

III Reunión conjunta del Grupo de Trabajo de Repoblaciones Forestales (SECF)
y el Grupo de Trabajo de Restauración Forestal (AEET)

Eficacia y sostenibilidad en forestación: nuevos acondicionadores y cubiertas del suelo

Coello, J.*, Rovira, P., Fuentes, C., Piqué, M.

Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. Ctra vella Sant Llorenç de Morunys km 2; 25280 Solsona, Lleida

*Autor para correspondencia: jaime.coello@ctfc.es

Resumen

El mantenimiento de forestaciones jóvenes frente a la sequía y la vegetación competidora tiene un gran impacto económico. Además, muchas de las técnicas aplicadas (riegos de emergencia, desbroces), pueden tener un efecto ambiental negativo. Para incrementar el éxito y mejorar la sostenibilidad ambiental de la forestación minimizando la inversión de recursos durante los primeros años, en el marco del proyecto SustAffor se desarrollaron prototipos de técnicas de plantación innovadoras: un nuevo acondicionador del suelo (producto granulado con 23 ingredientes incluyendo polímeros hidroabsorbentes) y tres prototipos de cubiertas del suelo o “mulch”: dos biodegradables (de bioplástico o yute) y uno reutilizable (de goma reciclada). Estas técnicas se compararon con otras de referencia en 8 plantaciones experimentales instaladas en Cataluña y Aragón, distribuidas en 4 bioclimas contrastados: Semiárido, Mediterráneo Continental, Mediterráneo Húmedo y Montano. Este estudio presenta los resultados a nivel de árbol (supervivencia, crecimiento aéreo y subterráneo y estado hídrico) durante los dos primeros períodos vegetativos (2014 y 2015). El nuevo acondicionador del suelo fue muy positivo en todas las variables en condiciones Semiáridas y fomentó el crecimiento en el Montano, con resultados similares al acondicionador de referencia. Las cubiertas del suelo, tanto las innovadoras como las de referencia, incrementaron el crecimiento y estado hídrico en las condiciones más productivas (Mediterráneo Continental y Húmedo) y, en menor medida, en el semiárido. Las nuevas técnicas permiten reducir la dependencia de las forestaciones de tareas de mantenimiento, presentando una clara ventaja técnica y ambiental respecto a las técnicas de referencia.

Palabras clave: acolchado, biodegradable, eco-innovación, mejorador del suelo, mulch, repoblación, técnicas de plantación.

1. Introducción

1.1. La sequía y la vegetación competidora

La sequía y la vegetación competidora son dos de las principales amenazas durante los primeros años de vida para las plantas empleadas en forestaciones. Ambos factores pueden causar, por separado o conjuntamente, una pérdida de crecimiento y vigor de los árboles, una mayor susceptibilidad a plagas y enfermedades e incluso la pérdida total o parcial de los mismos.

La sequía es el principal factor limitante en los ecosistemas mediterráneos (Vallejo *et al.*, 2006), y se espera que pueda tener una incidencia cada vez mayor durante las próximas décadas (Resco de Dios *et al.*, 2007), pudiendo afectar cada vez más a todas las regiones templadas. El principal método empleado habitualmente contra la sequía es la aplicación artificial de agua, especialmente, mediante riegos de emergencia o apoyo (Carminati *et al.*, 2010). Es una manera eficaz de mejorar el estado hídrico de los árboles jóvenes, pero es inaplicable en la mayoría de casos, debido a los costes de personal y maquinaria, especialmente, en terrenos poco accesibles, y a la dificultad para planificar a priori el número de intervenciones necesarias cada año. Por estos motivos se intenta priorizar técnicas preventivas, no recurrentes y más sostenibles, incluyendo la selección conservadora de material vegetal considerando escenarios climáticos futuros más rigurosos, prácticas de conservación de agua durante la preparación del suelo (alcorque, compensación de pendiente) y técnicas de plantación específicas. Entre estas técnicas destacan los acondicionadores del suelo (Thomas, 2008; Sloup and Salaš, 2009), productos que se mezclan con el suelo durante la plantación o siembra, que incrementan la disponibilidad de agua y nutrientes en el volumen del suelo ocupado por las raíces durante los primeros años. Los acondicionadores más habituales son sustratos de vivero o bien polímeros hidroabsorbentes, preferentemente combinados con otros ingredientes. Estos polímeros incrementan su volumen notablemente en contacto con el agua, almacenándola durante las épocas lluviosas (evitando la infiltración rápida a capas profundas del suelo), y manteniéndola disponible para la planta a medida que el suelo se va secando. Las principales ventajas de esta técnica son su aplicación directa y sencilla en el momento de plantar y su funcionamiento autónomo. En un estudio de costes realizado por Coello y Piqué (2016) se observó que el coste de aplicación de esta técnica es más bajo que el de aplicar un riego de apoyo, considerando un amplio rango de tipologías de proyecto de plantación forestal. Finalmente, esta técnica ofrece frente al riego de apoyo una serie de ventajas técnicas (no requiere la movilización de personal y maquinaria) y ambientales (se evita el uso de agua y combustibles fósiles).

Por otra parte, la vegetación competidora es un problema especialmente severo en estaciones productivas (Olivera *et al.*, 2014), en las que compite por el agua, luz y nutrientes con los árboles (Willoughby *et al.*, 2009). Las técnicas más comúnmente empleadas contra la vegetación competidora consisten en intervenciones reiteradas (más recurrentes cuanto mayor es la productividad) de desbroce mecánico o químico. El primero se realiza bien con maquinaria (inaplicable en muchos ambientes de difícil accesibilidad y poco efectivo si no se puede eliminar la competición más cercana al árbol)

o con herramientas o máquinas manuales, de muy baja eficiencia y alto coste. En ambos casos, el riesgo de daños sobre la forestación es elevado (George and Brennan, 2002). La principal alternativa empleada, de mayor eficiencia a un coste razonable (Thiffault and Roy, 2011), son los desbroces químicos (Willoughby *et al.*, 2009), consistentes en la aplicación de herbicida. Además del problema de requerir una aplicación reiterada, esta técnica tiene un rechazo social creciente (Siipilehto, 2001) debido a su elevado impacto ambiental, no siendo aplicable en muchas condiciones por restricciones legales (Thiffault and Roy, 2011). Una alternativa a estas técnicas, que permite evitar, simplificar o reducir considerablemente la aplicación de desbroces, así como el riesgo de causar daños durante éstos, es el empleo de cubiertas del suelo, también llamadas acolchados o “*mulch*” (Green *et al.*, 2003; Chalker-Scott, 2007). Estas cubiertas se instalan situando el árbol en su centro, e impiden la germinación y proliferación de vegetación competidora cerca del tronco y las raíces (Maggard *et al.*, 2012), debido al efecto doble de barrera física y sombreado. Las cubiertas pueden ser continuas (lámina de plástico, bioplástico, textil, papel tratado, cartón...) o de partículas (pequeños elementos apilados; piedras, astillas, paja...). Las cubiertas del suelo tienen una función adicional: mitigan la evaporación de agua del suelo (Zegada-Lizarazu and Berliner, 2011), un efecto especialmente notable en períodos secos (McConkey *et al.*, 2012) y en suelos de textura ligera. Además, en función de su composición, pueden regular la temperatura del suelo (Arentoft *et al.*, 2013), mejorar las propiedades físicas del mismo (Chalker-Scott, 2007) y realizar un aporte de nutrientes (Van Sambeek and Garrett, 2004). Las cubiertas de lámina de plástico son las más empleadas (Arentoft *et al.*, 2013), debido a su bajo coste y a su prolongada resistencia, pero tienen dos desventajas: se deben retirar una vez han cumplido su función (Shogren and Rousseau, 2005), lo que supone una intervención muy costosa y están fabricadas con materias primas no renovables y difícilmente reciclables tras su uso, por lo que tienen un impacto ambiental elevado. Durante los últimos años se están desarrollando nuevos materiales de acolchado que eviten estos inconvenientes, especialmente, fabricados en materiales biodegradables (Álvarez-Chávez *et al.*, 2012; Kasirajan and Ngouajio, 2012). En el estudio del coste de aplicación de diferentes técnicas de plantación de árboles mencionado anteriormente (Coello y Piqué, 2016) se estudiaron los supuestos en los que las cubiertas (plásticas, biodegradables y reutilizables o de larga duración) son una alternativa económicamente viable a la aplicación de herbicidas y desbroces mecánicos: en áreas de baja productividad, en la que se precisa la aplicación de dos o menos desbroces, las cubiertas no son competitivas. Sin embargo, a medida que aumenta la productividad o empeora la accesibilidad y transitabilidad del terreno, el uso de cubiertas del suelo es una alternativa económicamente viable frente a la aplicación recurrente de desbroces. En áreas de mala accesibilidad el uso de cubiertas biodegradables puede ser más barato que el de cubiertas plásticas, al compensar su coste de adquisición más elevado con el ahorro que supone no tener que retirarlas del terreno.

