



CAPÍTULO 6

Introducción de especies leñosas

Pedro Villar-Salvador, Santiago Soliveres y José Luis Quero

I. OBJETIVOS DE LA REVEGETACIÓN CON PLANTAS LEÑOSAS. FACTORES LIMITANTES

Las infraestructuras lineales (autopistas, carreteras, caminos, vías del tren, etc.) generan numerosos impactos ambientales durante su construcción y explotación (Forman y Alexander 1998, Steinfeld *et al.*, 2007) (véase Capítulo 1). Por ello, uno de los objetivos de las obras de las infraestructuras lineales debe ser su integración ambiental y funcional en el territorio que atraviesan. La vegetación, tanto la surgida espontáneamente como la introducida activamente, desempeña un papel muy importante en dicho objetivo. No obstante, la revegetación activa también es importante para conseguir otros objetivos relacionados tanto con el mantenimiento de la integridad de la infraestructura como con la seguridad y comodidad de sus usuarios. Específicamente, los principales objetivos que se persiguen con la revegetación son (Forman *et al.*, 2003):

- a. Integrar la infraestructura en la dinámica ecológica del territorio circundante mediante la restauración o rehabilitación de funciones ecosistémicas, como la creación, mejora y protección del suelo, reducción de la escorrentía superficial, mitigación de la fragmentación de las poblaciones de organismos y catalización de la sucesión secundaria, así como la mejora de la calidad del agua emitida por la infraestructura.

- b. Mantener la integridad de la infraestructura y proporcionar una barrera de colisión eficaz y segura en caso de accidentes.
- c. Minimizar el deslumbramiento de los conductores, apantallar el ruido y los gases contaminantes y reducir el viento lateral.
- d. Eliminar los impactos visuales de las obras y mejorar la percepción estética de la infraestructura.

La implantación de una comunidad de plantas herbáceas es muy eficaz para algunas de estas funciones, como prevenir la erosión (Andrés y Jorba 2000), pero no para otras. Por ello, las plantas leñosas deben ser un complemento a las hierbas en los proyectos de revegetación de infraestructuras lineales. Sin embargo, en ambientes muy secos o cuando los suelos son muy pobres en nutrientes, el establecimiento de una cubierta de hierbas es difícil y lento. Ello es debido a que las hierbas en general y, particularmente, las que se utilizan en la restauración de infraestructuras lineales demandan una gran cantidad de recursos y son poco tolerantes a factores de estrés. Además, en ambientes mediterráneos, la hierba se marchita al final de la primavera incrementándose el riesgo de incendio, por lo que se hace necesario segarla, con el consiguiente incremento del coste de mantenimiento de la obra. En estos casos, las plantas leñosas no tendrían por qué ser solamente un complemento a las plantas herbáceas, sino una alternativa. La introducción de plantas leñosas permite no solamente acelerar la sucesión secundaria, garantizando a medio y largo plazo todas las funciones de protección frente a la erosión, estabilización del suelo y drenaje de agua. La ventaja de las especies leñosas frente a las herbáceas es que producen un sistema radicular mucho más profundo, extenso y resistente, favoreciendo una mayor consolidación y estabilidad del suelo si la densidad de planta es

suficientemente elevada. Además, a largo plazo reducirán el riesgo de incendio, porque la mayoría de ellas permanecen verdes durante el verano, y permiten crear manchas discontinuas de vegetación embebidas en una matriz de suelo desnudo, lo que reduce la propagación del fuego en caso de incendio. No conviene implantar formaciones mono específicas, ya que ecológicamente pueden ser menos funcionales, resistentes y resilientes frente a perturbaciones y factores de estrés. Tampoco es recomendable la eliminación total de la vegetación herbácea antes o durante la introducción de plantas leñosas, porque será fundamental para prevenir la erosión hasta que se consiga una cobertura adecuada de especies leñosas que pueda cumplir con dicha función. A la larga, las especies leñosas serán las que excluyan a las hierbas. A pesar de su importancia y la experiencia proveniente de la restauración forestal, las plantas leñosas no reciben la atención debida en los proyectos de restauración de infraestructuras lineales ni se dedican los recursos suficientes para su mantenimiento. El resultado son taludes con herbazales sempiternos con coberturas de leñosas muy pobres en los que se gastan importantes recursos en siegas y herbicidas para prevenir incendios.

El objetivo de este capítulo es abordar los principales factores limitantes y las prácticas que condicionan el establecimiento de las plantas leñosas en las obras de infraestructuras viarias. Pretendemos hacer énfasis en aquellos aspectos que, a nuestro juicio, son muy determinantes en la implantación de las plantas, identificar los principales errores y dar una base científica a la toma de las decisiones importantes.

Las principales limitaciones para la implantación de plantas leñosas en infraestructuras lineales y los factores que las determinan se recogen en la Tabla 1 (Steinfeld *et al.* 2007).

II. SELECCIÓN DE ESPECIES E IMPORTANCIA DE LA PROCEDENCIA DE LOS MATERIALES DE REPRODUCCIÓN

La selección de especies leñosas destinadas a obras civiles tradicionalmente se ha basado tanto en el potencial colonizador y la resistencia a condiciones

adversas de las especies como en criterios ornamentales, en detrimento de otros aspectos más importantes desde el punto de vista ecológico.

Tabla 1. Principales factores limitantes para el establecimiento de plantas leñosas en obras de infraestructuras lineales.

FACTOR LIMITANTE	¿QUÉ CAUSA LA LIMITACIÓN?
Disponibilidad de agua en el suelo	El régimen de precipitaciones y temperaturas de la zona, la orientación de la ladera y la posición en ella, el viento, la profundidad, textura y compactación del suelo, la vegetación preexistente
Disponibilidad de suelo y su estabilidad superficial	La intensidad de la precipitación, la pendiente y longitud de la ladera, las heladas, la vegetación preexistente, la pedregosidad superficial, la falta de tierra vegetal
Fertilidad del suelo y baja actividad de los organismos del suelo	El contenido de materia orgánica, textura, pH y salinidad del suelo, la vegetación preexistente, el tipo de roca madre, la posición en la ladera y la abundancia de organismos edáficos
Bajas temperaturas	La altitud, latitud y la orientación de la ladera
Depredación	Altas densidades de herbívoros
Ausencia de propágulos de plantas	Fuentes de propágulos alejados de la infraestructura lineal (Tormo <i>et al.</i> 2009) y la llegada de organismos dispersores a la infraestructura lineal. No obstante, en ciertas infraestructuras lineales fomentan la llegada de ciertos dispersores, como las aves, puede poner en peligro la seguridad vial y la de las aves
Competencia con plantas, especialmente de hierbas	La disponibilidad de agua y nutrientes minerales en el suelo

Los principales criterios que se deben tener en cuenta para la selección de especies leñosas para infraestructuras lineales son:

a. Las especies deben estar adaptadas a las condiciones ambientales del sitio de revegetación. Ello significa que deben sobrevivir, crecer y ser capaces de regenerar sus poblaciones sin ayuda, o con una intervención mínima, una vez establecidas. Para ello se deben seleccionar especies nativas y dentro de estas, emplear semillas o plántulas de procedencias cercanas o, en su defecto,

compatibles con la zona a revegetar. Este criterio es importante para reducir tanto los costes de establecimiento y mantenimiento de la vegetación como el riesgo de expansión de especies invasoras (Steinfeld *et al.* 2007).

b. Entre el abanico de especies posibles, elegir aquellas cuyas características (p.e., porte, densidad de follaje, velocidad de crecimiento, capacidad de rebrotar, producción de frutos, etc.) satisfagan mejor los objetivos del proyecto. Por ejemplo, si se necesita crear una barrera viva en

una mediana de una carretera que evite el deslumbramiento de los conductores y detenga un vehículo que se salga de la calzada sin dañar a sus ocupantes, no se podrán utilizar ni árboles ni especies de muy bajo porte, como un tomillo (*Thymus* sp.) o un espliego (*Lavandula latifolia*).

c. Verificar que las semillas y plantas de las procedencias deseadas están disponibles en el mercado. No todas las especies están accesibles a costos económicos razonables debido a la dificultad de su producción en vivero a gran escala (Vallejo *et al.* 2003).

En relación con el primer criterio de selección, los atributos funcionales de las plantas son un aspecto fundamental para seleccionar las especies. Engloban las características morfológicas y fisiológicas que condicionan el uso del agua y el metabolismo energético y, por tanto, la supervivencia y crecimiento de las plantas. Por ejemplo, las diferencias en la arquitectura hidráulica (Martínez-Vilalta *et al.* 2002), la arquitectura de la copa (Esteso-Martínez *et al.* 2006), la profundidad de las raíces (Padilla y Pugnaire 2007) o las características foliares (Poorter y Bongers 2006) pueden determinar las diferencias de crecimiento y supervivencia de las especies en un contexto ambiental determinado. Dentro de las características foliares, el área específica foliar (SLA), que es el cociente entre el área y el peso seco de la hoja, tiene una gran trascendencia funcional, ya que se relaciona positivamente con la velocidad de crecimiento, la tasa de fotosíntesis y transpiración de las plantas y negativamente con la resistencia a la herbivoría (Ruiz Robledo y Villar 2005, Villar *et al.* 2008, Poorter *et al.*, 2009). Valores bajos de SLA indican hojas más densas y/o gruesas. Este tipo de hoja también suele tener una mayor capacidad de retener agua y una menor capacidad de transpiración, lo que confiere ventajas adaptativas en climas con escasez de agua como los mediterráneos (Cornelissen *et al.*, 1996, Antúñez *et al.*, 2001, Poorter *et al.*, 2009). Prueba de ello es que, en una plantación de especies leñosas mediterráneas en los taludes de una carretera del Parque Natural Sierra de Cardeña y Montoro (Córdoba), se observó una relación negativa entre el área específica foliar y la supervivencia (Figura 1). Especies con hojas de bajo SLA, como *Quercus ilex* (encina), *Pistacia lentiscus* (lentisco) u *Olea europaea* var. *sylvestris* (acebuche) están mejor adaptadas a soportar la elevada insolación y temperatura de los taludes durante el verano, en contraposición con *Viburnum tinus* (durillo) o *Quercus faginea* (quejigo), que son especies predominantes en umbrías y,

por tanto, tienen hojas más finas que les permiten captar mayor radiación, pero no para retener agua.

En relación con la arquitectura hidráulica del tallo, el agua sube desde las raíces hasta las hojas a través de los conductos del xilema. La ascensión del agua es un transporte pasivo que se realiza aprovechando la fuerza de cohesión de las moléculas de agua y es fundamental que la columna de agua que va por el interior de los conductos no se rompa. De lo contrario, se formaría una embolia (esto es, aire en el conducto) que impediría el flujo de agua hasta las hojas. La embolia de los conductos del xilema es una de las principales causas de muerte en las especies leñosas (McDowell *et al.* 2008). En situaciones de sequía estival, la falta de agua en el suelo y la mayor transpiración foliar provocan tensiones en las columnas de agua de los conductos del xilema que pueden llegar a romperlas. La mejor manera de medir la resistencia del xilema al embolismo es mediante las curvas de vulnerabilidad (Sperry y Saliendra 1994) en las que se determina el potencial hídrico al que el tallo pierde el 50% de su conductividad hidráulica (P_{50}). Valores muy negativos de P_{50} indicarán elevada resistencia al embolismo (Martínez-Vilalta *et al.* 2002). En la repoblación de los taludes del Parque Natural Sierra de Cardeña y Montoro que se mencionó anteriormente, se observó una relación positiva entre supervivencia y P_{50} , de forma que las especies más resistentes al embolismo presentaron mayor supervivencia que las especies menos resistentes (Figura 1).

En este estudio, cabe destacar el caso particular de *Retama sphaerocarpa* (retama), que es una especie con relativamente poca resistencia al embolismo ($P_{50} = -3$ MPa), pero con una gran supervivencia. Esto indica que, aunque la arquitectura hidráulica es muy importante para el funcionamiento de las plantas, no puede predecir perfectamente el potencial de supervivencia de una especie, dado que en un mismo sistema la adaptación de las plantas puede basarse en otras estrategias en las que otros atributos funcionales también pueden ser importantes (Miranda *et al.*, 2010). De ahí que recomendamos que la selección de especies, base en una combinación de varias características funcionales. En el caso de la retama, su alta supervivencia está relacionada con la formación de profundas raíces (Padilla y Pugnaire 2007) y con la falta de hojas que permite reducir la transpiración, concentrando la fotosíntesis en los tallos, los cuales, además, tienen valores bajos de SLA (Figura 1).

