negocio que quiere desarrollar. Dos opciones a estudiar son:

- El operador paga a un agricultor una renta por el alquiler de sus tierras, siendo éste su único ingreso. El operador asume los trabajos de plantación, cultivo y aprovechamiento, así como la comercialización.
- El agricultor es el que produce la biomasa por sus medios y el operador se la compra a un precio determinado, pactado. El agricultor, por tanto, realiza la plantación, el cultivo y el aprovechamiento recibiendo anualmente el 50% del valor acordado para la cantidad de biomasa correspondiente al crecimiento producido (o esperado). El resto del valor acordado lo recibe en los años de aprovechamiento en los que le entrega la biomasa al operador.

3.4.2.1 Datos de partida

En cualquiera de las dos opciones, los flujos económicos por los diferentes conceptos son:

Magnitud considerada	Valor
Renta de la tierra	150 €/ha (opción arrendamiento)
Productividad	20 t MS/año (a partir de la segunda corta)
Inversión plantación	572 €/ha
Vida plantación	22 años (5 cortas)
Costes anuales cultivo (riegos y plagas)	404 €/ha
Coste del agua (incluido en cultivo)	60 €/1.000 m ³
Costes tras corta (abono y desmamonado)	272 €/ha
Costes aprovechamiento	2.915 €/ha
Precio de venta	75 €/t MS <> 56 €/t MH
Certificaciones parciales por 50% crecimiento anual	Depende del crecimiento esperado
Superficie y tiempo de cultivo	500 ha a 10 años
Margen de comercialización	15%
Precio de venta	86 €/t Mat. Seca 65 €/t Mat. Húmeda
Gastos generales	100 k€ año
IPC	3%

3.4.2.2 Indicadores de rentabilidad

Se realiza una proyección de los flujos acumulados de caja de las dos opciones a 10 años, obteniendo los siguientes resultados:

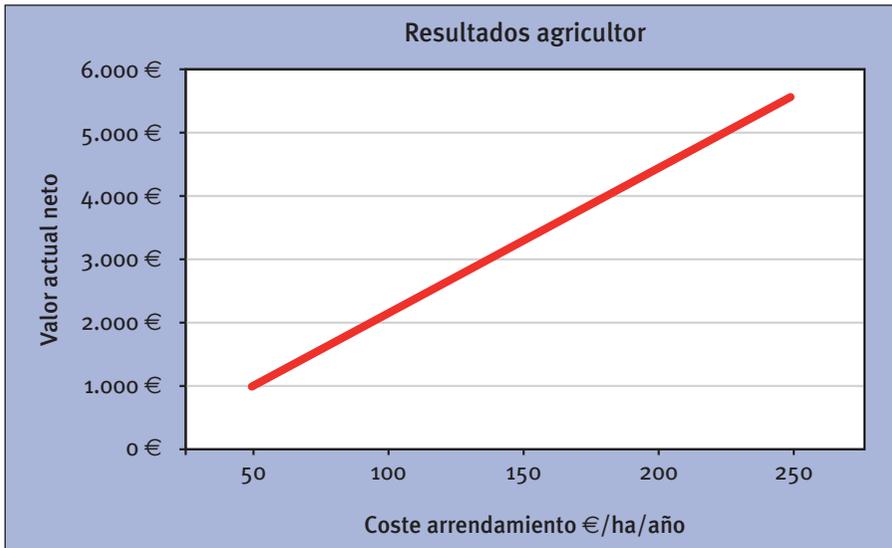
- A) OPCIÓN ARRENDAMIENTO DE TIERRAS: el valor actual neto para el agricultor en el caso de sólo arrendar sus tierras es de 3.304 €/ha, mientras que el negocio del operador alcanza un valor actual neto de 7.876 € por cada una de las 500 ha, y una tasa interna de rentabilidad del 9%.
- B) OPCIÓN CULTIVO POR AGRICULTOR: el valor actual neto para el agricultor en el caso de realizar el cultivo asciende a 4.740 € por ha, mientras que el agente operador obtiene un valor actual neto de 4.197 k€; y una TIR del 9%.

La opción de arrendamiento de tierras favorece más al agricultor, que recibe una renta sin arriesgar esfuerzo ni dinero. Por contra, si el agricultor asume el riesgo de realizar la explotación de la chopera, obtiene un VAN un 50% superior que el que obtiene con el arriendo de las fincas. El operador obtiene la misma rentabilidad y la única diferencia es que en la opción de asumir el cultivo y sus gastos, después se ve recompensado con un VAN mayor.

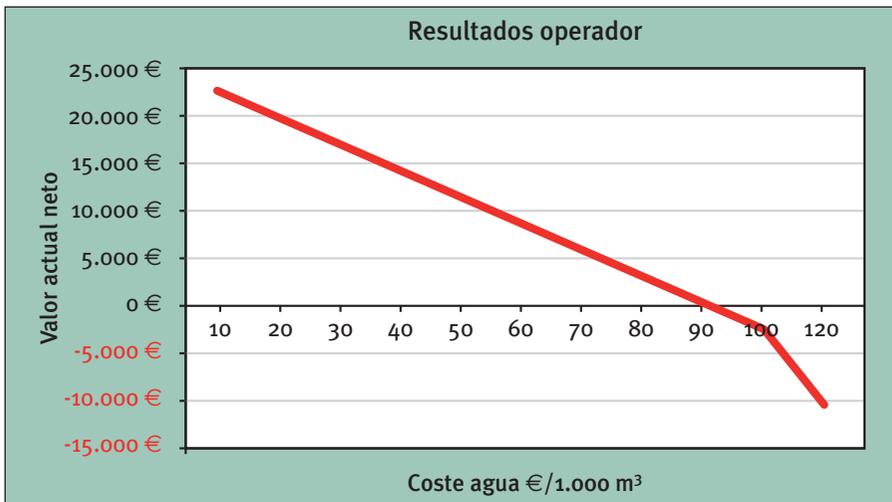
3.4.2.3 Estudios de sensibilidad

Cuando se trata de realizar inversiones y negocios a medio y largo plazo, es de mucha ayuda hacer un análisis de sensibilidad, es decir, hacer una previsión de cómo puede evolucionar la rentabilidad de la inversión si los parámetros clave cambian de valor a lo largo del tiempo. Seguidamente, se realiza un estudio de este tipo, tanto desde el punto de vista del agricultor como del operador, para las dos opciones propuestas anteriormente. El análisis se acompaña con gráficos muy indicativos de las tendencias de la rentabilidad en la forma de Valor Actual Neto, respecto a la productividad, el coste del agua, etc.