1.2. *Objetivos*

El objetivo del presente trabajo es evaluar la eficacia de un conjunto de nuevas

técnicas de plantación destinadas a mejorar los proyectos de forestación desde un punto de vista ambiental, técnico y económico. Estas nuevas técnicas han sido desarrolladas para mitigar el efecto negativo de la sequía y la vegetación competidora en los primeros años de desarrollo de los árboles. Concretamente se evalúa su efecto sobre la supervivencia, crecimiento aéreo y subterráneo y estado hídrico de los árboles durante los dos primeros periodos vegetativos (2014 y 2015). Las mejoras ambientales frente a las técnicas de referencia (riegos de apoyo, desbroces recurrentes mecánicos o químicos, cubiertas plásticas) hacen referencia al empleo de materias primas recicladas o reciclables, a su aplicación manual y exclusivamente en el momento de plantar (minimizando el uso de maquinaria o las intervenciones recurrentes) y en su biodegradabilidad o reciclabilidad.

2. Material y métodos

2.1. Tratamientos y diseño experimental

Las técnicas objeto de este trabajo se ensayaron en condiciones de campo, frente a técnicas de referencia, es decir, aquellas empleadas actualmente para cumplir la misma función (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de las técnicas empleadas en el estudio y codificación empleada para cada técnica en esta comunicación.

Técnica	Descripción	Código
Acondicionamiento del suelo	Nuevo acondicionador del suelo granulado, consistente en 23 ingredientes, incluyendo un nuevo complejo de polímeros hidroabsorbentes. Se ensaya en tres dosis: 20, 40 y 80 g árbol ^{-1a}	NAS20 NAS40 NAS80
	Acondicionador del suelo comercial TerraCottem Universal®, 40 g árbol ^{-1b}	ComAS40
	Control (sin acondicionador del suelo)	No_AS
Técnicas contra vegetación competidora	Nuevo marco 100% biodegradable de biopolímero, fundido sobre un film biodegradable comercial ^a	BIOPOL
	Cubierta de yute tejido, tratada con resina orgánica para prolongar su durabilidad, 100% biodegradable ^a	YUTE
	Cubierta de goma reciclada, de larga duración o reutilizable, de 1.5 mm de grosor para no requerir fijación al suelo ^a	GOMA
	Biofilm comercial tejido ^b	ComBiofilm
	Film de polietileno ^b	ComPlastico
	Aplicación de herbicida (glifosato) cada primavera ^b	ComHerbi
Control (sin técnica contra vegetación competidora)	Ctrl_Veg	

^a técnica innovadora, desarrollada durante el proyecto SustAffor

^b técnica de referencia

Estas técnicas de acondicionamiento del suelo y contra la vegetación competitiva se ensayaron en diferentes combinaciones entre ellas, conformando un total de 17 tratamientos (*Tab. 2*).

Tabla 2. Tratamientos ensayados (marcados con una X), resultantes de la combinación de las diferentes técnicas de acondicionamiento del suelo y contra la vegetación competitiva.

Acondicionador suelo Contra vegetación competidora	NAS20	NAS40	NAS80	ComAS40	No_AS
BIOPOL		X			X
YUTE		X			X
GOMA		X			X
ComBiofilm		X			X
ComPlastico	X	X	X	X	X
ComHerbi ^a		X			X
Ctrl_Veg		X			X

^a El herbicida no se aplicó en las condiciones semiárida ni montana, debido a la nula competencia herbácea en el entorno de los árboles plantados, por lo que no se ha analizado su efecto en estas condiciones.

Cada uno de estos 17 tratamientos se aplicó sobre 30 árboles en cada ensayo experimental, siguiendo un diseño en bloques completos al azar, con 6 bloques por ensayo y 5 árboles por bloque y tratamiento.

2.2. Ensayos de campo

Entre febrero y marzo de 2014 se instaló una red de 8 ensayos de campo, distribuidos en 4 bioclimas claramente contrastados del nordeste peninsular (*Fig. 1*).

La *Tab. 3* muestra las principales características de cada condición y de los ensayos realizados.

Las condiciones semiáridas eran las más limitantes para la forestación, debido a la baja precipitación y a las temperaturas extremadamente altas durante el verano, unidas a un suelo con baja capacidad de retención de agua debido a su textura ligera y pendiente elevada. Los ensayos realizados en condiciones Mediterráneas continentales y Mediterráneas húmedas correspondieron a sitios de elevada productividad, con suelos ricos y con una incidencia de la sequía moderada (Mediterráneo continental) o leve (Mediterráneo húmedo). Por último, las condiciones montanas estuvieron limitadas por las bajas temperaturas y por la textura ligera del suelo, que limita la disponibilidad de agua y nutrientes.

2.3. Seguimiento y análisis estadístico

Desde la instalación de los ensayos se realizó el seguimiento de las principales variables relacionadas con el vigor y la productividad de los árboles (*Tab. 4*).

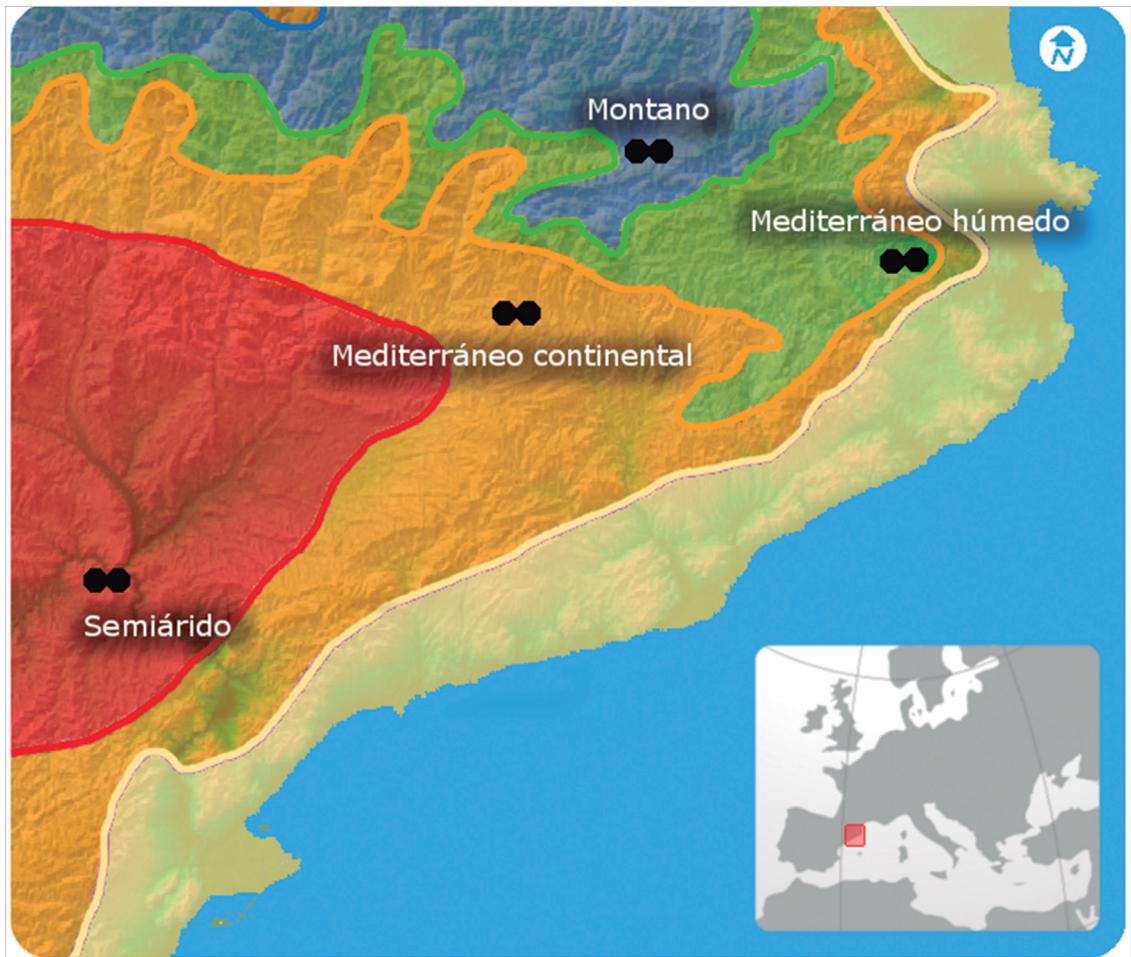


Figura 1. Localización de los 8 ensayos de campo en los 4 bioclimas de estudio.

