



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-222

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Factores claves para la gestión de la regeneración natural en pinares mediterráneos

RUANO, I.¹ y BRAVO, F.^{1,2}

¹ Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), Universidad de Valladolid-INIA. Av. Madrid

² Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Campus de Palencia-Universidad de Valladolid.

irene@pvs.uva.es

Resumen

La regeneración natural es un proceso complejo compuesto por diferentes sub-procesos los cuales pueden verse afectados por variados factores. Identificar esos factores y definir sus efectos durante todo el proceso es clave.

El objetivo de esta tesis fue identificar los factores claves de la regeneración natural y sus efectos para desarrollar alternativas de gestión y así abordar las consecuencias del cambio climático en los bosques mediterráneos. Para lograr este objetivo se han analizado diferentes factores a lo largo de los sub-procesos de la regeneración natural de *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis*. Se han utilizado diferentes diseños experimentales como el diseño en split-plot o los anillos Nelder, al igual que diferentes métodos estadísticos para analizar los datos disponibles, desde análisis de la varianza a modelos mixtos generalizados.

Los resultados obtenidos en esta tesis sugieren que el clima y los factores relacionados con la densidad de la masa son claves para obtener una regeneración natural exitosa. En términos de gestión forestal sería posible mejorar las condiciones para la regeneración llevando a cabo tratamientos selvícolas que mejoren los factores relacionados con la masa. Además el conocimiento del impacto del clima puede ayudar para anticipar tratamientos selvícolas que alivien dicho impacto.

Palabras clave

modelización, precipitación, temperatura, condiciones de micro-sitio; *Pinus pinaster*; *Pinus halepensis*; fuego

1. Introducción

La regeneración natural es un proceso complejo que se puede dividir en diferentes sub-procesos: producción de semilla, dispersión de semilla, almacenamiento de semilla, germinación y establecimiento (HARPER, 1977; PRICE ET AL., 2001). Se puede producir una gran pérdida de potencial reproductivo entre la producción de semilla y el establecimiento del regenerado por lo que la regeneración natural se considera como el momento más crítico de la dinámica de las masas forestales (CLARK ET AL., 1999) porque su objetivo principal es conseguir la renovación de la masa forestal para perpetuar el bosque.

Durante todo el proceso diferentes factores y las interacciones entre ellos pueden afectar el éxito de la regeneración, poniéndolo en riesgo. Se pueden definir dos grandes grupos de factores potenciales: factores intrínsecos al proceso y factores extrínsecos. Algunos de los factores intrínsecos al proceso pueden ser las características edáficas y la topografía, pero uno de los más importantes es

el factor climático: temperatura, humedad y los regímenes de radiación. Por otro lado los factores extrínsecos están relacionados con la actividad humana, como pueden ser el pastoreo, los incendios provocados, el cambio de uso del suelo, los tratamientos selvícolas... (RODRÍGUEZ-GARCÍA ET AL., 2008). La clave es identificar qué factores son determinantes y cómo responden las especies vegetales a ellos para poder diseñar las estrategias selvícolas adecuadas para obtener una regeneración exitosa (PRICE ET AL., 2001). Dichas estrategias se deben basar en el conocimiento de las respuestas a diferentes tipos, tamaños e intensidades de perturbaciones durante todo proceso (COATES & BURTON, 1997).

Una de los principales factores para la regeneración natural es el clima. En los ecosistemas mediterráneos existen unas condiciones climáticas particulares, caracterizadas por inviernos fríos e húmedos y veranos secos y calurosos, con una fuerte sequía (RUMNEY, 1968, SCARASCIA-MUGNOZZA ET AL., 2000, RODÓ Y COMÍN, 2001). Además se caracteriza por una gran variabilidad interanual en términos de precipitación, con eventos ocasionales y violentos, muy poco previsibles y de difícil modelización. Esto complica el análisis y las predicciones del efecto de la disponibilidad hídrica, que además es uno de los principales factores controladores del funcionamiento ecológico en estos ecosistemas (JOFFRE ET AL., 2001, RODÓ Y COMÍN 2001). Por último aparecen vientos fuertes y secos que favorecen los incendios forestales (SCARASCIA-MUGNOZZA ET AL., 2000).

2. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es identificar los factores claves durante la fase de regeneración en los pinares mediterráneos y conocer sus efectos para desarrollar alternativas de gestión adecuadas frente al cambio climático. Para llevarlo a cabo en esta tesis se han abordado cuatro estudios en diferentes masas de *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis*:

Estudio I. Las condiciones climáticas extremas limitan la disponibilidad de semilla para lograr la regeneración natural de las masas de *Pinus pinaster* (RUANO ET AL 2015b)

Estudio II. La depredación de semillas de *Pinus pinaster* después de la dispersión: factores clave y sus efectos en el banco de semillas (RUANO ET AL 2015a)

Estudio III. Efecto de los clareos en el crecimiento y el potencial reproductivo en la regeneración post-fuego de *Pinus halepensis* (RUANO ET AL 2013).

Estudio IV. Interacciones intra- e inter-específicas en plántulas de pinos mediterráneos bajo diferentes densidades de masa usando el diseño de anillos Nelder.

En la Figura 1 se presenta un esquema general de la tesis donde, a lo largo de los diferentes sub-procesos de regeneración natural, se muestran mediante iconos los factores clave que se han analizado en cada uno de los estudios realizados. Además se indica la referencia de los estudios publicados en revistas de impacto.

