



Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. 41: 291-304 (2015)

Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales

Acceso abierto disponible en <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/index>

III Reunión del Grupo de Trabajo de Hidrología Forestal: La hidrología forestal: ciencia y técnicas útiles

Balance hídrico del suelo en pinares con diferente densidad de arbolado. Efectos sobre el establecimiento de brinzales de especies rebrotadoras bajo el dosel

Chirino, E.^{1*,6}, Heredia-Osorio, M.², Granados, M^a.E.³, Vilagrosa, A.^{1,6}, Manrique-Alba, A.⁴, Ruiz-Yanetti⁴, S., Andarcio, C.⁵, Bellot, J.^{4,6}

¹ Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM). C/ Charles R. Darwin, 14. Parque Tecnológico. 46980 - Paterna, Valencia, España

² Doctorando del Programa de Doctorado Ciencias y Tecnologías del Medio Ambiente. Dpto. Fisiología Vegetal. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona. Gran Vía de les Corts Catalanes, 585. 08007 Barcelona. España

³ Departamento de Biología Básica, Instituto de Investigaciones Sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. San Juanito Itzicuaró s/n Col Nueva Esperanza Morelia, Michoacán, México

⁴ Dpto. Ecología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante. Apdo. 99. 03080-Alicante. España

⁵ Software Developer. Plusamedia LLC, 13764 Kendale Lakes Dr, Miami, FL 33183. EE.UU

⁶ Unidad Mixta de Investigación Universidad de Alicante-Fundación CEAM. Apdo. 99. 03080-Alicante. España

*e-mail: Esteban.Chirino@ua.es

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue determinar el balance hídrico del suelo en bosques de pino carrasco con diferente densidad de arbolado utilizando el modelo ecohidrológico HYDROBAL, y evaluar sus efectos sobre la introducción y establecimiento bajo el dosel, de brinzales de especies ampliamente utilizadas en la restauración forestal. En este contexto, en La Hunde (Ayora, Valencia), y como consecuencia de previas labores de aclareo con diferente intensidad, se definieron tres tratamientos experimentales de acuerdo a diferentes densidades de pinos: Baja (100-300 pies ha⁻¹); Media (300-700 pies ha⁻¹) y Alta (700-1100 pies ha⁻¹). De cada tratamiento se establecieron tres parcelas experimentales de 900 m², localizadas en tres sitios (El Aljibe, El Lobo y El Mojón). En cada parcela se plantaron quince individuos de seis especies rebrotadoras con características morfo-funcionales contrastadas (*Arbutus unedo*, *Rhamnus alaternus*, *Quercus ilex*, *Quercus faginea*, *Fraxinus ornus*, *Acer opalus ssp granatense*). Los resultados del balance hídrico indicaron que las parcelas con alta densidad de pinos mostraron menor transcolación, menor precipitación neta y en consecuencia, menor humedad del suelo; lo cual coincidió con los resultados observados en campo. No obstante, y contrariamente a los resultados esperados, las parcelas de alta densidad presentaron los mayores valores de supervivencia (85%) y crecimiento en altura; lo cual pudo ser favorecido por el efecto protector del dosel, que redujo significativamente la radiación solar (transmisividad de luz solar: 15%).

Palabras clave: ecohidrología, reforestación, bosques, resiliencia, supervivencia.

1. Introducción

El pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) ha sido ampliamente utilizado para la reforestación en la cuenca mediterránea durante el siglo pasado (Vallejo, 1996; Kuitiel, 2000; Quézel, 2000). En la actualidad en muchas regiones se encuentra como formaciones monoespecíficas con diferentes edades y densidades de arbolado (Maestre y Cortina, 2004). En estos escenarios, la introducción de otras especies rebrotadoras bajo el dosel se ha planteado como una práctica útil de reforestación para incrementar la resiliencia de estos bosques frente a riesgos de incendios forestales, y así reducir la vulnerabilidad del ecosistema a procesos de degradación (Vallejo *et al.*, 2012; Pausas, *et al.*, 2004). Sin embargo, las posibilidades de éxito de estas reforestaciones bajo cubierta, dependerán en gran medida de las interacciones entre plantas (competencia, facilitación), disponibilidad de luz o tolerancia al sombreado, así como a la disponibilidad de los nutrientes y el agua en el suelo (Sack y Grubb, 2002), siendo esta última una consecuencia del balance hídrico superficial (Chirino y Bellot, 2013).

Tradicionalmente se ha considerado que los bosques infiltran una gran cantidad de agua y generan poca escorrentía. Pero por un lado, los bosques con una alta densidad de la cubierta vegetal presentan una elevada interceptación de la lluvia, reducen la precipitación neta y, en consecuencia, el agua que llega a la superficie del suelo. Una mayor cobertura y estratificación del bosque contribuye a reducir la escorrentía superficial y la pérdida de suelo por erosión. Sin embargo, también presentan un elevado consumo de agua como consecuencia de la transpiración de la vegetación (Gallart y Llorens, 1994), compitiendo por el agua de infiltración lenta, almacenada superficialmente (Bellot y Escarré, 1998). En este sentido, la composición de especies, estructura y densidad del arbolado son variables que regulan los flujos de agua que determinan el balance hídrico del suelo. La respuesta a esta disyuntiva se basa en diseñar una estructura vegetal adecuada, que proteja al suelo frente a la erosión, evite fuertes escorrentías, y a la vez favorezca niveles de humedad del suelo adecuados para el establecimiento de nuevos individuos.