En conclusión, los rasgos funcionales pueden indicar la supervivencia potencial de las especies y, por ende,

es un buen criterio para su selección en trabajos de restauración. Por ejemplo, el durillo, con un alto SLA, hojas grandes y baja resistencia al embolismo, difícilmente soportará las condiciones de sequía y fuerte radiación durante el verano. Para la selección de especies, no es necesario cuantificar SLA o P_{50} . En la

literatura científica, existe cada vez más información sobre rasgos funcionales asociados a la supervivencia como los presentados aquí. Consultando los valores por especie de estos rasgos en la literatura científica, es posible establecer el potencial de supervivencia de las especies en condiciones adversas.

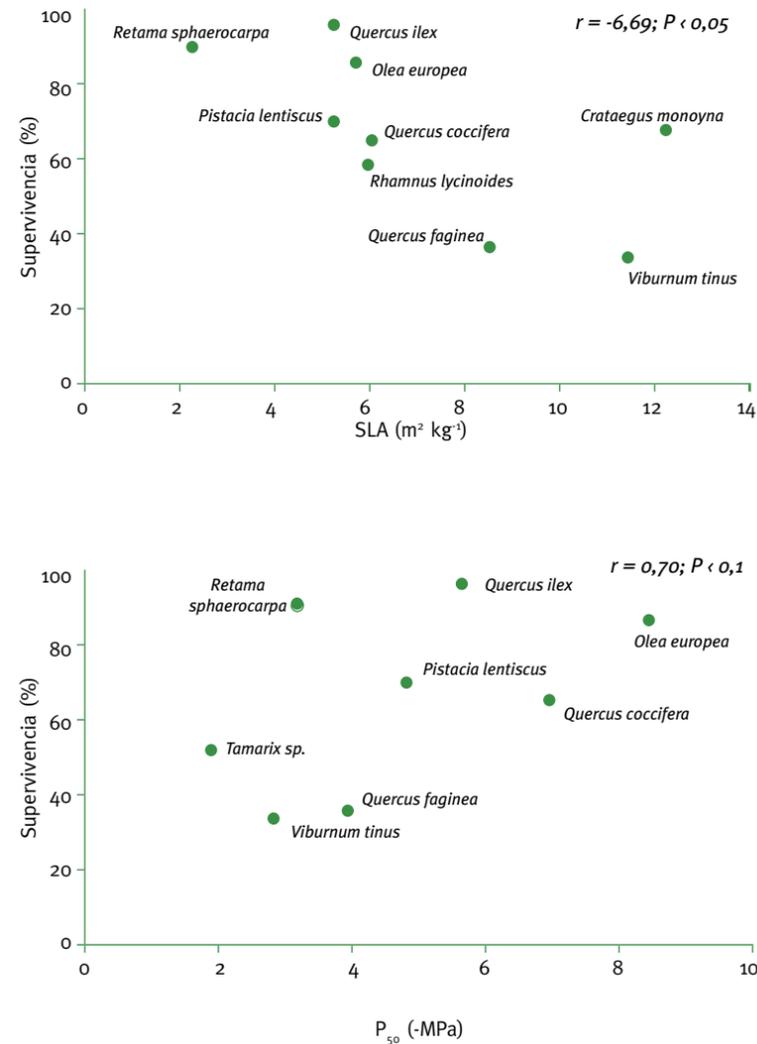


Figura 1. Relación entre la supervivencia y el área específica foliar (SLA) (panel superior) y el potencial hídrico en el que los tallos pierden el 50% de su conductividad hidráulica (P_{50}) (panel inferior) entre diferentes especies leñosas mediterráneas. Los nombres comunes de las especies son: retama (*Retama sphaerocarpa*), encina (*Quercus ilex*), quejigo (*Q. faginea*), coscoja (*Q. coccifera*), acebuche (*Olea europaea* var. *sylvestris*), lentisco (*Pistacia lentiscus*), taraje (*Tamarix sp.*) y durillo (*Viburnum tinus*). El punto blanco correspondiente a retama no se incluyó en el análisis de correlación (véase texto para más detalles).

Una vez seleccionadas las especies de plantas, es importante que para cada una se elija correctamente el origen o procedencia de los materiales de reproducción (MR). Los MR son las plantas, o sus partes, y las semillas que se usarán en el proyecto de revegetación. Muchas especies presentan variaciones funcionales entre poblaciones, dando lugar a ecotipos que tienen diferentes capacidades de respuesta a los factores abióticos y bióticos (Abrams 1994, Tognetti *et al.* 1997). Por ejemplo, los individuos de las poblaciones más húmedas de *Quercus suber* (alcornoque) presentan mayor mortandad al ser plantados en zonas secas que los individuos procedentes de poblaciones que experimentan mayor sequía en su lugar de origen (Ramírez-Valiente *et al.* 2009). Igualmente, el daño ocasionado por *Matsucoccus josephii*, una cochinilla endémica del Mediterráneo oriental, es mayor en las procedencias de *Pinus halepensis* (pino carrasco) del Mediterráneo occidental que en las orientales (Mendel 1984). Aunque las especies hayan sido bien seleccionadas, un proyecto de revegetación puede resultar un fracaso si se utilizan procedencias no adaptadas a las condiciones ambientales locales. Como recomendación genérica, lo ideal es usar MR de localidades próximas a la obra, pero a menudo no hay disponibilidad de dicho MR. En estos casos se puede emplear MR de localidades cuyas condiciones ambientales sean similares con la zona de revegetación.

La mayor parte de los países con sectores forestales importantes han desarrollado una legislación y

mecanismos administrativos para regular y controlar el uso de los materiales de reproducción entre regiones. Así, los países de la Unión Europea han definido regiones de procedencia para multitud de especies arbóreas y arbustivas (Alfía *et al.* 2005). Dicha normativa solo es aplicable a trabajos silvícolas, por lo que, si se realiza una interpretación restrictiva, las obras de infraestructuras lineales no estarían sometidas a dicha legislación. Sin embargo, muchas obras atraviesan zonas de vegetación natural, por lo que el uso de MR de procedencias incompatibles con la zona de actuación no es aceptable, porque podría contaminar genéticamente las poblaciones naturales y propiciar la pérdida de adaptaciones locales. Si se desea integrar la infraestructura en la dinámica ecológica del territorio y garantizar el éxito del proyecto de revegetación a largo plazo, es esencial emplear procedencias compatibles con la zona donde se ha llevado a cabo la obra. Por ello, sería deseable que se exija en los pliegos de condiciones de la obra el control del origen y la calidad de los MR. Por ejemplo, algunos aspectos básicos que hay que considerar es evitar el uso de procedencias litorales en obras en zonas de clima continental, y en las especies indiferentes a la naturaleza química del suelo evitar usar procedencias de suelos básicos en zonas silíceas y viceversa. Los criterios esenciales de uso de los materiales de reproducción y las regiones de procedencia reconocida por la legislación española para materiales forestales de reproducción se pueden consultar en Alfía *et al.* (2005).

III. MÉTODOS Y ÉPOCAS DE REVEGETACIÓN

1. Métodos de revegetación

La revegetación con plantas leñosas puede realizarse mediante la plantación de plantas cultivadas en vivero, introducción de fragmentos de plantas (raíces, rizomas y tallos) o mediante la siembra de semillas. La introducción de fragmentos vegetativos de plantas leñosas es menos habitual que los otros métodos. Se emplea para ciertas especies cuando no es posible producir plantas en vivero y/o la disponibilidad y capacidad de germinación de las semillas es muy reducida, restringiéndose su uso a ciertos trabajos de ecoingeniería, como la creación de fajinas, lechos de ramajes y empalizadas vivas (Schiechtel 1986, Steinfeld *et al.* 2007, véase el Capítulo 6 de este libro). Un requisito esencial para emplear material vegetativo es que enraíce fácilmente

y que la humedad en el suelo sea elevada durante períodos de tiempo prolongados. Así, las estaquillas de algunas especies arbóreas y arbustivas de los bosques de ribera, como *Populus nigra* (chopo), *P. alba* (álamo), *Tamarix spp.* (tarajes) y algunas especies de *Salix spp.* (sauces) enraízan fácilmente en el campo. Sin embargo, requieren suelos muy húmedos durante todo el año, por lo que su empleo en proyectos de revegetación se restringe a obras que se ejecuten en situaciones con elevada disponibilidad de agua como aquellas en zonas de clima atlántico o en obras próximas a las riberas de los ríos (Domínguez *et al.* 2004). También pueden implantarse por estaquillas *Olea europaea* (olivo) y algunos pequeños arbustos de la familia de las *Labiatae*, como *Lavandula spp.* (lavandas o espliegos), *Rosmarinus officinalis* (romero) y *Thymus spp.*



En esta lámina se muestran las 10 especies citadas en las dos gráficas de la figura 1: en la parte superior izquierda: majuelo (*Crataegus monogyna*) y taraje de flor pequeña (*Tamarix parviflora*), en la parte superior derecha: coscoja (*Quercus coccifera*), encina (*Quercus ilex*) y quejigo (*Quercus faginea*). En la imagen inferior y de izquierda a derecha: acebuche (*Olea europaea* var. *sylvestris*), lentisco (*Pistacea lentiscus*), espino negro (*Rhamnus lycioides*), retama (*Retama sphaerocarpa*) y durillo (*Viburnum tinus*). Autor: Ignacio Mola.



(tomillos). El empleo de material vegetativo directamente en el campo suele presentar menor supervivencia que el uso de plantas previamente cultivadas en viveros, especialmente cuanto más seco sea el ambiente de revegetación. En comparación con las siembras directas y las plantas producidas en vivero a partir de semillas, la revegetación con material vegetativo puede reducir la variabilidad genética de la población introducida. Por ello es importante recolectar el material vegetativo de una gran variedad de individuos madre (se aconsejan unos 50) y mezclarla en la obra. Además, en el caso de especies dioicas (con los sexos separados en distintos individuos, como el acebo (*Ilex aquifolium*) o los enebros y sabinas (*Juniperus sp.*), es importante mantener la proporción de sexos (Steinfeld *et al.* 2007).

Las siembras tienen sus ventajas e inconvenientes con respecto a las plantaciones (Tabla 2). Las siembras pueden ser puntuales en el espacio o realizarse en toda la superficie (siembras a hecho). En las siembras a hecho las semillas se aplican a voleo, tanto manualmente como con sembradoras acopladas a vehículos diversos, y se usa para especies de semillas medianas a pequeñas. Si se conocen *a priori*

las zonas favorables para la supervivencia (p.e., 'sitios seguros', *sensu* Harper *et al.* 1961), las siembras puntuales suelen optimizar los esfuerzos en la restauración, focalizando las siembras sólo en esas zonas. Las siembras puntuales suelen realizarse con especies de semillas grandes, como es el caso de las quercíneas, siendo fundamental proteger la semilla de los depredadores (véase apartado VII). Independientemente del método de siembra, la emergencia de las plántulas aumentará enormemente si las semillas se cubren con tierra o algún tipo de mulch. Sin embargo, es importante que las semillas no queden muy enterradas, aconsejándose que la profundidad a la que quede la semilla no exceda 1,5-2 veces su longitud (Peñuelas *et al.* 2002, Steinfeld *et al.* 2007).

La plantación de plantas cultivadas previamente en vivero tiene la ventaja de que son menos sensibles a factores de estrés abióticos y a la depredación que las siembras. En la plantación, los plantones deben introducirse verticales, la tierra debe quedar bien compactada alrededor del cepellón sin que existan bolsas de aire que puedan desecar las raíces, así como el nivel de la tierra debe quedar justo por debajo de las primeras hojas.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de las siembras con respecto de la plantación.

