

UNIVERSIDAD DE LLEIDA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRARIA



TRABAJO FINAL DE GRADO

**DINÁMICA INICIAL DEL REGENERADO EN MASAS
DE PINO RODENO (*Pinus pinaster* Ait.) DEL PARAJE
NATURAL DE INTERÉS NACIONAL DE POBLET:
RECOMENDACIONES SILVÍCOLAS FRENTE A
NUEVOS ESCENARIOS DE GESTIÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GRADUADO EN INGENIERÍA FORESTAL

PRESENTADA POR

Eduard Muñoz Haro

TUTOR

Sergio de Miguel Magaña

Lleida, Octubre de 2017

Trabajo Final de Grado:

*«Dinámica inicial del regenerado en masas de pino rodeno (*Pinus pinaster* Ait.) del Paraje Natural de Interés Nacional de Poblet: Recomendaciones silvícolas frente a nuevos escenarios de gestión.»*

Autor: Eduard Muñoz Haro

Tutor: Dr. Sergio de Miguel Magaña

Lleida, Octubre de 2017

RESUMEN

La regeneración natural es un proceso determinante para el mantenimiento y conservación de las masas forestales. El estudio del efecto de los condicionantes climáticos, ecológicos y silvícolas en la dinámica inicial del regenerado es crucial para el desarrollo de prácticas forestales sostenibles, en vista de los escenarios ambientales cambiantes a los que los sistemas naturales se van a tener que enfrentar.

En el presente estudio se investigó la probabilidad de germinación, la densidad del regenerado de primer año, la mortalidad y el crecimiento medio anual del regenerado en una masa de *Pinus pinaster* de sesenta años de edad, ubicada en la Cordillera Prelitoral Catalana, al Noreste de España. El objetivo del estudio consistió en evaluar el efecto relativo del clima, de las claras, de las propiedades físico-químicas del suelo y de las características topográficas, en el desarrollo del regenerado.

Para el seguimiento del regenerado de *Pinus pinaster*, se realizaron muestreos anuales durante el período 2011-2015 en 28 parcelas permanentes de 10m x 10m, 13 de las cuales fueron sometidas a distintos tratamientos e intensidades de gestión.

Se desarrollaron modelos mixtos para la predicción de la densidad del regenerado de primer año, la mortalidad y el crecimiento primario y secundario medio anual de las plántulas. Los resultados obtenidos revelaron la existencia de un elevado número de factores relacionados con la emergencia, supervivencia y crecimiento de las plántulas. Concretamente, la gestión forestal y el clima fueron los factores más correlacionados con la probabilidad de regeneración y con la densidad del regenerado de primer año. La variable más influyente en el proceso de mortalidad del regenerado resultó ser la edad biológica del regenerado, la cual presentó una correlación de carácter negativo. En cuanto al crecimiento medio anual de las plántulas, el efecto del clima se antepuso a todos los grupos de factores evaluados.

ABSTRACT

Natural regeneration is a key process for the maintenance and conservation of forest ecosystems. Understanding the effect of climatic, ecological and silvicultural conditions on the early regeneration dynamics is crucial for sustainable forest management within the framework of future climate and global change scenarios that natural systems will have to face.

In this study we investigated the probability of germination, the density of seedlings (i.e., amount of seedlings per hectare), as well as the mortality and annual growth of the regeneration in sixty year-old *Pinus pinaster* stands located in the Pre-Coastal Range of Catalonia, northeastern Spain. The objective of the study was to evaluate the relative effect of climate, forest management, soil physicochemical properties and topographic characteristics on seedlings development and early regeneration dynamics.

The monitoring of *Pinus pinaster* regeneration was carried out through annual sampling during the period 2011-2015 in 28 permanent 10m x 10m plots, 13 of which were subjected to different thinning intensities.

Mixed-effects models were developed for the prediction of one-year-old seedlings density, annual mortality, as well as for annual primary and secondary growth of seedlings. The results obtained revealed several factors related to the occurrence, survival and growth of young seedlings. Specifically, forest management and climate were the factors most correlated with the probability of regeneration and the one-year-old seedling density. The most influential variable on seedling mortality was the age of the seedlings, showing a significant negative correlation. Meteorological conditions were found to be the key driver of seedling growth.

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Sergio de Miguel Magaña por su formidable labor como tutor del presente trabajo final de grado y por todos los conocimientos compartidos.

Agradecer igualmente al Dr. José Antonio Bonet Lledós por la plena confianza depositada en mí y por brindarme esta magnífica oportunidad.

Al Dr. Juan Martínez de Aragón por la incesante ayuda prestada en el desarrollo del trabajo.

Asimismo, expresar mi gratitud al Dr. Jesús Pemán García por su continua predisposición para la resolución de dudas, así como también por sus magníficas sugerencias y aportaciones en el proyecto.

Agradecer a todos los docentes que han contribuido en mi formación académica, proporcionándome los recursos y conocimientos necesarios para poder desempeñar de la mejor manera posible ésta profesión.

Finalmente, y no por ello menos importante, a mis familiares y en especial a mis padres por el constante apoyo moral ofrecido y por el inmenso sacrificio realizado para ofrecerme la posibilidad de formarme académicamente y personalmente, algo por lo que les estaré eternamente agradecido.