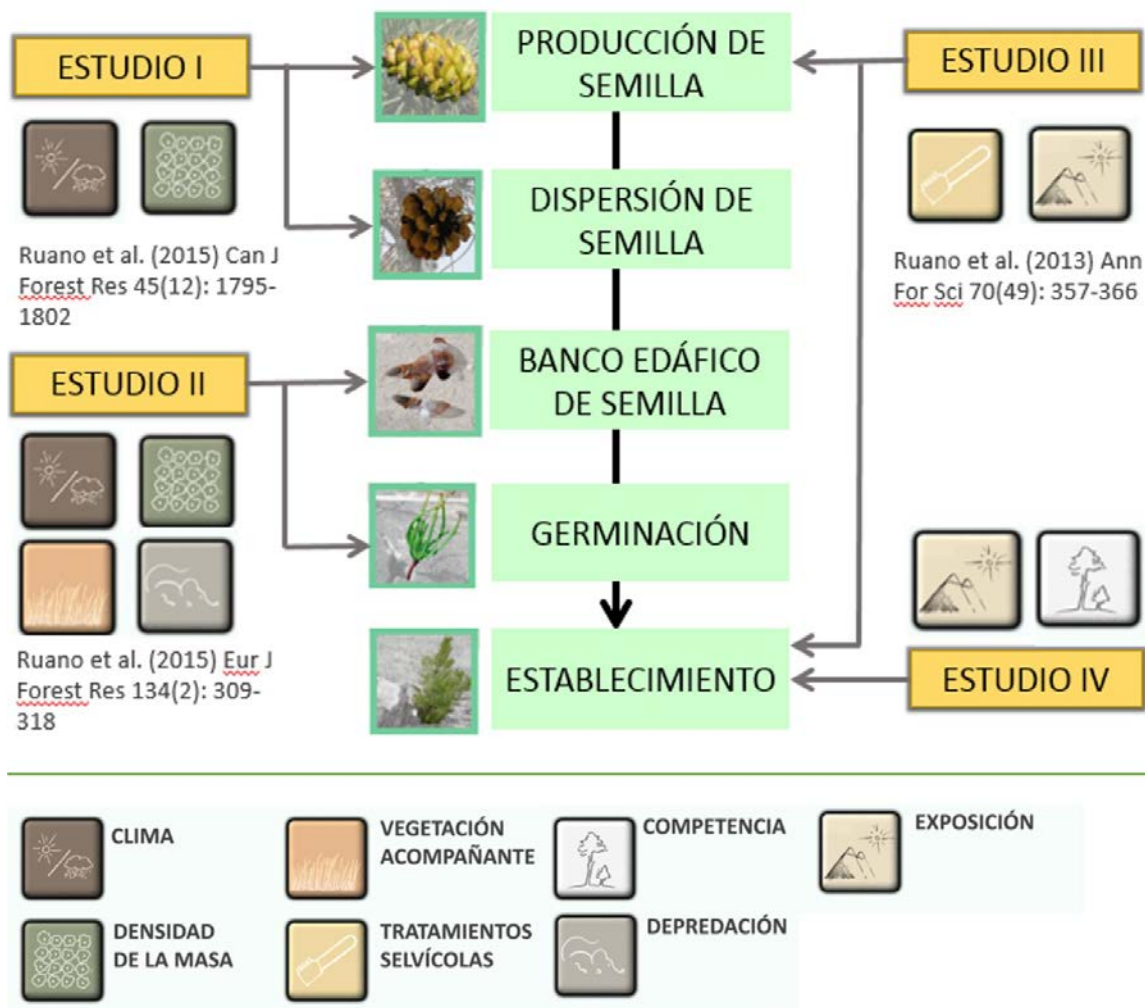


Figura 1. Esquema de la tesis presentada: Fases de la regeneración analizadas en cada estudio indicando los factores estudiados. Se indican las referencias de los estudios que están publicados

3. Metodología

Para poder cumplir los objetivos propuestos en esta tesis se han realizado cuatro estudios en tres dispositivos experimentales.

El sitio experimental de Mata de Cuéllar (Segovia) se encuentra en una masa de continua de *Pinus pinaster* donde se instalaron 10 parcelas permanentes, mediante un diseño en split-plot, con distintas intensidades de corta. En este sitio experimental se está llevando a cabo desde 2004 un seguimiento integrado de la regeneración natural de esta especie teniendo instalado en cada parcela distintos dispositivos (Figura 2). Trampas para la recogida de lluvia de semillas, subparcelas de control de germinación y supervivencia del regenerado y puntos de control de la depredación. En este sitio experimental se realizaron los estudios I y II, que analizan la producción y dispersión de semilla y su depredación en el banco edáfico.

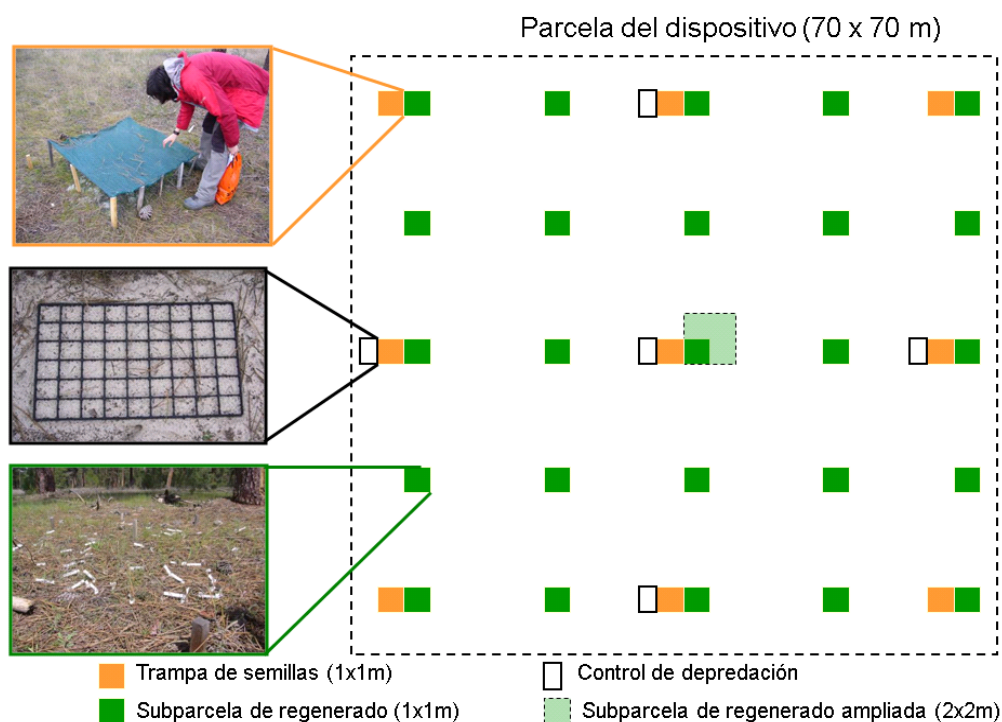
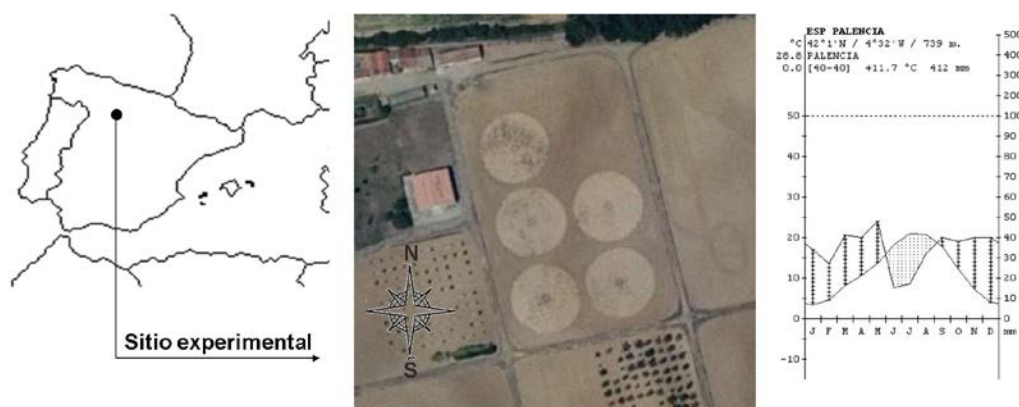


Figura 2. Esquema de los ensayos instalados en las parcelas del dispositivo experimental de Mata de Cuéllar (Segovia)

El sitio de manejo adaptativo de Moratalla (Murcia) está situado en una masa de *Pinus halepensis* regenerada después de un incendio y tratada con clareos semi-sistemáticos debido a la alta densidad de regeneración post-fuego producida. En este caso se instalaron 29 parcelas siguiendo un diseño factorial considerando dos factores (tiempo desde el tratamiento y exposición) para poder analizar el efecto de los clareos sobre el crecimiento, la biomasa y el potencial reproductivo. El potencial reproductivo se analizó contando los conos considerando tres tipos: nuevos, maduros y serótimos. Además se apearon árboles para poder realizar análisis dendroecológicos y así conocer el crecimiento anual después del tratamiento y estimar la biomasa del fuste. En este sitio se realizó el estudio III.