VENTAJAS
Son más baratas si se dispone de abundantes semillas de fácil germinación. No obstante, las siembras pueden encarecerse notablemente cuando se protegen de los depredadores con protectores individuales (véase apartado VII)
Son fáciles de ejecutar, al no precisarse mano de obra cualificada
Las plantas obtenidas no presentan deformaciones radicales, y ello puede favorecer el desarrollo lateral y en profundidad de las raíces, así como su conductividad hidráulica (Pemán <i>et al.</i> 2006)
DESVENTAJAS
Las semillas y plántulas recién emergidas presentan elevada depredación y mortandad, respectivamente (Matías <i>et al.</i> 2009, Gómez-Aparicio <i>et al.</i> , 2004), por lo que los resultados finales y el éxito de la revegetación son menos predecibles que con la plantación de plantas de varios meses de edad
No se puede utilizar para especies con baja capacidad germinativa o cuya germinación no sea coetánea o que se retrasa mucho en el tiempo. Esto restringe el uso de la siembra a aquellas plantas leñosas que producen gran cantidad de semillas, baratas y fáciles de germinar
No es aconsejable utilizar la siembra de plantas leñosas en zonas con elevado estrés ambiental y gran cantidad de depredadores de semillas
Si la siembra es un éxito y el porcentaje de planta emergida es elevado, se precisan aplicar aclareos para llegar a una densidad adecuada. Con la plantación, se controla mejor la densidad final

2. Épocas del año para la revegetación

Tanto la plantación como la siembra solamente se deben acometer durante determinados períodos del año en los que se garantice el enraizamiento de las plantas o la germinación de las semillas. El calendario de revegetación, por tanto, lo deben determinar los ritmos biológicos de las plantas y no el calendario de la obra civil. Los períodos adecuados para realizar las siembras o plantaciones deben decidirse teniendo en cuenta los períodos de estrés que limitan el desarrollo de las plántulas en la zona de trabajo. Como regla general, nunca debe revegetarse durante los períodos en los que las plantas estarán limitadas por escasez de precipitación y bajas temperaturas (Figura 2). Nunca se debe realizar una plantación si el suelo está seco. En la mayoría de las zonas de clima mediterráneo, el verano es el período de mayor estrés para las plantas. En zonas con bajas temperaturas invernales, el invierno también es otro período muy limitante.

La base ecofisiológica de la toma de decisión sobre la fecha de revegetación se fundamenta en que la capacidad de las plantas jóvenes para sobrevivir a la aridez estival depende en buena medida del desarrollo de un extenso y profundo sistema radical al comienzo del verano (Padilla y Pugnaire 2007, Cuesta *et al.* 2010a). Ello depende de la velocidad de crecimiento de las raíces de cada especie, pero también del momento en que se produce la revegetación. Si se realiza muy próxima al verano y el verano es seco, las plantas no tendrán tiempo suficiente para expandir su

sistema radical y sufrirán un fuerte estrés hídrico. Por otro lado, plantar cuando el suelo está muy frío no es útil, ya que las raíces de la mayoría de las plantas leñosas no crecen cuando la temperatura del suelo permanece por debajo de los 5-10 °C (Corchero de la Torre *et al.* 2002, Álvarez-Uría y Körner 2007). En zonas de clima mediterráneo, el crecimiento de las raíces es elevado en la primera mitad del otoño y en primavera, y en los sitios de clima atlántico el verano también puede ser un período de rápido crecimiento siempre que el suelo se mantenga húmedo (Lyr y Hoffmann 1967; Corchero de la Torre *et al.* 2002).

En la mayoría de las zonas mediterráneas, el período húmedo del año comprende desde mediados de octubre a finales de abril. En zonas de clima mediterráneo e inviernos suaves, se aconseja que la revegetación se haga pronto durante el período húmedo del año. En los lugares en los que el invierno es muy frío, la revegetación debe retrasarse hasta el final del invierno o a comienzos de la primavera (Figura 2), porque las heladas pueden matar las plántulas emergidas en otoño, en el caso de las siembras (Peñuelas *et al.* 2002), y descalzar y secar las plantas en el caso de las plantaciones. En este contexto, otra alternativa es adelantar la plantación y realizarse muy pronto en el otoño, pero para ello es fundamental que las precipitaciones otoñales hayan comenzado. En ambientes de clima atlántico donde los veranos no sean muy secos, las plantaciones se pueden realizar hasta el final de la primavera y comenzarse muy pronto en el otoño e incluso al final del verano.

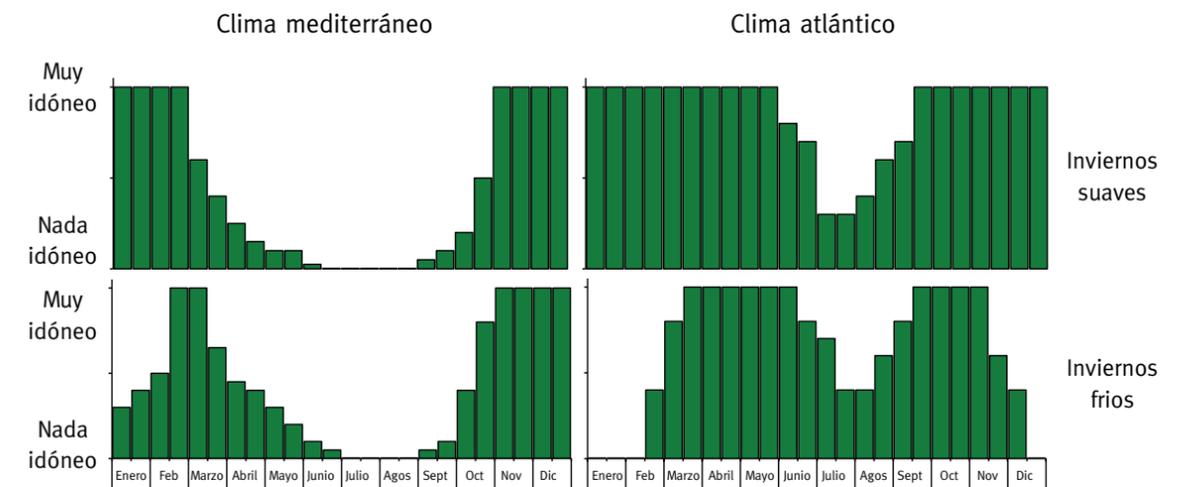


Figura 2. Esquema de los períodos idóneos de revegetación con plantas leñosas en zonas de clima mediterráneo y atlántico (columnas izquierda y derecha, respectivamente) tanto de inviernos suaves como de inviernos fríos, respectivamente (filas superior e inferior, respectivamente). La altura de la barra simboliza la idoneidad de la fecha de revegetación. Dentro de cada mes, se han diferenciado la primera y segunda quincena.

Un aspecto muy importante para decidir la época de plantación en climas de inviernos suaves es el hábito foliar de las especies (caducifolias frente a perennifolias). La plantación de caducifolias de invierno a partir de la segunda mitad del otoño y durante el invierno no propicia la formación de raíces durante este período, ya que el crecimiento principal de sus raíces no se produce hasta la formación de follaje en la brotación primaveral (Lyr y Hoffmann 1967; Sardá *et al.* 2005). Por tanto, para las especies caducifolias, las plantaciones deben retrasarse hasta unas semanas antes de la brotación. En cambio, las especies perennifolias sí pueden producir raíces durante el invierno, siempre que la temperatura del

IV. CALIDAD MORFOLÓGICA Y FISIOLÓGICA DE LAS PLANTAS

Se considera que una planta es de calidad cuando es capaz de sobrevivir y crecer adecuadamente en un medio determinado y, por tanto, cumplir los objetivos establecidos en un plan de revegetación (Ritchie 1984, Villar-Salvador 2003, Cortina *et al.* 2006). La supervivencia y crecimiento de las plantas utilizadas en los proyectos de revegetación están ligados a su balance de carbono, agua y nutrientes minerales. Dicho balance depende, en última instancia, de los atributos morfológicos y fisiológicos de las plantas (Gaudet y Keddy 1988, Burdett 1990). A escala intraespecífica, las plantas pueden mostrar grandes diferencias en sus atributos funcionales dependiendo de la plasticidad fenotípica de la especie, la procedencia de la semilla y las condiciones ambientales durante el cultivo en vivero y el transporte al lugar de plantación (Coutts 1982, Balaguer *et al.* 2001, Vilagrosa *et al.* 2003, Mena-Petite *et al.* 2004, Villar-Salvador *et al.* 2004, Villar-Salvador *et al.* 2008, Cuesta *et al.* 2010a). No existe un único modelo de calidad de planta ideal para cada especie. Una planta con determinadas características funcionales puede ser válida para ciertos objetivos de revegetación, pero no para otros. Por tanto, de forma ideal, las características funcionales de las plantas deberían diferir en función de las características ambientales del lugar de plantación (Rose *et al.* 1990). La calidad de las plantas cambia en el tiempo, variando con su estado fenológico y su desarrollo ontogenético.

suelo se mantenga por encima de los 5-10 °C (Lyr y Hoffmann 1967, Riedacker 1976, Corchero de la Torre *et al.* 2002), ya que en las especies perennifolias la formación de las raíces depende en buena medida de la fotosíntesis del momento (van den Driessche 1991b, Maillard *et al.* 2004). En los casos en los que la obra combine tanto especies caducifolias y perennifolias, se recomienda que se retrase la plantación hacia el final del período frío y se planten a la vez los dos tipos de plantas para reducir los costes de plantación. Por ejemplo, en muchas zonas de clima mediterráneo continental, este momento puede ser entre la segunda quincena de febrero y la primera quincena de marzo.

Por ejemplo, la resistencia a las heladas en muchas plantas del mundo templado se incrementa a lo largo del otoño e invierno y se reduce en primavera en respuesta a las horas de luz y la temperatura ambiental (Grossnickle 1992). La calidad de la planta también puede cambiar con su edad. Nicolás *et al.* (2004) observaron que los plantones de dos savias de *Quercus faginea* (quejigo) mostraron menor capacidad de producir nuevas raíces, supervivencia y crecimiento que los de una savia.

La importancia de la calidad de la planta en el éxito de un proyecto de revegetación se incrementa con el grado de estrés ambiental en el lugar de la plantación (del Campo *et al.* 2007, Cuesta *et al.* 2010a), si bien en situaciones de fuerte estrés ambiental otros aspectos del proyecto de revegetación, como la preparación del suelo y los cuidados posplantación pueden tener un papel más relevante que la calidad de la planta (Navarro *et al.* 2006a). Finalmente, las consecuencias del empleo de planta de baja calidad suelen ser muy aparentes a corto plazo. Pero, a veces, las consecuencias son solo aparentes muchos años más tarde, tal como sucede con las deformaciones radicales causadas por algunos tipos de contenedores, que reducen la estabilidad estructural de los árboles a largo plazo (Lindström y Rune 1999). En la Tabla 3 se recogen algunas recomendaciones básicas para garantizar un mínimo de calidad en las plantas.

Tabla 3. Recomendaciones básicas para garantizar un mínimo de calidad de planta en los trabajos de revegetación con plantas leñosas.

Utilizar preferentemente plantas cultivadas en contenedor que plantas cultivadas a raíz desnuda en plantaciones de zonas secas o muy frías. Las plantas cultivadas en contenedor casi siempre tienen mayor supervivencia que las cultivadas a raíz desnuda (South <i>et al.</i> 2005), especialmente en especies perennifolias
Evitar plantas con raíces severamente deformadas (Figura 3), especialmente en árboles, porque pueden comprometer la estabilidad estructural a largo plazo. En este sentido, no usar plantas cultivadas en contenedores que carezcan de sistemas antiespiralizantes, como las macetas troncocónicas empleadas en el cultivo de especies ornamentales. Esta exigencia probablemente sea menos importante para arbustos de pequeño porte
Usar plantas cultivadas en contenedores de al menos 250 ml para plantaciones de zonas secas. La supervivencia y crecimiento de las plantas están directamente relacionados con el volumen del contenedor (South <i>et al.</i> 2005, Tsakalimi <i>et al.</i> 2005, Domínguez-Lerena <i>et al.</i> 2006). En zonas húmedas se pueden usar contenedores más pequeños, pero la duración del cultivo (edad de la planta) deberá ser menor, especialmente en especies de rápido crecimiento
No usar plantas cuyos cepellones no estén consolidados, es decir, que el conglomerado de sustrato retenido por las raíces no se desmorone cuando las plantas se extraigan de las bandejas o durante la manipulación en la plantación
Rechazar plantas con podredumbres o plagas, y en el caso particular de las especies perennifolias, evitar plantas con follaje clorótico y senescente. Puede indicar que las plantas estén enfermas o tengan graves deficiencias nutricionales. En caso de enfermedades, estas pueden propagarse al resto de plantas del proyecto y a las poblaciones naturales circundantes
Desechar las plantas con heridas recientes en los tallos, especialmente en el cuello de la raíz
No emplear cultivos que tengan dos o más individuos por contenedor. En el campo competirán entre sí y tendrán menor vigor
Evitar plantas cuya parte aérea esté en crecimiento en el momento de la plantación. Tienen una escasa resistencia a factores de estrés, ya que las plantas en crecimiento relajan sus mecanismos de resistencia a factores de estrés
No llevar al campo plantas que han sido cultivadas en un invernadero sin que se hayan previamente aclimatado (endurecido) al menos un mes al aire libre y, a ser posible, expuestas a pleno sol
Evitar plantas que muestren un excesivo desequilibrio entre el tamaño de su parte aérea y radical. En general, no son recomendables tanto partes aéreas mucho más grandes que las raíces como lo contrario. A modo orientativo, un pino carrasco (<i>P. halepensis</i>) o una encina (<i>Q. ilex</i>) cuya altura sea de una a dos veces la altura del contenedor puede ser considerado normal. Valores más altos o inferiores no son recomendables. Una revisión de la importancia del tamaño de las plantas en su establecimiento en campo puede encontrarse en Navarro <i>et al.</i> (2006b). En general, dentro de los rangos de altura mencionados, las plantas de mayor tamaño normalmente tienen mayor supervivencia y crecimiento en campo que las más pequeñas (Villar-Salvador <i>et al.</i> 2004, Villar-Salvador <i>et al.</i> 2008, Cuesta <i>et al.</i> 2010a) (Figura 3)
Evitar plantas cuyos cepellones estén secos al salir del vivero o al llegar a la obra, así como plantas con gran cantidad de hierbas en los alvéolos
Evitar el uso de plantas cultivadas en viveros emplazados en localidades de inviernos suaves para proyectos de revegetación en localidades frías, aunque la procedencia del material de reproducción sea adecuada (Mollá <i>et al.</i> 2006). Si no queda más remedio que utilizar este tipo de planta, una solución es adelantar las plantaciones a mitad del otoño para que la planta se aclimate al frío en el campo

