



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-553

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Análisis de ciclo de vida de la obtención de astilla a partir de biomasa residual de cortas de choperas: estudio de caso en el Valle del Genil (Granada)

TOLOSANA, E.¹, LAINA, R.¹ y HERRERO, S.J.¹

¹E.T.S.I. de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. eduardo.tolosana@upm.es

Resumen

Se ha realizado un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de una plantación de chopo con un ciclo de cultivo convencional para aprovechamiento integrado de madera de sierra y astilla para uso energético en el valle del Genil (Granada), mediante el software SimaPro en aplicación de la metodología ReCiPe 2008. Se consideraron las categorías de impacto cambio climático, toxicidad humana, oxidantes fotoquímicos, partículas en suspensión, acidificación terrestre, eutrofización marina y de agua dulce, ecotoxicidad terrestre, marina y de agua dulce, agotamiento de reservas hídricas, metales y combustibles fósiles. Paralelamente, se analizó económicamente la plantación mediante los indicadores Valor Actualizado Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR). Las fases del aprovechamiento y de la aplicación de fertilizantes son las más impactantes del sistema. La plantación resulta económicamente rentable (TIR del 7,3%). La comparación con un estudio previo de un cultivo energético de chopo de turno corto en la misma comarca concluye que la plantación convencional con aprovechamiento integral reduce, en las categorías analizadas, los impactos ambientales respecto al cultivo energético, y que, en el momento del cálculo y bajo las hipótesis asumidas, la rentabilidad económica de la plantación es mayor que la correspondiente al cultivo energético.

Palabras clave

ACV, plantación, aprovechamiento integrado, biomasa, Populus X euroamericana, VAN, TIR, cultivo energético.

1. Introducción

A pesar de sus elevados requerimientos hídricos, la producción industrial de chopo está particularmente bien asentada en plantaciones en España, siendo su principal destino la producción de chapa de desenrollado (TOLOSANA et al., 2011). Estas plantaciones se gestionan con turnos que oscilan normalmente entre 10 y 15 años, con densidades entre 350 y 700 pies/ha y se produce la eliminación de los tocones al final del turno (BARRIO-ANTA et al., 2008, CAÑELLAS et al., 2012, PÉREZ-CRUZADO et al., 2014). En los últimos diez años, los sistemas de aprovechamiento han incorporado con frecuencia la recolección de ramas, puntas y, en algunos casos, tocones, para uso bioenergético.

Se espera que la bioenergía moderna juegue un papel clave en la transformación del sector energético europeo (COMISIÓN EUROPEA, 2009, IDAE, 2010, IEA, 2012). En la actualidad, la mayor parte de la biomasa sólida empleada para producción energética se genera como subproducto de los sectores agrícola, forestal e industrial de la madera. El chopo tiene potencial como fuente de biomasa sólida por su elevado crecimiento bajo las condiciones estacionales adecuadas y, como cultivo energético, por su capacidad de rebrote, por lo que sus plantaciones a turnos cortos bajo el método de beneficio de monte bajo han atraído un gran interés científico e industrial en numerosas zonas del mundo, incluida la cuenca mediterránea (CAÑELLAS et al., 2012, SIXTO et al., 2010, TESTA et al., 2014).

Este trabajo pretende comparar, bajo unas determinadas condiciones estacionales, tanto económica como ambientalmente, los regímenes de cultivo del chopo como monte bajo a turno corto para producción de biomasa y como plantación para producción integrada de madera para sierra y biomasa siguiendo el esquema más tradicional, en monte alto.

La opción del cultivo energético requiere densidades mayores, incluso llegando a superar los 15.000 pies/ha) y turnos muy inferiores, incrementando la producción hasta valores que pueden superar las 35 t de materia seca (MS)/(ha-año), como indican SIXTO et al. (2007) o TESTA et al. (2014). De acuerdo con publicaciones recientes, las plantaciones de chopo tienen el potencial de suministrar hasta el 1.0 % de la demanda energética española en el año 2020 (PÉREZ-CRUZADO et al., 2014).

Por otro lado, los aspectos económicos de las cadenas de suministro de biomasa tanto de plantaciones convencionales de chopo para el aprovechamiento integrado de madera y biomasa como de cultivos energéticos a turno corto han sido investigados en numerosos trabajos, con resultados bastante variables debido a las diferencias en los costes del suelo, los precios de las astillas y la madera, la disponibilidad de subvenciones públicas para uno u otro uso, y finalmente de la producción de biomasa, que depende de muchos factores, como el tipo de suelo, las condiciones climáticas, la disponibilidad hídrica, las especies y clones, etc. (ERICSSON et al., 2009; TOLOSANA et al., 2011; HAUK et al., 2014; TESTA et al., 2014; SAN MIGUEL et al., 2015).