Por último el ensayo de densidad mediante diseño de anillos Nelder está situado en Calabazanos (Palencia), en el antiguo vivero forestal de la Junta de Castilla y León. Este ensayo es una plantación de *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis* siguiendo el diseño de anillos Nelder. Este diseño permite analizar distintas densidades de plantación en una misma parcela y en un espacio relativamente pequeño en comparación a los diseños tradicionales. Consiste en una parcela circular que contiene anillos concéntricos y a su vez se definen radios que unen el centro con el anillo exterior. En las intersecciones de los radios y los anillos se sitúa un árbol.

Este ensayo de densidad está formado por 5 dispositivos. Cada uno de ellos están formados por 12 anillos para analizar 10 densidades diferentes entre 1000 y 80000 plántulas/ha, para comprobar el efecto de altas densidades en la regeneración. Además se mezclaron las dos especies para analizar las interacciones inter-específicas. En este ensayo se realizó el estudio IV.



Diseño experimental:

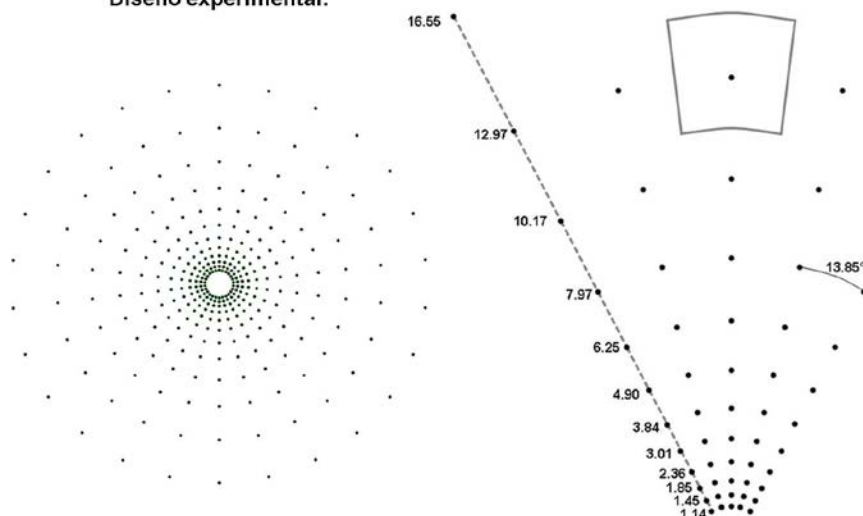


Figura 3. Localización del sitio experimental. El diseño experimental siguiendo el diseño de Nelder (1962): cada punto es una planta; distancias desde el centro de la parcela y el ángulo entre radios; superficie disponible para cada planta. Fuente del climodiagrama: Rivas-Martínez y Rivas-Sáenz (1996-2009)

4. Resultados

4.1 Producción y dispersión de semilla

Se analizaron los datos de dispersión de semilla recogidos durante diez años en el sitio experimental de Mata de Cuéllar (Segovia). Con estos datos se ajustó un modelo lineal mixto generalizado para conocer el efecto del clima y la densidad de la masa en el patrón interanual de la dispersión de semillas de *Pinus pinaster*. También se analizó el efecto de los clareos y la exposición en el potencial reproductivo de la regeneración post-fuego de *Pinus halepensis*, considerando el potencial reproductivo como el número de conos.

Tras analizar las variables climáticas potencialmente significativas a lo largo de los procesos fenológicos de producción y dispersión de la semilla se encontró que las variables significativas fueron la temperatura mínima en octubre dos años antes de la dispersión (momento del crecimiento primario del cono), la precipitación en abril un año antes de la dispersión (momento del crecimiento secundario del cono) y la precipitación de diciembre y noviembre un año antes de la dispersión (momento de la maduración del cono). Para analizar el efecto de la densidad de la masa se estimó un

índice espacial calculado como la suma del inverso de las distancias entre la trampa y cada árbol potencialmente fuente de semilla, con un límite de 20 metros. Este índice lo llamamos índice de fuente de semilla y también resultó significativo. Finalmente el mejor modelo ajustado en términos de AIC fue (Tabla 5):

$$E[\widehat{y_{ljk}}] = \exp^{\widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 \cdot SSI + \widehat{\beta}_2 \cdot \log(SSI+1) + \widehat{\beta}_3 \cdot \frac{TminOct}{10} + \widehat{\beta}_4 \cdot \frac{P_{Apr}}{100} + \widehat{\beta}_5 \cdot \frac{P_{OctNov}}{100} + \widehat{\beta}_6 \cdot \log\left(\frac{P_{OctNov}}{100}\right) + u_i + u_{ij}}$$

Dónde: SSI: índice de fuente de semilla; TminOct: temperatura mínima en octubre dos años antes de la dispersión; PApr: precipitación en abril un año antes de la dispersión; POctNov: precipitación en octubre y noviembre un año antes de la dispersión.

Tabla 1. Efectos fijos ajustados: parámetros estimados, error estándar y p-valor

Efecto fijo	Parámetro	Estimación	Error estándar	p-valor
Término independiente	β_0	2,591	0,138	<2·10-16
índice de fuente de semilla (SSI)	β_1	-1,612	0,384	2,67·10-5
log (SSI + 1)	β_2	4,305	0,730	3,64·10-9
TminOct /10 (crecimiento primario)	β_3	-0,421	0,070	<2·10-16
PApr /100 (crecimiento secundario)	β_4	0,692	0,046	<2·10-16
POctNov /100 (maduración del cono)	β_5	-0,833	0,036	2,5·10-9
log (POctNov)/100 (maduración del cono)	β_6	0,405	0,024	<2·10-16

Se analizó el potencial reproductivo mediante el número de conos de la regeneración post-fuego de *Pinus halepensis* en el sitio de manejo adaptativo de Moratalla (Murcia). Concretamente se ajustó un modelo lineal mixto considerando tres factores: años desde el tratamiento, exposición y tipo de cono, en función de su nivel de maduración. Finalmente sólo resultaron significativos los años desde el tratamiento, el tipo de conos y la interacción entre ambos.