Los resultados se analizaron con el paquete estadístico SPSS, agrupando los tratamientos de dos maneras: por un lado, los 14 tratamientos incluidos en la tercera y sexta columnas de la *Tab. 2*, equivalentes a un diseño factorial, con dos factores: acondicionamiento del suelo (2 niveles) y técnicas contra la vegetación competidora (7 niveles). Por otro lado, se analizaron los 5 tratamientos indicados en la quinta línea de la *Tab. 2*, correspondientes a diferentes técnicas de acondicionamiento del suelo, combinadas con una misma técnica contra la vegetación competidora. Para cada uno de estos dos grupos de tratamientos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para cada variable medida. En caso de detectarse diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), éstos se agruparon mediante el test de Tukey.

3. Resultados

El efecto de las diferentes técnicas de plantación sobre los árboles fue muy variable en los diferentes ámbitos bioclimáticos del estudio.

Tabla 3. Características principales de cada condición y de los ensayos de campo instalados.

Condición	Semiárida	Mediterránea continental	Mediterránea húmeda	Montana
Término municipal	Mequinenza (Z)	Solsona (L)	Banyoles (Gi)	Fontanals de Cerdanya (Gi)
Altitud	210 m	672 m	215 m	1430 m
Tipo de terreno	Forestal quemado en 2005	Agrícola abandonado	Agrícola abandonado	Pasto abandonado
Orientación y pendiente	Sur & Norte 40% & 60%	Llano	Llano	Norte 30%
Temperatura media anual	15.0°C	12.0°C	14.0°C	7.5°C
Precipitación media anual	371 mm	683 mm	872 mm	887 mm
Precipitación media estival	69 mm	165 mm	213 mm	272 mm
Textura del suelo	Franco-arenosa	Franco-arcillosa	Franco-limosa	Franco-arenosa
Especies empleadas	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Juglans x intermedia</i> <i>Quercus ilex</i> con <i>Tuber melanosporum</i>	<i>Juglans x intermedia</i> <i>Pinus pinea</i>	<i>Fraxinus excelsior</i> <i>Betula pendula</i>
Área tratada por árbol contra la vegetación competidora	40 x 40 cm	80 x 80 cm	80 x 80 cm	40 x 40 cm

Tabla 4. Descripción de las variables sobre las cuales se ha realizado un seguimiento.

Variable	Equipo / técnica	Fechas medición
Supervivencia	Observación directa	Octubre 2014 & 2015
Crecimiento en volumen (cm ³)	Calibre digital (diámetro), cinta métrica (altura), cálculo del volumen inicial y final	Abril 2014, Octubre 2014 & 2015
Estado hídrico	Contenido hídrico relativo acícula (pino) Potencial hídrico a mediodía (frondosas)	Verano de 2014 (4x)
Producción y distribución de biomasa	Arranque de árboles y división en raíces finas (<2mm), raíces gruesas (>2mm), tallo, (acículas); secado durante 72 h a 70°C y pesado de cada componente seca	Noviembre 2014 (Semiárido y nogal en Mediterráneo continental)

3.1 Resultados en el semiárido

La técnica de plantación más relevante en el semiárido fue el acondicionador del suelo, con un claro efecto positivo sobre todas las variables medidas, tanto en el ensayo de solana como en umbría. Las cubiertas del suelo también tuvieron un efecto positivo sobre la supervivencia y estado vegetativo y sobre el crecimiento y la humedad del suelo. Las Fig. 2 y 3 muestran los resultados de crecimiento aéreo y subterráneo y de humedad del suelo en función del uso de acondicionadores del suelo y

de técnicas contra la vegetación competidora, respectivamente. La Tab. 5 resume los datos de crecimiento y estado hídrico en estas condiciones.

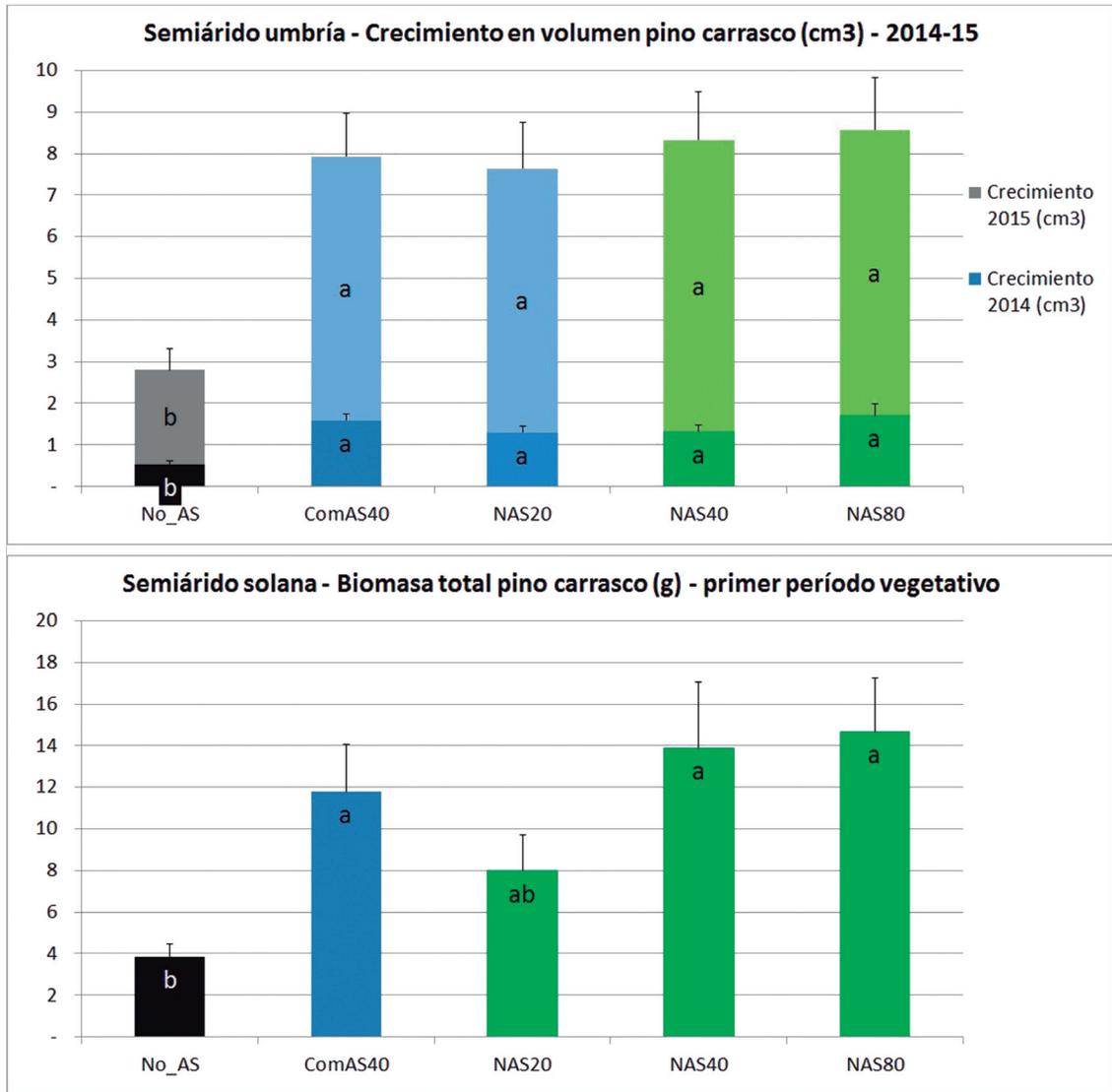


Figura 2. Pino carrasco en el semiárido: crecimiento en volumen (cm³) durante los dos primeros períodos vegetativos en el ensayo de umbría (arriba) y biomasa total del árbol (g) al final del primer período vegetativo en el ensayo de solana (abajo), en función de diferentes tratamientos de acondicionamiento del suelo; abreviaturas como en Tab. 1. Los datos mostrados corresponden a los valores medios y al error estándar. Las diferentes letras (minúsculas para 2014, mayúsculas para 2015) corresponden a la agrupación de medias según el test de Tukey, realizado de manera independiente para cada variable y año. Los tratamientos con letras diferentes tienen una media significativamente diferente ($p < 0.05$).