A) OPCIÓN ARRENDAMIENTO DE TIERRAS



La rentabilidad del agricultor sólo depende de forma directa del precio del arrendamiento y no depende del precio de venta de la madera, ni de los costes de cultivo.

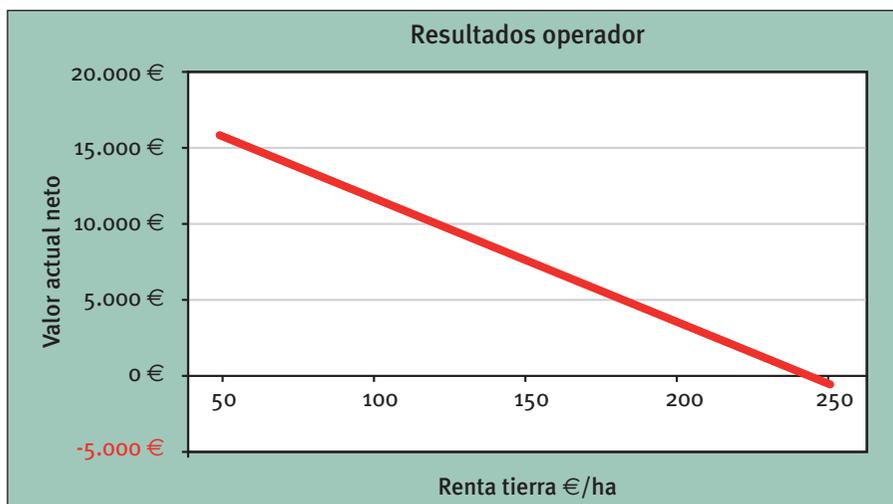


La importancia del riego se ve reflejada en el fuerte impacto negativo que, sobre la rentabilidad del operador, tiene el incremento del coste de agua de riego.

Se puede dar el caso de que este coste haga inviable la explotación de chopo para biomasa energética. No es menos cierto que donde el agua abunda, o es barata, la rentabilidad alcanza unos atractivos niveles.



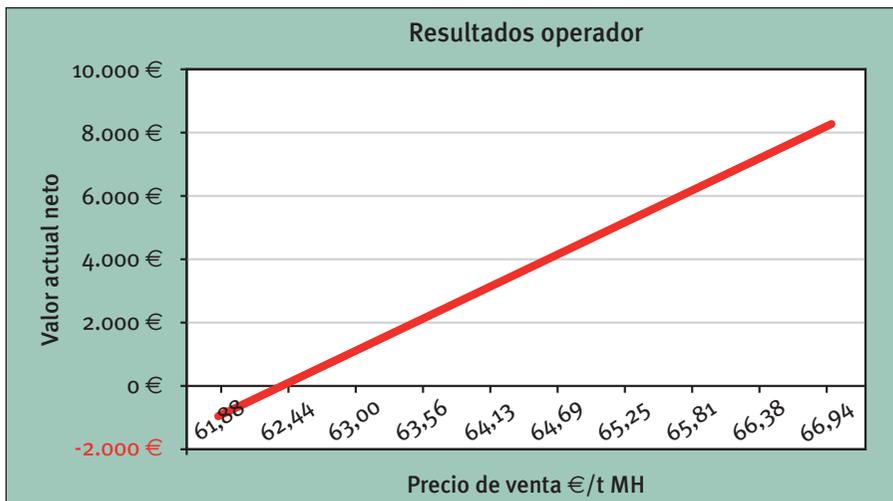
Este gráfico indica que la rentabilidad es proporcional a la producción, y que por debajo de un determinado valor de las t/ha que dé el monte, la rentabilidad es negativa. Si se llegara a esta situación, sería mejor alargar el turno o bien replantar ya que podría suponer que la cepa está agotada y los rebrotes son débiles.



La rentabilidad se ve mejorada a medida que el alquiler del terreno es menor y en ningún caso se podría pagar 250 €/ha y año, ya que supondría saber que se va a perder dinero. Según el rendimiento que queramos obtener, un gráfico de este tipo ayuda a conocer cuánto se puede pagar en concepto de alquiler.

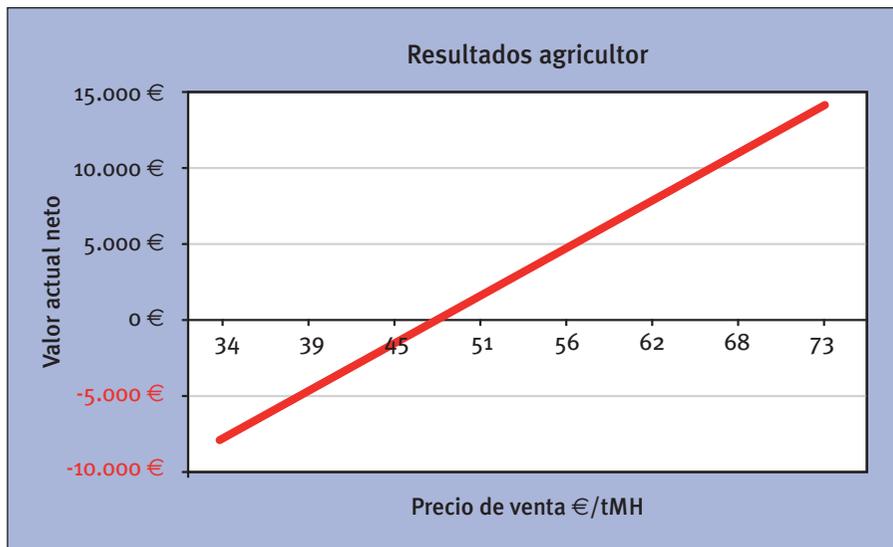


Los costes del aprovechamiento influyen en gran medida en la rentabilidad de un cultivo de este tipo. Por encima de 3.000 €/ha, el rendimiento es negativo. Estos costes pueden ser controlados en alguna medida por el operador, por lo que se puede actuar sobre ellos y, por tanto, influir en la rentabilidad.