La calidad de una planta puede alterarse al ser llevada al lugar de plantación. El trato rudo de las plantas por los operarios o su desecación causada por un prolongado e inadecuado almacenamiento y transporte, así como una incorrecta plantación, son algunos de los factores que pueden mermar el vigor de la planta de mejor calidad y arruinar

A



el proyecto de revegetación más esmerado (McKay 1997, Vallas-Cuesta *et al.* 1999, Landis *et al.* 2010). Por ejemplo, los plantones de *P. halepensis* reducen fuertemente su supervivencia y crecimiento cuando alcanzan un potencial hídrico al alba inferior a -2 MPa antes de su plantación (Vallas-Cuesta *et al.* 1999).

B



C



Figura 3. (A) Detalle de dos plantones de una savia de pino carrasco de tamaño de la parte aérea y proporción de parte aérea con respecto a la parte radical muy distinta. La planta grande presentó mayor supervivencia y crecimiento plantado con alta densidad de hierba que la planta pequeña. (B) Plantones de *Quercus faginea* cultivados con crecientes niveles de fertilizante. Los dos plantones pequeños de la izquierda fueron cultivados con nada o muy poco fertilizante, mostrando menor supervivencia y crecimiento en campo que los otros tres plantones grandes que recibieron mayor fertilización durante su cultivo. (C) Detalle de una raíz revirada de *Pistacia terebinthus* por un mal manejo del cultivo (Fotos: Pedro Villar).

La desecación de las plantas durante el transporte y almacenamiento de la planta afecta menos a las plantas en contenedor que a las de raíz desnuda, ya que el agua almacenada en los cepellones retrasa su desecación (Mena-Petite *et al.* 2004). Por esta razón, es fundamental que los cepellones de las plantas en contenedor estén bien hidratados al salir del vivero y en el momento de la plantación, aunque ello suponga un incremento de los costes de transporte. Finalmente, las plantas almacenadas en la obra deberán mantenerse regadas si no van a ser plantadas inmediatamente.

Las plantas se deben transportar al lugar de trabajo sin que se recalienten y desequen. Por ello, no deben exponerse al viento ni al sol. Las plantas a raíz desnuda deben transportarse envueltas en bolsas de papel o algún material semipermeable o en cajas de cartón. Lo ideal es que se transporten refrigeradas. Si las plantas a raíz desnuda no van a ser usadas inmediatamente al llegar a la obra, deberán ser aviveradas o guardadas en una cámara refrigerada (Landis *et al.* 2010). En el caso de las plantas en contenedor, deberán permanecer almacenadas en lugares frescos y sombreados (pero no a oscuras) hasta su uso, debiéndose programar bien los trabajos de plantación para minimizar el período de almacenamiento y evitar así la desecación de la planta.

Muchas plantas desarrollan interacciones mutualistas con los microorganismos del suelo. Las simbiosis con hongos (micorrizas) son de las más importantes y facilitan a la planta la toma de nutrientes minerales y agua, lo que es importante para superar las épocas de sequía y vivir en suelos pobres. A cambio, las micorrizas reciben carbohidratos formados por las plantas (Moora y Zobel 2010). Las poblaciones de microorganismos del suelo son muy reducidas en lugares muy

degradados o en las obras que han usado materiales estériles para la construcción de terraplenes y donde no existe tierra vegetal. Ello, unido a la pobreza de nutrientes del suelo y las condiciones de elevado estrés hídrico, dificulta aún más la colonización de las plantas leñosas, especialmente las de etapas intermedias y tardías de la sucesión. Por tanto, puede ser recomendable la introducción de estos microorganismos, ya sea mezclando esporas con la siembra, o mediante la plantación de individuos previamente micorrizados en el vivero. Esta última opción es más recomendable, por ser más barata, a la vez que actúa como fuente de esporas para toda la zona (Moora y Zobel 2010). No obstante, la mayoría de las plantas cultivadas en viveros se micorrizan solas durante su cultivo con micorrizas típicas de vivero o incluso de hongos más frecuentes en ambientes forestales si los viveros se localizan en la proximidad de masas forestales. Las micorrizas y otras simbiosis con otros microorganismos pueden aumentar el crecimiento y la supervivencia de los individuos introducidos (Titus y del Moral 1998, Requena *et al.* 2001, Thrall *et al.* 2005, Domínguez *et al.* 2006), a la vez que facilitan la formación de redes de micelios que ayudan a fijar el suelo y la colonización de las raíces de otras especies (Dodd 2000). Además, confieren ventajas a especies normalmente más tardías en la sucesión (p.e., leñosas o herbáceas perennes de vida larga) frente a especies pioneras, como las hierbas anuales. Por ejemplo, *Salsola kali*, una planta anual problemática en los taludes de las carreteras porque la mata seca pone en peligro a los conductores al rodar sobre la calzada, se mostró más competitiva que las especies herbáceas perennes cuando estas no se hallaban micorrizadas. Sin embargo, la inoculación con micorrizas hizo que las plantas perennes fueran más competitivas que *S. kali*, reduciendo notablemente su presencia en la comunidad (Allen y Allen 1984).

V. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PLANTAS

Los factores ambientales importantes para la vida de los organismos pueden variar en el espacio a escalas muy diversas, desde variaciones a escala regional hasta variaciones muy pequeñas, de apenas unos centímetros (Lechowicz y Bell 1991). Estas variaciones deben ser tenidas en cuenta a la hora de distribuir en el espacio las plantas. Por ejemplo, la orientación de los taludes o la posición dentro del talud conlleva cambios en la disponibilidad de recursos y condiciones ambientales que deben ser consideradas para decidir la localización de las diferentes especies, la

densidad y la distribución de los individuos. Muy frecuentemente se organizan los individuos según distribuciones regulares (p.e., cuadrangular, rectangular, tresbolillo, lineal). Sin embargo, dichas distribuciones limitan la posibilidad de incorporar la variación espacial en los factores ambientales que ocurre a escalas pequeñas (Beckage y Clark 2003). La revegetación basada en la introducción de plantones irregularmente espaciados o formando manchas que imiten la distribución de la vegetación natural puede favorecer el desarrollo de 'islas de recursos',



Talud de terraplén de 30 años de antigüedad de una carretera comarcal de la provincia de Málaga. En la parte superior de la fotografía se puede apreciar la presencia de distintas especies de leñosas del género *Ulex* (Foto: Pablo García-Palacios).

mejorar el banco de semillas y facilitar el reclutamiento de nuevas plantas, acelerando la dinámica sucesional (Maestre 2003). Además, conocer *a priori* la distribución espacial de los factores ambientales puede ayudar a seleccionar los mejores lugares de plantación y maximizar la supervivencia (p.e., 'recruitment hotspots' *sensu* Hampe *et al.* 2008). También se pueden crear manchas de un alto contenido en recursos mediante fertilización localizada en puntos concretos, o bien mediante la construcción de microcuencas u otras estructuras de retención de agua (véase Capítulo 6). De este modo, las tareas de revegetación podrían centrarse en estas manchas, optimizando así los recursos y evitando plantar o sembrar en zonas donde la probabilidad de marras se incrementa. Por ejemplo, en un estudio espacial a pequeña escala de las propiedades edáficas, Maestre *et al.* (2003) observaron que las manchas con alta proporción de suelo desnudo, alto contenido de arena o alta resistencia a la penetración comprometerían la supervivencia de los plantones. A modo de ejemplo, las especies leñosas pioneras y tolerantes al estrés pueden ser introducidas en zonas donde se ha eliminado la hierba, en micrositios más xéricos como zonas convexas o con peores suelos, laderas en solana. En cambio, las plantas leñosas intermedias y tardías de la sucesión o aquellas que tengan altos requerimientos en recursos y baja tolerancia a la sequía se deberían plantar en parches con elevado contenido de recursos, en sitios que tengan suelos más profundos, poca pedregosidad, exposiciones de umbría o las zonas bajas de los taludes, que almacenan más humedad y nutrientes. Las zonas del talud con rocas, en principio, no necesitan recibir ninguna actuación. De este modo, se pueden conseguir

VI. PREPARACIÓN DEL SUELO

La compactación del sustrato es uno de los factores que más dificulta el establecimiento de la vegetación leñosa, al limitar la infiltración de agua y la penetración en profundidad de las raíces, la aireación y el volumen útil de suelo para las plantas (Bejarano *et al.* 2010). Para mitigar estos efectos es muy importante realizar una preparación física del suelo previa a la plantación. La importancia de la preparación del suelo se incrementa cuanto más árido sea el clima o cuanto más se retrase la fecha de plantación (Quejeta *et al.* 2001, Saquete *et al.* 2006, Palacios *et al.* 2009). Las preparaciones más intensas, es decir, las que afectan a un mayor volumen de suelo, tienen un mayor efecto sobre el desarrollo de las plantas.

sistemas más heterogéneos con una estructura en parches que facilitan la integración paisajística de las obras a la vez que se aumenta la diversidad biológica. Un aspecto que se debe contemplar es que el tipo de preparación del suelo va a condicionar la distribución espacial de las plantas. En concreto, los subsolados lineales imponen un grado de regularidad en la distribución de las plantas, mientras que las preparaciones puntuales (véase apartado VI) permiten una mayor heterogeneidad.

La densidad de plantas que se introduzcan inicialmente dependerá de la cobertura final que se desee, el tamaño de la especie de adulta y la mortandad esperada de las especies en el contexto ambiental de la obra. Por ejemplo, si se desea una cobertura del suelo medio alta (50-80%) y se desea introducir un arbusto de bajo porte y una especie arbórea, ambas con una supervivencia estimada del 50% a corto plazo, la densidad de plantación deberá ser mucho más alta en la primera que en la segunda: 20.000 frente a 700 pies ha⁻¹. La densidad de plantación también debe contemplar la ecología de las especies y los condicionantes ambientales del lugar de la obra. Así, las especies que son ecológicamente semejantes o estén muy emparentadas tenderán a competir más intensamente entre sí que aquellas con las características contrarias (Valiente-Banuet y Verdú 2008), por lo que plantaciones mixtas de especies ecológicamente semejantes deberán contemplar densidades menores. En lugares de mayor aridez o pobreza de nutrientes en el suelo, también deberán contemplar densidades inicialmente mayores, previendo una mayor mortandad. Densidades elevadas de árboles conllevarán, a la larga, un empobrecimiento de arbustos heliófilos.

Las preparaciones del suelo mecánicas son habitualmente más efectivas que las manuales, ya que remueven mayor volumen de suelo. En una siembra de *Q. ilex* sobre margas yesíferas, un subsolado de 50-60 cm de profundidad incrementó la supervivencia un 700% al final del verano con respecto a hoyos manuales de 10 cm de profundidad (Nicolás *et al.* 1997; Figura 4). En una plantación de *Q. faginea* (quejigo) en terrenos agrícolas abandonados no se observaron diferencias de supervivencia entre un subsolado y hoyos efectuados con retroexcavadora, pero sí de crecimiento, siendo mayor en el segundo caso que produjo una mayor remoción del suelo (Nicolás *et al.* 2004).