Actualmente la literatura describe una amplia variedad de modelos hidrológicos (Vardavas, 1988; Gracia *et al.*, 1999; Arnold *et al.*, 1999; Delgado *et al.*, 2010), los cuales difieren en sus objetivos, datos de entrada, complejidad, y resolución espacial y temporal. En algunos casos, se han desarrollado modelos para determinar la escorrentía superficial y la producción de sedimentos. En otros casos se han empleado para evaluar los efectos de los usos del suelo sobre la hidrología, predecir la demanda estacional de riego y los efectos de la cubierta vegetal en la recarga de acuíferos. Pero el uso de modelos hidrológicos para evaluar los efectos del balance hídrico sobre el establecimiento de nuevos individuos en una formación vegetal, es menos frecuente. En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue determinar el balance hídrico del suelo en bosques de pino carrasco con diferente densidad de arbolado utilizando el modelo ecohidrológico HYDROBAL, y evaluar sus efectos sobre la introducción y establecimiento bajo el dosel, de brinzales de especies ampliamente utilizadas en la restauración forestal.

2. Material y métodos

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en La Hunde (39° 09' N, 1° 23' W; Valencia, SE de España), en clima mesomediterráneo seco, altitud de 830 m s.n.m. y relieve relativamente llano. Precipitación media anual de 480 L m⁻², temperatura media anual de 14°C, evapotranspiración de referencia (E_{io}) de 749 L m⁻² y evapotranspiración actual (E_{ta}) de 453 L m⁻² (Pérez-Cueva, 1994). Suelo margo-calizo, poco profundo (profundidad ~40 cm) y de origen calcáreo. La vegetación dominante corresponde a antiguas repoblaciones de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) plantados hace 40-50 años. En el área de estudio se han realizado labores de aclareo llevadas a cabo por el Servicio Forestal de la Generalitat Valenciana. La vegetación del sotobosque está compuesta por gramíneas como *Brachypodium retusum* Pers. Beauv., y *Lagunus ovatus* L.; arbusto de bajo porte como *Thymus vulgaris* L.; y arbustos esclerófilos como *Rosmarinus officinalis* L., *Juniperus oxycedrus* L., y *Ulex parviflorus* Pourr. En algunas zonas podemos observar dispersos individuos adultos de *Quercus ilex* L. y algunos individuos juveniles en las áreas circundantes.

2.2 Diseño experimental

A partir de diferentes niveles de intensidad del aclareo realizado por el Servicio Forestal, se definieron tres tratamientos experimentales basados en tres niveles de densidad de la masa forestal: Alta (AD; 700-1100 pies ha⁻¹), Media (MD; 300-700 pies ha⁻¹) y Baja (BD; 100-300 pies ha⁻¹). De cada tratamiento se establecieron tres parcelas experimentales de 900 m² (30x30 metros), localizadas en tres sitios: El Aljibe (39° 09' N; 1° 18' W), El Lobo (39° 12' N, 1° 23' W) y El Mojón (39° 12' N, 1° 22' W). En cada parcela se plantaron 15 individuos de seis especies rebrotadoras con características morfo-funcionales contrastadas (*Arbutus unedo*, *Rhamnus alaternus*, *Quercus ilex*, *Quercus faginea*, *Fraxinus ornus*, *Acer opalus ssp granatense*). La plantación se realizó en febrero de 2011, en hoyos de plantación de 40x40x40 cm realizados con retroexcavadora. Se realizó una caracterización de los suelos en la profundidad de 0-50 cm (capacidad de campo, punto de marchitez, densidad aparente, porosidad); así como de la vegetación mediante tres transectos de 10 m por parcela (inventario de especies y cobertura vegetal por estratos en 1000 puntos). Se determinó el Global Site Factor a partir de 9 fotos hemisféricas por parcela y procesamiento con el software HemiView (Delta-T Devices Ltd. UK). Además se determinó la densidad (pies ha⁻¹), fracción de cabida cubierta (Fcc), diámetro a la altura del pecho (DBH, cm) y área basal de los pinos (m² ha⁻¹).

2.3 Monitoreo de la transcolación, humedad del suelo y variables climáticas

Durante el período de seguimiento del experimento (marzo-2011-noviembre-2013) y con el fin de proporcionar parámetros, ecuaciones y datos para el funciona-