Al analizar las interacciones entre los dos factores se puede afirmar que el número medio de conos nuevos fue significativamente mayor 2 años después del tratamiento aunque no se encontraron diferencias significativas con las zonas tratadas hacía 3 y 5 años. Por otro lado el número menor de conos nuevos se encontró en las zonas control aunque no se encontraron diferencias significativas con las zonas tratadas hacía tres y cuatro años. El número medio de conos maduros fue significativamente mayor 5 años después de la clara, sin diferencias significativas con las zonas tratadas hacía 4 años. A su vez el número menor de conos maduros se observó en las zonas control, sin diferencias significativas con las zonas tratadas hacía dos y tres años. Por último el número de conos seróticos fue significativamente mayor 5 años después del tratamiento, sin encontrar diferencias entre el resto de niveles del factor (Figura 4).

Los conos nuevos fueron significativamente más abundantes que los conos maduros y seróticos a los dos y tres años del tratamiento sin embargo los conos maduros fueron significativamente más abundantes que los conos nuevos a los cuatro años. En cambio a los cinco años del tratamiento no hubo diferencias significativas entre los conos nuevos y maduros. Los conos seróticos tuvieron siempre valores menores aunque no hubo diferencias significativas con los conos maduros en las

zonas control y a los dos y tres años del tratamiento. Finalmente cabe resaltar que en las zonas control no hubo diferencias significativas entre los tipos de conos (Figura 4).

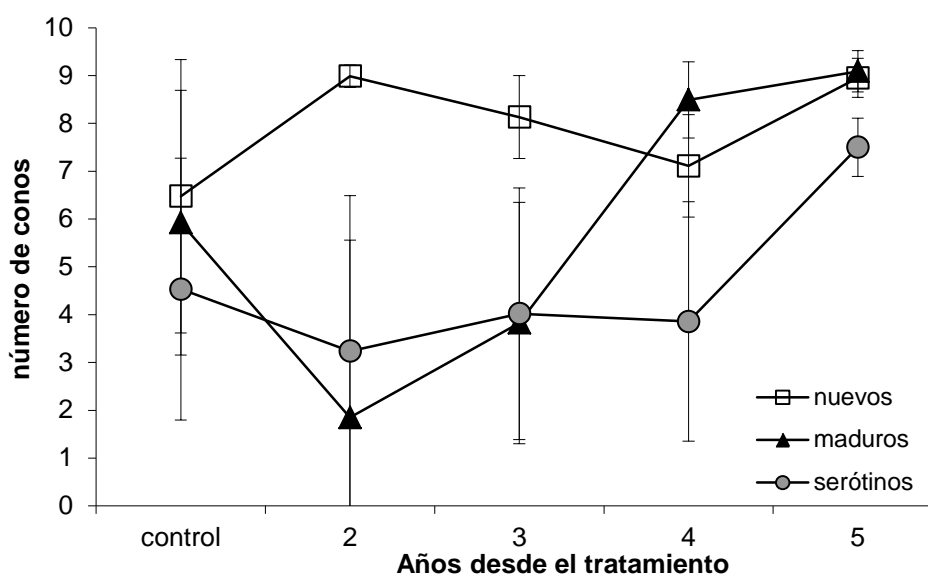


Figura 4. Valores medios del potencial reproductivo transformado dependiendo de los años desde el tratamiento considerando tres tipos de conos.

4.2 Banco edáfico de semillas

Los datos recogidos en los puntos de control de la depredación del sitio experimental de Mata de Cuéllar (Segovia) fueron analizados para conocer los factores clave que afectan al almacén de semillas edáfico de *Pinus pinaster*. Durante tres años se controló la depredación de las semillas, sin identificar los depredadores potenciales.

En los puntos de control se ponía la misma cantidad de semilla que se recogía en la trampa de captura de la lluvia de semillas adyacente, lo que permitió analizar la depredación en función de la lluvia de semillas. Así se puede hacer un análisis temporal del banco de semillas. La lluvia de semillas comienza en primavera y se produce un máximo en verano. Por otro lado la depredación es baja hasta otoño, cuando se reduce rápidamente la densidad de semillas del suelo.

Para este análisis se ajustó un modelo lineal generalizado considerando como variable dependiente la densidad de semillas en el suelo a la primavera siguiente de la dispersión, la cual sigue una distribución Poisson, y como variables explicativas se analizaron diferentes variables como la lluvia de semillas, condiciones de micro-sitio y la sequía estival. Finalmente las variables explicativas que mejor se ajustaron fueron: la distancia al tocón más cercano, el número de árboles en 200 m², el área basimétrica en 200 m², el porcentaje de herbáceas, el porcentaje de pinocha, el porcentaje de leñosas y el índice de sequía de Walter. Este índice se calcula como la temperatura media diaria de junio a agosto - 0,333·precipitación media diaria de junio a agosto por lo que valores altos indican mayor sequía. Además se incluyó en el modelo el cuadrado de la lluvia de semillas ya que fue la transformación que mejor se ajustó (Tabla 2).

De acuerdo con los parámetros estimados (Tabla 2) hay un efecto cuadrático positivo significativo entre la lluvia de semillas y la densidad de semillas la primavera siguiente (p -valor $>0,05$). De igual manera, hay un efecto significativamente positivo entre dicha densidad de semillas, el área basimétrica en 200 m² y la distancia al tocón más cercano. Sin embargo se observó un efecto significativamente negativo entre la densidad de semillas y el número de árboles en 200 m². Las coberturas de especies herbáceas, leñosas y la pinocha tienen un efecto significativamente positivo. Por último el índice de sequía de Walter también muestra un efecto significativamente positivo.

Tabla 2. Modelo lineal generalizado ajustado. Variables explicativas significativas (transformación cuadrática de la lluvia de semillas), parámetros estimados, error estándar, Chi-cuadrado de Wald y p -valor.

Variable explicativa	Parámetro estimado	Error estándar	Chi-cuadrado de Wald	p -valor
Término independiente	-20,1390	2,8597	49,59	<0,0001
(lluvia de semillas) ²	0,0002	0,0000	133,79	<0,0001
Distancia al tocón más cercano	0,1057	0,0100	110,84	<0,0001
Número de árboles en 200 m ²	-0,5109	0,0891	32,85	<0,0001
Área basimétrica en 200 m ²	1,7227	0,6303	7,47	0,0063
Porcentaje de herbáceas	0,0156	0,0024	43,05	<0,0001
Porcentaje de pinocha	0,0066	0,0028	5,70	0,0170
Porcentaje de leñosas	0,1000	0,0117	73,67	<0,0001
Índice de sequía de Walter	0,9381	0,1389	45,61	<0,0001

4.3 Establecimiento

Se han analizado el efecto de los clareos que se realizaron durante 5 años en la regeneración post-fuego de *Pinus halepensis*, surgida después del gran incendio de 1994 en Moratalla (Murcia). Concretamente se analizó el efecto de los clareos a lo largo del tiempo y la exposición de la masa en el tamaño, la biomasa del fuste y el crecimiento anual. Por otro lado se analizaron las interacciones intra- e inter-específicas entre plántulas de *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis*.