El autor

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DISTRIBUCIÓN	1
1.2. BIOLOGÍA REPRODUCTIVA.....	1
1.3. ECOLOGÍA.....	1
1.4. REGENERACIÓN NATURAL.....	2
1.5. CAMBIO GLOBAL	3
2. OBJETIVOS	4
3. MATERIALES Y MÉTODOS	5
3.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	5
3.2. MÉTODO EXPERIMENTAL	7
3.3. OBTENCIÓN DE DATOS	9
3.3.1. DATOS DE REGENERACIÓN	9
3.3.2. DATOS CLIMÁTICOS	10
3.3.3. DATOS DE SUELO	11
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	13
3.4.1. MODELIZACIÓN.....	13
3.4.2. SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE MODELOS	15
4. RESULTADOS.....	17
4.1. PROBABILIDAD Y DENSIDAD DEL REGENERADO DE PRIMER AÑO	17
4.2. MORTALIDAD ANUAL DEL REGENERADO	22
4.3. CRECIMIENTO MEDIO ANUAL DEL REGENERADO.....	24
5. DISCUSIÓN	27
5.1. PROBABILIDAD Y DENSIDAD DEL REGENERADO DE PRIMER AÑO	27
5.2. MORTALIDAD ANUAL DEL REGENERADO	29
5.3. CRECIMIENTO MEDIO ANUAL DEL REGENERADO.....	30
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SILVÍCOLAS	31
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS PARCELAS DE REGENERACIÓN NATURAL ESTABLECIDAS PARA LA TOMA DE DATOS (AB: ÁREA BASIMÉTRICA; S.N.M: SOBRE EL NIVEL DEL MAR).	7
TABLA 2. VALORES DE DENSIDAD Y ÁREA BASIMÉTRICA DE LAS PARCELAS DE REGENERACIÓN SOMETIDAS A TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS (AB: ÁREA BASIMÉTRICA).	8
TABLA 3. DATOS DE REGENERACIÓN DEL PERÍODO 2011-2015 OBTENIDOS DE LAS PARCELAS DE REGENERACIÓN (SD: DESVIACIÓN ESTÁNDAR).	9
TABLA 4. RESUMEN DE LOS DATOS CLIMÁTICOS MÁS RELEVANTES EN EL ESTUDIO DE LA REGENERACIÓN NATURAL, INTERPOLADOS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS ESPAÑOLAS Y CATALANAS DEL PERÍODO 2008-2015 (SD: DESVIACIÓN ESTÁNDAR; TME: TEMPERATURA MEDIA).	10
TABLA 5. RESUMEN DE LOS DATOS DE SUELO OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE SUELO RECOGIDAS EN LAS PARCELAS DE REGENERACIÓN (CIC: CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO; SD: DESVIACIÓN ESTÁNDAR; D: DIÁMETRO; PPM: PARTES POR MILLÓN).	12
TABLA 6. VALORES DE LOS PARÁMETROS DE EFECTOS FIJOS DE LOS MODELOS DE PROBABILIDAD DE REGENERACIÓN Y DE DENSIDAD DEL REGENERADO DE PRIMER AÑO (ABELIM: ÁREA BASIMÉTRICA ELIMINADA; COEF.: COEFICIENTE; EC.: ECUACIÓN; HSUELO5: HUMEDAD MEDIA DEL SUELO DEL MES DE MAYO; INTERV: INTERVENCIÓN; PPRIM: PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN LOS MESES DE PRIMAVERA; SE: ERROR ESTÁNDAR; SIGN.: SIGNIFICACIÓN ESTADÍSTICA; TMIN6: TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÍNIMAS DEL MES DE JUNIO; TPOSTINTERV: TIEMPO TRANSCURRIDO DESDE LA INTERVENCIÓN; ***: ALTAMENTE SIGNIFICATIVO).	17
TABLA 7. VALORES DE LOS PARÁMETROS DE EFECTOS FIJOS DEL MODELO DE DENSIDAD DE PLÁNTULAS REGENERADAS MUERTAS (COEF.: COEFICIENTE; EC.: ECUACIÓN; HRVERANO: HUMEDAD RELATIVA MEDIA DE LOS MESES DE VERANO; SE: ERROR ESTÁNDAR; SIGN.: SIGNIFICACIÓN ESTADÍSTICA; ***: ALTAMENTE SIGNIFICATIVO; **: BASTANTE SIGNIFICATIVO).	22
TABLA 8. VALORES DE LOS PARÁMETROS DE EFECTOS FIJOS DE LOS MODELOS DE CRECIMIENTO PRIMARIO Y SECUNDARIO MEDIO ANUAL DEL REGENERADO (COEF.: COEFICIENTE; CREC. PRIMARIO: CRECIMIENTO PRIMARIO MEDIO ANUAL; CREC. SECUNDARIO: CRECIMIENTO SECUNDARIO MEDIO ANUAL; EC.: ECUACIÓN; ETPPRIM: EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MEDIA DE LOS MESES DE PRIMAVERA; HR4: HUMEDAD RELATIVA MEDIA DEL MES DE ABRIL; PEND: PENDIENTE TOPOGRÁFICA; SE: ERROR ESTÁNDAR; SIGN.: SIGNIFICACIÓN ESTADÍSTICA; ***: ALTAMENTE SIGNIFICATIVO; *: SIGNIFICATIVO).	24