Los objetivos generales del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) son la mejora de los sistemas productivos reduciendo sus impactos ambientales. Esta herramienta de análisis proporciona información a los decisores políticos y al público en general. El ACV ha sido empleado con mucha frecuencia para analizar la sostenibilidad de sistemas de producción de base biológica (CHERUBINI & STROMMAN, 2011). Por ejemplo, se ha aplicado esta herramienta a los cultivos energéticos de chopo en España (BUTNAR et al., 2010, GASOL et al., 2009, GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2014). No obstante, no se ha llevado a cabo aún su aplicación para comparar sistemas de producción exclusivamente bioenergéticos con sistemas mixtos de producción de madera y biomasa para uso energético con esta misma especie.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el rendimiento económico y ambiental de la producción combinada de madera y biomasa para uso energético en una plantación convencional irrigada en el valle del Genil. Como objetivo complementario, se plantea la comparación en ambos aspectos con un estudio anterior sobre un cultivo energético de chopo a turno corto en la misma zona geográfica (SAN MIGUEL et al., 2015).

3. Metodología

El ACV se llevó a cabo de acuerdo con la metodología descrita en la Norma ISO 14040-14044:2006, considerando las siguientes fases: Preparación del suelo y acondicionamiento, Cultivo, Aprovechamiento y transporte, Eliminación de tocones. La metodología ReCiPe 2009 Europe H (Midpoint) v1.09 fue la utilizada para calcular los impactos agregados en las categorías ambientales seleccionadas. El programa informático SimaPro v8.0 fue el empleado para construir los modelos y llevar a cabo los cálculos.

La unidad funcional seleccionada, con vistas a la comparación entre usos del suelo, fue 1.0 ha. Más adelante, se utiliza también la tonelada seca de astillas de madera como unidad funcional para

comparar directamente la biomasa producida en los dos sistemas (plantación convencional con aprovechamiento integrado y cultivo energético).

3.1. Descripción del sistema

El escenario base, procedente de la toma de datos de campo para un estudio de rendimientos en el año 2009 (TOLOSANA et al., 2011), es una plantación de chopo (*Populus X euroamericana*) de 714 pies/ha, con un turno de 10 años, situada en la vega del Genil, provincia de Granada, donde la precipitación media anual es de 497 mm. La producción de madera en rollo estimada pesando la cosecha y determinando la humedad sobre muestras de madera y biomasa, fue de 17,6 toneladas secas de madera y 3,6 de ramas y puntas por hectárea y año.

Este trabajo proporciona información actualizada sobre prácticas de cultivo, maquinaria empleada habitualmente y precios en el sur de España. La Tabla 1 muestra esquemáticamente los procesos incluidos en el sistema de producción objeto de estudio.

Tabla 1. Fases y procesos del sistema productivo integrado de madera y biomasa considerados para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con indicación del año del turno en que tienen lugar.

OPERACIONES/MAQUINARIA		AÑO												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Preparación y acondicionamiento del terreno	Alzado (30 cm)/ Vertedera acoplada a tractor de 74 Kw	1												
	Gradeo / Rotovator acoplado a TDF de tractor de 74 Kw	1												
	Señalamiento / Puntos de cruce de pasadas de tractor de 59 Kw con rejón.	1												
Plantación	Plantación a raíz superficial (90 cm) / Barrena helicoidal acoplada a TDF de tractor de 59 kW.	1												
Tratamientos culturales	Riego / 2.750 m ³ /(haaño) en 12 dosis durante el periodo vegetativo de verano, cada 15 días	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	Abonado superficial (550 kg/ha 15/15/15 NPK) / abonadora centrífuga sobre tractor de 59 kW		1	1	1	1								
	Control mecánico de malas hierbas / Desbrozadora de cadenas acoplada a tractor de 74 kW, pases cruzados		2	2	2	2								
	Podas / operarios con podadoras neumáticas sobre plataformas elevadoras movidas por tractores de 24 kW, autopropulsados con brazo telescópico.		1	1	1	1								
Aprovechamiento	Aprovechamiento de madera en rollo y biomasa. Astillado de biomasa.													1
Transporte	Transporte (madera y astillas)													1
Eliminación de tocones	Barrenado de tocones / barrena helicoidal a TDF de tractor de 118 kW													1