3.2 Resultados en el mediterráneo continental

En el mediterráneo continental la supervivencia fue muy alta (496%), sin que se encontraran diferencias relevantes entre los diferentes tratamiento. Las técnicas con-

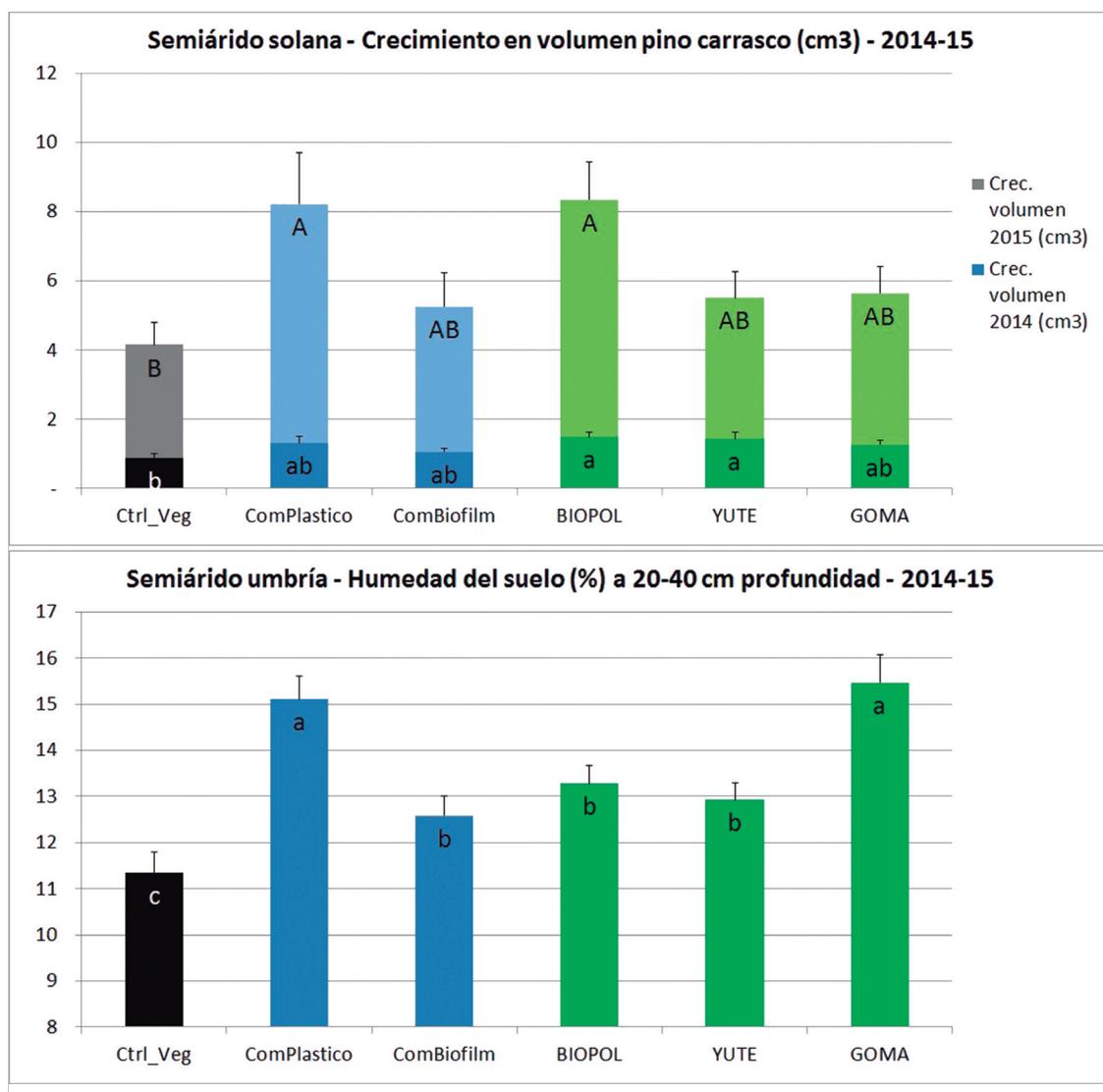


Figura 3. Pino carrasco en el semiárido: crecimiento en volumen (cm³) durante los dos primeros períodos vegetativos en el ensayo de solana (arriba) y humedad del suelo (%) a 20-40 cm de profundidad, considerando todas las mediciones realizadas durante 2014 y 2015, en el ensayo de umbría (abajo), en función de diferentes tratamientos contra la vegetación competidora; abreviaturas como en Tab. 1. Los datos mostrados corresponden a los valores medios y al error estándar. Las diferentes letras (en el caso del crecimiento: minúsculas para 2014, mayúsculas para 2015) corresponden a la agrupación de medias según el test de Tukey, realizado de manera independiente para cada variable y año. Los tratamientos con letras diferentes tienen una media significativamente diferente ($p < 0.05$).

tra la vegetación competidora tuvieron un efecto muy favorable sobre el crecimiento, estado hídrico y producción de biomasa, mientras que el acondicionador del suelo no tuvo un efecto significativo sobre ninguna variable. Las Figs. 4 y 5 muestran, respectivamente, los resultados más relevantes en cuanto a crecimiento aéreo y subterráneo.

Tabla 5. Resumen de resultados (media \pm error estándar) de crecimiento y contenido hídrico relativo en acícula en los dos ensayos en condiciones semiáridas. Las diferentes letras (a, b, c) corresponden a la agrupación de medias según el test de Tukey ($p < 0.05$), realizado de manera independiente para cada variable y para cada tipo de tratamiento (acondicionamiento del suelo, tratamiento contra la vegetación competidora).

		Solana			Umbría	
	Crecimiento 2014 (cm ³)	Crecimiento 2015 (cm ³)	CHRA'14 (%) ^a	Crecimiento 2014 (cm ³)	Crecimiento 2015 (cm ³)	CHRA'14 (%) ^a
Acondicionamiento del suelo						
No_AS	0.38 \pm 0.05b	2.97 \pm 1.11b	78.4 \pm 1.4b	0.54 \pm 0.07b	2.26 \pm 0.51b	78.7 \pm 1.5b
ComAS40	1.61 \pm 0.14a	4.79 \pm 0.72ab	83.6 \pm 1.1a	1.59 \pm 0.16a	6.35 \pm 1.04a	80.6 \pm 1.4ab
NAS20	1.59 \pm 0.18a	5.92 \pm 1.17ab	81.1 \pm 1.1ab	1.30 \pm 0.14a	6.34 \pm 1.1a	83.4 \pm 1.1ab
NAS40	2.00 \pm 0.23a	9.73 \pm 2.13a	83.6 \pm 0.8a	1.31 \pm 0.15a	7.01 \pm 1.14a	83.8 \pm 1.5a
NAS80	1.88 \pm 0.26a	9.88 \pm 3.17a	84.1 \pm 1.2a	1.70 \pm 0.28a	6.87 \pm 1.25a	82.4 \pm 1.2ab
Tratamientos contra la vegetación competidora						
Ctrl_Veg	0.88 \pm 0.12b	3.27 \pm 0.66	81.8 \pm 0.9	0.66 \pm 0.06b	4.14 \pm 0.78	81.7 \pm 0.6
ComPlastico	1.31 \pm 0.18ab	6.91 \pm 1.48	81.0 \pm 0.9	0.97 \pm 0.10ab	4.71 \pm 0.76	81.1 \pm 0.7
ComBiofilm	1.06 \pm 0.11ab	4.20 \pm 0.97	81.5 \pm 0.7	1.08 \pm 0.15ab	6.84 \pm 1.97	81.0 \pm 0.7
BIOPOL	1.48 \pm 0.14a	6.86 \pm 1.09	83.2 \pm 0.8	0.99 \pm 0.09ab	3.58 \pm 0.46	82.9 \pm 0.5
YUTE	1.42 \pm 0.19ab	4.09 \pm 0.75	83.3 \pm 1.0	1.31 \pm 0.17a	7.56 \pm 1.26	82.8 \pm 0.7
GOMA	1.26 \pm 0.14ab	4.39 \pm 0.77	85.5 \pm 0.8	0.93 \pm 0.11ab	5.71 \pm 0.76	83.5 \pm 0.6

^a CHRA'14 (%): Contenido hídrico relativo de la acícula en 2014

3.4 Resultados en el mediterráneo húmedo

Al igual que en el caso anterior, la supervivencia fue muy alta (100% en nogal, 94% en pino piñonero), sin un efecto claro debido a los diferentes tratamientos. La respuesta de los árboles al acondicionamiento del suelo tampoco fue significativa en este caso, si bien los tratamientos contra la vegetación competidora incrementaron notablemente el crecimiento y mejoraron el estado hídrico de los árboles. Se muestran a continuación los resultados de las diferentes técnicas contra la vegetación competidora en cuanto al crecimiento de nogal híbrido y pino piñonero (Fig. 6).