miento y calibración del modelo, se realizó el monitoreo de las siguientes variables en cada parcela: (1) transcolación acumulada ($L m^{-2}$) mediante 3 pluviómetros (diámetro 26 cm conectados a bidones de 5L) colocados sobre la diagonal de cada parcela. La frecuencia de medición fue quincenal en el período lluvioso y mensual en el período menos lluvioso; (2) humedad volumétrica del suelo ($m^3 m^{-3}$) en la profundidad de 0-40 cm; la cual se obtuvo a partir del promedio entre la humedad del suelo medida en siete hoyos de plantación (profundidad de 0-20 cm) mediante sondas TDR (Time Domain Reflectometer, TDR100, Campbell scientific, Inc. Logan, Utah, USA. Ecuación de Topp); y la humedad del suelo en la profundidad de 30-40 cm (medida en tres de esos hoyos,) mediante sensores HS-10 con medidas instantáneas utilizando el ProCheck (Decagon Devices, Inc., Pullman, USA.). La precipitación fue registrada en el vivero La Hunde (Servicios Forestales de la Generalitat Valenciana ($39^{\circ} 05' N$; $1^{\circ} 16' W$), mientras que la temperatura del aire y la humedad relativa fueron registradas en una estación meteorológica del CEAMET ($39^{\circ} 03' N$; $1^{\circ} 02' W$; Campbell scientific, Inc. Logan, Utah, USA); ambos sitios próximos al área de estudio. La radiación fotosintéticamente activa (PPFD $mol m^{-2} s^{-1}$) se midió en días totalmente soleados utilizando un Ceptómetro (Sunfleck Ceptometer, Decagon Devices, Inc., Pullman, USA). En los meses de mayo, julio, septiembre y noviembre 2011 y marzo de 2012, cada tres horas a lo largo del día y entre las 06:00 y 18:00 horas (hora solar), se realizaron en cada parcela diez medidas de la PPFd bajo el dosel siguiendo la diagonal. Los datos del mes de julio-2011 (12 horas de luz solar) fueron utilizados para estimar la transmisividad de luz solar (TLS). TLS (%) en cada tratamiento experimental (BD, MD, AD) se calculó como el cociente entre la PPFd bajo el dosel y la PPFd a pleno sol.

2.4 Supervivencia y crecimiento relativo

Con el fin de evaluar el efecto del balance hídrico en los diferentes tratamientos experimentales sobre el establecimiento de los brinzales introducidos, se realizó un seguimiento de la supervivencia y el crecimiento relativo en altura del tallo y diámetro basal en primavera y otoño de 2011, 2012 y 2013. La tasa de crecimiento relativo (RGR) se calculó como $(\ln P_2 - \ln P_1)/(t_2 - t_1)$ en el mismo período.

2.5 Modelo ecohidrológico HYDROBAL

El modelo ecohidrológico HYDROBAL es un modelo determinístico desarrollado con el objetivo de evaluar el papel de la cubierta vegetal sobre el balance hídrico del suelo. El modelo simula la dinámica temporal del balance hídrico del suelo con una resolución diaria integrando las condiciones meteorológicas, las características de la vegetación y del suelo, a escala de parcela y cuenca hidrológica. HYDROBAL utiliza como variables de entrada las variables climáticas de precipitación diaria y temperaturas mínima, máxima y media diarias. Emplea un conjunto de parámetros de suelo detallados en la *tabla 1* [profundidad del suelo, humedad inicial del suelo ($\theta_{inicial}$), humedad máxima del suelo (θ_{max}) observada en el período de segui-

miento, capacidad de campo (θ_{33}), punto de marchitez permanente (θ_{1500}) y porosidad total (P_{total}); así como de la vegetación (composición de especies, cobertura y estructura de la vegetación). Las variables de salida son: evapotranspiración de referencia, evapotranspiración actual, interceptación, precipitación neta, escorrentía superficial, drenaje profundo y humedad del suelo.

Conceptualmente, HYDROBAL a partir de la precipitación bruta (PB), estima los flujos de agua [transcolación (Tr), escorrentía cortical (Ec) e interceptación (Int)] a través del dosel vegetal considerando la composición, cobertura y estratificación de las especies, para lo cual utiliza ecuaciones de regresión obtenidas durante el experimento o seleccionadas de investigaciones previas (Bellot y Chirino, 2013), simulaciones en laboratorio (Derouiche, 1996; Abdelli, 1999) o reportadas en la bibliografía (Belmonte y Romero, 1998). Este módulo finaliza con la estimación de la precipitación neta (PN_i). A partir de la precipitación neta, el modelo estima el volumen de escorrentía superficial (Es) y la infiltración del agua en el suelo (Infiltr). Del volumen de agua que queda en el suelo, se estima la evapotranspiración actual (E_{ta}) y la reserva de agua en el suelo (θ). Como indicador funcional de la capacidad de transpiración de la cubierta vegetal, el modelo utiliza el factor k . Es un parámetro empírico que integra las características ecofisiológicas y estructura de la vegetación, y se utiliza para ajustar y calibrar el modelo, teniendo en cuenta las diferencias entre los diversos tipos de cobertura vegetal. El modelo HYDROBAL fue calibrado relacionando la humedad del suelo observada vs. humedad del suelo estimada, reportando coeficientes de regresión significativos (coeficientes de regresión promedios por tipo de densidad de arbolado BD: 0.902, MD: 0,895 y AD: 0.724) y un error de predicción (Frueh y Hopmans, 1997) promedio de 2.008%.