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO (MARCO DE CONTORNO ROJO) EN EL MAPA DE CATALUÑA.....	5
FIGURA 2. DIAGRAMA OMBROTÉRMICO DE GAUSSEN CONSTRUÍDO A PARTIR DE UNA SERIE CLIMATOLÓGICA DEL PERÍODO 1974-2014 OBTENIDA DEL CONJUNTO DE REJILLAS CUADRICULADAS DEL E-OBS (HAYLOCK ET AL. 2008) (P: PRECIPITACIÓN; T: TEMPERATURA).	6
FIGURA 3. VALORES DE PRECIPITACIÓN ANUAL DEL PERÍODO 1974-2014 PROCEDENTE DEL CONJUNTO DE REJILLAS CUADRICULADAS DEL E-OBS (HAYLOCK ET AL. 2008) (I: INVIERNO; O: OTOÑO; P: PRIMAVERA; V: VERANO).	6
FIGURA 4. CURVA ROC DEL MODELO DE PROBABILIDAD DE REGENERACIÓN (LÍNEA ROJA: PROBABILIDAD PRONOSTICADA POR EL MODELO; LÍNEA DISCONTINUA: LÍNEA DE REFERENCIA).	18
FIGURA 5. EFECTO DEL ÁREA BASIMÉTRICA EXTRAÍDA EN LAS CLARAS SOBRE LA DENSIDAD DEL REGENERADO DE PRIMER AÑO.	18
FIGURA 6. EFECTO DE LA HUMEDAD MEDIA DEL SUELO DEL MES DE MAYO SOBRE LA DENSIDAD DEL REGENERADO DE PRIMER AÑO.	19
FIGURA 7. EFECTO DE LA TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÍNIMAS DEL MES DE JUNIO SOBRE LA DENSIDAD DEL REGENERADO DE PRIMER AÑO (TME: TEMPERATURA MEDIA).	19
FIGURA 8. EFECTO DE LA HUMEDAD MEDIA DEL SUELO DEL MES DE MAYO SOBRE LA PROBABILIDAD DE REGENERACIÓN (GRÁFICO SUPERIOR) Y EFECTO DE LA HUMEDAD RELATIVA MEDIA DE LAS MÁXIMAS DEL MES DE ENERO SOBRE LA DENSIDAD DEL REGENERADO DE PRIMER AÑO (GRÁFICO INFERIOR).	20
FIGURA 9. EFECTO DEL ÁREA BASIMÉTRICA SOBRE LA HUMEDAD DEL SUELO EN EL MES DE MAYO (AB: ÁREA BASIMÉTRICA). .	21
FIGURA 10. EFECTO DE LA EDAD BIOLÓGICA DEL REGENERADO SOBRE LA TASA DE MORTALIDAD DEL REGENERADO.....	22
FIGURA 11. EFECTO DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN EL MES DE AGOSTO SOBRE LA TASA DE MORTALIDAD DEL REGENERADO.	23
FIGURA 12. EFECTO DE LA PENDIENTE TOPOGRÁFICA SOBRE EL CRECIMIENTO PRIMARIO MEDIO ANUAL DEL REGENERADO.	24
FIGURA 13. EFECTO DE LA TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÍNIMAS DEL MES DE ENERO (GRÁFICO SUPERIOR) Y DE LA PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN EL MES DE ENERO (GRÁFICO INFERIOR) SOBRE EL CRECIMIENTO PRIMARIO MEDIO ANUAL DEL REGENERADO.	25

1. INTRODUCCIÓN

1.1. DISTRIBUCIÓN

Pinus pinaster es una especie forestal característica de la cuenca del Mediterráneo occidental con presencia en España, Portugal, Sur de Francia, Italia, Marruecos, Argelia y Túnez (Ceballos & Ruiz de la Torre 2001). La distribución mayoritaria de la especie se encuentra en la Península Ibérica. Fuera de su área de distribución natural está considerada como una de las especies más invasoras del mundo (Invasive Species Specialist Group (ISSG) 2015).

Presente en prácticamente todo el estado, destacan las grandes formaciones de Galicia y del Sistema Central, Ibérico y Bético. Se estima que la superficie actual ocupada por *Pinus pinaster* en España supera los dos millones de hectáreas (2.400.000 ha) de las cuales resulta ser la especie dominante en 1.500.000 ha (Alía et al. 2009). Siendo en consecuencia una de las especies de pino que mayor superficie ocupa naturalmente en España y más ampliamente utilizada en la actividad repobladora.

Algunos autores aceptan la existencia de dos grupos o estirpes en España, que se encuadran en las subespecies *atlántica* o marítima y *mesogeensis* o mediterránea, la primera representada en el sector noroccidental peninsular y la segunda extendida por el Centro, Levante y Sur (Ceballos & Ruiz de la Torre 2001).

1.2. BIOLOGÍA REPRODUCTIVA

La floración de *Pinus pinaster* se extiende desde finales de marzo hasta principios de mayo. Las piñas alcanzan la madurez sexual a finales de verano o a principios de otoño del segundo año, pero la dehiscencia y caída de los piñones no tiene lugar hasta la primavera o verano del tercer año. La apertura de los conos femeninos no resulta definitiva, sino que las piñas se cierran al rehumedecerse pudiendo permanecer varios años en el árbol (Ceballos & Ruiz de la Torre 2001). Las buenas fructificaciones son frecuentes en la especie por lo que no condicionan las cortas. El carácter serótino de muchas procedencias permite que el árbol disponga de un banco aéreo de semilla viable en cualquier época del año, aunque con un mínimo otoñal asociado a la caída de las semillas y a la escasez de piñas maduras (Rodríguez et al. 2008).