La fase de aprovechamiento se documenta a través de un estudio de tiempos y rendimientos (TOLOSANA et al., 2011), siendo el apeo llevado a cabo por un motoserrista ayudado por una retroexcavadora ligera (105 kW) para dirigir el apeo. La misma máquina, equipada con un cabezal procesador, procesaba la madera apilando las trozas. Un tractor agrícola de 152 kW, adaptado con

un remolque de 25 m³ aparentes y una grúa maderera, cargaba las trozas y las transportaba desde la plantación a la serrería, situada a una distancia media de las choperas de 15 km. Las ramas y copas fueron apiladas por un cargador telescópico con un apero tipo “peine” (Figura 1). Una astilladora acoplada a la toma de fuerza de otro tractor de 155 kW procesó la biomasa, cargando la astilla a través de la cañonera sobre el remolque de 35 m³ de un tractor, que lo extrajo hasta un cargadero accesible a tráiler. A partir de ahí, se considera una distancia de transporte de la astilla a la planta de consumo de 25 km, realizándose el transporte con un camión semi-remolque (tráiler) de piso móvil de 184 kW de potencia.

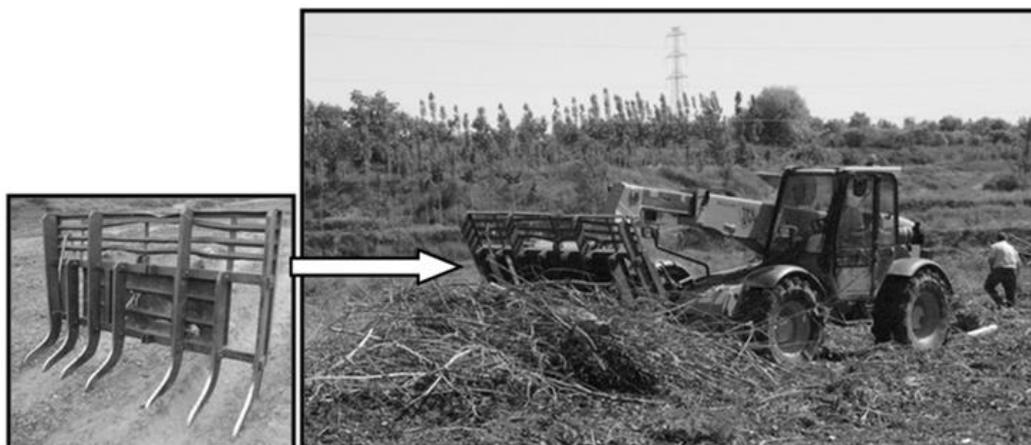


Figura1. Cargador con brazo telescópico con apero en forma de peine.

3.2. Datos del inventario técnico y ambiental.

Los procesos considerados en el ACV de la cadena de suministro de madera y biomasa se han resumido en la Tabla 1. Las emisiones difusas de fosfatos/nitratos en los cursos naturales de agua asociados con el uso de fertilizantes NPK se calcularon de acuerdo con POWERS (2005) y CHERUBINI et al. (2009), y las emisiones difusas de N₂O, CH₄ y NH₃ a la atmósfera se calcularon siguiendo los manuales publicados por el IPCC (2006).

Los datos de fondo del inventario de ciclo de vida se obtuvieron de la base de datos Ecoinvent v3.0. Los valores de entradas de energía y materiales (kg/ha), el uso de electricidad y las características específicas de la maquinaria (tamaño, peso, capacidad de carga, vida útil) se adaptaron de la base de datos citada, considerando la información obtenida de la parcela experimental durante los trabajos de campo.

El escenario base para este caso es un sistema multifuncional. Para asignar los impactos ambientales a la madera o la biomasa se adoptó un criterio de masa. Se dejaron fuera del alcance del análisis los siguientes elementos: producción de estaquillas de chopo, secuestro de carbono en las raíces, conversión de la biomasa en energía en la planta y cambios indirectos en el uso de la tierra.

3.3. Inventario económico y metodología

La viabilidad económica del sistema se calculó con base en las mismas fases definidas en la Tabla 1. El interés del análisis económico no es solo analizar la rentabilidad operacional, sino también comparar el sistema de aprovechamiento integrado en estudio con la alternativa de un sistema productivo de biocombustibles sólidos más intensivo.

Los costes se han analizado sobre una base superficial (por hectárea). Los costes unitarios de operación se derivaron de los costes horarios calculados empleando métodos estandarizados descritos por ACKERMAN et al. (2011), SAVOIE et al. (2012) y SPINELLI et al. (2009), y de las productividades de las distintas operaciones. Estas últimas se estimaron a partir de los datos del mencionado estudio de tiempos del aprovechamiento. El resto de los datos de operaciones de cultivo se recopilieron durante 2014 de empresas y asociaciones de productores locales. Los costes de transporte se calcularon usando un simulador en línea producido por el GOBIERNO VASCO (2014), considerando las distancias de transporte reales de 15 km para la madera en rollo y 25 km para las astillas.