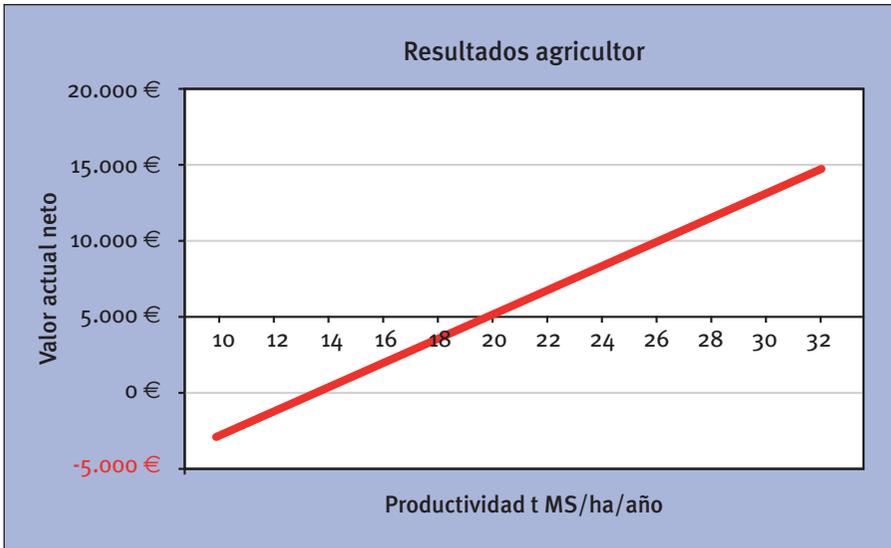


El operador no puede actuar sobre los precios de mercado, pero sí puede aprovechar las mejores oportunidades de venta, es decir, alcanzar acuerdos a largo plazo que le garanticen un precio estable, o asumir más riesgo y buscar un cliente para cada cosecha y tener la posibilidad de mejorar los ingresos por ventas.

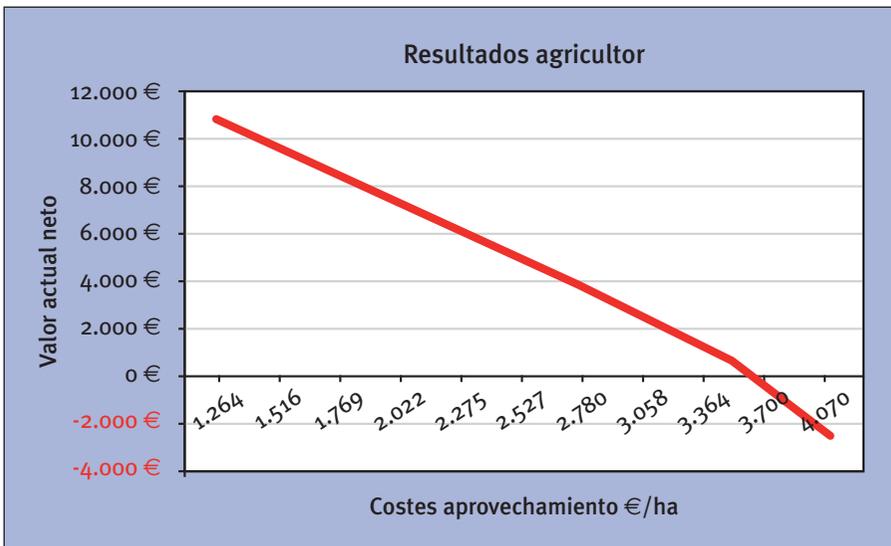
B) OPCIÓN CULTIVO POR PARTE DEL AGRICULTOR



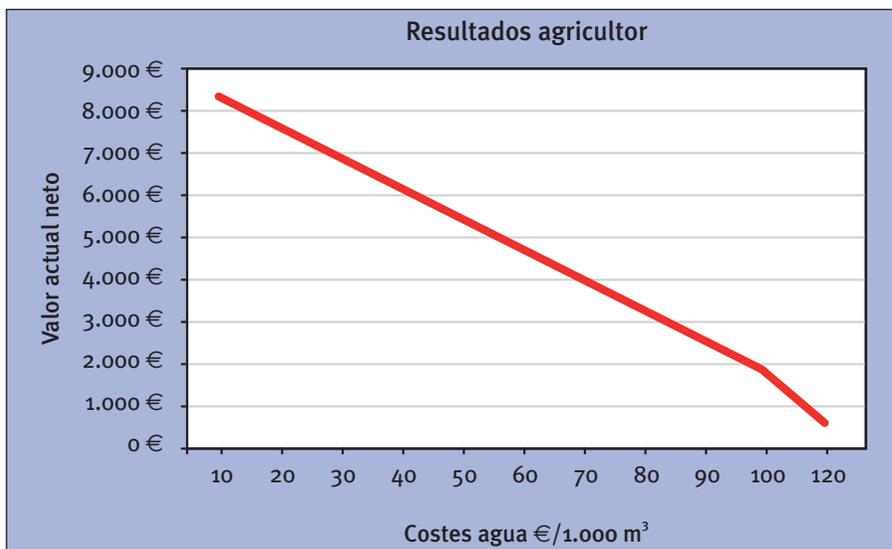
En las condiciones del estudio, el agricultor no debería vender la biomasa por menos de 50 €/t, ya que estaría perdiendo dinero. Por eso es recomendable asegurarse de que los precios de mercado están por encima de tal entorno con anterioridad a hacer una plantación para explotar a turno corto. La densidad depende del turno, cuestión que hace que una vez hayamos tomado la decisión, difícilmente podamos alargar el turno sin poner en peligro el vigor de la masa, salvo a costa de un carísimo aclareo que posiblemente no se viera compensado por el cambio de criterio de explotación.