3.5 Resultados en el montano

En condiciones montanas la supervivencia fue del 92% en fresno y del 93% en abedul, sin diferencias apreciables entre tratamientos. En estas condiciones es donde las técnicas de plantación tuvieron un efecto global menor, con un ligero incremento del crecimiento tanto con el uso del acondicionador del suelo como de las técnicas contra la vegetación competidora (Fig. 7).

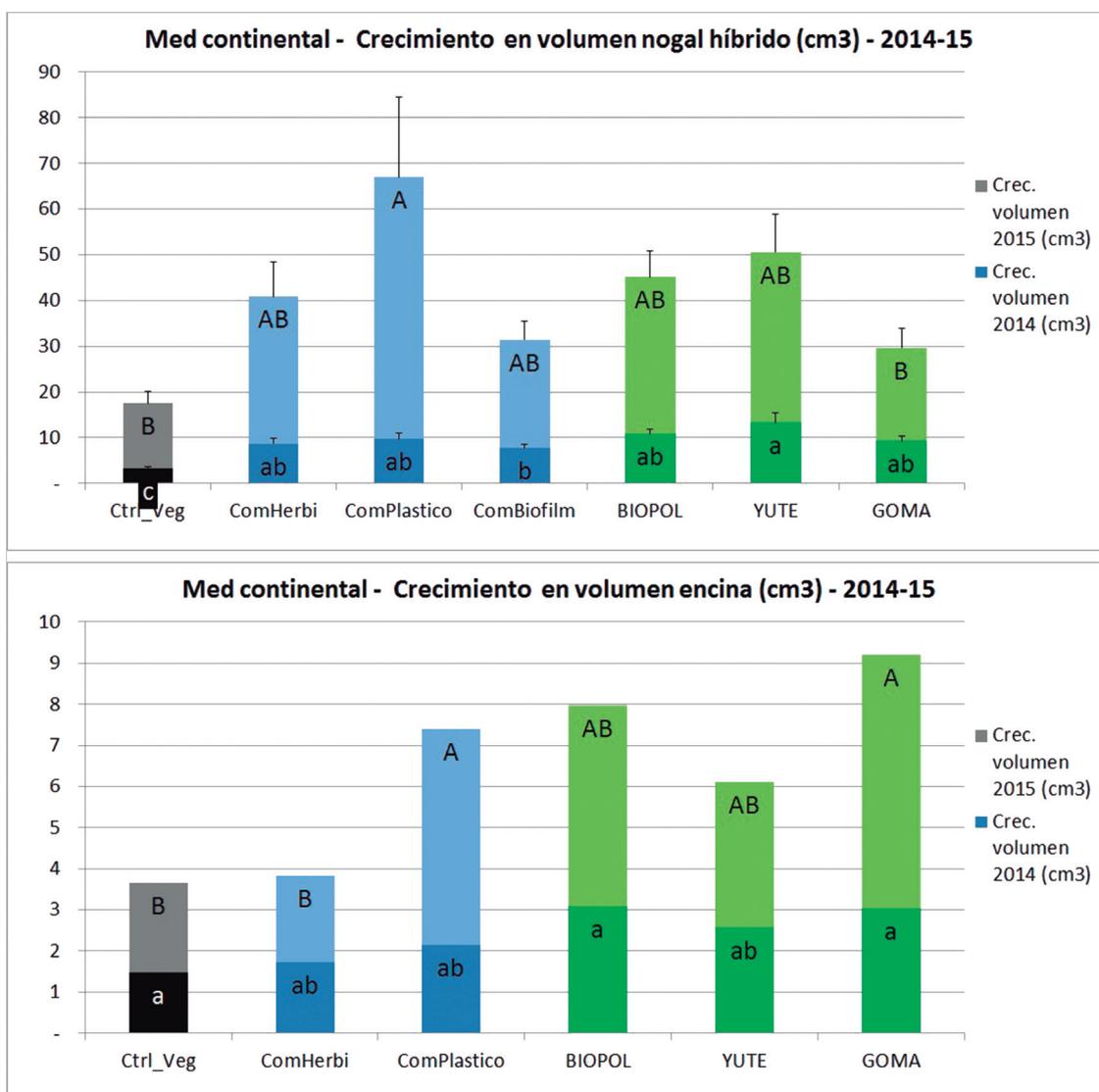


Figura 4. Crecimiento en volumen (cm³, media y error estándar) de nogal híbrido (arriba) y encina micorrizada (abajo) durante los dos primeros períodos vegetativos en condiciones mediterráneas continentales, en función de diferentes tratamientos contra la vegetación competidora; abreviaturas como en Tab. 1. Las diferentes letras (minúsculas para 2014, mayúsculas para 2015) corresponden a la agrupación de medias según el test de Tukey, realizado de manera independiente para cada especie y año. Los tratamientos con letras diferentes tienen una media significativamente diferente ($p < 0.05$).

4. Discusión

4.1 Los acondicionadores del suelo

4.1.1. Valoración general de la técnica

El acondicionamiento del suelo ha probado ser una técnica de gran eficacia para incrementar el crecimiento en condiciones en las que el suelo tiene una baja capaci-

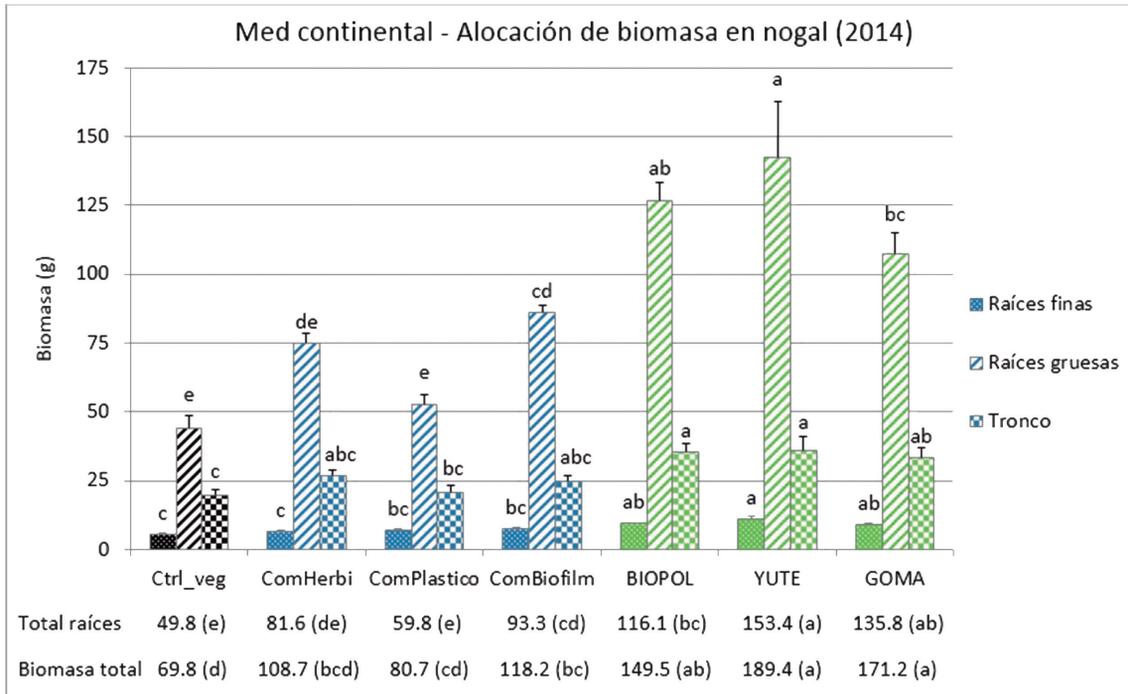


Figura 5. Producción y distribución de biomasa (media y error estándar) de nogal híbrido en condiciones mediterráneas continentales al final del primer período vegetativo (2014), en función de los diferentes tratamientos contra la vegetación competidora; abreviaturas como en *Tab. 1*. Las diferentes letras corresponden a la agrupación de medias según el test de Tukey, realizado de manera independiente para cada componente del árbol. Los tratamientos con letras diferentes tienen una media significativamente diferente ($p < 0.05$).

dad de retención de agua y nutrientes ligada a una textura ligera. Otros estudios previos mostraron el efecto positivo de los acondicionadores del suelo en la reducción de la mortalidad (Viero *et al.*, 2002) y en la promoción del desarrollo radical (Sarvas, 2003, Thomas, 2008).