El tamaño del regenerado post-fuego se analizó mediante el diámetro en la base y la altura. Estas variables se analizaron mediante dos métodos estadísticos. Por un lado se analizó el tamaño de todos los pies medidos en las parcelas del sitio de manejo adaptativo de Moratalla (Murcia) mediante un análisis de la varianza considerando dos factores: tiempo desde el tratamiento (control, 2, 3, 4 y 5 años) y exposición (solana y umbría). Por otro lado, se analizó el tamaño de los pies apeados mediante un análisis de la covarianza. Las rodajas en la base fueron medidas con métodos dendrocronológicos lo que permite conocer el crecimiento anual de esos ejemplares, por lo que en este análisis se consideran los mismos factores que en el análisis de la varianza pero se incluye como covariable el crecimiento previo al tratamiento. Estos dos análisis se ajustaron para las mismas variables pero el tamaño muestral del análisis de la covarianza fue menor ya que se analizó una submuestra del análisis de la covarianza.

El análisis fue estadísticamente mejor con el análisis de la covarianza a pesar de que el tamaño muestral fuera menor, por lo que incluir una covariable mejora el resultado. Este caso los años desde el tratamiento y la interacción entre los años y la exposición fueron significativos para el diámetro en la base. En el caso de la altura los años desde el tratamiento y la exposición fueron significativos (p -

valor < 0,05). Los mayores diámetros en la base se encontraron en las zonas tratadas hacía cinco años aunque no se encontraron diferencias significativas con las zonas tratadas hacía dos y cuatro años (Figura 5). Por otro lado el diámetro fue significativamente menor en las zonas control. En cuanto a la altura, los valores más altos se observaron cinco años después del tratamiento aunque no hubo diferencias significativas con las parcelas tratadas hacía cuatro años. Por otro lado los valores más bajos se encontraron en las zonas control y las zonas tratadas hacía dos y tres años, sin encontrar diferencias significativas entre ellas. Finalmente la altura fue significativamente mayor en las zonas de umbría (Figura 5).

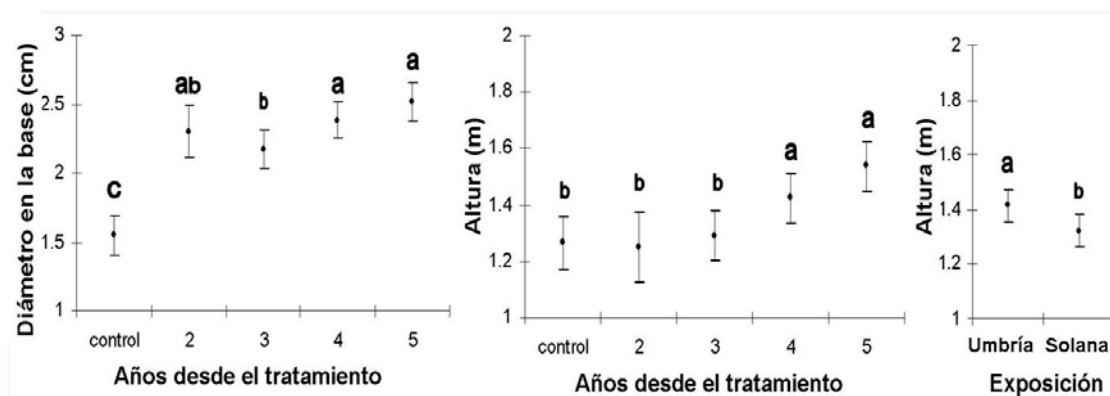


Figura 5. Valores medios y sus intervalos de confianza de las variables de tamaño transformadas del análisis de los pies analizados con métodos dendrocronológicos, en función de los años desde el tratamiento y la exposición. Letras minúsculas iguales sobre los valores medios indican que no hay diferencias significativas (p -valor > 0,05)

Por último el análisis dendrocronológico de las rodajas en la base permitió conocer el crecimiento anual de los regenerados apeados. Esta variable se analizó mediante un análisis de la covarianza considerando de nuevo dos factores: tiempo desde el tratamiento y exposición. Además se incluyeron dos covariables: crecimiento antes del tratamiento y la precipitación total anual. En este caso el tiempo desde el tratamiento y la interacción entre este factor y la exposición fueron significativos para el crecimiento anual (p -valor > 0,05). Esta variable fue significativamente mayor 3 y 4 años después del tratamiento sin diferencias significativas entre ellos. Tampoco se encontraron diferencias significativas entre los crecimientos anuales 2 y 5 años después del tratamiento. Los menores crecimientos se encontraron en las zonas no tratadas y 1 año después del tratamiento. Esto indica que 1 año después del tratamiento el crecimiento anual no aumenta comparado con las zonas sin tratar, ocurre un pico de máximo crecimiento a los 3-4 años del tratamiento y empieza a decrecer a los 5, pero en este caso sigue siendo mayor que en las zonas control (Figura 6).

Se ha pretendido analizar las interacciones intra- e interespecíficas entre plántulas de *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis* en el ensayo de densidad que se instaló siguiendo el diseño propuesto por Nelder (1962). El ensayo se instaló durante el otoño de 2013 para analizar el efecto de 10 densidades y tres niveles de mezcla de las especies. En el momento de la instalación se midieron los diámetros en la base y las alturas de todas las plántulas y se remidieron en el otoño del 2014. Es necesario mantener este tipo de dispositivos durante al menos 5-10 años para obtener conclusiones significativas por lo que en esta tesis se presenta un análisis preliminar.

En la tesis se presentaron las tendencias observadas analizando los promedios de los incrementos en diámetro en la base y altura de las 620 plántulas que tienen las cuatro plántulas vecinas vivas. Se puede observar que hay diferencias entre las dos especies analizadas, obteniendo mayores incrementos en las plántulas de *Pinus halepensis* en todos los casos. Las diferencias intra-específicas a lo largo de las densidades analizadas no son tan claras.