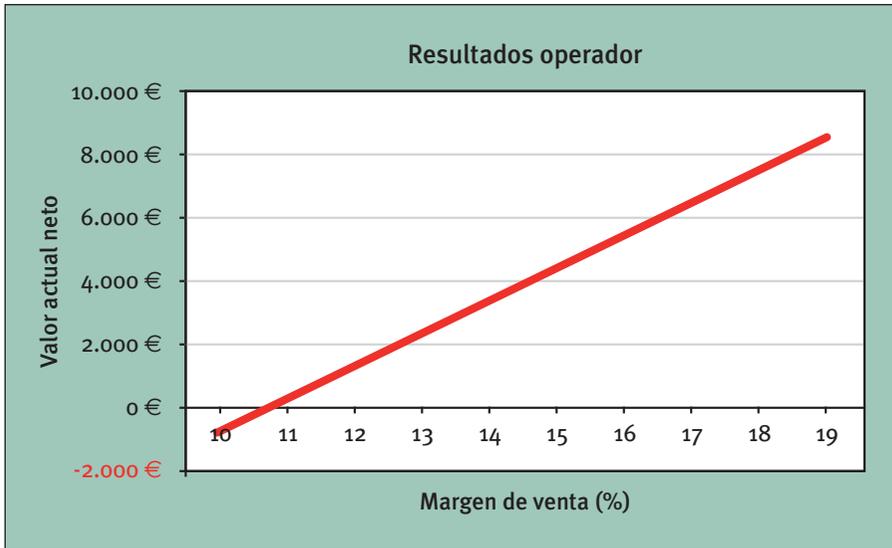
Como en el caso del operador, el agricultor debe tratar de obtener la máxima productividad de madera en cada corta, o bien dejar pasar los meses de hoja para aumentar la cantidad de biomasa extraíble del monte hasta unos mínimos que le permitan obtener un valor actual neto en torno a 5.000 €/ha, que equivale a una tasa de rentabilidad del 9%.



Cuanto más se controlen o limiten los costes de aprovechamiento, más se mejora la rentabilidad. Para ello, dentro de lo posible habrá que poner especial cuidado en la adquisición de fertilizante y en la subcontratación de los servicios de cosecha o saca, tratando de hacerlas en periodos de menor demanda de mano de obra en la zona.



El coste del agua es un factor que, como se puede ver, es de tal importancia que puede hacer económicamente inviable el cultivo. Por eso, es conveniente situar la chopera en lugares con la capa freática alta y en caso de ser necesario, regar en las mejores condiciones de aprovechamiento por la chopera. Regando con eficiencia se podrán mantener controlados estos costes.



En el caso de que el operador sea un mero intermediario, no dando más valor añadido que la comercialización de la biomasa, es sólo el margen de venta el que define la rentabilidad. Es decir, que si se quieren hacer negocios seguros, será bueno establecer acuerdos a largo plazo tanto con agricultores como con la empresa que utilice la biomasa para energía. Por el contrario, si se quiere ser más agresivo, habrá que ir al mercado a corto plazo para obtener mejores márgenes, pero también con mayor riesgo.

3.4.3 Turno corto (3-5 años): Eucaliptos

Hay muchas especies adaptadas en nuestro país como cultivos energéticos para la producción de biocombustibles sólidos, por ser aptas a rotaciones cortas. Generalmente se han cultivado en zonas de escasa altitud y sin inviernos fríos.

El cultivo tradicional de eucalipto no ha necesitado el uso de regadío, pero resulta interesante, a la par que eficaz, el riego con aguas contaminadas, actuando así como filtro verde en algunas zonas de la Península Ibérica. En zonas con temperaturas altas y suelos de regadío pobres (zona meridional de la Península), no favorables para el cultivo de chopo, la mejor alternativa es el eucalipto.

El eucalipto necesita precipitaciones importantes para producir un buen crecimiento. En España se pueden considerar como especies fiables en lo referente a su cultivo y su aplicación energética: *E. rostrata* y *E. globulus*, debido a su tradicional aprovechamiento para celulosa.

Una posibilidad más que interesante es el cultivo de eucalipto en zonas agrícolas marginales o en zonas deforestadas, con el fin de producir biomasa.

En algunos países como Marruecos, se dedica la primera corta a celulosa y los rebrotes posteriores a leña para la producción de energía, aprovechando también los tocones para acabar con la vida productiva del cultivo.

Las especies de eucalipto más aconsejables para el aprovechamiento energético en España son:

- *E. globulus*, en zonas agrícolas de secano abandonadas y praderas del Norte o bien del Suroeste. Esta especie requiere entre 500-1.500 mm anuales de precipitación y soporta una estación seca de hasta tres meses, no rigurosa, temperaturas mínimas absolutas superiores a -5 °C, y una altitud de 0-350 metros sobre el nivel del mar, coincidiendo con las zonas costeras de Galicia y la Cornisa cantábrica.
- *E. rostrata*, en altitudes de 0-600 metros, con precipitaciones de 225-640 mm, en 40-150 días, resistente a la sequía, y soporta heladas de hasta 13 días consecutivos, pero no nevadas. En cuanto a suelos es menos exigente que *Eucalyptus globulus*, prefiriendo los sueltos y arenosos y tolerando ácidos.
- *E. cladocalix*, en zonas agrícolas de secano abandonadas o regadíos de mala calidad. Requiere más de 500 mm de precipitación media anual, temperaturas mínimas superiores a 7 °C y una altitud inferior a 600 m por encima del nivel del mar, coincidiendo con las zonas costeras del Suroeste andaluz.

Ésta última produce más en el rebrote y da una madera más densa y de mejor calidad para quemar, resistiendo mejor la sequía.

El eucalipto es un árbol con un buen potencial para producción de energía. Las diferentes aplicaciones que tienen sus maderas, desde estacas, leñas, celulosa, energía, etc. es una de las claves para su implante como una fuente continua de aprovisionamiento y suministro de biomasa para la generación de energía.

3.4.4 Turno corto a medio (15-18 años): Quercus

En la zona interior de España donde la falta de agua para riego y el frío son inevitables, el chopo y el eucalipto no pueden ser masivamente implantados como cultivos de aprovechamiento energético. Sin embargo, algunas de las especies de Quercus son las más aptas para este tipo de aprovechamiento.

Dentro de los *Quercus* autóctonos hay dos usos complementarios y diferentes, con el mismo fin:

- 1 Como monte bajo gestionados mediante la selvicultura tradicional, es decir, cultivos forestales sobre suelos forestales.
- 2 Como una posible repoblación de *Quercus* sobre suelos agrícolas abandonados para un aprovechamiento energético.