Las preparaciones del suelo que pueden aplicarse en obras de infraestructuras lineales pueden clasificarse en dos categorías: preparaciones puntuales y preparaciones lineales. Las preparaciones puntuales engloban a casillas, hoyos y microcuencas, bien hechos a mano o bien con picos mecánicos, barrenas helicoidales o retroexcavadora, o una combinación de medios mecánicos y manuales (Serrada 2000). En algunas obras se utilizan inyectores de agua a alta presión para abrir el hoyo. Las preparaciones puntuales no implican necesariamente la apertura de hoyos ni el volteo de los horizontes del suelo,

especialmente las realizadas con excavadora o picos mecánicos. Por ejemplo, para los ahoyados con retroexcavadora, se debe introducir el cazo hasta la profundidad deseada y levantar el suelo sin voltear el cazo para finalmente dejarlo caer de nuevo en el mismo punto. Posteriormente, el operario abrirá con un barrón o una azada un pequeño hueco donde introducir la planta o la semilla sobre el suelo esponjado. En el caso de las retroexcavadoras, es preferible no usar un cazo, sino solo uñas. El cazo puede ocasionar compactación en su roce con las paredes y el fondo del hoyo, que las uñas evitan.

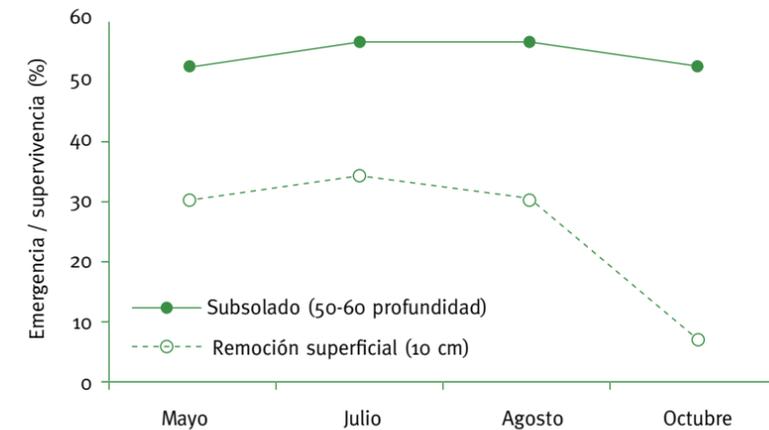


Figura 4. Evolución de la emergencia y supervivencia de siembras de bellotas de *Quercus ilex* (encina) realizadas sobre dos tipos de preparación del suelo: subsolados de 50-60 cm de profundidad y casillas hechas a mano de 10 cm de profundidad. La figura está dibujada a partir de los datos de Nicolás *et al.* (1997). El experimento se realizó sobre margas yesíferas en Guadalajara. La siembra se hizo en febrero y se protegió de los depredadores con tubos protectores de 30 cm. La potencia germinativa del lote de bellotas empleado en el estudio fue del 55%, determinado en condiciones de laboratorio.

Las preparaciones lineales engloban a los subsolados lineales, que consisten en realizar cortes al suelo, normalmente siguiendo las curvas de nivel, con un apero denominado subsolador o *ripper* montado sobre un tractor o un bulldózer. El subsolador puede profundizar hasta unos 60-80 cm. El subsolado tampoco produce una alteración en los horizontes del suelo y tiene una gran capacidad de infiltrar la escorrentía superficial de agua. En superficies llanas, el subsolado se puede hacer cruzado. La mecanización

de la preparación del suelo dependerá de la pendiente de los taludes. Una profusión de detalles sobre técnicas de preparación del suelo puede encontrarse en Serrada (2000) y Steinfeld *et al.* (2007). Como recomendación general, en caso de preparaciones puntuales, el hoyo de trabajo debe tener una dimensión mínima de 40 × 40 × 40 cm.

Los métodos destinados a incrementar la fertilidad del suelo se tratan en detalle en el Capítulo 6 de este libro.

VII. CUIDADOS POSPLANTACIÓN

Los cuidados posplantación son aquellas medidas encaminadas a garantizar el establecimiento de las plantas una vez realizada la plantación o la siembra. Se aplican durante un breve período de tiempo, que varía entre 1-5 años, dependiendo del tratamiento, pero habitualmente no pasan de los dos años, que es el período de garantía que tiene la empresa constructora. Los principales cuidados posplantación son los siguientes.

1. Riegos

Los riegos son muy importantes para garantizar niveles adecuados de supervivencia en localidades con escasa precipitación, en años muy secos, cuando se trabaja con especies poco resistentes a la sequía o se planta fuera de las épocas adecuadas (Jiménez *et al.* 2007, Rey Benayas 1998). No obstante, la necesidad de riego se reduce significativamente o incluso pueden ser innecesaria si la toma de decisiones y la ejecución de las otras actividades de revegetación se hacen correctamente, como la selección correcta de especies, la preparación del suelo y, sobre todo, la revegetación se hace en el período adecuado.

Habitualmente, se diferencian los riegos de establecimiento y los de mantenimiento. Los primeros se dan inmediatamente después de la plantación y su uso se suele restringir a situaciones en las que el suelo tiene poca humedad en el momento de la plantación y/o las plantaciones se han hecho muy tardíamente. Los riegos de mantenimiento se suelen aplicar solamente en los períodos de mayor aridez. En ambientes mediterráneos se suele recomendar la aplicación de entre 20 y 40 l por planta en cada evento de riego (Serrada 2000), que no deben activar el crecimiento aéreo de la planta, ya que la resistencia a factores de estrés se reduce. El riego conviene repartirlo durante el período de sequía en lugar de aplicarse en un único riego en mitad del período de sequía. Los riegos se aplican a mano por medio de mangueras conectadas a cisternas móviles (Figura 5). Ahora bien, esto solo es posible si la cisterna de riego tiene acceso al lugar de trabajo y en terrenos de poca pendiente. Otra alternativa es montar un sistema de riego por goteo conectado a unos depósitos de agua que periódicamente son rellenados. Esta opción es cara y se restringe habitualmente a las medianas, aunque también sería deseable en taludes con pendientes pronunciadas y en las que el riego se va a mantener durante varios

años. Los riegos deben planificarse correctamente, porque encarecen enormemente los costes de los proyectos de revegetación.

2. Control de la competencia con otras plantas

En la restauración de infraestructuras lineales habitualmente se persiguen dos objetivos ecológicos, proteger al suelo de la erosión y acelerar la sucesión secundaria, consiguiendo así comunidades de plantas más desarrolladas y estables. El primer objetivo se puede conseguir estableciendo una cubierta de hierbas densa, mientras que ambos objetivos se pueden alcanzar con especies leñosas. Sin embargo, las especies leñosas crecen más despacio que las hierbas, por lo que, a corto plazo el primer objetivo se puede alcanzar más rápidamente con hierbas. Ambos objetivos se ven favorecidos por separado cuando se incrementa la fertilidad del suelo y la disponibilidad hídrica. Sin embargo, bajo estas condiciones, la competencia entre plantas herbáceas y leñosas es más intensa (Löf 2000, Rey Benayas *et al.* 2005) y por tanto estos dos objetivos primordiales pueden entrar en conflicto.

La mayoría de especies herbáceas que se desarrollan en los taludes son ruderales anuales, esto es, especies que completan su ciclo de vida en un año y que están adaptadas a vivir en sitios muy perturbados (Grime 2001). Además, son más eficaces en explotar los recursos del suelo que las especies leñosas, porque crecen más rápidamente, tienen raíces con una elevada longitud específica y una mayor capacidad intrínseca de absorción de nutrientes (Grime and Hunt 1975, Eissenstat 1992). La competencia entre las especies herbáceas y leñosas es más intensa cuanto menor es la disponibilidad de recursos edáficos, de forma que la implantación de las plantas leñosas suele fracasar si no se eliminan las hierbas (Rey Benayas *et al.* 2005, Gómez-Aparicio 2009, Cuesta *et al.* 2010a, Cuesta *et al.* 2010b). Sin embargo, para una especie dada, la capacidad competitiva de los plantones leñosos depende de sus atributos funcionales, los cuales se pueden determinar según cómo se cultive la planta en el vivero (van den Driessche 1991a, Villar-Salvador *et al.* 2004). Así, en *P. halepensis*, los plantones de gran tamaño y elevada concentración de nitrógeno en sus tejidos tienen mayor capacidad de competencia con las hierbas que los plantones de atributos contrarios (Figura 3; Cuesta *et al.* 2010a).



Figura 5. Detalles de tubos de riego por goteo en la mediana de la Autovía A-9 (Almería) (A) y en una ladera plantada de encina en Cazorra (Jaén) (B), una cisterna de agua para alimentar un sistema de riego por goteo en una repoblación en Ayora (Valencia) (C) y regando a mano con manguera conectada a una cuba situada en la parte superior de la infraestructura en un talud del tren de alta velocidad a Málaga (Humilladero) (D) (Fotos: Pedro Villar y Marisa Martínez).

Un aumento de los recursos edáficos, sobre todo agua, relaja la competencia, tendiéndose a interacciones más o menos neutras en situaciones intermedias de disponibilidad de recursos edáficos (Figura 6). Sin embargo, cuando los recursos edáficos superan un cierto umbral y se hacen muy abundantes, las hierbas y las leñosas pueden volver a experimentar competencia, principalmente por la luz. Sin embargo, el resultado de la competencia con las hierbas diferirá dependiendo del tipo de planta leñosa. Para las

especies pioneras de la sucesión, la mayoría de las cuales son heliófilas, se traducirá en un efecto negativo, ya que las hierbas impedirán el acceso a la luz. Sin embargo, las especies intermedias y tardías de la sucesión, que suelen regenerarse mejor en ambientes de luz moderada, sufrirán menos la competencia que las pioneras de la sucesión. La Figura 6 sintetiza este proceso y puede constituir un modelo conceptual de toma de decisiones sobre el control de las especies herbáceas cuando se introducen especies leñosas.

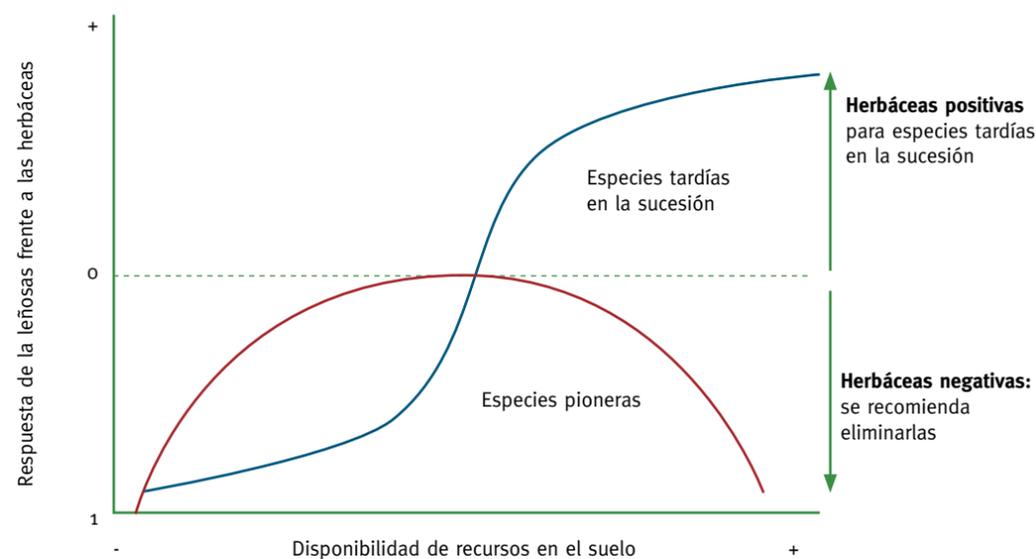


Figura 6. Modelo conceptual del efecto de las plantas herbáceas sobre las leñosas dependiendo de su estrategia ecológica (pionera frente a tardía de la sucesión) y el nivel de recursos disponibles en el suelo. Por encima de la línea punteada, estos efectos son positivos, y por debajo, son negativos.

No debe eliminarse la cubierta de hierbas en toda la superficie del talud cuando se desea implantar las leñosas. Basta eliminar la hierba en un halo de 0,5-1 m de diámetro alrededor de cada plantón para relajar la competencia (Figura 7). De esta manera, a la vez que reducimos la competencia sobre las especies leñosas de interés, se garantiza una cobertura del suelo suficiente para evitar la erosión y fomentar otras funciones ecológicas como el incremento de materia orgánica en el suelo y la creación de hábitat para otros organismos.