Otros costes se recopilieron de Fuentes industriales locales y del Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente (MAGRAMA), principalmente los referidos a renta del suelo - 757 €(ha-año)⁻¹ -, coste anual de riego - 132,47 €(ha-año)⁻¹ -, plantones de 5 m para la plantación - 1,0 €plantón⁻¹ - y abono NPK 15:15:15 - 350 €t⁻¹. Los costes indirectos asociados a la coordinación y supervisión de las actividades subcontratadas se estimaron como el 5% de todos los costes directos.

Los ingresos se estimaron partiendo de los precios locales de 2014 para la madera de chopo y las astillas (68,42 €t verde⁻¹ para la madera en rollo en puerta de fábrica y 45,0 € t verde⁻¹ para las astillas en planta con el 40% de humedad), teniendo en cuenta la producción por hectárea que se ha indicado.

La rentabilidad de la inversión se evaluó a través de la estimación de los Valores Actualizados Netos (VAN) y las Tasas Internas de Retorno (TIR). Los flujos monetarios de entrada y salida se actualizaron para 2024 (fin del turno) asumiendo un tipo de descuento anual del 5.0% y una tasa de inflación del 0,0% durante la duración del proyecto. Para utilizar el VAN para la comparación con el cultivo energético de turno corto, su valor se anualizó dividiéndolo por el turno de 10 años.

4. Resultados

4.1 Análisis ambiental.

Los impactos categorizados se muestran en la Tabla 2 para el sistema considerado como escenario base. La fase del ciclo de vida que contribuye en mayor grado a todas las categorías (excepto Agotamiento de recursos hídricos) es el Aprovechamiento, que incluye apeo, procesado, apilado de biomasa, astillado de biomasa y desembosque, tanto de madera como de biomasa. El Abonado superficial es otra fase destacable por su contribución a todas las categorías.

Los valores normalizados de los impactos (según la metodología ReCiPe Mindpoint (H) V1.10) se exponen en la Figura 2. El gráfico indica que la categoría más afectada con mucho es la Ecotoxicidad marina, seguida de la Ecotoxicidad de las aguas dulces. Los efectos sobre el Cambio climático son comparativamente menos relevantes.

Para alcanzar uno de los objetivos de este trabajo, la comparación del ACV de las astillas provenientes de cultivo energético con las del caso estudiado (aprovechamiento combinado de madera y biomasa), los impactos ambientales deben referirse a una misma unidad funcional, para lo que se seleccionó la t seca de astilla. Para asignar los impactos a la t de astilla en el caso de producción combinada, hay que adoptar un criterio de reparto de los impactos entre madera y astillas. En este caso, se adoptó el criterio de masa (reparto proporcional al peso seco producido de madera y astillas). La tabla 3 muestra los valores a comparar. Se encuentran diferencias muy relevantes en las principales categorías de impacto, explicadas por el uso de herbicidas y de mayores cantidades de abono en el cultivo energético.

4.2. Análisis económico

Los resultados en cuanto a Valores Actualizados de costes e ingresos y VAN de la inversión se presentan en la Tabla 4. El VAN anualizado tiene un valor de 271,18 €•ha⁻¹•año⁻¹.

La Tasa Interna de Retorno se estimó usando la función TIR() de MS Excel®, teniendo en cuenta todos los costes – incluido el 5% de costes indirectos – e ingresos. El TIR obtenido bajo las hipótesis de costes e ingresos fue de 7,29%.

Tabla 1. Porcentajes de aportación a cada categoría de impacto de los distintos procesos: 1.- Aprovechamiento 2.- Abonado 3.- Transporte 4.- Control mecánico de la competencia 5.- barrenado de tocones 6.- Preparación del terreno 7.- Plantación 8.- Podas 9.- Riego

Categoría de impacto	Unidad/ha	Total	%								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cambio climático	kg CO2 eq	2.338	53	26	7	5	4	1	2	2	x
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	15,2	56	26	4	4	4	1	3	2	x
Eutrofización de aguas dulces	kg P eq	0,4	60	22	4	4	2	1	1	5	x
Eutrofización marina	kg N eq	0,8	61	19	5	5	5	1	3	1	x
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	523,2	58	25	4	4	3	1	2	5	x
Oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	20,5	70	8	5	5	5	1	3	2	x
Formación de partículas	kg PM10 eq	6,3	61	18	4	6	4	2	2	2	x
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,2	51	22	7	3	11	1	3	2	x
Ecotoxicidad de aguas dulces	kg 1,4-DB eq	13,5	62	20	4	4	2	1	1	6	x
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	16,3	54	28	4	3	3	1	1	5	x
Agotamiento recursos hídricos	m ³	9.496	34	6	2	2	1	1	1	3	49
Agotamiento de metales	kg Fe eq	384,7	72	10	2	5	2	1	1	7	x
Agotamiento combust. fósiles	kg oil eq	636,9	57	17	9	5	4	1	3	3	x