Los *Quercus* no son especies de rápido crecimiento, pero están bien adaptadas a turno corto. Tienen una eficacia reconocida en la producción de leñas de alta calidad, al igual que son conocidas en España sus normas de cultivo y aprovechamiento. Sin embargo, salvo el *Q. robur* y el *Q. petraea*, su utilidad para sierra es escaso por carecer de interés técnico-económico.

Al formar parte de los ecosistemas autóctonos españoles, en secano y a rotaciones o turnos cortos, los *Quercus* alcanzan un gran interés productivo, por su bajo coste de mantenimiento, por su longevidad y por los beneficios ambientales que genera este tipo de cultivo.

En las plantaciones sobre suelos agrícolas marginales un cultivo de *Quercus* puede integrarse como un monte bajo de leñas con una mecanización mucho más sencilla. Son muchas las especies adecuadas para producir energía en terrenos agrícolas abandonados (encina, rebollo, alcornoque, quejigo, robles...) adaptándose muy bien a las zonas de secano más continental de España.

Para su uso como productores de biocombustibles sólidos es imprescindible reforestar a densidades mucho mayores que las aplicadas tradicionalmente.





4 Especies agrícolas

El objetivo dentro del ámbito agrícola es la producción de biomasa lignocelulósica tanto mediante cultivos tradicionales, como con nuevas especies. Para ello, distintos organismos públicos y privados han investigado durante varios años qué especies y variedades son las más propicias como cultivos energéticos.

4.1 ESPECIES DE LA AGRICULTURA TRADICIONAL

Entre estas especies se encuentran los cereales, la colza, el girasol, etcétera, y en general, plantas anuales que se han venido cultivando con el objetivo de utilizar sus frutos y semillas para la alimentación humana, animal y para la industria textil y química, entre otras.

En este punto, es importante distinguir entre cultivos de invierno y de verano ya que sus características, y las exigencias de riego sobre todo, son críticas a la hora de estudiar su idoneidad, viabilidad, su productividad y rentabilidad, tanto en términos agronómicos, medioambientales y energéticos como económicos.

Por otro lado, en determinados lugares donde se dispone de agua y el clima es adecuado, las especies de verano más prometedoras son el maíz y el sorgo.

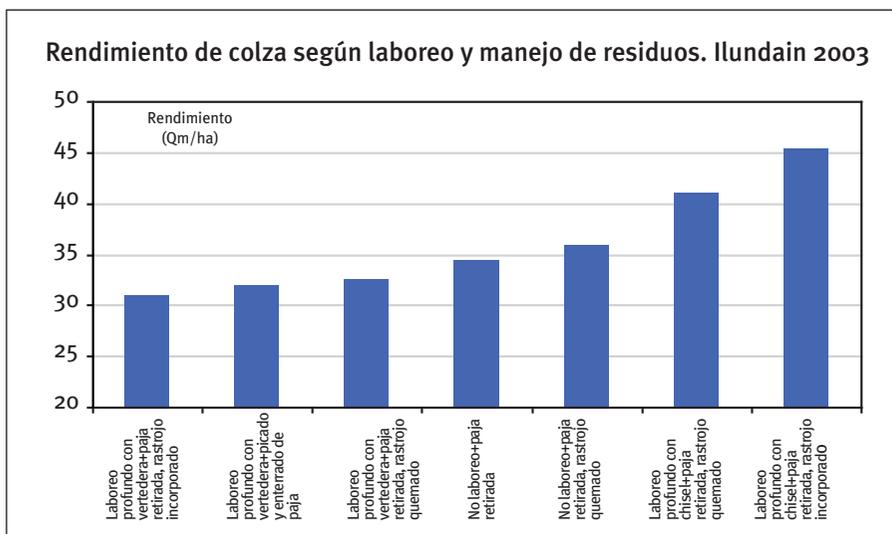
4.1.1 Colza

La colza es una crucífera de aprovechamiento tradicional para la producción de semilla oleaginosa. Se siembra en suelos frescos y fértiles en climas no excesivamente fríos, y con una pluviosidad razonable, no muy habitual en la media

española. Por eso, se viene cultivando en el tercio norte de la península Ibérica. La siembra es uno de los momentos más críticos para el cultivo, siendo muy importante acertar con la preparación del terreno adecuada y la dosis de semilla apropiada.

El factor crítico para un buen desarrollo del cultivo reside en obtener una buena instalación del mismo, con una población de planta suficiente y repartida de forma homogénea. Es más que importante conseguir la dosis de siembra adecuada debido al elevado coste de las semillas, sobre todo en el caso de las variedades híbridas. Así, la dosis de siembra aconsejable para variedades no híbridas es de 50 a 100 semilla/m² y en variedades híbridas de 40 a 60 semilla/m². Las variedades híbridas pueden sembrarse con dosis inferiores puesto que tienen mayor capacidad de ramificación.

Los rendimientos de este tipo de cultivo, según su manejo, quedan reflejados en el gráfico siguiente.



Fuente: ITGA de Navarra. Nota: 1 Qm = 200 kg.

4.1.2 Cereales

Aunque existe una amplia oferta de posibilidades de nuevos cultivos en la bibliografía para producir biomasa, los cereales, dada la tradición de cultivo existente en nuestro país, son uno de los más apropiados para la producción de biomasa para la producción de calor o de calor y electricidad.

Todas las especies de cereales de invierno son susceptibles de utilizarse en la producción de energía (trigos, cebadas, triticales, avenas y centenos principalmente), aunque unos serán más favorables que otros para el uso energético.

Los triticales, avenas y centenos son las especies con menores índices de cosecha (biomasa grano/biomasa total) lo que las hace más favorables al aprovechamiento de su biomasa integral para producir energía. Avenas y centenos tienen además la ventaja de ser menores demandantes de nitrógeno y, por tanto, menos costosos de producir. Aunque no hay que obviar que también son más sensibles al encamado y menos aconsejables en tierras de alta productividad.