1.3. ECOLOGÍA

Pinus pinaster es una especie pionera, de temperamento robusto que exige gran cantidad de luz para su desarrollo y que se caracteriza por su gran plasticidad ecológica (Rodríguez et al. 2007). Pudiéndose encontrar desde prácticamente el nivel del mar hasta los 1500-1700 metros de altitud (López 2006).

Resiste condiciones climáticas muy diversas, soportando desde climas de carácter típicamente mediterráneo hasta climas templados de tendencia oceánica. Presente en regiones con temperaturas medias anuales entre 10,1 °C y 14,6 °C y un período de heladas variable pudiendo superar los tres meses y medio (Alía et al. 2009).

Muestra preferencia por los suelos bien drenados, especialmente por los terrenos silíceos, sueltos y arenosos, aunque soporta también los suelos ácidos pobremente drenados. Se caracteriza por su marcada tolerancia a la cal, especialmente cuando tiene gran proporción de dolomita (dolomías cristalinas) o se desintegra en arenas de grano duro (mármoles cristalinos). Generalmente, aún en calizas, vive sobre suelos neutros (Ceballos & Ruiz de la Torre 2001).

1.4. REGENERACIÓN NATURAL

La regeneración natural es un proceso complejo conformado por varias etapas sucesivas en las que intervienen múltiples factores que condicionan el desarrollo futuro de los bosques. Éste es, en consecuencia, un proceso determinante para garantizar la continuidad espacial y temporal de las masas forestales. Los métodos de regeneración natural ofrecen, en general, soluciones eficientes y económicas a corto y largo plazo para la perpetuación de los ecosistemas naturales (Ruano et al. 2009).

El desarrollo de las distintas fases o etapas de la regeneración y la consecución de las mismas están íntimamente relacionadas con dos grandes grupos de factores: los factores ligados a las condiciones naturales, tales como el clima, suelo, topografía, predación y competencia inter e intraespecífica y los factores relacionados con el propio manejo o gestión de los bosques (del Peso et al. 2012).

Tanto en los ecosistemas templados como en los boreales de Europa y América del Norte se ha fomentado la regeneración natural. Ello explica el amplio conocimiento del proceso de regeneración sobre algunas especies de coníferas. Sin embargo, la extrapolación de esta información a las especies mediterráneas no siempre es posible como consecuencia de las diferencias ecológicas y climáticas existentes (Rodríguez et al. 2007).

Las investigaciones de regeneración natural de pináceas desarrolladas hasta la fecha en España se han centrado mayoritariamente en *Pinus sylvestris* (González & Bravo 2001), *Pinus nigra* (Lucas et al. 2016) y *Pinus halepensis* (Fernandez et al. 2008), dedicándose en gran parte al estudio de la regeneración post-incendio (Martín & Coll 2016; García et al. 2017).

Los estudios de regeneración natural realizados para *Pinus pinaster* son limitados pese a ser una de las especies más representativas del paisaje español y de mayor importancia en la industria forestal del norte peninsular (Barrio et al. 2006). La mayoría de los estudios existentes de dicha especie se han centrado en el efecto del fuego sobre el comportamiento del regenerado (Madrigal et al. 2005; Calvo et al. 2007; Fernandes & Rigolot 2007).

Dicha escasez de estudios explica el gran desconocimiento actual de cómo las condiciones estructurales y ambientales dentro de una masa controlan el establecimiento y desarrollo del regenerado de *Pinus pinaster* bajo diferentes tratamientos silvícolas (Rodríguez et al. 2007).

1.5. CAMBIO GLOBAL

El cambio climático es probablemente a día de hoy la mayor amenaza para el mantenimiento global de los bosques así como para la preservación de los bienes y servicios que estos ofrecen a la sociedad. Los bosques desempeñan un papel determinante en la mitigación del cambio climático, así como también las actividades silvícolas orientadas al fomento del secuestro del dióxido de carbono.

El estudio de la regeneración natural es crucial para el desarrollo de prácticas forestales sostenibles en vista de los escenarios ambientales cambiantes a los que los sistemas naturales se van a tener que enfrentar. En la región mediterránea, la mayoría de los modelos climáticos prevén reducciones en la cantidad total de lluvias y aumentos en la estacionalidad, lo que conduce a períodos de sequía más largos e intensos (IPCC 2014). Dichos cambios tendrán una mayor influencia en los momentos críticos de la dinámica del bosque, con especial incidencia en la fase de regeneración (Ruano et al. 2009). Ello justifica la necesidad de tener un buen conocimiento del comportamiento de las especies frente a dicho cambio para poder predecir las condiciones futuras.

En el caso del *Pinus pinaster* prácticamente no existen estudios centrados en los efectos del cambio climático en la dinámica inicial del regenerado. Solamente tratan la temática los estudios de Nuñez et al. 2009 y Ruano et al. 2009.

Es por todo ello que para maximizar la eficiencia de las prácticas silvícolas y adecuar dichas actuaciones frente a nuevos escenarios cambiantes es necesario conocer con mayor exactitud el comportamiento del regenerado en sus fases más incipientes frente características ambientales diferentes y ante intervenciones silvícolas distintas.