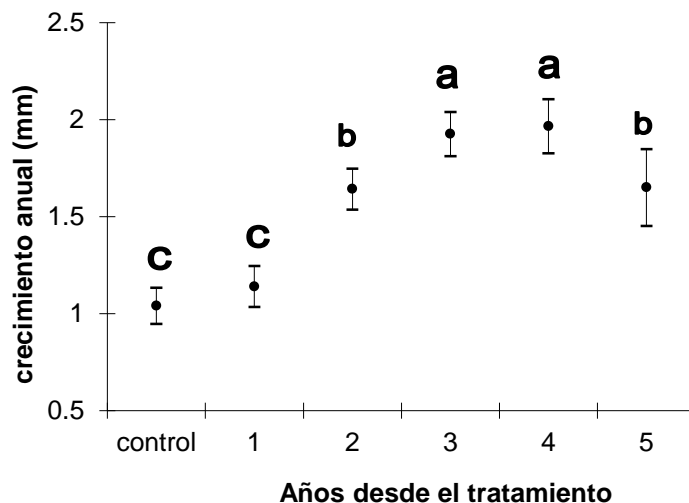


Figura 6. Valores medios y sus intervalos de confianza del crecimiento anual transformado (mm) en función de los años desde el tratamiento. Letras minúsculas iguales sobre los valores medios indican que no hay diferencias significativas (p -valor > 0,05)

Durante el primer año el 5,4% de las plántulas se secaron. Se intentó ajustar un modelo logístico binomial para estimar la probabilidad de supervivencia de las plántulas considerando tres factores: especie, densidad de la masa y mezcla de especies. Se realizaron diferentes ajustes pero ninguno de los factores considerados resultaron significativos, por lo que no se pudo cumplir este objetivo. Será necesario tener los datos de más años para poder realizarlo.

Una alternativa de análisis cuando existe mortalidad es el cálculo de índices de competencia para cada plántula. Así se obtiene un índice de competencia para cada individuo y no se eliminan del análisis plantas vivas que tienen vecinos muertos. Uno de los más usados para estos casos es el índice de Hegyi, que se calcula en función del tamaño y la distancia de las plantas que están dentro de un radio determinado. La clave es definir ese radio donde están las plantas que entran en competencia. Para definirlo en nuestro caso, siguiendo el experimento de Linares et al. (2009), calculando los índices con radios de 1 a 13 m, en incrementos de 0,5 m y las correlaciones de Pearson entre los índices y el incremento en diámetro. En todos los casos se obtuvo una correlación negativa pero el test de correlación fue significativo en todos los casos así que no pudimos definir el mejor radio. También se intentó definir el radio siguiendo el experimento de Linares et al. (2013) calculando las regresiones lineales entre los índices de Hegyi estimados y el incremento en diámetro. Pero en todos los casos las regresiones ajustadas fueron significativas y los coeficientes de determinación aumentaron al aumentar también el radio, pero siempre con valores bajos (menores de 0,20), lo que impidió conocer el radio óptimo para nuestro caso.

A pesar de la falta de conclusiones respecto al mejor radio para estimar el índice de Hegyi, en la Figura 6 se muestra la variación del índice a lo largo de los anillos del diseño, con el índice calculado con un radio de 5,5 m. Como era previsible, el índice tiende a disminuir al alejarse del centro, es decir, tiende a disminuir con densidades menores.

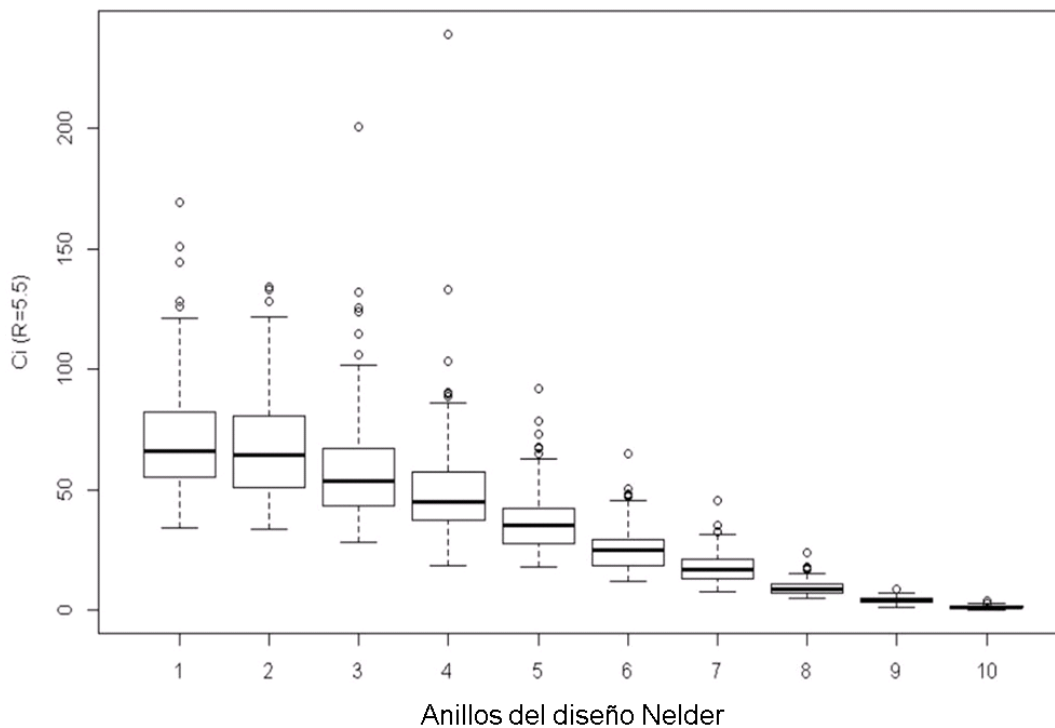


Figura 6. Diagrama de cajas con la variación del índice de Hegyi calculado con un radio de 5,5 m, a lo largo de los anillos de la parcela.

5. Discusión

Los resultados de esta tesis muestran el efecto de diversos factores durante todo el proceso de regeneración. Las condiciones climáticas resultaron claves en varios de los subprocesos: la temperatura y la precipitación durante el crecimiento primario y secundario de los conos y durante su maduración final resultaron claves para la cantidad de semilla dispersada. Además la sequía estival influye en la depredación de las semillas del banco edáfico. La densidad de la masa también ha resultado ser uno de los factores importantes en la regeneración natural. La cantidad de semilla dispersada puede ser insuficiente en masas con bajas densidades. Además la densidad de la masa crea unas condiciones de micro-sitio que también resultaron claves en el almacenamiento de semillas en el suelo. También se ha observado que los tratamientos selvícolas tienen un efecto positivo en la regeneración post-fuego cuando su densidad inicial es excesiva pero ese efecto positivo no es perceptible hasta pasados 2-5 años.

Hemos visto que durante todo el proceso de regeneración de los pinares mediterráneos son muchos los factores que influyen y que incluso interaccionan entre ellos. Uno de los factores claves son las condiciones climáticas, que influyen desde la producción de semilla hasta el establecimiento de las plántulas. Este factor no puede ser controlado por el gestor como la densidad de la masa y

además hay que tener en cuenta las previsiones debidas al cambio climático, donde se espera mayor irregularidad climática. Este aspecto complica todavía más el éxito de la regeneración natural ya que va a ser difícil encadenar un número suficiente de años consecutivos con las condiciones adecuadas para la regeneración forestal.