Tabla 1. Valores de los parámetros de suelo y factor k utilizados en las simulaciones realizadas con el modelo HYDROBAL

Parámetros		Tratamientos experimentales		
		BD	MD	AD
Profundidad del suelo	cm	40	40	40
Punto de marchitez	%	6.1	5.7	5.8
Capacidad de campo	%	26	23	20
Porosidad total	%	51	46	47
Humedad inicial	%	18.0	15.6	15.1
Humedad máx. observada	%	28.1	28.0	28.8
k mínimo		0.007	0.008	0.008
k máximo		0.011	0.010	0.011

El modelo ecohidrológico HYDROBAL se encuentra en fase de registro (Solicitud N°. A-759-2013) en las oficinas del Registro de la Propiedad Intelectual de la Comunidad Valenciana. Una descripción más detallada de la estructura y funciona-

miento del modelo se puede encontrar en Bellot y Chirino (2013). Durante la última década, HYDROBAL se ha aplicado satisfactoriamente en condiciones semiáridas para evaluar el papel de diferentes tipos de cobertura vegetal sobre el balance hídrico del suelo (Bellot *et al.*, 1999; Chirino, 2003); así como para evaluar el efecto de diferentes escenarios de uso del suelo sobre la recarga de acuíferos (Bellot *et al.*, 2001. Touhami *et al.*, 2013; 2014). De acuerdo con (Biroty Gracia, 2011), el agua azul (BW) se calculó como la fracción de agua de lluvia que llega a los ríos a través de la escorrentía superficial y la infiltración en el suelo ($BW=Es+Infiltr$); mientras que el agua verde (GW) se calculó como la fracción de agua de lluvia que se evapotranspira ($GW=Int+E_{ta}$).

2.6 Análisis estadísticos

En la caracterización de los tratamientos experimentales, las medias de la densidad de arbolado (pies ha^{-1}), cobertura vegetal (%), fracción de cabida cubierta (%), cobertura de arbustos (%), cobertura de arbustos bajos (%), cobertura de gramíneas (%), diámetro a la altura del pecho (DBH, cm), área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), Global Site Factor (GSG) y transmisividad de luz solar (TLS, %); así como las medias de las tasas de crecimiento relativo-RGR en altura y diámetro fueron comparadas mediante un análisis de la varianza (ANOVA de un factor, *test a posterior* Tukey's HSD). Los datos de supervivencia fueron analizados utilizando el test de Kaplan-Meier (Log Rank). Todos los análisis se realizaron utilizando el paquete estadístico SPSS® v. 18.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA).

3. Resultados

3.1 Características de los tratamientos experimentales

Los tratamientos experimentales (parcelas con diferente densidad de pinos) como consecuencia de las labores de aclareo presentaron valores de cobertura vegetal entre 62 y 86%. Las parcelas de alta densidad (AD) presentaron mayor densidad de pinos, área basal, fracción de cabida cubierta (Fcc) y en consecuencia mayor cobertura vegetal ($p<0.05$; *Tab. 2*). El análisis de la estructura indicó que en AD predominó el estrato arbóreo ($p<0.001$), mientras en las parcelas de media densidad (MD) los arbustos ocuparon el 33%, aunque no se observaron diferencias significativas. En las parcelas BD y MD, las especies arbustivas de porte bajo y de gramíneas representaron un estrato importante; siendo éstos casi nulos en AD. No se observaron diferencias en el DBH de los pinos para las diferentes densidades de pinos ($p>0.05$; *Tab. 2*). Los brinzales plantados bajo el dosel en los tratamientos con mayor densidad de pinos presentaron menos horas de luz a lo largo del año, lo que se reflejó en menores valores de GSF ($p<0.01$; *Tab. 2*). Alta densidad redujo el 75% de la PPFD a pleno Sol, mientras que MD y BD mostraron una reducción del 65% y 33% respectivamente (TLS, $p>0.001$; *Tab. 2*).

Tabla 2. Características de los tratamientos experimentales. Resultados ANOVA de un factor (Media±error típico; N=3; *test a posteriori* Tukey's HSD; valores seguidos de letra diferente indican diferencia significativa). Abreviaturas: cobertura (Cob.), fracción de cabida cubierta (Fcc), diámetro a la altura del pecho (DBH), Global Site Factor (GSG).

	Tratamientos experimentales			Valor F
	BD	MD	AD	
Densidad (pies ha ⁻¹)	165±25 b	344±19 b	1067±141 a	32.687 ***
Cob. vegetal (%)	62.6±8.4 c	74.6±1.1 ab	86.2±2.2 a	5.360 *
Fcc (%)	25.5±4.7 c	54.0±8.1 b	86.7±1.8 a	30.865 ***
Cob. arbustos (%)	14.2±7.6	33.8±18.0	5.5±2.0	1.645 ns
Cob. arbustos bajo (%)	20.5±4.6 a	11.8±5.1 ab	2.1±1.4 c	5.232 *
Gramíneas (%)	21.4±9.9 a	5.2±2.2 a	0.34±0.2 c	21.279 **
DBH pinos (cm)	24.5±2.8	21.4±1.9	19.7±1.6	1.219 ns
Área basal (m ² ha ⁻¹)	7.5±1.0 b	12.4±1.6b	31.7±1.3 a	96.118 ***
GSG	0.76±0.03 a	0.57±0.06 b	0.40±0.01 c	22.136 **
TLS (%)	62.9 ± 5.1 a	35.6 ± 3.1 b	14.7 ± 2.5 c	41.783 ***