2. OBJETIVOS

Los objetivos específicos que se pretenden alcanzar con el presente trabajo de investigación son:

1. Determinar el efecto de los distintos tratamientos e intensidades de intervención silvícola en la fase inicial del proceso de regeneración natural de *Pinus pinaster*.
2. Determinar las variables ambientales más influyentes en la dinámica inicial de la regeneración natural de *Pinus pinaster*.
3. Construir modelos fiables que permitan explicar los procesos de germinación, mortalidad y crecimiento del regenerado de *Pinus pinaster* en sus fases más incipientes.
4. Valorar los resultados obtenidos desde una perspectiva silvícola para definir una serie de recomendaciones que mejoren y garanticen la estabilidad y la persistencia de las masas forestales frente a los nuevos escenarios de gestión.
5. Aportar nueva información para la gestión forestal sostenible de los sistemas forestales.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se desarrolla en una masa coetánea monoespecífica de *Pinus pinaster* de sesenta años de edad ubicada en la Cordillera Prelitoral Catalana, al Noreste de España ($41^{\circ} 21' 6.4728''$ latitud y $1^{\circ} 2' 25.7496''$ longitud). Con mayor exactitud, la zona de estudio se halla en la vertiente norte de la Sierra de Prades y a su vez se incluye en el Paraje Natural de Interés Nacional de Poblet, espacio natural de protección especial cuya superficie se encuentra en la comarca de la Conca de Barberà (Tarragona, España) y más concretamente en los términos municipales de Vimbodí y la Espluga de Francolí (Figura 1).



Figura 1. Localización de la zona de estudio (marco de contorno rojo) en el mapa de Cataluña.

La masa objeto de estudio abarca una superficie total de 25 hectáreas y procede de la actividad repobladora realizada a finales de los años sesenta. Pese a la homogeneidad de las densidades de plantación, en las repoblaciones realizadas en la zona existe una gran variedad de densidades (de 446 a 2657 pies·ha⁻¹) y de áreas basimétricas (de 20,9 a 81,7 m²·ha⁻¹), fenómeno asociado mayoritariamente a los procesos de mortalidad natural de origen biótico y abiótico.

La litología de la zona está fuertemente condicionada por su pertenencia a la Cordillera Prelitoral, así como por la influencia de la Depresión Central Catalana, lo que explica que los suelos sean mayoritariamente silíceos, con texturas franco-arenosas y con abundante pedregosidad. Los suelos de la zona de estudio son bastante homogéneos dada la poca extensión del área estudiada en comparación con otras regiones de Cataluña.

El clima del área de estudio es de carácter típicamente mediterráneo y viene caracterizado por una baja precipitación anual y unas temperaturas oscilantes entre los meses de invierno y verano. La distribución de las precipitaciones respecto a la variación de las temperaturas registradas evidencia la existencia de un período de déficit hídrico estival que se extiende desde mediados de junio hasta mediados de septiembre (Figura 2).

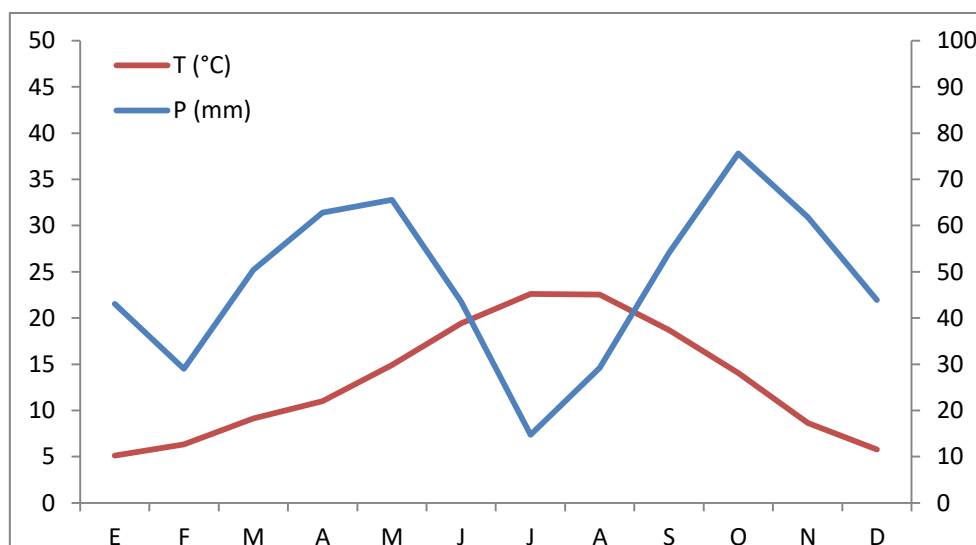


Figura 2. Diagrama ombrotérmico de Gausson construido a partir de una serie climatológica del período 1974-2014 obtenida del conjunto de rejillas cuadrículadas del E-OBS (Haylock et al. 2008) (P: Precipitación; T: temperatura).

La temperatura media anual es de 12,8 °C, la temperatura máxima media anual es de 16,6 °C y la temperatura máxima absoluta anual de 31 °C. La temperatura mínima media anual es de 7 °C mientras que la temperatura mínima absoluta anual de -6 °C. Los meses de enero y febrero son con diferencia los meses más fríos y los meses de julio y agosto los más cálidos.