El control de la competencia herbácea se puede realizar por procedimientos físicos y/o químicos. Los métodos físicos implican la remoción de la hierba por medio de desbroces y escardas o el impedimento de su crecimiento por medio de una barrera

física o *mulch*. Estos últimos consisten en piedras o telas y mantas permeables de fibras vegetales o sintéticas que se colocan pegadas al suelo alrededor del plantón y que dificultan la emergencia de las plántulas de herbáceas (Peñuelas *et al.* 1996) y reducen la evaporación de agua del suelo, de forma análoga a como lo hace la hojarasca de muchas plantas (Rebollo *et al.* 2001). Las escardas o desbroces deben planificarse cuando la hierba tiene un tamaño suficiente para competir con la leñosa. Realizarlas demasiado pronto no es efectivo y probablemente habrá que repetir las más adelante, mientras que tampoco se deben retrasar mucho porque la hierba ya estará compitiendo intensamente con la planta leñosa. Los métodos químicos de control de la competencia herbácea se realizan con herbicidas, siendo recomendable aplicar una

mezcla de herbicidas de contacto y residuales, específicos para gramíneas, compuestas o leguminosas, las familias predominantes en los herbazales de los taludes. Es esencial que la planta leñosa sea protegida por un tubo al aplicarse el herbicida. La eliminación total de las hierbas alrededor de la planta leñosa deja el suelo desnudo, favoreciendo

la evaporación. Por ello, no se deben retirar los restos de las hierbas en las escardas o siegas, porque reducen la evaporación de agua y el recalentamiento del suelo (Papavassiliou 1991, Sack y Grubb 2002), aportan fertilidad al suelo, dificultan la emergencia de futuras hierbas y dicha retirada encarece el mantenimiento.

A



B



Figura 7. (A) Trabajadores segando la hierba en un talud del tren de alta velocidad a Málaga (Humilladero). (B) Foto del halo sin hierba alrededor de dos plantones de encina en Santa Cruz de Mudela, Ciudad Real (Fotos: Marisa Martínez y Pedro Villar).

3. Protección frente a herbívoros

Los herbívoros pueden dañar y matar las plantas introducidas, siendo las aves, los ungulados y roedores los que más daño causan. Las aves depredan básicamente semillas, mientras que los ungulados, tanto silvestres como domésticos, se alimentan de plantas de cualquier edad. Finalmente, entre los roedores, los ratones comen fundamentalmente semillas y plántulas en estadios de vida incipientes, mientras que los conejos y liebres dañan tanto a las plántulas como los plantones de mayor edad. Para reducir la depredación de las semillas aplicadas a voleo y favorecer su germinación, conviene enterrar las semillas (Peñuelas *et al.* 2002, Gómez 2004). La protección de las plantas leñosas se puede llevar a cabo bien por medio de vallas, que encierran amplias zonas, o bien protegiendo individualmente cada planta. La protección individual también se puede practicar con las siembras puntuales. Las vallas son útiles para evitar los ungulados y, si se entierran, también sirven para evitar a los conejos y liebres. La protección individual de cada planta se puede llevar a cabo con mallas y tubos protectores. Las mallas pueden ser de plástico y metálicas (Figura

8). En la mayoría de los casos deben ir sujetas con tutores y el borde inferior debe quedar ligeramente enterrado. Los tubos protectores son de plástico, de entre 0,60 y 2 m de longitud, con paredes continuas, si bien cada vez se venden más modelos con agujeros de ventilación. Los tubos deben ser enterrados aproximadamente entre un cuarto y un tercio de su longitud y, por ello, los hacen muy útiles para proteger siembras puntuales. La principal diferencia con las mallas es que los tubos alteran significativamente el microclima alrededor de la planta. La mayoría de ellos reduce la radiación y la concentración de CO_2 e incrementa la temperatura y la humedad relativa del aire (Bergez y Dupraz 2000, Bellot *et al.* 2002, Oliet y Jacobs 2007). Esta alteración del microclima aéreo de la planta puede tener efectos desiguales para el establecimiento de las especies. En general, para las especies leñosas pioneras de la sucesión, que son mayoritariamente heliófilas, los tubos protectores no incrementan la supervivencia e incluso la pueden reducir. Plantas como el romero, las jaras, la retama o los pinos mediterráneos no tienden a beneficiarse de los tubos protectores. En cambio, para especies intermedias y tardías de la sucesión, que se reclutan en micrositos con una cierta sombra,

como la encina, el madroño o especies caducifolias, los tubos protectores incrementan la supervivencia y el crecimiento (Oliet *et al.* 2003, Puértolas *et al.* 2010), especialmente si los tubos tienen agujeros de ventilación (Figura 9). La ventilación reduce la

temperatura e incrementa la concentración de CO₂. Los tubos protectores deben ser retirados cuando las plantas hayan superado ampliamente la longitud del tubo y se puedan mantener erguidas por sí solas una vez retirado el tubo.

A



B



C



D



Figura 8. Diferentes modelos de tubos protectores. En la imagen (A) se muestra un tubo protector de 1,80 m sujeto con dos postes y protegido todo ello con malla metálica. Este sistema está pensado para evitar los daños causados por grandes herbívoros. Las imágenes B y C muestran dos tipos de tubos protectores de 0,6 m agujereados para favorecer su ventilación. La imagen D muestra una malla de plástico usada frente a pequeños herbívoros, como conejos y liebres, que afecta poco al microclima de la planta (Fotos: Pedro Villar).

VIII. PREGUNTAS CLAVE

¿Necesito introducir plantas leñosas para cumplir mis objetivos de revegetación?

Es muy recomendable, especialmente en ambientes mediterráneos, ya que aceleran la sucesión secundaria, en muchos casos permiten una integración funcional y paisajística de la infraestructura lineal mejor que las herbáceas, y su mantenimiento, si están bien seleccionadas, es menor que en las herbáceas.

En caso de que se decida revegetar con leñosas, ¿cuáles son los principales limitantes para el desarrollo de los plantones en la obra y qué medidas correctoras puedo tomar para reducirlas?

El estrés hídrico, el frío, la baja fertilidad y la compactación del suelo, la competencia con las especies herbáceas o el daño producido por los herbívoros son los mayores problemas en el establecimiento de leñosas. Las medidas dependerán de las características ecológicas de las especies que se implanten, pero, en general, usar plantas y semillas de calidad, plantar en la época adecuada y en micrositios de mayor disponibilidad de recursos, en conjunto con la protección contra los herbívoros y la eliminación de las especies herbáceas en los hoyos de plantación, es suficiente para asegurar un buen nivel de éxito en la plantación.

¿Qué criterios debo tener en cuenta a la hora de seleccionar las especies y los materiales de reproducción?

La selección de especies debe tener en cuenta que estas estén adaptadas a los factores de estrés dominantes en la zona, y debe incluir diversas especies para incrementar la diversidad y resistencia a las perturbaciones de la zona restaurada. Lo más sencillo es escoger especies y materiales de reproducción que se desarrollen de forma natural en las cercanías de la obra o en zonas con características climáticas similares. El material de

reproducción debe ser de calidad, es decir, con las características morfofisiológicas adecuadas a la zona, sin enfermedades ni deformaciones en las raíces.

¿Conviene regar o fertilizar?

El riego no es estrictamente necesario si se han seleccionado las especies leñosas adecuadas, la revegetación se hace en la época debida, el régimen de precipitaciones es normal y el material de reproducción es de buena calidad. No obstante, el riego se puede plantear en climas muy secos o en años más secos de lo normal. En caso de tener suelos muy pobres, se puede fertilizar, pero siempre con dosis bajas. La fertilización dependerá de las características iniciales del sitio, o de si existen sitios especialmente fértiles donde podamos plantar.

¿Cómo dispongo mis plantas en el espacio?

Depende de si las especies seleccionadas son pioneras o más tardías en la sucesión y de su estrategia para resistir la sequía. Las primeras, especialmente si no tienen raíces profundas, se pueden plantar en suelos más pobres en nutrientes y en lugares que retengan menos humedad. En cambio, las especies más tardías en la sucesión y menos resistentes a la sequía requieren lugares más fértiles y húmedos, como el pie del talud, zonas llanas y menos expuestas a la insolación.

¿Son necesarias preparaciones del suelo?

Son muy importantes cuando el suelo está muy compactado, de modo que dificulte el enraizamiento y la infiltración del agua. Las preparaciones someras son poco útiles y lo mínimo que se debe realizar son ahoyados de 40 x 40 x 40 cm. Dependiendo de la pendiente, es preferible el uso de maquinaria, ya que permite preparaciones más intensas y el rendimiento de trabajo es mayor.

IX. ERRORES HABITUALES

Uso de especies y procedencias no adaptadas a las condiciones locales

Frecuentemente se usan las mismas especies, normalmente las más fáciles de conseguir, por igual en todas las obras y, dentro de una obra, su distribución no sigue criterios con base ecológica. Esto es un error muy grave, ya que seleccionar especies y, dentro de estas, las procedencias mejor adaptadas a las condiciones ambientales locales, es fundamental para el éxito de la revegetación (véase apartado II).

Métodos y épocas de revegetación inadecuados

No se debe usar como método principal de revegetación la siembra de plantas leñosas de semillas pequeñas o de baja capacidad germinativa. El uso de estaquillas se desaconseja en ambientes muy secos. Por otro lado, las obras de infraestructuras lineales habitualmente tienen plazos de ejecución muy constreñidos, en los que a menudo los trabajos de revegetación se ven abocados a realizarse en épocas inadecuadas para el establecimiento de las plantas. Cualesquiera que sean las especies empleadas, plantar o sembrar en una época inadecuada (muy cerca o durante el verano, en mitad del invierno en estaciones muy frías) conduce al fracaso. La revegetación debe hacerse en los períodos húmedos del año y no muy fríos (véase apartado III).

Mala calidad de planta

Las características morfológicas, fisiológicas y sanitarias de las plantas determinan su

capacidad de establecimiento. El uso de plantas enfermas, con una morfología inadecuada, raíces deformadas, poco fertilizadas y cultivadas en contenedores muy pequeños y con cepellones secos en el momento de la plantación es una garantía de fracaso. Los plántones deben estar morfológicamente bien proporcionados, sanos y sin heridas, y deben tener un cepellón compacto y sin deformaciones en las raíces para que no se desequen, recalienten o se golpeen durante su transporte y permanencia en la obra (véase apartado IV).

Malas (o ausencia de) preparaciones del suelo y condiciones edáficas muy limitantes

La falta de preparaciones del suelo, o bien preparaciones muy someras, que no consigan reducir la compactación del suelo y aumenten el volumen efectivo de enraizamiento, así como la baja fertilidad edáfica son factores que limitan el establecimiento incluso de las especies más resistentes (véase apartado VI).

Ausencia de cuidados posplantación

Al finalizar la plantación o la siembra, se deben procurar una serie de cuidados encaminados a aportar recursos, crear las condiciones y minimizar las interacciones negativas con otros organismos hasta que la planta se establezca y pueda seguir desarrollándose por sí sola (véase apartado VII).

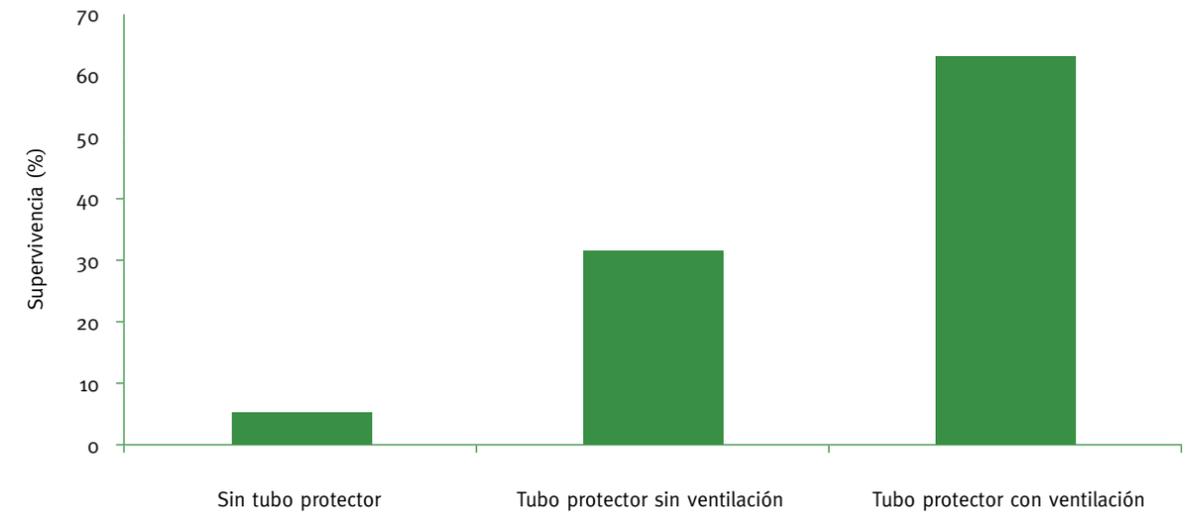


Figura 9. Influencia del tipo de tubo protector (sin tubo, tubo sin ventilación y tubo ventilado) en la supervivencia de *Quercus ilex* (encina) al final del primer verano. La figura está hecha a partir de los datos de Nicolás *et al.* (1997).