3.2 Balance hídrico del suelo

El balance hídrico en un período de tres años (2011-2013; precipitación acumulada: 1583 L m⁻²) indicó que las parcelas de BD presentaron menor interceptación de la precipitación (14%) y en consecuencia mayor precipitación neta (86%; *Tab. 3*). En contraste las parcelas de AD interceptaron hasta el 39% de la precipitación bruta (PB), reduciendo la lluvia que llega al suelo hasta el 61%. Las parcelas de MD mostraron un comportamiento intermedio (*Tab. 3*). El elevado porcentaje de interceptación en las parcelas de AD puede estar asociado al alto valor de Fcc (86%) y a las características de las precipitaciones. Los eventos de precipitación presentaron una media de 8.8±0.9 L m⁻², correspondiendo al evento de máximo volumen 73 L m⁻². El 55% de los eventos de lluvia fueron menores a 5 L m⁻², y el 74% < 10 L m⁻². Sólo el 13% de los eventos de precipitación fueron >20 L m⁻². La escorrentía superficial no superó el 0,7% de la PB (*Tab. 3*), lo cual está en correspondencia con el relieve llano de la zona. Una menor cobertura vegetal se tradujo en mayor infiltración del agua en el suelo. La infiltración en BD alcanzó el 36% de la PB, mientras que en AD fue el 25%. La E_{ta} osciló entre 50% en BD y un 37% en AD. El porcentaje de agua verde (GW) mostró un incremento con el aumento de la densidad de árboles, siendo 64% en BD y 75% en AD (*Tab. 3*). En cambio, fue en las parcelas de menor densidad donde se aportó mayor porcentaje de agua a la percolación profunda (agua azul en BD = 37%) en relación con las parcelas de alta densidad (BW = 26%). En general, el agua utilizada por la vegetación y evaporada hacia la atmósfera en estas formaciones vegetales mostró una media de 2.5 veces al porcentaje de agua que escurre superficialmente o se infiltra en el suelo (*Tab. 3*).

Tabla 3. Balance hídrico del suelo por densidad de pinos determinado a partir del modelo HYDROBAL. Arriba: valores ($L\ m^{-2}$, media, $N=3$) acumulados en el período (años 2011, 2012 y 2013). Abajo: valores en % respecto a la precipitación bruta acumulada. Abreviaturas: Precipitación bruta (PB), Interceptación (Int), precipitación neta (PNt), escorrentía superficial (Es), Reserva de agua el suelo ($\Delta\theta = \theta_{final} - \theta_{inicial}$), Infiltración (Infilt), evapotranspiración real (E_{ta}), agua azul ($BW = Es + Infilt$), agua verde ($GW = Int + E_{ta}$).

	PB	Int	PNt	Es	Dq	Infilt	E_{ta}	GW	BW	GW/BW
Datos en $L\ m^{-2}$										
BD	1583	227.3	1355.7	10.7	-10.6	576.8	785.9	1013.2	581.0	1.74
MD	1583	467.7	1115.3	11.5	-7.8	402.3	715.9	1183.6	413.8	2.86
AD	1583	611.3	971.7	7.8	-1.2	395.5	578.2	1189.5	403.3	2.95
Datos en %										
BD	100	14.4	85.6	0.7	-2.6	36.4	49.6	64.0	36.7	1.74
MD	100	29.5	70.5	0.7	-2.0	25.4	45.2	74.8	26.1	2.86
AD	100	38.6	61.4	0.5	-0.3	25.0	36.5	75.1	25.5	2.95

3.3 Efectos sobre la supervivencia y crecimiento de los brinzales

La supervivencia de los brinzales introducidos bajo el dosel en los diferentes tipos de densidades de pinos fue de 78%. Por tratamiento experimental, fue en AD donde se observó mayor supervivencia de los brinzales ($p<0.001$; Tab. 4). Las parcelas en MD y BD no mostraron diferencias significativas. Los brinzales en AD y MD mostraron mayor RGR en altura ($p<0.05$; Tab. 4); mientras en BD y MD se observaron los mayores valores de RGR en diámetro ($p<0.05$).

Tabla 4. Supervivencia y crecimiento relativo en altura y diámetro después de tres años en plantación, Resultados estadísticos en supervivencia (Test de Kaplan-Meier, Log Rank) y tasa de crecimiento relativo-RGR (ANOVA de un factor; $N=3$; test a posterior Tukey's HSD; valores seguidos de letra diferente indican diferencia significativa).

Densidad de pinos	Supervivencia (%)	RGR Altura (año-1)	RGR Diámetro (año-1)
BD	73.7±2.5 b	0.057±0.005 b	0.082±0.004 a
MD	75.2±2.5 b	0.072±0.005 a	0.079±0.004 a
AD	85.0±2.1 a	0.081±0.004 a	0.060±0.004 b
Valor F	13.230 ***	6.7867 **	11.738 ***

4. Discusión

3.1 Características de los tratamientos experimentales

Estudios previos han destacado la importancia de la vegetación en la regulación de los flujos hídricos (Chirino, 2003; Yildiz y Barros, 2007), particularmente en la protección del suelo frente a la erosión (Vacca *et al.*, 2000; Chirino *et al.*, 2006) y en el incremento de la infiltración del agua en el suelo (Stothoff *et al.*, 1999). Partiendo de estas premisas, muchos gobiernos han realizado grandes esfuerzos en la reforestación. En España la gestión forestal desempeñó un importante papel social, y entre 1945 y 1995 se repoblaron más de 4 millones de hectáreas, lo que supuso el 8% de la superficie del territorio nacional (Ortuño, 1990). En las zonas semiáridas de la cuenca mediterránea la reforestación estuvo basada principalmente en la reintroducción de coníferas y particularmente de *Pinus halepensis* Miller (Vallejo, 1996; Cortina *et al.*, 2004), llegando a representar el 89% de la superficie forestal en el sector semiárido de la provincia de Alicante (Bautista, 1999). Las regiones de clima mesomediterráneo seco no han estado exentas de estas prácticas, favoreciendo la existencia de grandes extensiones de repoblaciones monoespecíficas de pino carrasco (Vallejo *et al.*, 2000); las cuales reducen la riqueza y diversidad de especies en el sotobosque (Chirino *et al.*, 2006), pudiendo ser propensas o más vulnerables a los incendios forestales (Vallejo *et al.* 2012). Diversos estudios cuestionan la idoneidad de las plantaciones monoespecíficas y proponen una revisión de los programas de reforestación en beneficio de la introducción de frondosas y de especies arbustivas rebrotadoras nativas, con el fin de mejorar la resistencia y resiliencia de estos ecosistemas frente al fuego y otras perturbaciones (Vallejo *et al.* 2012).