La precipitación media anual varía entre 550 y 600 mm. El régimen de precipitaciones presenta cierta variabilidad anual (Figura 3). Los valores máximos de precipitación acumulada se registran en los meses de primavera y otoño, con un máximo de 101,7 mm en noviembre.

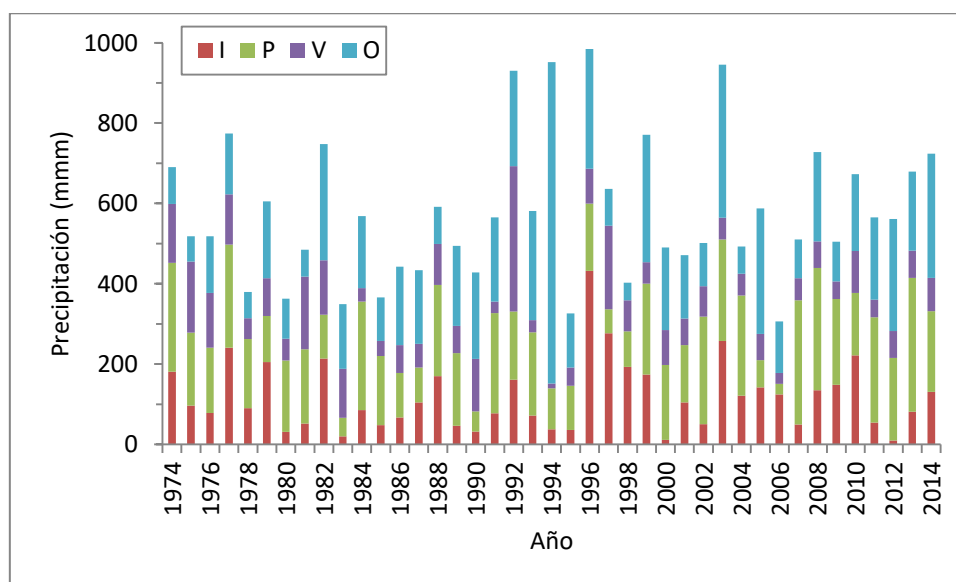


Figura 3. Valores de precipitación anual del período 1974-2014 procedente del conjunto de rejillas cuadrículadas del E-OBS (Haylock et al. 2008) (I: Invierno; O: otoño; P: primavera; V: verano).

Las mayores tasas de evapotranspiración potencial se alcanzan durante los meses de verano, con un máximo en julio. Y los niveles mínimos de evapotranspiración potencial se registran durante el período invernal con un mínimo en febrero, coincidiendo con el período de parada vegetativa de la planta.

3.2. MÉTODO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del presente estudio se establecieron aleatoriamente 15 parcelas cuadrangulares de regeneración natural de 100 m² (10 x 10 m) el año 2008 en la masa estudiada de *Pinus pinaster*. La disposición espacial de las parcelas pretendía incluir el amplio rango de orientaciones (de 10° a 360°), altitudes (de 594 a 1013 m s.n.m) y pendientes (del 3 al 23%) existentes en la zona. En 2009 se instalaron 15 nuevas parcelas en rodales con características semejantes a los del grupo establecido el año 2008. Sin embargo, a diferencia de las parcelas instaladas en 2008, las del 2009 se situaron en zonas dónde se pretendía realizar una actuación silvícola. Solamente 13 de las 15 parcelas establecidas en 2009, fueron sometidas a tratamientos culturales entre julio y agosto de 2009. En base a ello, se decidió excluir del estudio las 2 parcelas establecidas el año 2009 a las que no se les practicaron claras, y se trabajó con un total de 28 parcelas de regeneración natural (Tabla 1).

Tabla 1. Características de las parcelas de regeneración natural establecidas para la toma de datos (AB: Área basimétrica; s.n.m: sobre el nivel del mar).

Parcela	Coordenadas UTM		Actuación	Elevación (m s.n.m)	Orientación (°)	Pendiente (%)
	X (m)	Y (m)				
301	336601	4578428	No	1010	110	19
302	336848	4578660	No	1013	135	22
303	335531	4579373	No	903	20	19
304	335504	4579577	No	879	360	22
305	335839	4580525	No	744	90	18
306	335850	4580341	No	759	40	23
307	335673	4580200	No	796	60	18
308	335481	4579838	No	835	65	15
309	335445	4579709	No	852	20	13
311	336589	4580918	No	594	360	3
312	336755	4580848	No	633	10	23
313	336541	4580755	No	609	340	5
314	336407	4580600	No	612	10	8
315	336435	4580498	No	626	260	23
316	336211	4580113	No	644	30	3
301c	336575	4578391	Si	1010	110	19
302c	336865	4578620	Si	1013	135	22
303c	335531	4579332	Si	903	20	19
304c	335468	4579628	Si	879	360	22
305c	335852	4580525	Si	744	90	18
306c	335788	4580427	Si	759	40	23
307c	335708	4580207	Si	796	60	18
308c	335529	4579871	Si	835	65	15
309c	335437	4579786	Si	852	20	13
312c	336752	4580864	Si	633	10	23
313c	336545	4580697	Si	609	340	5
315c	336466	4580471	Si	626	260	23
316c	336209	4580048	Si	644	30	3