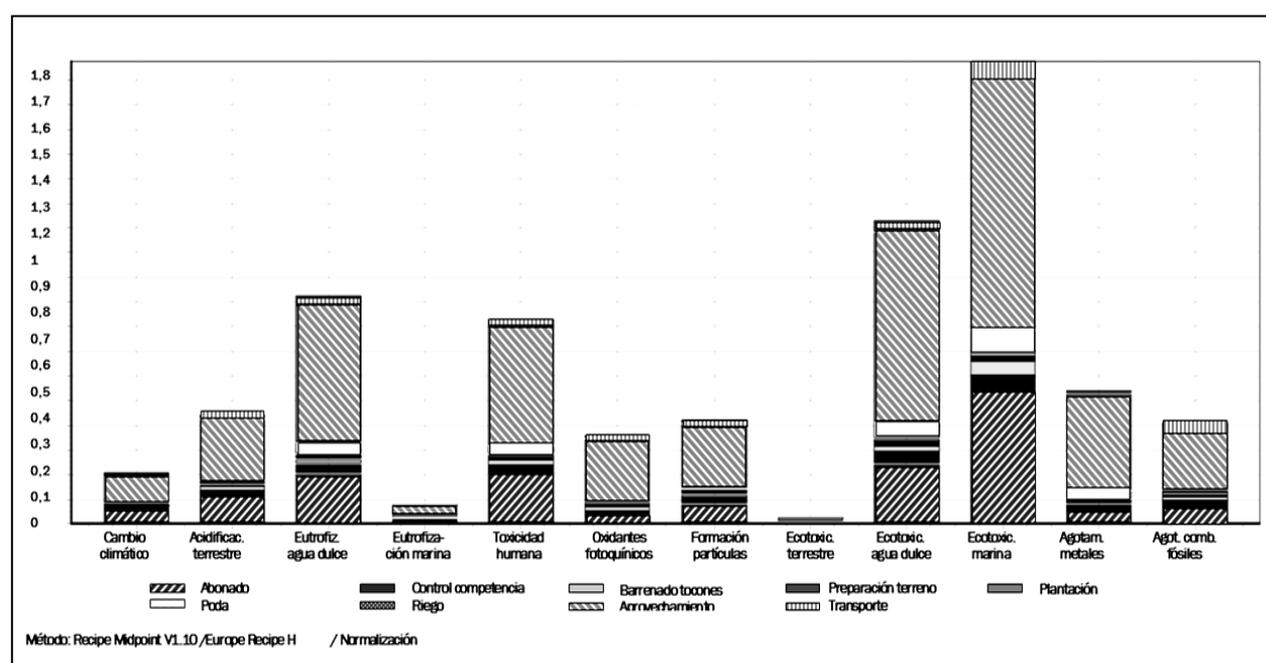


Figura 2. Análisis normalizado de los impactos ambientales de la producción combinada de madera y biomasa en una plantación convencional de chopo.

Tabla 2 Comparación ambiental de astillas de la plantación con aprovechamiento combinado con madera con astillas de cultivo energético

	Por tonelada seca de astilla	Plantación aprovechamiento integrado	Cultivo energético	Ratio
Cambio climático	kg CO2 eq	10,9	24,0	2,2
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	0,07	0,35	5,0
Eutrofización de aguas dulces	kg P eq	0,002	0,006	3,0
Eutrofización marina	kg N eq	0,004	0,081	20,3
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	2,4	4,7	2,0
Oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	0,10	0,14	1,4
Formación de partículas	kg PM10 eq	0,029	0,076	2,6
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,001	0,004	4,0
Ecotoxicidad de aguas dulces	kg 1,4-DB eq	0,06	0,16	2,7
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	0,076	0,091	1,2
Agotamiento de recursos hídricos	m ³	44,2	178,9	4,0
Agotamiento de metales	kg Fe eq	1,79	1,39	0,8
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil eq	2,97	8,47	2,9

El año más costoso fue el primero, debido a los costes de preparación del terreno y plantación. Los siguientes años de la primera mitad del turno de 10 tienen costes similares entre ellos por las operaciones de poda y abonado, mientras que los siguientes años del turno – del 6º al 9º – tienen sólo los costes de la renta del suelo y los riegos. El único año con VAN positivo es el último, en que aparecen los ingresos por la venta de los productos.