El éxito de la reintroducción y establecimiento de frondosas y de especies arbustivas rebrotadoras nativas bajo el dosel de pinos, está afectado por dos factores claves en los ecosistemas mediterráneos, como son la disponibilidad de luz solar y la disponibilidad de agua (Zavala *et al.*, 2000; Valladares y Pearcy 2002). Ambos factores varían en intensidad y pueden interactuar simultáneamente, afectando el establecimiento, crecimiento y supervivencia de las plantas bajo su dosel (Callaway 1997; Tracol *et al.*, 2011). Una de las técnicas más utilizadas para mejorar la disponibilidad de luz solar y agua bajo el dosel en plantaciones monoespecíficas de pino carrasco son las labores de aclareo (Osem, *et al.* 2013). Estas labores propician la reducción de la F_{cc} y en consecuencia un incremento de disponibilidad de luz (PPFD) y de agua en el suelo; efectos derivados del balance hídrico superficial como se ha demostrado en nuestro estudio. Las parcelas con mayor densidad de pinos presentaron menos horas de luz solar bajo el dosel a lo largo del año (GSF; *Tab. 2*); y a su vez redujeron significativamente la intensidad de la luz ($\langle TLS$ a partir de la PPFD; *Tab. 2*), respecto a aquellas parcelas donde las labores de aclareo fueron más intensas. Valores muy bajos de PPFD pueden afectar la actividad fotosintética de especies mediterráneas (Gulias *et al.* 2003).

La composición de especies y estructura de la formación vegetal determina los flujos de agua a través de la cubierta vegetal y en consecuencia el balance hídrico

del suelo (Chirino, 2003). En nuestro estudio la disminución de la densidad de árboles condicionó los flujos de agua, determinando diferencias en el balance hídrico. Un estudio previo realizado en la misma zona por Del Campo *et al.* (2014), en parcelas no tratadas (control, C, 1489 pies ha⁻¹) y parcelas con alta intensidad de aclareo (H, 178 pies ha⁻¹) reportó valores similares a los observados en nuestro estudio, en las parcelas de BD y AD; específicamente respecto a los flujos de interceptación (12 – 40%), translocación (88-60%) y la suma de los flujos de transpiración y evaporación directa (49-47%), lo que se estimó por HYDROBAL como E_{ta}. La disminución de la infiltración con el incremento de la densidad de pinos fue un patrón similar en ambos trabajos, pero con porcentajes inferiores en el estudio precedente (C: 13% y H: 42%). En clima semiárido (Estación Experimental “El Ventós”) y aplicando el modelo HYDROBAL, Bellot y Chirino (2013) indicaron valores de interceptación (~19%) y precipitación neta (~80%) similares a los obtenidos en nuestras parcelas de BD; en cambio los valores de infiltración (~22%) fueron ligeramente inferiores a los observados en AD. Los porcentajes de E_{ta} en “El Ventós” en general son superiores a los estimados en nuestro estudio, lo cual puede estar relacionado con las características de la precipitación (volumen, intensidad y duración).

Los estudios sobre los flujos de agua verde (GW) han mostrado un gran interés en los últimos años, especialmente en regiones secas donde el agua verde domina el ciclo hidrológico (Biroty Gracia, 2011); como se ha observado en nuestro estudio, donde la ratio GW/BW fue 2.5. Descomponiendo los valores observados de GW, como promedio el 62% corresponde al flujo de agua verde productiva (que interviene en la producción de biomasa) y el 38% corresponde al flujo de agua verde no productiva derivado de la evaporación del agua interceptada por la cubierta vegetal.

5. Conclusiones

La densidad de pinos diferenció los flujos de agua a través del dosel y en consecuencia los componentes del balance hídrico del suelo. No obstante, y considerando las tasas de supervivencia registradas, podemos concluir que el balance hídrico, en las condiciones estudiadas, no afectó al establecimiento de los brinzales, contrariamente a los resultados esperados. Se ha observado en nuestro estudio, que las parcelas de alta densidad de pinos mostraron menor humedad del suelo y menor disponibilidad de luz durante el período de seguimiento de la plantación experimental. No obstante, ha sido en estas parcelas donde se ha observado mayor supervivencia y crecimiento en altura. Ésto indica que la humedad del suelo no fue un factor limitante para la supervivencia y crecimiento de las especies introducidas. Simultáneamente, las parcelas con mayor densidad de pinos produjeron un efecto positivo sobre los plantones, reduciendo la intensa de la radiación solar incidente sobre los mismos. Finalmente consideramos que el modelo eco-hidrológico HYDROBAL ha sido útil para estimar los flujos de agua que componen el balance hídrico del suelo en estos ecosistemas y evaluar sus efectos sobre especies reintroducidas bajo el dosel.

6. Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Economía (Proyecto SURVIVE CGL2011-30531-C02-02 y ECOBAL CGL2011-30531-C02-01), FUME (GA243888), Consolider-INGENIO (CTM2014-59111-REDC)

7. Bibliografía

- Abdelli, F. 1999. *Análisis comparativo de distintas comunidades vegetales a la distribución del agua de lluvia, a la conservación del agua en el suelo y a la recarga de acuíferos en medios semiáridos*. Tesis Master. IAMZ.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Allen, P.M., 1999. Continental scale simulation of the hydrologic balance. *J Am Water Resour Assoc.* 35(5), 1037-51.
- Bellot, J., Chirino, E., 2013. Hydrobal: An eco-hydrological modelling approach for assessing water balances in different vegetation types in semi-arid areas, *Ecol. Model.* 266, 30-41.
- Bautista, S., 1999. *Regeneración post-incendio de un pinar (Pinus halepensis, Miller) en ambiente semiárido. Erosión del suelo y medidas de conservación a corto plazo*. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.
- Bellot, J., Bonet, A., Sánchez, J.R., Chirino, E., 2001. Likely effects of land use changes on the runoff aquifer recharge in a semiarid landscape using a hydrological model. *Landscape Urban Plan.* 778, 1-13.
- Bellot, J., Escarré, A., 1998. Stemflow and throughfall determination in a resprouted Mediterranean holm-oak forest, and changes by precipitation trends. *Ann Sci forest.* 55(7), 847- 65.
- Bellot, J., Sanchez, J. R., Chirino, E., Hernandez, N., Abdelli, F., Martinez, J. M. (1999). Effect of different vegetation type cover on the soil water balance in semi-arid areas of south eastern Spain. *PhysChem Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(4), 353-357.
- Belmonte, F., Romero, A., 1998. A simple technique for measuring rainfall interception by small shrub: "interception flow collection box". *Hydrol. Process.* 12, 471-481. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19980315)12:471-481
- Biro, Y., Gracia, C. 2011. Una visión general de ciclo hidrológico. Agua verde y agua azul. En Biro, Y., Gracia, C., Palahí, M. (eds.), *Agua para los bosques y la sociedad en el mediterráneo – Un difícil equilibrio*. European Forest Institute, Joensuu, pp. 19-21.
- Callaway, R.M., Walker L.R., 1997. Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities. *Ecology.* 78(7), 1958-1965.
- Chirino, E., 2003. *Influencia de las precipitaciones y de la vegetación en el balance hídrico superficial y la recarga de acuíferos en clima semiárido*. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, Spain. Publicado en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/3386>.
- Chirino, E., Bonet, A., Bellot, J., Sánchez, J. R., 2006. Effects of 30-years-old Aleppo pine plantations on runoff, soil erosion, and plant diversity in a semi-arid landscape in south-eastern Spain. *Catena.* 65,19-29.
- Cortina, J., Bellot, J., Vilagrosa, A., Caturla, R.N., Maestre, F.T., Rubio, E., Ortiz De Urbina, J.M., Bonet, A., 2004. Restauración en semiárido. In Vallejo, V.R., Alloza, J.A. (eds.), *Avances en el estudio de la gestión del monte mediterráneo* Valencia, Spain: Fundación

CEAM, pp. 345-406.