Previamente a la actuación, se asignaron aleatoriamente cinco intensidades de clara diferentes. Pese a ello y dado que las intensidades de clara inicialmente definidas variaron con la realización de los tratamientos, el área basimétrica real eliminada se distribuyó de forma uniforme entre 22.9% y 68.9%. El tratamiento silvícola al que se sometió el segundo grupo de parcelas consistió en la realización de claras sistemáticas. Previamente a la realización de la claras se realizó un desbroce eliminando la totalidad del estrato arbustivo. Todos los pies apeados fueron retirados manualmente de las parcelas, así como también, los restos de la corta. Los ejemplares de roble procedentes de rebrote que aparecieron a la primavera siguiente a la intervención fueron eliminados con el objetivo de mantener las mismas condiciones que en el año previo. Las parcelas fueron cercadas con valla metálica para evitar el pisoteo del regenerado en vista de la gran afluencia de gente que recibe la zona durante la campaña de recolección de setas. Las variables de masa de las parcelas de inventario se documentaron antes y después de las actuaciones silvícolas. Todos los árboles tanto de las parcelas control (no sujetas a tratamiento silvícola) como los de las parcelas intervenidas fueron inventariados, midiendo de cada uno de ellos el diámetro normal (a 1,30 m de altura) y la altura de un mínimo de 10 árboles por parcela. En las parcelas sometidas a intervención se tomaron además medidas de los diámetros de los tocones de los pies apeados, con la intención de estimar el diámetro normal y obtener la intensidad de clara y el área basimétrica exacta extraída en cada parcela (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de densidad y área basimétrica de las parcelas de regeneración sometidas a tratamientos silvícolas (AB: Área basimétrica).

Parcela	Densidad inicial (pies·ha ⁻¹)	Número de pies extraídos (pies·ha ⁻¹)	AB inicial (m ² ·ha ⁻¹)	AB extraída (m ² ·ha ⁻¹)	AB extraída (%)
301c	1783	1051	60.3	32.2	53.4
302c	1878	605	53.7	13.9	25.9
303c	1496	732	58.3	25.8	44.3
304c	1146	573	47.1	20.5	43.5
305c	2324	796	58.2	16.5	28.4
306c	1974	1274	54.1	28.6	52.9
307c	923	255	29.2	8.0	27.4
308c	1019	351	32.3	10.9	33.7
309c	1305	955	53.0	36.5	68.9
312c	1592	446	47.5	11.4	24.0
313c	1910	1242	73.7	44.4	60.2
315c	1496	382	61.2	14.0	22.9
316c	1464	955	76.3	44.9	58.8

3.3. OBTENCIÓN DE DATOS

3.3.1. DATOS DE REGENERACIÓN

Las 28 parcelas de regeneración fueron muestreadas anualmente durante el período 2011-2015. El muestreo de las parcelas se realizó durante los meses de primavera, una vez transcurrido el período de germinación de la especie. En todas las parcelas se consideró la totalidad del regenerado independientemente del tamaño.

En cada muestreo se contabilizó el número de plántulas y, de cada una de ellas, se tomaron medidas en campo de diámetro y altura. Las mediciones de diámetro se realizaron a la altura del cuello de la raíz. Dichas mediciones se tomaron tanto del regenerado germinado el año del inventario como del regenerado nacido en los años anteriores, obteniendo información detallada del comportamiento del regenerado durante los primeros 5 años de vida (Tabla 3).

Para identificar la edad del regenerado, se marcaron todos los brizales en la base del tallo con una etiqueta de distinto color en función del año de inventario. Y con el propósito de considerar todas las plántulas regeneradas y evitar posibles repeticiones en las mediciones se recorrieron las parcelas en zigzag.

Tabla 3. Datos de regeneración del período 2011-2015 obtenidos de las parcelas de regeneración (SD: Desviación estándar).

Parcela	Densidad (Pies·ha ⁻¹)		Mortalidad (Pies·ha ⁻¹)		Altura (cm)		Diámetro (mm)	
	Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD
301	500	0	500	0	2.9	0.0	0.92	0.00
302	800	990	800	990	3.7	0.1	0.77	0.46
303	833	1185	767	1069	3.6	0.7	0.82	0.14
304	300	283	500	0	4.1	1.7	0.79	0.03
305	1300	1273	1300	1273	3.6	0.3	0.76	0.23
306	1000	0	1000	0	3.6	0.0	0.81	0.00
307	200	0	200	0	3.6	0.0	0.95	0.00
308	0	0	0	0	0.0	0.0	0.00	0.00
309	0	0	0	0	0.0	0.0	0.00	0.00
311	500	0	500	0	4.8	0.0	0.94	0.00
312	200	0	200	0	3.9	0.0	1.35	0.00
313	200	0	200	0	4.6	0.0	1.01	0.00
314	0	0	0	0	0.0	0.0	0.00	0.00
315	0	0	0	0	0.0	0.0	0.00	0.00
316	100	0	100	0	3.7	0.0	0.62	0.00
301c	1575	1672	525	680	9.0	6.1	2.04	1.04
302c	1233	1617	775	1087	4.7	1.6	1.14	0.26
303c	4360	3749	2588	3380	6.6	3.7	1.40	0.62
304c	1560	1656	590	567	7.5	3.5	1.28	0.50
305c	800	1187	720	952	4.8	2.3	1.01	0.44
306c	2000	2369	813	1458	6.4	3.0	1.31	0.64
307c	850	988	800	744	5.3	3.2	1.02	0.27