El sistema de cultivo es el mismo si hablamos de una producción de grano que si hablamos de una producción de biomasa, siendo la recolección el único elemento diferente a tener en cuenta (siega de la planta entera y empaquetado posterior). De este modo, los costes de producción son similares a los costes tradicionales de producir cereales, aunque la recolección de la biomasa es más costosa económicamente que la recolección del grano.

Zona Tipo	Avena (biomasa)	Cebada (grano)	Trigo (grano)
Montaña	11,7	5,4	4,7
Media montaña	9,9	3,4	4,3
Baja montaña	9,6	4,1	4,0
Intermedia	8,1	3,0	4,0
Semiárida	7,0	3,0	4,2
Árida	4,2	2,2	2,5

Producciones potenciales de biomasa de avena comparadas con la producción de los cereales tradicionales en distintas zonas climáticas de Navarra. Campaña 2007. Fuente: ITGA Navarra.

Esto hace que los costes totales de producir biomasa sean actualmente superiores a la producción de grano, aunque los sistemas de recolección de la biomasa actuales tienen todavía mucho que evolucionar, mejorando su eficiencia y reduciendo por tanto el coste final. Es razonable pensar que los costes finales de producir biomasa con cereales se sitúen en un horizonte próximo en torno al 20% por encima de la producción de grano, según estimaciones del ITGA de Navarra.

De un modo sencillo se puede estimar que los precios de la biomasa de los cereales deberían situarse próximos a la mitad del precio del grano del mismo cereal.

4.2 NUEVAS ESPECIES

Entre las denominadas nuevas especies para la producción de biomasa lignocelulósica se pueden mencionar *Brassica carinata*, *Sorghum bicolor* y *Cynara cardunculus*.

4.2.1 *Brassica carinata*

La *Brassica carinata* es, como la colza, una crucífera. No se cultiva como oleaginosa porque la torta del grano es tóxica, y eso hace perder mucho valor a la semilla. Sus mayores virtudes son:

- la gran producción de biomasa,
- el hecho de ser menos exigente que *Brassica napus*, y
- que se integra muy bien en las rotaciones, siendo más beneficiosa que un año de barbecho.

Esta última cualidad la hace apta, y hasta económicamente sostenible, ya que se ha demostrado que produce incrementos de rendimiento en los cultivos posteriores de cereal, por ejemplo.



Manejo de *Brassica carinata*. Fuente: ITGA de Navarra.

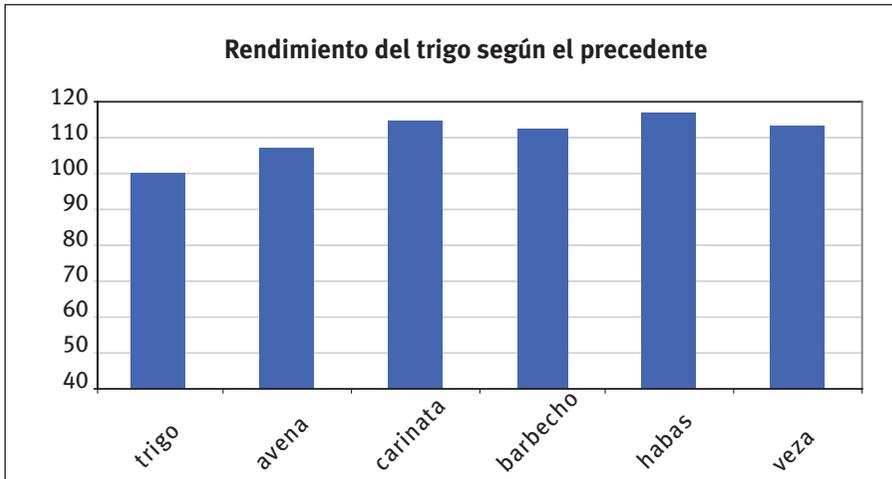
El cultivo de brasicas se integra perfectamente en la rotación cerealista (esquema 1), mejorando los rendimientos en los cereales siguientes y permitiendo la reducción del uso de fertilizantes nitrogenados y de fitosanitarios.

1 CABECERA
CULTIVO PARA BIOMASA
(BRASICAS) 1/6 año, 1/6 superficie

2 CEREALES
Clima húmedo: Trigo, cebada
Clima seco: Cebada, cebada

LEGUMINOSA

Esquema 1. Rotación de cultivos para producción de biomasa herbácea.



Fuente: Estudios del ITGA de Navarra.

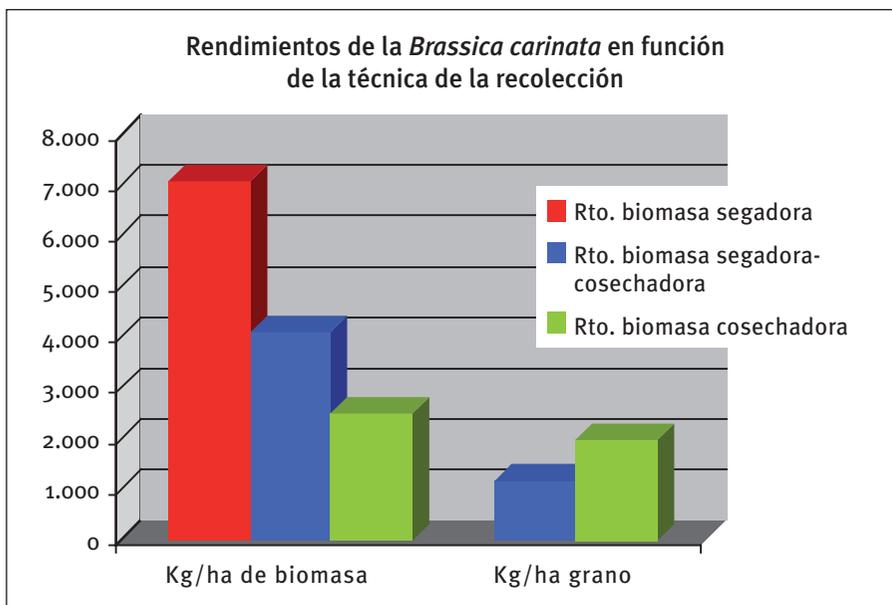
La recolección o siega se realiza cuando empiezan a formarse las silicuas y antes de que se haya formado el grano completamente, ya que lo que se pretende es un mayor desarrollo de la parte vegetativa que de la reproductora.