- Del Campo, A.D., Fernandes, T. J. G., Molina, J.A., 2014. Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation: How much can be modified the water cycle through forest management? *Eur. J. For. Res.* 133, 879-894. doi: 10.1007/s10342-014-0805-7
- Delgado, J., Llorens, P., Guillaume, N., Calder, I.R., Gallart, F., 2010. Modelling the hydrological response of a Mediterranean medium-sized headwater basin subject to land cover change: The Cardener river basin (NE Spain). *J Hydrol.* 383,125-34.
- Derouiche, A., 1996. *Estimation et modelisation des composantes du bilan hidrique chez diferentes firmatios arborees, arbustives et herbacees mediterraneennes*. Tesis Master of Science. IAMZ
- Frueh, W.T., Hopmans, J.W. 1997. Soil moisture calibration of a TDR multilevel probe in gravelly soils. *Soil Science.* 162(8): 554-564.
- Gallart, F., Llorens, P., 1994. Papel de los cultivos de montaña y su abandono en la economía del agua. En: *Efectos geomorfológicos del abandono de tierras*. Eds.: J.M. García Ruiz & T. Lasanta. Sociedad Española de Geomorfología, Zaragoza, pp. 43-55.
- Gracia, C. A., Tello, E., Sabaté, S., Bellot, J., 1999. GOTILWA: An Integrated Model of Water Dynamics and Forest Growth. In Rodà F. et. al. editors. *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak. Forests. Ecological Studies*, Vol. 137. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, pp. 163-79.
- Gulias, J., Flexas, J., Mus, M., Cifre, J., Lefi, E., Medrano, H., 2003. Relationship between maximum leaf photosynthesis, nitrogen content and specific leaf area in balearic endemic and non-endemic mediterranean species. *Annals of Botany* 92, 215–22.
- Kutiél, P., 2000. Plant composition and plant species diversity in East Mediterranean. In: Ne'eman G., Trabaud L. (eds.). *Ecology, Biogeography and Management of Pinus halepensis and P. brutia forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Backhuys Pub., Leiden, pp. 143-152.
- Maestre, F. T., Cortina, J., 2004. Are *Pinus halepensis* plantations useful as a restoration tool in degraded semiarid Mediterranean areas? *For. Ecol. Manag.* 198, 303-317.
- Ortuño Medina, F., 1990. El plan para la repoblación Forestal de España del año 1939: Análisis y comentarios. *Ecología.* 1, 373-392.
- Osem, Y., Yavlovich, H., Zecharia, N., Atzmon, N., Moshe, Y., Schiller, G., 2013. Fire-free natural regeneration in water limited *Pinus halepensis* forests: a silvicultural approach. *Eur. J. For. Res.* 132(5-6), 679-690.
- Pausas, J. G., Bladé, C., Valdecantos, A., 2004. Pine and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes of Spain: new perspectives for an old practice—a review. *Plant Ecol.* 171, 209–220.
- Pérez-Cueva, A., 1994. *Atlas climático de la Comunidad Valenciana*. Valencia: Generalitat Valenciana, pp. 205.
- Quezel, P., 2000. Taxonomy and biogeography of Mediterranean pines (*Pinus halepensis* and *P. brutia*). In: Ne'eman G, Trabaud L. (Eds.), *Ecology, Biogeography and Management of Pinus halepensis and Pinus brutia Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*, Backhuys, Leiden, Netherlands, pp. 1–12.
- Sack, L., Grubb, P. J., 2002. The combined impacts of deep shade and drought on the growth and biomass allocation of shade-tolerant woody seedlings. *Oecologia.* 131(2), 175-185.
- Stothoff, S.A., Or, D., Groeneveld, D.P., Jones, S.B., 1999. The effect of vegetation on infil-

tration in shallow soils underlain by fissured bedrock. *J. Hydrol.* 18, 169–190 doi: 10.1016/S00221694(99)00038-4

- Touhami, I., Andreu, J.M., Chirino, E., Sánchez, J.R., Moutahir, H., Pulido-Bosch, A., Martínez Santos, P., Bellot, J., 2013. Recharge estimation of a small karstic aquifer in a semiarid Mediterranean region (southeastern Spain) using a hydrological model, *Hydrol. Processes.* 27, 165-174. doi: 10.1002/hyp.9200.
- Touhami, I., Andreu, J.M., Chirino, E., Sánchez, J.R., Pulido-Bosch, A., Martínez-Santos, P., Moutahir, H., Bellot, J., 2014. Comparative performance of soil water balance models in computing semiarid aquifer recharge, *Hydrolog. Sci. J.* 59 (1), 193-203.
- Tracol, Y., Gutiérrez, J.R. Squeo, F.A., 2011. Plant Area Index and microclimate underneath shrub species from a Chilean semiarid community. *J. Arid. Environ.* 75, 1-6.
- Vacca, A., Loddo, S., Ollesch, G., Puddu, R., Serra, G., Tomasi, D. y A. Aru. 2000. Measurement of runoff and soil erosion in three areas under different land use in Sardinia (Italy). *Catena*, 40:69-92.
- Valladares, F., Pearcy, R.W., 2002. Drought can be more critical in the shade than in the sun: a field study of the carbon gain and photo-inhibition in a California shrub during a dry El Niño year. *Plant cell Environm.* 25, 749-759.
- Vallejo, V.R., 1996. *La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana*. Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo - CEAM. Valencia, España. 601 pp
- Vallejo, V.R., Allen, E.B., Aronson, J., Pausas, J.G., Cortina, J., Gutiérrez, J.R., 2012. Restoration of Mediterranean-type woodlands and shrublands. In: van Andel, J., Aronson, J. (eds.). *Restoration Ecology: The New Frontier*. Blackwell Publishing Ltd, pp. 130-144.
- Vallejo, V.R., Serransoles, I., Cortina, J., Seva, J.P., Valdecantos, A., Vilagrosa, A., 2000. Restoration strategies and actions in Mediterranean degraded lands. En: Desertification in Europe: Mitigation strategies, land-use planning. Enne, G., Zanolla, Ch., Peter, D. (Eds.). EC DG XII, Environment and Climate program. European Commission, Brussels, pp. 211-233.
- Vallejo, V.R., Smanis, A., Chirino, E., Fuentes, D., Valdecantos, A., Vilagrosa, A., 2012. Perspectives in dryland restoration: approaches for climate change adaptation. *New Forests.* 43, 561-579.
- Vallejo, V.R., 1996. Presentación. In Vallejo, V.R. (eds.), *La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana*. Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo. Valencia, pp. 3-7
- Vardavas, I. M., 1988. A simple water balance daily rainfall-runoff model with application to the tropical Magela Creek catchment. *Ecol Model.* 42, 245-64.
- Yildiz, O., Barros, A.P., 2007. Elucidating Vegetation Controls on the Hydroclimatology of a Mid-Latitude Basin. *J. Hydrol.* 333(2-4): 431-448.
- Zavala, M.A., Espelta, J.M., Retana, J., 2000. Constraints and tradeoffs in Mediterranean plant communities the case of Holm oak-Aleppo pine forests. *Botanical Review.* 66, 119-149.