Otro aspecto a tener en cuenta es que esta tesis se ha basado en conocimientos fenológicos de las especies analizadas. Por ejemplo, el análisis del efecto del clima en la producción y dispersión de semilla se realizó conociendo los momentos de floración y polinización, crecimiento y maduración de los conos de *Pinus pinaster*. Ya se han observado cambios en la distribución de las especies (THUILLER ET AL., 2008) debido al cambio climático y aunque no hay estudios que analicen cambios en la fenología, las condiciones climáticas que se esperan podrían cambiar el comportamiento de las especies, adelantando o retrasando los procesos analizados.

MATNEY & HODGES (1991) definieron una densidad de al menos 2000 plántulas/ha como el mínimo requerido para obtener una regeneración exitosa aunque una densidad de 1000-1500 plántulas/ha puede ser suficiente en masas con estrés abiótico (RODRÍGUEZ-GARCÍA ET AL., 2010). Siguiendo como ejemplo el caso del *Pinus pinaster* en la Meseta Castellana, hemos encontrado diferentes factores que afectan negativamente los subprocesos de la regeneración natural. La cantidad de lluvia de semilla dispersada puede parecer suficiente pero la depredación de semillas en el suelo o las condiciones climáticas durante los primeros meses del establecimiento de las plántulas pueden hacer fracasar la regeneración (MIGUEL PÉREZ ET AL., 2008). En los resultados obtenidos en el análisis del efecto de la depredación sobre el banco de semillas edáfico se observaron porcentajes medios de depredación de aproximadamente el 75% en las parcelas control y las cortas totales, alrededor del 86% en las parcelas donde se cortó el 25% del área basimétrica y alrededor del 92% en las parcelas donde se cortó el 50%. Además RUANO ET AL. (2009) analizaron el efecto de las intensidades de corta y la disponibilidad hídrica en la germinación y la supervivencia de las plántulas durante los primeros dieciocho meses y observaron porcentajes de germinación de aproximadamente el 40% en las cortas a hecho, las parcelas control y las parcelas donde se cortó el 50% y alrededor del 60% en las parcelas donde se cortó el 25%. Además los porcentajes de supervivencia fueron de aproximadamente del 13% en el caso de las cortas a hecho, alrededor del 25% para las parcelas control y las parcelas donde se cortó el 50% y alrededor del 45% en las parcelas donde se cortó el 25%.

Con los resultados de estos trabajos podemos estimar de una manera aproximada si finalmente esa lluvia de semillas obtenida en el sitio experimental de Mata de Cuéllar (Segovia), que parecía abundante, será suficiente para obtener una regeneración natural de 2000 plántulas/ha: en el caso de las parcelas donde se cortó el 25% del área basimétrica se necesitaría una densidad de lluvia de semillas aproximada de 6 semillas/m²; 8 semillas/m² en las parcelas control; alrededor de 16 semillas/m² en las parcelas donde se aplicó una corta a hecho y 25 semillas/m² en las parcelas donde se cortó el 50% (Figura 7). Entonces si tenemos en cuenta nuestros resultados podemos asumir que las densidades de lluvia de semilla de las parcelas control y las parcelas donde se cortó el 25% sería suficiente incluso en las condiciones climáticas más desfavorables. Sin embargo la regeneración se puede ver comprometida en los otros casos. La densidad de lluvia de semillas media predicha en las parcelas donde se cortó el 50% fue aproximadamente 23 semillas/m², lo que podría ser una lluvia de semillas suficiente para regenerar con las condiciones climáticas actuales pero si estas condiciones se extreman se complica el éxito de la regeneración. Por último en el caso de las

cortas a hecho la lluvia de semillas no parece suficientemente abundante incluso con las mejores condiciones climáticas.

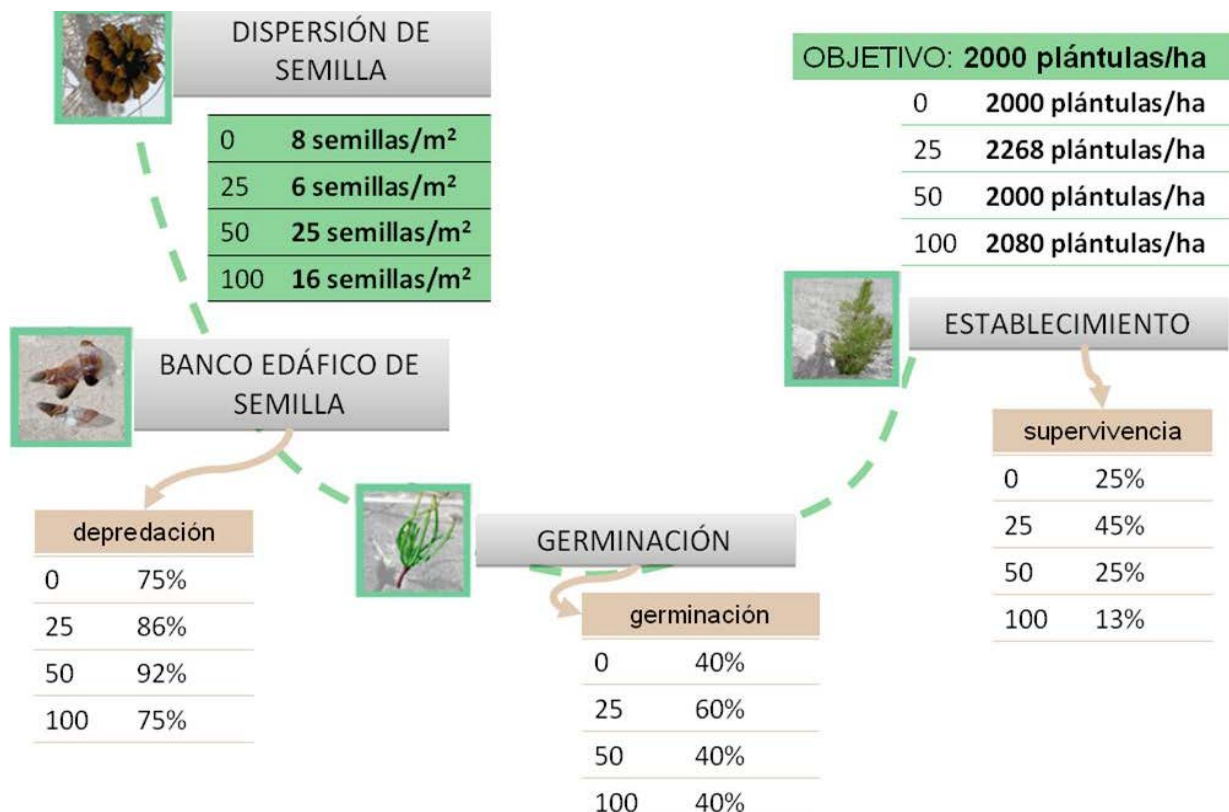


Figura 7. Proceso de regeneración natural en masas de pino negral de la meseta castellana: se estima la lluvia de semillas necesaria para cumplir el objetivo de 2000 plántulas/ha teniendo en cuenta las pérdidas de potencial reproductivo durante el proceso. Los valores varían según la intensidad de corta de la masa: 0: zona control donde no se aplicó ninguna corta; 25: zona donde se cortó el 25% del área basimétrica; 50: zona donde se cortó el 50% del área basimétrica; 100: zona donde se cortaron todos los árboles. Ejemplo de cálculo: en las zonas donde se cortó el 50% del área basimétrica: dispersión (25 semillas/m²) * remanente tras depredación (8%) * germinación (40%) * supervivencia (25%) = 2000 plántulas/ha