Por otra parte, no se ha detectado un efecto significativo de la aplicación de esta técnica en ninguna variable en las condiciones más productivas (Mediterráneo continental y húmedo), en línea con lo observado por Bernetti (1995) en plantaciones de nogal con alta disponibilidad de agua y por Hüttermann *et al.* (1999) en suelos de textura pesada. Este tipo de estaciones, con suelos ricos y bien provistos de agua, el efecto del acondicionador ha sido imperceptible.

4.1.2. Valoración de la nueva formulación y la dosis de aplicación

Para una dosis de 40 g árbol⁻¹, que es la recomendada por el fabricante, el resultado de la nueva formulación ha sido muy similar al de la formulación comercial.

El resultado positivo del nuevo acondicionador ha sido proporcional a la dosis empleada (20, 40 y 80 g árbol⁻¹), si bien las diferencias entre las tres dosis no siempre han sido significativas: las dosis de 40 y 80 g árbol⁻¹ han mejorado generalmen-

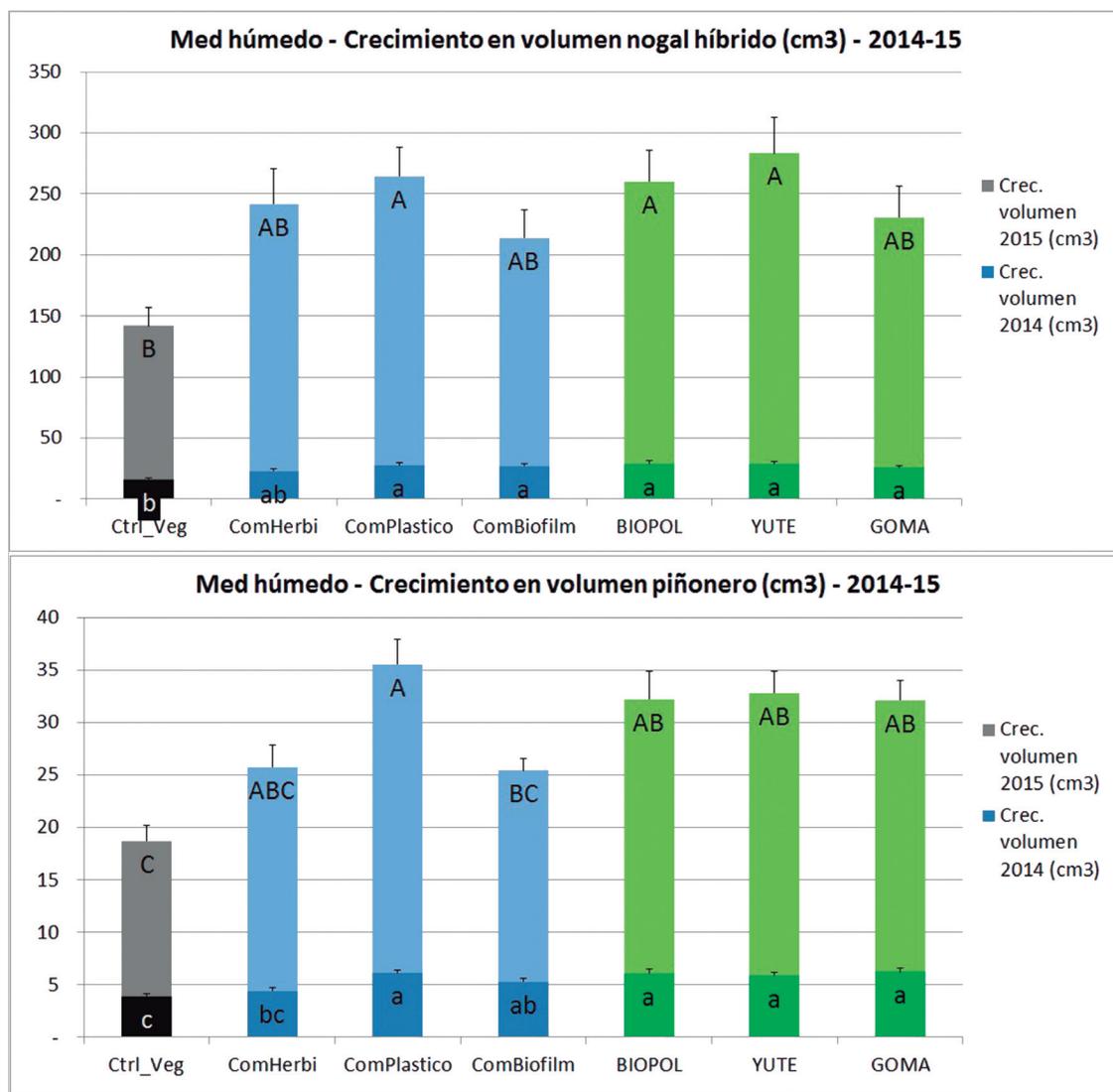


Figura 6. Crecimiento en volumen (cm³, media y error estándar) de nogal híbrido (arriba) y pino piñonero (abajo) durante los dos primeros períodos vegetativos en condiciones mediterráneas húmedas, en función de diferentes tratamientos contra la vegetación competidora; abreviaturas como en Tab. 1. Las diferentes letras (minúsculas para 2014, mayúsculas para 2015) corresponden a la agrupación de medias según el test de Tukey, realizado de manera independiente para cada especie y año. Los tratamientos con letras diferentes tienen una media significativamente diferente ($p < 0.05$).

te el crecimiento en comparación con la de 20 g árbol⁻¹ mientras que la dosis de 80 g árbol⁻¹ nunca ha mejorado significativamente los resultados de la aplicación de 40 g árbol⁻¹ que, por tanto, parece la dosis más adecuada en términos de coste-beneficio. Esta dosis es la prescrita por el fabricante para brinzales pequeños o medianos (15-60 cm de altura).