La biomasa así producida tiene un contenido en humedad inicial del 60-80% que se deja reducir en campo hasta un 15% antes de hilerarse y empacarse.

El rendimiento en masa, al igual que cualquier otra planta incluye una serie de pérdidas de biomasa en las diferentes operaciones de manejo, es decir, en las labores que se realizan (siega, hilerado, empacado y manipulación). Para reducir estas pérdidas al mínimo práctico, se han estudiado diferentes soluciones en cuanto al método de recolección. Con una adecuada adaptación de la maquinaria centrada en la recolección de la parte vegetativa, se puede conseguir un progreso muy rápido en el aumento de la cantidad de biomasa recogida o, lo que es lo mismo, en la reducción de las pérdidas mencionadas.

Operación	% Pérdidas
Siega	3
Hilerado	9
Empacado	6
TOTAL	18

Valores indicativos de las pérdidas producidas en la recolección de biomasa de brasicas.
Fuente: ITGA de Navarra.



Fuente: ITGA de Navarra.

Los costes de producción de la biomasa del cultivo de *Brassica carinata*, tras un análisis económico queda reflejado en la tabla siguiente:

Prod. t/ha	Coste de producción €/ha		
	1 ^{er} tercil	2 ^º tercil	3 ^{er} tercil
6	82,8	72	60,1
8	67,9	59,8	50,9
10	58,9	52,5	45,3
12	53	47,6	41,6
14	48,7	44,1	39
16	45,5	41,5	37

Ref. precio biomasa puesta en fábrica: 36 €/t. Fuente: Estudios del ITGA de Navarra.

La *Brassica carinata* como cultivo no alimentario para el aprovechamiento de su biomasa se adapta bien a los secanos frescos e intermedios (Navarra), con producciones que se sitúan en torno a las 6-8 t/ha de biomasa. Además presenta un coste de producción, incluida recolección y transporte a fábrica, en torno a 50-70 €/t. Tanto el cultivo como la recolección de la biomasa de esta especie pueden hacerse con maquinaria convencional, sin que sean necesarias inversiones extraordinarias por parte del productor.

La especie en consideración es recomendable para ser la cabecera de un ciclo de rotación consistente en brásica, seguida de un cereal y una leguminosa.

Este sistema de rotación (esquema 1) consiste en que el primer año se implanta un cultivo de cabecera de biomasa (por ejemplo brásicas), los dos años siguientes un cultivo de cereal y, por último, uno de leguminosas, consiguiendo un rendimiento mucho mayor en cada cultivo debido a la interacción que se da entre ellos.

El balance energético de algunas especies agrícolas que se pueden emplear para producir biomasa lignocelulósica ha sido estudiado en un proyecto financiado por la UE. Los resultados son los siguientes:

Especie	Producción de materia seca	Output energético	Input energético	Balance (Output-Input)	Rendimiento (Output-Input)
<i>B. carinata</i> A. Braun	5,2	95.609	16.402	78.873	5,8
<i>Brassica napus</i>	4,8	88.702	15.407	73.315	5,7
<i>Sorghum bicolor</i>	21,4	386.719	39.713	347.006	9,7

Proyecto Bioelectricity crops. Contrato NNE-2001-0065, ITGA de Navarra y J. Fernández.

Para el cálculo del insumo energético, se han tenido en cuenta todos los insumos, incluso la fabricación de la maquinaria necesaria para el cultivo y la cosecha.

4.2.2 Sorgo (*Sorghum bicolor*)

El sorgo es una especie anual de origen tropical, de la familia de las gramíneas. Sus variedades para obtención de grano o forrajeras son conocidas de tiempo atrás. Entre las variedades susceptibles de cultivos con fines de producción de biomasa lignocelulósica destaca el sorgo para fibra.



Cosecha de sorgo. Fuente: ITGA de Navarra.

El sorgo para fibra, con las limitaciones de temperatura y necesidad de riegos, es de los cultivos más prometedores en cuanto a la producción de biomasa. Los aprovechamientos energéticos de este cultivo son dos: la producción del grano para la obtención de biocarburantes, y el resto de la planta (que puede crecer hasta los 4 m de altura) para usos térmicos o eléctricos. Los rendimientos son muy variables en función de la zona de cultivo; en el Sur de España se han obtenido datos muy positivos en cuanto a la producción de materia seca en condiciones de cultivo exigentes (fertilidad, disponibilidad de agua y temperaturas suaves). Existen empresas e instituciones españolas realizando experiencias cuyos resultados publicados estiman la productividad en 80 t/ha. Los resultados indican que se podrían obtener por ha 10 kg de azúcar y 17 t de materia seca. Para obtener buenas producciones hacen falta suelos de mediana a buena calidad, siembra para obtener de 150.000 a 200.000 plantas/ha y riegos de 7.000 m³/ha y año.

4.2.3 Cardo (*Cynara cardunculus*)

El cardo es una especie vivaz muy bien adaptada al clima mediterráneo de veranos secos y calurosos. Cuando el cultivo está establecido puede alcanzar producciones totales de biomasa superiores a 18-20 t de materia seca por ha y año.

En el cultivo de cardo se debe diferenciar entre el primer año, que es el de implantación, donde el desarrollo es lento ya que procede de semilla, de los años sucesivos en los que la planta rebrota de las yemas remanentes del cuello de la raíz y forma rápidamente una roseta de hojas basales gracias a la reservas acumuladas en la raíz. Se puede decir que el cultivo de cardo entra en producción a partir del segundo año, pudiendo permanecer en el mismo terreno una cantidad de años ilimitada siempre que se lleven a cabo los ínfimos cuidados necesarios para su mantenimiento.

En las siguientes tablas se incluyen unos costes orientativos de la implantación del cultivo y del coste de operación anual.

Coste de implantación del cultivo de <i>C. cardunculus</i> en €/ha	
Operación o materia	€/ha
Alzado	100
Gradeo	13
Abonado	13
Abono 0,7 t/ha	150
Siembra con máquina neumática	26

Coste de implantación del cultivo de *C. cardunculus* en €/ha (Continuación)

2 pasadas de cultivador	100
Semilla	15
Alquiler del terreno	100
Total costes de implantación	517

Desglose de costes de implantación del cultivo de *Cynara cardunculus*. Fuente. J. Fernández, Fernando Sebastián, CIRCE, y elaboración propia.