5. Discusión

Los valores normalizados (Figura 2) muestran cómo las fases contribuyen a cada categoría de impacto. La utilización de la maquinaria y su productividad en los tratamientos culturales deberían ser objeto de investigaciones futuras, dado que los valores utilizados parten de referencias empresariales. El Agotamiento de combustibles fósiles proporciona una referencia del consumo de combustible en las distintas operaciones. Casi el 40% de los 636,9 kg de gasóleo equivalente por ha se asocian con la operación de apilado de ramas y puntas, que resulta la menos productiva. Como se indicará más adelante, la fase de Aprovechamiento tiene también una gran influencia en los resultados económicos, como en los impactos ambientales. Frente a ello, la Fertilización tiene un impacto económico reducido, de donde se aprecia que la economía de mercado no refleja las externalidades negativas ambientales asociadas al abonado.

Para comparar estos resultados con otros de la bibliografía, deben coincidir en ámbito, metodología de ACV y análisis económico, así como en la unidad funcional escogida. El escenario base estudiado solo puede compararse con el trabajo de SAN MIGUEL et al. (2015) y sólo para el caso de producción de astillas de cultivo energético de chopo. De la comparación se deduce que el cultivo energético es más intensivo en uso de productos químicos (añadiendo al abonado NPK oxifluorfenol y glifosato para el control químico de la competencia y como abono nitrogenado). Los resultados para las categorías de impacto recogidas en la Tabla 3 en relación con Ecotoxicidad y Toxicidad humana se

incrementan en factores entre 1,2 y 4,0. El Agotamiento de combustibles fósiles se incrementa 2,9 veces en el cultivo energético debido al uso más intensivo de maquinaria.

Si se comparan los valores actualizados y agregados de los diferentes procesos y operaciones, la renta del suelo es el concepto más costoso, casi tres veces más que los costes de riego y cinco veces más que los del aprovechamiento integrado de madera y biomasa. La importancia de los costes de arrendamiento del terreno y riego ha sido confirmada en otros estudios sobre la economía de la producción de madera en choperas (AUNÓS et al., 2002).

Tabla 3 Productividad operacional, costes y valores agregados por operación.

Operación /Material	Año	Horas de máquina / ha	Coste/Ingreso (€/ha)	Valor actualizado agregado (€/ha)
Renta del suelo	1-10	---	-756,97	-9.521,09
Arado	1	2,0	-79,4	-123,18
Gradeo	1	1,5	-70,93	-110,04
Señalamiento	1	1,0	-33,5	-51,97
Plantones (plantación)	1	---	-714	-2.028,55
Plantación	1	11,9	-593,62	
Riegos	1-10	---	-297,11	-3.737,02
Abonado NPK	2-5	1,6	-208,61	-1.147,55
Control mecánico competencia	2-5	16,0	-161,76	-889,83
Poda (1ª)	2	45,9	-287,16	
Poda (2ª)	3	45,9	-312,67	
Poda (3ª)	4	45,9	-338,19	
Poda (4ª)	5	45,9	-363,71	-1.781,63
Aprovechamiento y astillado	10	Motosierra	13,7	
		Procesadora	6,7	
		Cargadora (apilado)	8,3	
		Tractor-astilladora	8,3	
		Tractor con remolque	2,7	
			-2.008,37	-2.008,37
Carga y transporte de madera	10	---	-1.237,27	-1.237,27
Transporte de astilla	10	---	-469,00	-469,00
Eliminación de tocones	10	10,5	-463,74	-463,74
Valor actualizado total costes				23.569,24
Costes Indirectos (5%)				1.178,46
Venta de madera	10		24.173,47	24.173,47
Venta de astilla	10		3.285,00	3.285,00
TOTAL VAN (€/ha ⁻¹)				2.710,77
VAN anualizado (€/ha ⁻¹ año ⁻¹)				271,18

El VAN de la inversión es positivo, mientras que el TIR es ligeramente superior al tipo de descuento asumido del 5,0 %, de modo que la rentabilidad estimada es baja.

Las principales razones para explicar este hecho son los bajos precios de la madera en rollo de chopo en la provincial de Granada, por su destino principal en la industria de aserrío en vez de en la de chapa, además de los elevados costes del arrendamiento de tierras y del agua de riego - esta

última no es necesaria bajo otras condiciones climáticas en otras regiones españolas -. Además, la vida útil estimada para las máquinas en la base de datos Ecoinvent 3.0. es inferior a la observada por los autores en la práctica forestal en España, lo que ha podido llevar a sobreestimar los costes de amortización y el conjunto de costes horarios de las máquinas.