4.2 Las técnicas contra la vegetación competidora

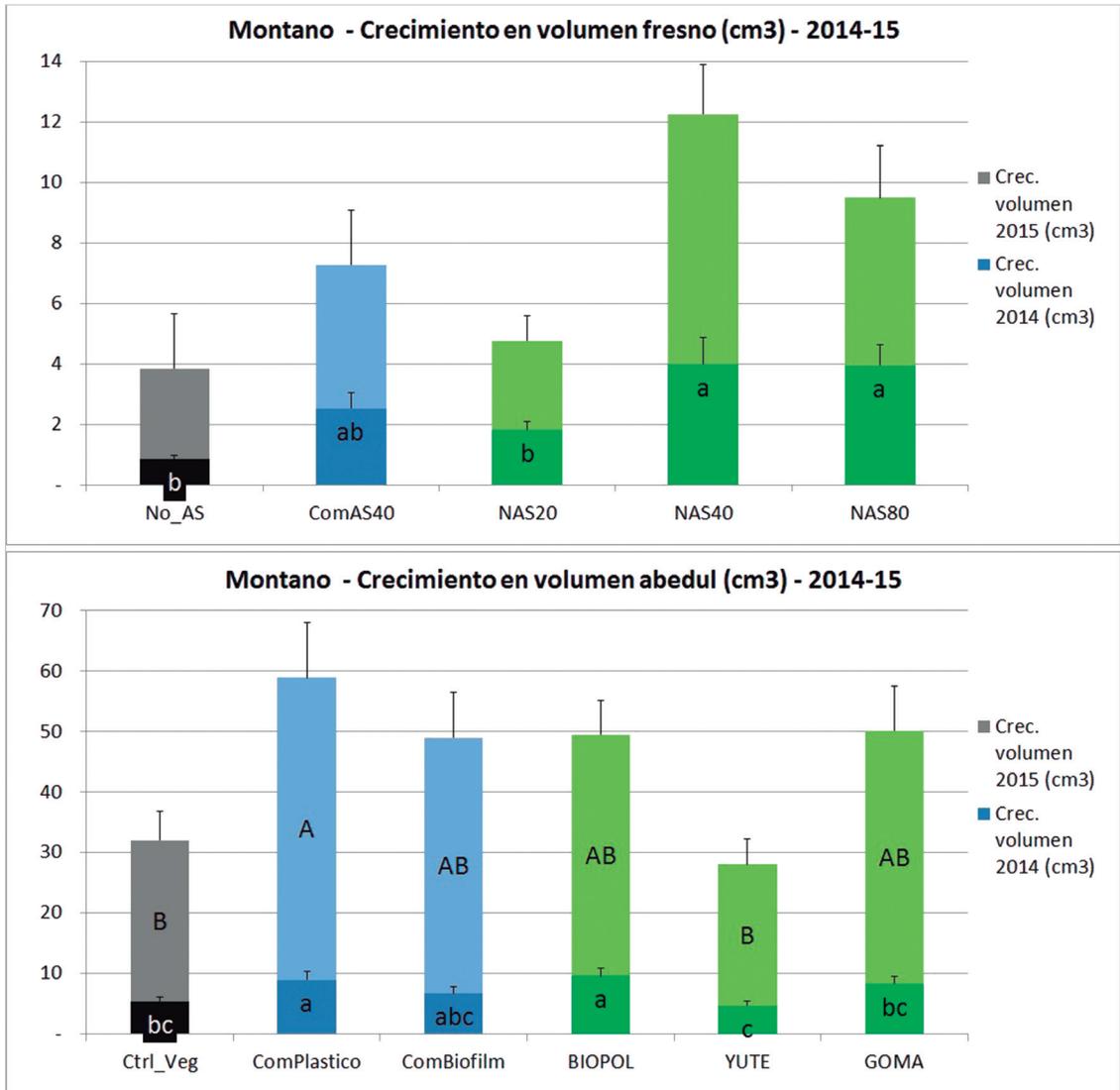


Figura 7. Crecimiento en volumen (cm³, media y error estándar) de fresno (arriba) y abedul (abajo) durante los dos primeros períodos vegetativos en condiciones montanas, en función de diferentes tratamientos de condicionamiento del suelo y contra la vegetación competidora, respectivamente; abreviaturas como en Tab. 1. Las diferentes letras (minúsculas para 2014, mayúsculas para 2015) corresponden a la agrupación de medias según el test de Tukey, realizado de manera independiente para cada especie y año. Los tratamientos con letras diferentes tienen una media significativamente diferente (p<0.05).

4.2.1. Valoración general de los tratamientos contra la vegetación competidora

Las técnicas contra la vegetación competidora han mejorado notablemente el funcionamiento de los brinzales, especialmente en las condiciones más productivas: mediterráneo continental y mediterráneo húmedo.

En comparación con los árboles control, aquellos en los que se ha aplicado cualquier técnica contra la vegetación competidora siempre han dado resultados mejores en todas las variables analizadas, en línea con la mayoría de estudios previos. El efec-

to positivo de las cubiertas del suelo sobre el crecimiento del sistema radical fue descrito por Ghosh *et al.* (2006) y por Kasirajan and Ngouajio (2012), mientras que los efectos positivos sobre el crecimiento aéreo se dan en prácticamente todos los estudios previos, de acuerdo con la revisión de 50 publicaciones realizada por Van Sambeek (2010).

Entre las diferentes técnicas contra la vegetación competidora, las cubiertas han dado resultados similares o mejores (crecimiento de encina micorrizada y pino piñonero) que la aplicación de herbicida en las condiciones en las que se han utilizado ambas técnicas. Van Sambeek (2010) obtuvo también un crecimiento predominantemente mejor con cubiertas frente al herbicida, pero Coello *et al.* (observación personal) obtuvieron un efecto opuesto en una parcela de nogal situada en el mediterráneo continental. Es probable que la elevada precipitación de 2014 haya hecho que la aplicación de herbicida, realizada únicamente en primavera, perdiera parte de su eficacia debido a una segunda proliferación de vegetación competidora durante la segunda mitad del período vegetativo. En 2015, un año más seco, el efecto del herbicida ha sido muy similar al de las cubiertas.

4.2.2. *Valoración de los diferentes tipos de cubiertas del suelo*

Entre las diferentes cubiertas del suelo (2 de referencia y 3 innovadoras) se han detectado pocas diferencias significativas, y sin un patrón evidente. La tendencia más clara podría ser un menor crecimiento en el caso del biofilm comercial en comparación con los nuevos modelos fabricados en yute o en el nuevo biopolímero (mediterráneo continental) o en plástico (mediterráneo húmedo). También parece que los modelos innovadores conducen a un incremento de la producción total de biomasa (mediterráneo continental) en comparación con los modelos de referencia.

En general, puede aceptarse que los modelos de cubiertas desarrollados durante el proyecto son, como mínimo, igual de eficientes en cuanto a su efecto sobre los árboles que las versiones disponibles actualmente en el mercado, además de aportar ventajas notables en comparación con la cubierta de plástico, tanto a nivel técnico (los biodegradables no tienen que ser retirados) y ambiental (fabricados con materias primas renovables o recicladas). El resultado similar entre cubiertas de plástico y bioplástico fue también observado por Garlotta (2001).

A modo de resumen, la *Tab. 6* muestra los principales resultados del estudio.

4.3 *Aspectos pendientes de evaluar*

El seguimiento durante los próximos años permitirá conocer en mayor detalle la eficacia de las técnicas en las diferentes áreas de estudio, así como su durabilidad, un aspecto especialmente relevante en el caso de las cubiertas biodegradables. El tamaño de las cubiertas es un aspecto relevante que convendrá estudiar en el futuro, tanto desde el punto de vista técnico (efectos a nivel de árbol y suelo) como económico (incremento del coste de adquisición e instalación).

En línea con esta última apreciación, es necesario integrar un balance económico para determinar el potencial de utilización de las nuevas técnicas desarrolladas

Tabla 6. Resumen de resultados del estudio (2014 – 2015): efecto de la aplicación de técnicas de acondicionamiento del suelo y contra la vegetación competidora, respecto a no aplicarlas.

Condición	Semiárida		Med continental		Med húmeda		Montana	
	Acond. suelo	Veg. comp.	Acond. suelo	Veg. comp.	Acond. suelo	Veg. comp.	Acond. suelo	Veg. comp.
Supervivencia / estado vegetativo	+	+	o	o	o	o	o	o
Crecimiento	++	+	o	++	o	++	+	o
Estado hídrico	+	o	o	++	o	++	o	o
Producción de biomasa	++	o	o	++				

++: efecto muy positivo de la técnica, en todas sus dosis y/o modelos/productos.

+: efecto positivo de la técnica en la mayoría de dosis y/o modelos/productos.

o: sin efecto significativo de la técnica.

en comparación con las opciones de referencia, y establecer los umbrales de utilización en función de factores como por ejemplo el coste de la mano de obra, la densidad de la forestación o su accesibilidad. También se espera que, una vez probada su eficacia y ante las ventajas ambientales que ofrecen, pueda reducirse el coste de las cubiertas de bajo impacto ambiental, como resultado de un incremento esperado de la demanda (Iles and Martin, 2012).

5. Conclusiones

La actividad forestadora precisa de técnicas innovadoras contra el efecto negativo de la sequía y la vegetación competidora, que cumplan con los siguientes requisitos:

- Mínima mano de obra necesaria para su instalación / aplicación y para su eliminación.
- Bajo coste de adquisición, instalación / aplicación y eliminación.
- Bajo impacto ambiental: deben estar basados preferentemente en materias primas recicladas o reciclables y ser inocuas con el medio.

Las nuevas técnicas de plantación estudiadas han mostrado su eficacia en diferentes condiciones de estudio, con un patrón estable: el acondicionamiento del suelo tiene un claro efecto positivo en zonas con suelos ligeros y poca capacidad de retención de agua (condiciones semiáridas y montanas), especialmente cuando la restricción hídrica es severa. En cambio, las técnicas contra la vegetación competidora son especialmente efectivas en condiciones productivas, con suelos ricos en nutrientes y con una adecuada provisión hídrica.

El nuevo acondicionador del suelo requiere una instalación sencilla y no requiere mantenimiento.