6. Conclusiones

Los resultados de esta tesis indican que la regeneración natural es un proceso complejo durante el cual múltiples factores tanto ambientales como selvícolas afectan el éxito del proceso. La regeneración puede estudiarse de forma continua o mediante el análisis individual de los subprocesos en que se pueden descomponer. La forma de abordar el estudio del proceso no es irrelevante ya que si se analiza de manera individual cada subproceso puede que no identifiquemos una única fase como un cuello de botella que conduzca al fracaso de la regeneración pero si se analiza como un proceso continuo podemos concluir que la pérdida en cadena de potencial reproductivo, desde los inicios de la producción de semilla hasta el establecimiento de la plántula, puede comprometer la regeneración natural de las masas mediterráneas sin identificar los procesos clave. En esta tesis se ha optado por el análisis de los diferentes subprocesos pero realizando una integración de los mismos para poder entender el proceso de regeneración en su conjunto.

Esta tesis está disponible en <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/20862>

7. Agradecimientos

I. Ruano agradece al programa de becas FPU del Ministerio de Educación su financiación. Gracias a todas las personas y entidades que han hecho posible esta tesis.

8. Bibliografía

AKAIKE, H., 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In 2nd International Symposium on Information Theory. Edited by Csáki F. Akadémiai Kiadó, Budapest, pp 267–281.

CLARK, J.S., SILMAN, M., KERN, R., MACKLIN, E., HILLERISLAMBERS, J., 1999. Seed dispersal near and far: patterns across temperate and tropical forest. *Ecology* 80, 1475–1494. doi:10.1890/0012-9658(1999)080[1475:SDNAFP]2.0.CO;2

COATES, K.D., BURTON, P. J., 1997. A gap-based approach for development of silvicultural systems to address ecosystem management objectives. *For. Ecol. Manage.* 99(3), 337-354

HARPER, J. L., 1977. Population biology of plants. Academic, London, United Kingdom.

HEGYI, F., 1974. A simulation model for managing Jack-pine stands. In Growth models for tree and stand simulation. Edited by Fries, J. Royal College of Forest, Stockholm, Sweden. pp 74-90

JOFFRE, R., RAMBAL, S., WINKEL, T., 2001. Respuestas de las plantas mediterráneas a la limitación de agua: desde la hoja hasta el dosel. En: Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional. Editado por: Zamora Rodríguez, R., Pugnaire, F. I., Pugnaire de Iraola, F. I. Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Asociación Española de Ecología Terrestre, Granada, España, pp. 37-65.

MATNEY, D.T., HODGES, D.J., 1991. Evaluating regeneration success. In Forest Regeneration Manual. Edited by Duryea M.L. and Dougherty P.M. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands pp. 321-331

MIGUEL PÉREZ, I., GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, S.C., ALÍA MIRANDA, R., GIL SÁNCHEZ, L., 2008. Growth phenology and mating system of maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton) in central Spain. *For. Syst.* 11, 193–204. doi:10.5424/768

NELDER, J.A., 1962. New kinds of systematic designs for spacing experiments. *Biometrics* 18(3): 283-307

PRICE, D.T., ZIMMERMANN, N.E., MEER, P.J. VAN DER, LEXER, M.J., LEADLEY, P., JORRITSMA, I.T.M., SCHABER, J., CLARK, D.F., LASCH, P., MCNULTY, S., WU, J., SMITH, B., 2001. Regeneration in Gap Models: Priority Issues for Studying Forest Responses to Climate Change. *Clim. Change* 51, 475–508. doi:10.1023/A:1012579107129

RODÓ, X., COMÍN, F., 2001. Fluctuaciones del clima mediterráneo: conexiones globales y consecuencias regionales. En: Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional. Editado por:

Zamora Rodríguez, R., Pugnaire, F. I., Pugnaire de Iraola, F. I. Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Asociación Española de Ecología Terrestre, Granada, España, pp. 1-35.

RODRÍGUEZ-GARCÍA, E., JUEZ, L., BRAVO, F., 2010. Environmental influences on post-harvest natural regeneration of *Pinus pinaster* Ait. in Mediterranean forest stands submitted to the seed-tree selection method. *Eur. J. For. Res.* 129, 1119–1128. doi:10.1007/s10342-010-0399-7

RODRÍGUEZ-GARCÍA, E., JUEZ, L., GUERRA, B., BRAVO, F., 2008. Análisis de la regeneración natural de *Pinus pinaster* Ait. en los arenales de Almazán-Bayubas (Soria, España). *For. Syst.* 16, 25–38.

RUANO, I., DEL PESO, C., BRAVO, F. 2015a. Post-dispersal predation of *Pinus pinaster* Aiton seeds: key factors and effects on below-ground seed bank. *Eur. J. Forest Res.* 134(2), 309-318

RUANO, I., MANSO, R., FORTIN, M., BRAVO, F. 2015b. Extreme climate conditions limit seed availability to successfully attain natural regeneration of *Pinus pinaster* in sandy areas of Central Spain. *Can. J. Forest Res.* 45(12) 1795-1802

RUANO, I., PANDO, V., BRAVO, F., 2009. How do light and water influence *Pinus pinaster* Ait. germination and early seedling development? *For. Ecol. Manage.* 258, 2647–2653. doi:10.1016/j.foreco.2009.09.027

RUANO, I., RODRÍGUEZ-GARCÍA, E., BRAVO, F. 2013. Effects of pre-commercial thinning on growth and reproduction in post fire regeneration of *Pinus halepensis* Mill. *Ann. For. Sci.* 70(4), 357-366

RUMNEY, G.R., 1968. *Climatology and the World's Climates*. Macmillan, London, United Kingdom

SCARASCIA-MUGNOZZA, G., OSWALD, H., PIUSSI, P., RADOGLU, K., 2000. Forests of the Mediterranean region: gaps in knowledge and research needs. *For. Ecol. Manage.* 132, 97–109. doi:10.1016/S0378-1127(00)00383-2

THUILLER, W., ALBERT, C., ARAÚJO, M.B., BERRY, P.M., CABEZA, M., GUISAN, A., HICKLER, T., MIDGLEY, G.F., PATERSON, J., SCHURR, F.M., SYKES, M.T., ZIMMERMANN, N.E., 2008. Predicting global change impacts on plant species' distributions: Future challenges. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 9, 137–152. doi:10.1016/j.ppees.2007.09.004