Si se comparan los costes por operación y año y los valores del TIR y el VAN anualizado estimados para la presente plantación y sistema de aprovechamiento con los obtenidos en la misma zona para un cultivo energético experimental por SAN MIGUEL et al. (2015) para el sistema de aprovechamiento por astillado, preferible al de empacado según las mismas fuentes y para ese caso, los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 4 Comparación económica entre las dos alternativas de cultivo de chopo para uso combinado madera/astilla o sólo como cultivo energético para producción de astilla.

Operación/Concepto de coste	Costes / Ingresos (€·ha ⁻¹)	
	Aprovechamiento integrado	Cultivo energético
Arrendamiento terreno	-756,97	-756,97
Subsolado	-	-110
Arado	-79,4	-40
Gradeo	-70,93	-
Señalamiento	-33,5	-
Plantación	-1.307,62	-650
Riego	-297,11	-297,11
Abonado NPK	-208,61	-217
Control mecánico de competencia	-161,76	-40
Herbicida Post-emergencia	-	-42
Herbicida Pre-emergencia	-	-51
Podas	-1.301,73	0
Aprovechamiento	-2.008,37	-6.024,55
Transporte de astilla	-469	-2.375,37
Carga y transporte de madera en rollo	-1.237,27	0
Eliminación de tocones/ restauración del terreno	-463,74	-450
Venta de madera	24.173,5	0
Venta de astillas	3.285	18.098,6
VAN anualizado NPV (€·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	271	-719
TIR (%)	7,3%	<< 0 %

6. Conclusiones

Para la producción integrada de madera y astilla a partir de plantaciones de chopo convencionales en el área estudiada (Vega de Granada, plantaciones irrigadas con turno de 10 años), el abonado superficial muestra una gran influencia en las categorías de impacto ambiental, aunque no resulta relevante en el balance económico. El riego supone una notable influencia tanto en el desempeño ambiental como en el balance económico, en contraste con la situación en los países del norte de Europa e incluso con las plantaciones sobre capas freáticas altas en las cuencas del centro de España, en que el riego no es necesario.

La fase de aprovechamiento combinado de madera y astilla es la más relevante, tanto por sus impactos ambientales como por su balance económico. Por ello, los esfuerzos de optimización de los procesos deberían dirigirse de forma prioritaria a las operaciones de aprovechamiento, cuyo grado de mecanización en el caso estudiado es bajo en comparación con otras plantaciones.

En todo caso, en el caso estudiado, las plantaciones convencionales de chopo para aprovechamiento integrado de madera y astilla muestran menos impactos ambientales y mejores resultados económicos que los cultivos energéticos de turno corto de la misma especie.

7. Agradecimientos

La Fundación CESEFOR financió los estudios de tiempo en la plantación. Debemos agradecer su apoyo en los trabajos de campo a JOSÉ CALERO, de Maderas Calero Tejera. El equipo del profesor SAN MIGUEL, de la E.T.S.I. Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid facilitó el uso del programa SimaPro, apoyando a los autores en la introducción de datos e interpretación de las salidas.

8. Bibliografía

ACKERMAN, P.; LYONS, J.; ELIASSON, L.; HEUNIS, G.; GRULOIS, S.; DE JONG, A.; 2012. Equipment Costing Model. A Business Model. Cost Action FP0902. WG3. Forest Energy Action. 24 pág. Stellenbosch University. Southafrica.

AUNÓS, A.; RODRÍGUEZ, F.; GARASA, M.; 2002. Análisis de sensibilidad sobre la rentabilidad financiera de choperas de Huesca y Lérida. Universidad de Lérida. Rev Montes 69. 25-32

ERICSSON, K.; ROSENQVIST, H.; NILSSON, L.J.; 2009. Energy crop production costs in the EU. Biomass Bioenergy 33 (11). 1577-1586.

EUROPEAN COMMISSION; 2009. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources. European Commission, Brussels.

BARRIO-ANTA, M.; SIXTO-BLANCO, H.; VIÑAS, I.C.D.; CASTEDO-DORADO, F.; 2008. Dynamic growth model for I-214 poplar plantations in the northern and central plateaux in Spain. For Ecol Manage 255 (3-4), 1167-1178.

BUTNAR, I.; RODRIGO, J.; GASOL, C.M.; CASTELLS, F.; 2010. Life-cycle assessment of electricity from biomass: Case studies of two biocrops in Spain. Biomass Bioenergy 34 (12), 1780-1788.