X. UN EJEMPLO DE ÉXITO

¿Dónde?

Almoguera (Guadalajara), sobre margas yesíferas con una precipitación y temperatura media anual de 415 mm y 13.4 °C, respectivamente.

¿Qué se hizo?

Se plantaron en enero plántones de *Quercus ilex* (encina) de una savia que se repartieron en tres tratamientos de protección de la planta: dos tipos de tubos protectores, ventilado y sin ventilación, y un control (sin tubo protector). El tubo protector usado fue ®Tubex-Press 0,65, de 60 cm de longitud y translúcido. El tubo ventilado se consiguió practicando agujeros de 2,5 cm de diámetro a dos niveles, a 10 y 40 cm del borde superior. A cada altura se hicieron cuatro agujeros. La preparación del suelo consistió en subsolados a 60 cm de

profundidad y no se aplicó ningún riego (Nicolás *et al.* 1997).

¿Qué ocurrió?

Los tubos protectores, especialmente los ventilados, aumentaron significativamente la supervivencia con respecto al control después del primer verano, cuya supervivencia al comienzo del otoño fue tan solo del 5%. Se atribuye la elevada supervivencia (~60%) de las encinas en los tubos ventilados con respecto al control (Figura 9) porque redujeron la radiación, un factor que cuando se da en combinación con estrés hídrico causa la fotoinhibición de los fotosistemas de la planta, reduciendo, en consecuencia, su capacidad fotosintética. Además, el microclima dentro del tubo ventilado fue menos desecante que el del tubo sin ventilación.

XI. BIBLIOGRAFÍA

Abrams, M.D. 1994. Genotypic and phenotypic variation as stress adaptations in temperate tree species: a review of several case studies. *Tree Physiology* 14:833-842.

Alía, R., N. Alba, D. Agúndez y S. Iglesias. 2005. Manual para la comercialización y producción de semillas y plantas forestales. Materiales de base y de reproducción. En Serie Forestal. DGB, Madrid. 384 pp. http://www.inia.es/gcontrec/pub/LIBRO_SEMILLASfi_1177140511984.pdf.

Allen, E.B., y M.F. Allen. 1984. Competition between plants of different successional stages: mycorrhizae as regulators. *Canadian Journal of Botany* 62:2625-2629.

Álvarez-Urúa, P. y C. Körner. 2007. Low temperature limits of root growth in deciduous and evergreen temperate tree species. *Functional Ecology* 21:211-218.

Andrés P. y M. Jorba. 2000. Mitigation strategies in some motorway embankments (Catalonia, Spain). *Restoration Ecology* 8:268-275.

Antúnez, I., E.C. Retamosa y R. Villar. 2001. Relative growth rate in phylogenetically related deciduous and evergreen woody species. *Oecologia* 128:172-180.

Balaguer, L., E. Martínez-Ferri, F. Valladares, M.E. Pérez-Corona, F.J. Baquedano, F.J. Castillo y E. Manrique Balaguer. 2001. Population divergence in the plasticity of the response of *Quercus coccifera* to the light environment. *Functional Ecology* 15:124-135.

Beckage B y J.S. Clark. 2003. Seedling survival and growth of three forest species, the role of spatial heterogeneity. *Ecology* 84:1849-1861.

Bejarano MD, R. Villar, A.M. Murillo y J.L. Quero. 2010. Effects of soil compaction and light on growth of *Quercus pyrenaica* Willd.(Fagaceae) seedlings. *Soil, Tillage & Research* 110:108-114.

Ballot, J., J.M. Ortiz de Urbina, A. Bonet y J.R. Sánchez. 2002. The effects of treeshelters on the growth of *Quercus coccifera* L. seedlings in a semiarid environment. *Forestry*. 75:89-106.

Bergez, J.E. y C. Dupraz. 2000. Effect of ventilation on growth of *Prunus avium* seedlings grown

in treeshelters. *Agricultural and Forest Meteorology* 104:199-214.

Burdett, A.N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research* 20:415-427.

Corchero de la Torre, S., M. Gozalo-Cano, P. Villar-Salvador y J.L. Peñuelas-Rubira. 2002. Crecimiento radical en campo de *Pinus halepensis* y *Quercus ilex* plantados en diferentes momentos. *Revista Montes* 68:5-11.

Cornelissen, J.H.C., P. Castro-Díez y R. Hunt. 1996. Seedling growth, allocation and leaf attributes in a wide range of woody plant species and types. *Journal of Ecology* 84:755-765.

Cortina, J., J.L. Peñuelas, J. Puértolas, R. Savé and A. Vilagrosa. 2006. Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos: estado actual de conocimientos. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 191 pp.

Coutts, M.P. 1982. Water relations of Sitka Spruce seedlings after root damage. *Annals of Botany* 49:661-668.

Cuesta, B., P. Villar-Salvador, J. Puértolas, D. Jacobs y J.M. Rey Benayas. 2010a. Why do large, nitrogen rich seedlings better resist stressful transplanting conditions? A physiological analysis in two functionally contrasting Mediterranean forest species. *Forest Ecology and Management* 260:71-78.

Cuesta, B., P. Villar-Salvador, J. Puértolas, J.M. Rey Benayas y R. Michalet. 2010b. Facilitation of oak in Mediterranean shrubland is explained by both direct and indirect interactions mediated by herbs. *Journal of Ecology* 98:688-697.

Del Campo, A., R.M. Navarro Cerrillo, J. Hermoso y A.J. Ibáñez. 2007. Relationships between site and stock quality in *Pinus halepensis* Mill. reforestation on semiarid landscapes in eastern Spain. *Annals of Forest Science* 64:719-731.

Dodd, J.C. 2000. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in agro-and natural ecosystems. *Outlook on Agriculture* 29:55-62.

Domínguez, J.A., J. Selva, J.A. Rodríguez y J.A. Saiz de Omeñaca. 2006. The influence of mycorrhization with *Tuber melanosporum* in the afforestation of a Mediterranean site with *Quercus ilex* and *Quercus faginea*. *Forest Ecology and Management* 231:226-233.

Domínguez, M.T., T. Marañón, J.M. Murillo, J.P. Hidalgo y P. Madejón. 2004. Crecimiento y morfología foliar de especies leñosas en las reforestaciones del corredor verde del Guadiamar (Sevilla). Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 20:173-179.

Domínguez-Lerena, S., N. Herrero Sierra, I. Carrasco Manzano, L. Ocaña Bueno, J. Peñuelas Rubira y J.G. Mexal. 2006. Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. *Forest Ecology and Management* 221:63-71.

Eissenstat, D.M. 1992. Costs and benefits of constructing roots of small diameter. *Journal of Plant Nutrition* 15:763-782.

Esteso-Martínez, J., F. Valladares, J.J. Camarero y E. Gil-Pelegrín. 2006. Crown architecture and leaf habit are associated with intrinsically different light harvesting efficiencies in *Quercus* seedlings from contrasting environments. *Annals of Forest Science* 63:511-518.

Forman, R.T.T. y L.E. Alexander. 1998. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics* 29:207-231.

Forman, R.T.T., D. Sperling, J. A. Bissonette, A. P. Clevenger, C. D. Cutshall, V. H. Dale, L. Fahrig, R. France, C. R. Goldman, K. Heanue, J. A. Jones, F. J. Swanson, T. Turrentine y T. C. Winter. 2003. *Road Ecology: Science and Solutions*. Island Press, Washington.

Gaudet, C.L., y P.A. Keddy. 1988. Comparative approach to predicting competitive ability from plant traits. *Nature* 334:242-243.

Gómez JM. 2004. Importance of microhabitat and acorn burial on *Quercus ilex* early recruitment: non-additive effects on multiple demographic processes. *Plant Ecology* 172:287-297.

Gómez-Aparicio, L., R. Zamora, J.M. Gómez, J. Hódar, J. Castro y E. Baraza. 2004. Applying plant facilitation to forest restoration: A meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Applications* 14:1128-1138.

Gómez-Aparicio, L. 2009. The role of plant interactions in the restoration of degraded ecosystems: a meta-analysis across life-forms and ecosystems. *Journal of Ecology* 97:1202-1214.

Grime, J.P. 2001. *Plant strategies, vegetation processes and ecosystem properties*. John Wiley & Sons Inc., Chichester. 417 pp.

Grime, J.P., y R. Hunt. 1975. Relative growth-rate: its range and adaptive significance in a local flora. *Journal of Ecology* 63:393-422.

Grossnickle, S.C. 1992. Relationship between freezing tolerance and shoot water relations of western red cedar. *Tree Physiology* 11:229-240.

Hampe, A., J.L. García-Castaño, E.W. Schupp, y P. Jordano. 2008. Spatio-temporal dynamics and local hotspots of initial recruitment in vertebrate dispersed trees. *Journal of Ecology* 96:668-678.

Harper, J.L., J.N. Clatworthy, I.H. McNaughton, y G.R. Sagar. 1961. The evolution and ecology of closely related species living in the same area. *Evolution* 15:209-227.

Jiménez, M., E. Fernández-Ondoño, M. Ripoll, F. Navarro, E. Gallego, E. De Simón y A. Lallena. 2007. Influence of different post-planting treatments on the development in holm oak afforestation. *Trees-Structure and Function* 21:443-455.

Landis, T., R. Tinus, A.J.S. McDonald y J.P. Barnett. 2010. Seedling processing, storage, and outplanting. In *The container tree nursery manual*. USDA.

Lechowicz, M.J., y G. Bell, 1991. The ecology and genetics of fitness in forest plants. II. Microspatial heterogeneity of the edaphic environment. *Journal of Ecology* 79:687-696.

Lindström, A., y G. Rune. 1999. Root deformation in plantations of container-grown Scots pine trees: effects on root growth, tree stability and stem straightness. *Plant and Soil* 217:31-39.

Löf, M. 2000. Establishment and growth in seedlings of *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*: influence of interference from herbaceous vegetation. *Canadian Journal of Forest Research* 30:855-864.

Lyr, H., y G. Hoffmann. 1967. Growth rates and growth periodicity of tree roots. *International Review of Forest Research* 2:181-226.

Maestre, F.T. 2003 La restauración de la cubierta vegetal en zonas semiáridas en función del patrón espacial de factores bióticos y abióticos. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. 383 pp.

Maestre, F. T., J. Cortina, S. Bautista, J. Bellot y V. R. Vallejo. 2003. El papel de la heterogeneidad espacial en la restauración de un ecosistema semiárido degradado II. Factores ambientales condicionantes de la supervivencia. *Ecología* 17:25-45.

Maillard, P., D. Garriou, E. Deléens, P. Gross, y J.M. Guehl. 2004. The effects of lifting on mobilisation and new assimilation of C and N during regrowth of transplanted Corsican pine seedlings. A dual ¹³C and ¹⁵N labelling approach. *Annals of Forest Science* 61:795-805.

Martínez-Vilalta J, E. Prat, I. Oliveras, J. Piñol. 2002. Xylem hydraulic properties of roots and stems of nine Mediterranean woody species. *Oecologia* 133:19-29.

Matías, L., I. Mendoza y R. Zamora. 2009. Consistent pattern of habitat and species selection by post-dispersal seed predators in a Mediterranean mosaic landscape. *Plant Ecology* 203:137-147.

McDowell N, W.T. Pockman, C.D. Allen, D.D. Breshers, N.Cobb, T. Kolb, J. Plaut, J. Sperry, A. West, D.G. Williams y E.A. Yezpe. 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought, why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytol* 178:719-739.

McKay, H.M. 1997. A review of the effect of stresses between lifting and planting on the nursery stock quality and performance. *New Forests* 13:369-399.

Mena-Petite, A., J.M. Estavillo, M. Duñabeitia, B. González Moro, A. Muñoz Rueda y M. Lacuesta. 2004. Effect of storage conditions on post planting water status and performance of *Pinus radiata* D. Don stock-types. *Annals Forest Science* 61:695-704.

Mendel, Z.D.G. 1984. Provenance as a factor in susceptibility of *Pinus halepensis* to *Matsucoccus josephi* (Homoptera: Margarodidae). *Forest Ecology and Management* 9:259-266.