La producción del cardo oscila sobre las 18 toneladas de materia seca al año y ha, más dos toneladas de semilla oleaginosa, que también tiene mercado.

Coste de operación anual en €/ha

Fertilización 0,5 t/ha	105
Cosechado, empacado y transporte	300
Alquiler de terreno	100
Repercusión coste de implantación en 7 años	65
Venta de semilla	-200
Coste anual por ha	359

Para una producción media como la antedicha, durante los siete años de duración de la cepa el coste es de 20 € por tonelada, puesta en planta. Este precio es competitivo para aplicaciones térmicas, con respecto al coste de los combustibles fósiles.



5 Glosario

En este documento se incluyen algunos términos empleados en los ámbitos forestal y agrícola, pero que pueden resultar extraños para muchos lectores. Seguidamente se trata de explicar con otros términos el significado de tales palabras. Por tanto, no se persigue tanto un rigor científico en las definiciones, como su comprensión para el común de los lectores.

Pie: árbol de cualquier edad, especie y origen.

Sistema radical: conjunto de raíces de una planta.

Monte alto: estas dos expresiones no se refieren a la altura de los pies que forman una masa. El monte alto se aplica a la masa de árboles formada por pies que proceden de semilla, es decir, de reproducción sexual; a los ejemplares jóvenes procedentes de semilla se les llama muchas veces brinzales.

Monte bajo: se aplica a la masa de árboles formada por pies que proceden de reproducción vegetativa, no sexual, es decir, los que tradicionalmente se llaman brotes, ya sean de cepa (tocón) o raíz, y también se llaman chirpiales.

Brinzal: se llama así al pie joven procedente de reproducción sexual. En general, para una misma especie, crece más despacio en su infancia y juventud que los ejemplares de reproducción vegetativa — chirpiales — pero mantiene duran-

te más tiempo su crecimiento en altura y, por tanto, para una misma edad en la fase adulta, será más alto que un chirpial. Su porte es más esbelto, su longevidad es mayor, y su resistencia a enfermedades y plagas es mayor a medio y largo plazo. No obstante, en su juventud es más sensible a cualquier revés climático, al ataque de plagas y enfermedades, competencia por el suelo o la luz, etc.

Chirpial (o renuevo): se llama así al pie que procede de reproducción vegetativa (ver brinzal). El hecho de nacer disponiendo del sistema radical del árbol preexistente le permite crecer rápidamente, tener ganado un cierto espacio en el bosque y llegar con sus raíces a nutrientes y agua con más facilidad que los brinzales, que han de desarrollar su sistema radical por completo. No obstante, la cepa o raíz de la que nace el chirpial tiene la edad del árbol preexistente y, al envejecer antes que el brote, limita el desarrollo y es más sensible a ataques de agentes externos a medio y largo plazo. La configuración genética celular de los brotes es idéntica a la del pie preexistente.

Corta a hecho: aprovechamiento final de una masa arbolada que consiste en cortar todos los pies existentes en una determinada zona.

Tocón: parte aérea de un árbol que queda unido a la raíz cuando se corta dicho árbol. Cuando la especie tiene la capacidad de rebrotar, a sus tocones también se les llama cepas.

Prácticas culturales: conjunto de actividades que se realizan en el monte o en el campo, relativas al cultivo de las plantas.

Troza: cada una de las partes en que se trocea el fuste de un árbol tras ser apeado, para facilitar su manejo y transporte. Dependiendo de la especie y del destino final de la madera, las trozas varían en su longitud.

Reproducción vegetativa: reproducción de una planta sin intervención de la reproducción sexual, es decir, sin semilla. La reproducción vegetativa se produce mediante brotes, que crecen al cortarse un pie preexistente, y se desarrollan por activación de las yemas durmientes en los tocones o en las raíces que no se arrancan y sacan del monte. A los pies jóvenes que se originan de esta manera se les llama chirpiales.

Clareo y aclareo: prácticas culturales consistentes en la eliminación de pies de una masa arbolada que tiene como objetivo reducir la competencia entre los diferentes pies, y que los que se dejen crezcan más deprisa y con mejor porte, y por tanto, mejorar la calidad de la madera y el rendimiento económico de la corta final. Se suele practicar cuando los pies han alcanzado los 2-3 m de altura. La biomasa retirada puede ser aprovechada como madera industrial y como biomasa energética.

Resalveo: es una práctica cultural que consiste en cortar los rebrotes menos vigorosos para favorecer los pies más desarrollados, y tiene como objetivo acelerar la regeneración natural y seleccionar los rebrotes —llamados "chirpiales o renuevos"— más adecuados. En las especies arbóreas se deja como mínimo un tercio de los rebrotes. No se practica en los arbustos.





Bibliografía y fuentes adicionales de información

- Montoya, J.M. *Planes de abastecimiento de biomasa a partir de cultivos energéticos leñosos de rotación corta para co-combustión*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Tolosana, E., Ambrosio, Y., Laina, R., Martínez, R. y Pinillos, F. *Rendimientos y costes de diferentes aprovechamientos de la biomasa forestal*. Universidad Politécnica de Madrid y CESEFOR.
- Fernández, J. *Jornada sobre biocombustibles sólidos para usos térmicos y co-combustión*. Junio 2005.
- Lafarga, A., Lezáun, J., Armesto, A. y Eslava, V. *Brassica carinata: Nuevo cultivo para la producción de biomasa para el mercado no alimentario*. ITGA. Junio 2004.
- Lafarga, A., Goñi, J., Lezáun, J., Armesto, A. y Eslava, V. *Brassica carinata: como cultivo energético*. ITGA. Mayo 2006.
- Lafarga, A., Lezáun, J. y Armesto, A. *La colza en Navarra. Evolución y perspectivas*. ITGA de Navarra. Diciembre 2003.

IDA Instituto para la
Diversificación y
Ahorro de la Energía

c/ Madera, 8 - 28004 Madrid
Tel.: 91 456 49 00. Fax: 91 523 04 14
comunicacion@idae.es
www.idae.es



P.V.P.: 5 € (IVA incluido)