Las nuevas cubiertas biodegradables (nuevo biopolímero y yute) tienen como principal ventaja, frente a las cubiertas plásticas, no requerir ser retiradas. Además, estos nuevos modelos tienen un interés ambiental añadido, al reducirse el uso de plásticos y posible dispersión en áreas naturales y por su fabricación en materias primas renovables. En este sentido, estas dos técnicas pueden ser muy interesantes para la forestación especialmente en áreas de mala accesibilidad, en las que la retirada de la cubierta sea muy costosa. La cubierta de yute, de alto valor estético, puede ser especialmente interesante en áreas de gran presión paisajística y visual. La cubierta realizada con goma reciclada tiene como principal atractivo la valorización de un residuo y su prolongada durabilidad, por lo que parece una opción muy atractiva para ser empleada en forestación en entornos urbanizados (jardinería, espacios verdes, etc.).

En resumen, las técnicas desarrolladas durante el proyecto han dado lugar a resultados similares y frecuentemente mejores que las versiones de referencia lo que, unido a sus beneficios ambientales, permiten que a priori se puedan considerar como una alternativa interesante para ser empleadas en forestación, si bien los resultados a medio plazo y el balance económico en cada área, definido por su accesibilidad y por la viabilidad de la aplicación de técnicas tradicionales permitirán ajustar su potencial de aplicación.

6. Agradecimientos

Proyecto FP7 SustAffor “Uniendo eficacia y sostenibilidad en forestación en un contexto de cambio climático: nuevas tecnologías para mejorar las características del suelo y el rendimiento de la planta”, financiado por la línea Capacities del 7º Programa Marco de la Unión Europea, gestionado por la REA - Research Executive Agency <http://ec.europa.eu/research/rea> (FP7/2007-2013) bajo el acuerdo de ayuda nº 606554 (2013-2015). www.sustaffor.eu.

El consorcio del proyecto SustAffor, formado por las empresas TerraCottem Internacional (ES), DTC (BE), ECORUB (BE), La Zeloise (BE), Terrezu (ES) y Ceres International (PL) y por las entidades de I+D CTFC (ES), Centexbel (BE), CNRS (FR) y EDMA (ES).

El personal de campo que ha participado en la instalación, mantenimiento y seguimiento de los ensayos, a la Sección de Gestión de Montes del Servicio Provincial de Huesca del Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón, al Departament d’Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural de la Generalitat de Catalunya en la comarca de la Cerdanya y propietarios forestales privados.

7. Bibliografía

Arentoft, B.W., Ali, A., Streibig, J.C., Andreasen, C., 2013. A new method to evaluate the weed-suppressing effect of mulches: a comparison between spruce bark and cocoa husk

- mulches. *Weed Res.*, 53 (3), 169-175.
- Álvarez-Chávez, C.R., Edwards, S., Moure-Eraso, R., Geiser, K., 2012. Sustainability of bio-based plastics: general comparative analysis and recommendations for improvement. *J. Clean. Prod.* 23 (2012) 47-56.
- Bernetti, G., 1995. *Selvicoltura speciale*. UTET, Turin.
- Carminati, A., Moradi, B.A., Vetterlein, D., Vontobel, P., Lehmann, E., Weller, U., Vogel, H., Oswald, S.E., 2010. Dynamics of soil water in the rhizosphere. *Plant Soil* 332, 163-176.
- Chalker-Scott, L., 2007. Impact of mulches on landscape plants and the environment — A review. *J. Environ. Hort.* 25:239–249.
- Coello, J., Piqué, M., 2016. *Acondicionadores y cubiertas del suelo para una plantación de árboles más eficiente y sostenible - guía técnica*. CTFC, Solsona.
- Garlotta, D., 2001. A literature review of poly(lactic acid). *J. Polym. Environ.* 9, 63–84.
- George, B.H., Brennan, P.D., 2002. Herbicides are more cost-effective than alternative weed control methods for increasing early growth of *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus saligna*. *New Forests* 24; 147-163.
- Ghosh, P.K., Dayal, D., Bandyopadhyay, K.K., Mohanty, M., 2006. Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut. *Field Crop. Res.* 99, 76–86.
- Green, D.S., Kruger, E.L., Stanosz, G.R., 2003. Effects of polyethylene mulch in a short-rotation, poplar plantation vary with weed-control strategies, site quality and clone. *Forest Ecology and Management*, 173, 251–260.
- Hüttermann, A., Zommodi, M., Reise, K., 1999. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought. *Soil Tillage Res.* 50, 295-304.
- Iles, A., Martin, A.N., 2012. Expanding bioplastics production: sustainable business innovation in the chemical industry. *J. Clean. Prod.* 45, 38-49.
- Kasirajan S., Ngouajio M., 2012. Polyethylene and biodegradable for agricultural applications: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 501-529.
- Maggard, A.O., Will, R.E., Hennessey, T.C., McKinley, C.R. Cole, J.C., 2012. Tree-based Mulches Influence Soil Properties and Plant Growth. *HortTechnology*, 22 (3), 353-361.
- McConkey, T., Bulmer, C., Sanborn, P., 2012. Effectiveness of five soil reclamation and reforestation techniques on oil and gas well sites in northeastern British Columbia. *Can. J. Soil Sci.*, 92 (1), 165-177.
- Olivera, A., Bonet, J.A., Palacio, L., Liu, B., Colinas, C., 2014. Weed control modifies *Tuber melanosporum* mycelial expansion in young oak plantations. *Annals of Forest Science*, 71 (4), 495-504.
- Resco de Dios, V., Fischer, C., Colinas, C., 2007. Climate change effects on Mediterranean forests and preventive measures. *New Forests* 33: 29-40.
- Sarvas M., 2003. Effect of desiccation on the root system of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) seedlings and a possibility of using hydrogel STOCKOSORB for its protection. *J. Forest Sci.* 49(11), 531-536.
- Siipilehto, J., 2001. Effect of weed control with fibre mulches and herbicides on the initial development of spruce, birch and aspen seedlings on abandoned farmland. *Silva Fennica*, 35 (4), 403-414.
- Shogren, R.L., Rousseau, R.J., 2005. Field testing of paper/polymerized vegetable oil mulches

- for enhancing growth of eastern cottonwood trees for pulp. *For. Ecol. Manage.* 208, 115-122.
- Sloup J., Salaš P., 2009. Affecting the quality of nursery produce by soil conditioners. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 57 (4), 103-108.
- Thiffault, N., Roy, V., 2011. Living without herbicides in Quebec (Canada): historical context, current strategy, research and challenges in forest vegetation management. *Eur. J. For. Res.* 130 (1), 117-133.
- Thomas D.S., 2008. Hydrogel applied to the root plug of subtropical eucalypt seedlings halves transplant death following planting. *For. Ecol. Manage.* 255, 1305-1314.
- Vallejo, R., Aronson, J., Pausas, J.G., Cortina, J., 2006. Restoration of Mediterranean woodlands. In: Van Andel, J., Aronson, J. (eds), *Restoration ecology: the new frontier*. Blackwell Publishing. Malden, USA, pp. 193-207.
- Van Sambeek, J.W., 2010. Database for Estimating Tree Responses of Walnut and Other Hardwoods to Ground Cover Management Practices. In: McNeil, D.L. (ed.), *VI International Walnut Symposium*, pp. 245-252.
- Van Sambeek, J.W., Garrett, H.E., 2004. Ground cover management in walnut and other hardwood plantings. In: Michler, C.H., Pijut, P.M., Van Sambeek, J.W., Coggeshall, M.V., Seifert, J., Woeste, K., Overton, R., Ponder, F. Jr. (eds.), *Proceedings of the 6th Walnut Council Research Symposium; Gen. Tech. Rep. NC-243*. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station, 85-100.
- Viero, P.W.M., Chiswell, K.E.A., Theron, J.M., 2002. The effect of a soil-amended hydrogel on the establishment of a *Eucalyptus grandis* clone on a sandy clay loam soil in Zululand during winter. *The Southern African Forestry Journal* 193 (1), 65-75.
- Willoughby, I., Balandier, P., Bentsen, N.S., McCarthy, N., Claridge, J. (eds.), 2009. *Forest vegetation management in Europe: current practice and future requirements*. COST Office, Brussels.
- Zegada-Lizarazu, W., Berliner, P.R., 2011. The effects of the degree of soil cover with an impervious sheet on the establishment of tree seedlings in an arid environment. *New For.* 42 (1), 1-17.