Miranda, J.D., F.M. Padilla, J. Martínez-Vilalta, y F.I. Pugnaire. 2010. Woody species of a semi-arid community are only moderately resistant to cavitation. *Functional Plant Biology* 37:828-839.

Mollá, S., P. Villar-Salvador, P. García-Fayos y J.L. Peñuelas. 2006. Physiological and transplanting

performance of *Quercus ilex* L. (holm oak) seedlings grown in nurseries with different winter conditions. *Forest Ecology and Management* 237:218-226.

Moor, M., y M. Zobel. 2010. Arbuscular Mycorrhizae and Plant-Plant Interactions. Impact of Invisible World on Visible Patterns. Pugnaire F. I., ed. Positive interactions and plant community dynamics (79-98). Boca Raton, FL, USA: CRC PRESS.

Navarro, R.M., A. del Campo y J. Cortina. 2006a. Factores que afectan al éxito de una repoblación y su relación con la calidad de la planta. En *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos. Estado actual de conocimientos*. Cortina J., J.L. Peñuelas, J. Puértolas, R. Savé y A. Vilagrosa, eds. Organismo Autónomo de Parques Naturales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 31-46.

Navarro, R.M., P. Villar-Salvador y A. del Campo. 2006b. Morfología y establecimiento de los plantones. En *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos degradados. Estado actual de conocimientos*. J. Cortina, J.L. Peñuelas, J. Puértolas, R. Savé y A. Vilagrosa, eds. Organismo Autónomo de Parques Naturales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 67-88.

Nicolás, J.L., S. Domínguez-Lerena, N. Herrero-Sierra y P. Villar-Salvador. 1997. Plantación y siembra de *Quercus ilex*: efectos de la preparación del terreno y de la utilización de protectores en la supervivencia de plantas. *In Irati* 97. II Congreso Forestal Hispano-Luso. Gobierno de Navarra, Pamplona, pp. 449-454.

Nicolás, J.L., P. Villar-Salvador y J.L. Peñuelas Rubira. 2004. Efecto de la edad de la planta y el tipo de preparación del suelo en la supervivencia y crecimiento de *Quercus faginea* Lam. cultivado en contenedor. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 17:205-209.

Oliet, J., R.M. Navarro Cerrillo y O. Contreras Atalaya. 2003. Evaluación de la aplicación de tubos y mejoradores en repoblaciones forestales Ed. J.C. Costa. Dirección General de Gestión del Medio Natural, Junta de Andalucía, Córdoba. 234 p.

Oliet, J.A., y D.F. Jacobs. 2007. Microclimatic conditions and plant morphophysiological development within a tree shelter environment during establishment of *Quercus ilex* seedlings. *Agricultural and Forest Meteorology* 144:5 8-72.

Padilla, F.M., y F.I. Pugnaire. 2007. Rooting depth and soil moisture control Mediterranean woody seedling survival during drought. *Functional Ecology* 21:489-495.

Palacios, G., R.M. Navarro Cerrillo, A. del Campo y M. Toral. 2009. Site preparation, stock quality and planting date effect on early establishment of Holm oak (*Quercus ilex*) seedlings. *Ecological Engineering* 35:38-46.

Papavassiliou, S. 1991. Ecophysiological studies on chalkland shrubs. *M.Phil* thesis, University of Cambridge, Cambridge.

Pemán, J., J. Voltas y E. Gil-Pelegrín. 2006. Morphological and functional variability in the root system of *Quercus ilex* L. subject to confinement: consequences for afforestation. *Annals of Forest Science* 63:425-430.

Peñuelas, J.L., L. Ocaña, S. Domínguez Lerena y I. Renilla. 1996. Experiencias sobre el control de la competencia herbácea en repoblaciones de terrenos agrícolas abandonados. *Montes* 45:30-36.

Peñuelas, J., S. Domínguez Lerena, N. Herrero Sierra, J.L. Nicolás Peragón, R. Fernández Salvador, S. Sarría Sopena, P. Sendra Arce y J. Costa Pérez. 2002. Experiencias de aplicación de semillado directo para la restauración forestal. *Conserjería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Sevilla (España)*.

Poorter, L. y F. Bongers. 2006. Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species. *Ecology* 87:1733-1743.

Poorter, H., U. Niinemets, L. Poorter, I.J. Wright y R. Villar. 2009. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New Phytologist* 182:565-588.

Puértolas, J., J.A. Oliet, D.F. Jacobs, L.F. Benito y J.L. Peñuelas. 2010. Is light the key factor for success of tube shelters in forest restoration plantings under Mediterranean climates? *Forest Ecology and Management* 260:610-617.

Querejeta, J.I., A. Roldán, J. Albaladejo y V. Castillo. 2001. Soil water availability improved by site preparation in a *Pinus halepensis* afforestation under semiarid climate. *Forest Ecology and Management* 149:115-128.

Ramírez-Valiente, J.A., F. Valladares, L. Gil y I. Aranda. 2009. Population differences in juvenile survival

under increasing drought are mediated by seed size in cork oak (*Quercus suber* L.). *Forest Ecology and Management* 257:1676-1683.

Rebollo, S., L. Pérez-Camacho, M.T. García-de Juan, J.M. Rey Benayas y A. Gómez-Sal. 2001. Recruitment in a Mediterranean annual plant community: seed bank, emergence, litter, and intra- and inter-specific interactions. *Oikos* 95:485-495.

Requena, N., E. Pérez-Solís, C. Azcón-Aguilar, P. Jefries, J.M. Barea. 2001. Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. *Applied Environmental Microbiology* 67:495-498.

Rey Benayas, J.M. 1998. Growth and survival in *Quercus ilex* L. seedlings after irrigation and artificial shading on a Mediterranean set-aside agricultural land. *Annales des Sciences Forestières* 55:801-807.

Rey Benayas, J.M., J. Navarro, T. Espigares, J.M. Nicolau, y M.A. Zavala. 2005. Effects of artificial shading and weed mowing in reforestation of Mediterranean abandoned cropland with contrasting *Quercus* species. *Forest Ecology and Management* 212:302-314.

Riedacker, A. 1976. Rythmes de croissance et de régénération des racines des végétaux ligneux. *Annales des Sciences Forestières* 33:109-138.

Ritchie, G.A. 1984. Assessing seedling quality. En *Forest nursery manual: production of bareroot seedlings* M.L. Duryea y T.D. Landis, eds. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, The Hague/Boston/Lancaster, pp. 243-259.

Rose, R., C. Carlson y P. Morgan. 1990. The target seedling concept. *In Target seedling symposium: Proceedings, combined meeting of the western forest nursery associations* Eds. R. Rose, S. Campbell y T.D. Landis. USDA Forest Service, Roseburg, Oregon, pp. 1-8.

Ruiz-Robledo, J., y R. Villar. 2005. Relative growth rate and biomass allocation in ten woody species with different leaf longevity using phylogenetic independent contrasts PICs. *Plant Biology* 7:484-494.

Sack, L., y P. J. Grubb. 2002. The combined impacts of deep shade and drought on the growth and biomass allocation of shade-tolerant woody seedlings. *Oecologia* 131:175-185.

Saquete, A., M.J. Lledó, A. Escarré, M.A. Ripoll Morales y E. De Simón. 2006. Effects of site preparation

with micro-basins on *Pinus halepensis* Mill. afforestations in a semiarid ombroclimate. *Annals of Forest Science* 63:15-22.

Sardá, P., A. Aguilar, G. Valle, P. Villar-Salvador y J.L. Peñuelas Rubira. 2005. Crecimiento radical de plántones de *Retama sphaerocarpa*, *Pistacia terebinthus* y *Olea europaea* durante el período húmedo del año. In IV Congreso Forestal Español. SECF, Zaragoza, 4CFE05 T1. 8 pp.

Schiechtl, H.M. 1986. Manual de ordenación de cuencas hidrográficas. Estabilización de laderas con tratamientos del suelo y la vegetación. Roma: Guías FAO: Conservación 13/1. FAO, 1986. <http://www.fao.org/docrep/006/ado81s/ADo81s00.htm>.

Serrada, R. 2000. Apuntes de repoblaciones forestales. Escuela Universitaria de Ingeniería Forestal. Fundación Conde del Valle de Salazar. 3ª edición. Madrid.

South, D.B., S.W. Harris, J.P. Barnett, M.J. Hains y D.H. Gjerstad. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, U.S.A. *Forest Ecology and Management* 204:385-398.

Sperry, J.S., y N.Z. Saliendra. 1994. Intra and inter-plant variation in xylem cavitation in *Betula occidentalis*. *Plant, Cell and Environment* 17:1233-1241.

Steinfeld, D.E., S.A. Riley, K.M. Wilkinson, T.D. Landis y L.E. Riley. 2007. Roadside revegetation. An integrated approach to establishing native plants. Federal Highway Administration, Western Federal Lands Highway Division, Vancouver, Canada.

Thrall, P.H., D.A. Millsom, A.C. Jeavons, M. Waayers, G.R. Harvey, D.J. Bagnall, J. Brockwell. 2005. Seed inoculation with effective root-nodule bacteria enhances revegetation success. *Journal of Applied Ecology* 42:740-751

Titus, J.H., y R. Del Moral. 1998. The role of mycorrhizal fungi and microsites in primary succession on Mount St. Helens. *American Journal of Botany* 85: 370-375.

Tognetti, R., M. Michelozzi y A. Giovanelli. 1997. Geographical variation in water relations, hydraulic architecture and terpene composition of Aleppo pine seedlings from Italian provenances. *Tree Physiology* 17:241-250.

Tormo, J., E. Bochet y P. García-Fayos. 2009. Restauración y revegetación de taludes de carreteras en ambientes mediterráneos semiáridos: procesos edáficos determinantes para el éxito. *Ecosistemas*. 18:79-90.

Tsakalimi, M., T. Zagas, T. Tsitsoni y P. Ganatsas. 2005. Root morphology, stem growth and field performance of seedlings of two Mediterranean evergreen oak species raised in different container types. *Plant and Soil* 278:85-93.

Valiente-Banuet, A., y M. Verdú. 2008. Temporal shifts from facilitation to competition occur between closely related taxa. *Journal of Ecology* 96:489-494.

Vallas-Cuesta, J., P. Villar-Salvador, J. Peñuelas Rubira, N. Herrero Sierra, S. Domínguez Lerena y J.L. Nicolás Peragón 1999. Efecto del aviveramiento prolongado sin riego en la calidad funcional de los brinzales de *Pinus halepensis* Mill. y su desarrollo en campo. *Montes* 58:51-58.

Vallejo, V.R., J. Cortina, A. Vilagrosa, J.P. Seva y J.A. Alloza. 2003. Problemas y perspectivas de la utilización de leñosas autóctonas en la restauración forestal. En *Restauración de Ecosistemas Mediterráneos*, eds. J.M. Rey Benayas, T. Espigares y J.M. Nicolau. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, pp. 11-42.

Van den Driessche, R. 1991a. Influence of container nursery regimes on drought resistance of seedlings following planting. I. Survival and growth. *Canadian Journal of Forest Research* 21:555-565.

Van den Driessche, R. 1991b. New root growth of douglas-fir seedlings at low carbon dioxide concentration. *Tree Physiology* 8:289-295.

Vilagrosa, A., J. Cortina, E. Gil-Pelegri y J. Bellot. 2003. Suitability of drought-preconditioning techniques in Mediterranean Climate. *Restoration Ecology* 11:208-216.

Villar, R., J. Ruiz-Robledo, J.L. Quero, H. Poorter, F. Valladares y T. Marañón. 2008. Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. En: *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. 2ª Edición. F. Valladares, eds. OAPN, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid :121-227.

Villar-Salvador, P. 2003. Importancia de la calidad de la planta en los proyectos de revegetación. In

Restauración de Ecosistemas en Ambientes Mediterráneos, J.M. Rey Benayas, T. Espigares Pinilla y J.M. Nicolau Ibarra, eds. Universidad de Alcalá /Asociación Española de Ecología Terrestre, Alcalá de Henares, p. 65-86.

Villar-Salvador, P., R. Planelles, E. Enríquez y J. Peñuelas Rubira. 2004. Nursery cultivation regimes, plant functional attributes, and field performance relationships in the Mediterranean oak

Quercus ilex L. *Forest Ecology and Management* 196:257-266.

Villar-Salvador, P., F. Valladares, S. Domínguez-Lerena, B. Ruiz-Díez, M. Fernández-Pascual, A. Delgado y J.L. Peñuelas. 2008. Functional traits related to seedling performance in the Mediterranean leguminous shrub *Retama sphaerocarpa*: insights from a provenance, fertilization, and rhizobial inoculation study. *Environmental and Experimental Botany* 64:145-154.