CAÑELLAS, I.; HUELIN, P.; HERNÁNDEZ, M.J.; CIRIA, P.; CALVO, R.; GEA-IZQUIERDO; G., SIXTO, H.; 2012. The effect of density on short rotation *Populus* sp. plantations in the Mediterranean area. Biomass Bioenergy 46. 645-652.

CHERUBINI, F.; BIRD, N.D.; COWIE, A.; JUNGMEIER, G.; SCHLAMADINGER, B.; WOESS-GALLASCH, S.; 2009. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resour Conserv Recycl* 53 (8), 434-447

CHERUBINI, F.; STROMMAN, A.H.; 2011. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresour Technol* 102 (2), 437-451

GASOL, C.M.; MARTINEZ, S.; RIGOLA, M.; RIERADEVALL, J.; ANTON, A.; CARRASCO, J.; CIRIA, P.; GABARRELL, X.; 2009. Feasibility assessment of poplar bioenergy systems in the Southern Europe. *Renew Sust Energ Rev* 13 (4). 801-812

GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; DIAS, A.C.; CLERMIDY, S.; BENOIST, A.; MAUREL, V.B.; GASOL, C.M.; GABARRELL, X.; ARROJA, L.; 2014. Comparative environmental and energy profiles of potential bioenergy production chains in Southern Europe. *J Clean Prod* 76. 42-54

GOBIERNO VASCO; 2014. Simulador del coste de transporte de mercancías por carretera. [Online].<http://www.garraioak.ejgv.euskadi.net/r41-10714x/es/s46aSIMUCOSTESWar/S46ASeleccionTipoVehiculoServlet> [Consultado: diciembre 2016]

HAUK, S.; KNOKE, T.; WITTKOPF, S.; 2014. Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass-A review. *Renew Sust Energ Rev.* 29, 435-448

IPCC; 2006. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU): (2006) IPCC/Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC/IGES, Hayama, Japan

LÓPEZ, V.E.; CASQUET MORATE, E.; DÍAZ BALTEIRO, L.; 2005. El turno financiero óptimo al introducir la fiscalidad en el análisis. Aplicación a las choperas de Castilla y León. *Inv Agr Sist Rec For.* 14 (1). 122-136.

PÉREZ-CRUZADO, C.; SÁNCHEZ-RON, D.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; JOSÉ HERNÁNDEZ, M.; MARIO SÁNCHEZ-MARTÍN, M.; CAÑELLAS, I.; SIXTO, H.; 2014. Biomass production assessment from *Populus* spp. short-rotation irrigated crops in Spain. *GCB Bioenergy* 6 (4), 312-326

POWERS, S.E.; 2005. Quantifying Cradle-to-Farm Gate Life-Cycle Impacts Associated with Fertilizer Used for Corn, Soybean, and Stover Production. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-510-37500. 122 pág. Batelle (USA).

SAN MIGUEL, G.; B. CORONA; D. RUIZ; D. LANDHOLM; R. LAINA; E. TOLOSANA; H. SIXTO; I. CAÑELLAS; 2015. Environmental, energy and economic analysis of a biomass supply chain based on a poplar short rotation coppice in Spain. *J Clean Prod* 94. 93–101.

SAVOIE, P.; CURRENT, D.; ROBERT, F.; HEBERT, P.L.; 2012. Harvest of natural shrubs with a biobaler in various environments in Quebec, Ontario and Minnesota. *Appl Eng Agric* 28 (6). 795-801.

SIXTO, H.; HERNÁNDEZ, M.J.; CIRIA, P.; CARRASCO, J.E.; CAÑELLAS, I.; 2010. Manual de cultivo de *Populus* spp. para la producción de biomasa con fines energéticos. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA). Monografías INIA, nº 21. 80 pág. Madrid.

SPINELLI, R.; NATI, C.; MAGAGNOTTI, N.; 2009. Using modified foragers to harvest short rotation poplar plantations. *Biomass Bioenergy* 33 (5). 817-821.

TESTA, R.; DI TRAPANI, A.M.; FODERA, M.; SGROI, F.; TUDISCA, S.; 2014. Economic valuation of introduction of poplar as biomass crop in Italy. *Renew Sustain Energy Rev* 38, 775-780.

TOLOSANA, E.; LAINA, R.; MARTÍNEZ-FERRARI, R.; AMBROSIO, Y.; 2011. Recovering of forest biomass from Spanish hybrid poplar plantations. *Biomass Bioenergy* 35 (7), 2570-2580.