308c	780	1043	313	318	8.2	5.5	1.53	0.93
309c	2833	2101	871	770	12.5	9.0	2.89	1.95
312c	1040	1029	543	458	5.0	1.6	1.05	0.32
313c	2280	3164	780	1135	9.2	5.1	1.47	0.70
315c	750	603	371	386	7.4	2.6	1.19	0.35
316c	2040	1813	950	1008	11.9	9.4	2.05	1.37

3.3.2. DATOS CLIMÁTICOS

Para la obtención de una serie de valores climatológicos fiables, se interpolaron las variables meteorológicas diarias de las parcelas a partir de datos extraídos de las estaciones meteorológicas españolas del período 2008-2011 y de datos obtenidos de las estaciones catalanas y españolas del período 2012-2015, siguiendo la metodología daymet (Thornton & Running 1999; Thornton et al. 2000). En base a ello, se estimó la precipitación acumulada, la temperatura (mínima, máxima y media) y la humedad relativa (mínima, máxima y media) para cada parcela (Tabla 4).

La alta dependencia de la precipitación con respecto a la topografía local conllevó ciertos problemas en el proceso de interpolación de datos climáticos. En base a ello, se promediaron los valores de las estaciones meteorológicas con factores de ponderación que dependían de la proximidad geográfica de la parcela objetivo, con el fin de evitar predicciones falsas o erróneas de lluvias. Asimismo, se corrigió la estimación de cada estación meteorológica en base a las diferencias de elevación entre la estación y la parcela objetivo.

Tabla 4. Resumen de los datos climáticos más relevantes en el estudio de la regeneración natural, interpolados de las estaciones meteorológicas españolas y catalanas del período 2008-2015 (SD: desviación estándar; Tme: temperatura media).

Variable	Media	SD	Mínimo	Máximo
Precipitación enero (mm)	36.33	29.48	4.15	118.03
Precipitación agosto (mm)	11.18	10.77	0.00	35.28
Precipitación primavera (mm)	48.32	18.81	16.45	83.00
Tme mínimas enero (C°)	0.30	1.22	-2.35	3.16
Tme mínimas junio (C°)	11.91	1.47	8.26	14.13
Tme máximas enero (C°)	7.68	1.90	2.87	10.09
Tme máximas julio (C°)	26.38	2.65	20.48	30.70
Humedad relativa abril (%)	63.67	2.82	58.27	69.98
Humedad relativa verano (%)	61.45	2.23	58.98	65.75
Humedad relativa máxima enero (%)	95.36	2.89	89.98	99.01
Humedad relativa máxima primavera (%)	88.64	5.51	80.39	95.55

3.3.3. DATOS DE SUELO

MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

En todas las parcelas permanentes estudiadas se instalaron sensores de humedad Decagon 5 TM (Decagon devices Inc., USA) para la medición del contenido volumétrico de agua del suelo. Los sensores se ubicaron en el centro de cada parcela a 12-15 cm de profundidad. Cada sensor tomó mediciones cada minuto y estas se almacenaron como promedio de 2 horas en un registrador de datos EM50 (Decagon devices Inc., USA). La humedad volumétrica del suelo obtenida por los sensores se convirtió en porcentaje de humedad relativa a la capacidad de campo utilizando las ecuaciones de Saxton (Saxton et al. 1986).

Dado que las mediciones de humedad del suelo empezaron en abril de 2013, la serie de datos de humedad del suelo era incompleta para el período de estudio de la regeneración que se inició la primavera del 2011. Para complementar las mediciones de humedad de suelo tomadas y reconstruir la serie diaria histórica, se empleó un modelo basado en el balance hídrico del suelo, para ello se recurrió al paquete estadístico de R “medfate” (Cáceres et al. 2015). El modelo utilizado presentó como variables de entrada las características de la masa, de sitio y del suelo e información meteorológica. Para ello, se trató cada árbol de forma individual, estimando la altura y el índice de área foliar a partir del diámetro normal de acuerdo con las ecuaciones alométricas, ajustadas especialmente para *Pinus pinaster*, del Tercer Inventario Forestal Nacional. El suelo se describió en el modelo discerniendo dos capas: suelo vegetal (0-30 cm) y subsuelo (30-150 cm). La textura del suelo se obtuvo del muestreo de las parcelas. La macroporosidad se evaluó a partir del contenido en arena y de la densidad aparente (Stolf et al. 2011) y los valores de estos últimos se adquirieron de la Base de Datos Mundial de Suelos Armonizados (FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC 2009). En el proceso anterior se utilizó como entrada climática las series meteorológicas interpoladas. El método de interpolación demostró ser superior en comparación con la simple asignación de datos meteorológicos de la estación más cercana en el modelo de balance hídrico del suelo. En vista de que el modelo no tenía en consideración los cambios de la estructura de la masa, para incorporar el crecimiento de los árboles, se simuló dos veces el balance hídrico del suelo para cada parcela utilizando las mediciones de diámetro normal tomadas en los inventarios realizados en diciembre de 2010 y en agosto de 2013. El período anterior a la realización del primer inventario (2008-2010) y el posterior al segundo inventario (2013-2015) se obtuvo utilizando valores de diámetro normal del primer y segundo inventario, respectivamente. Las predicciones entre los dos inventarios se obtuvieron promediando las dos simulaciones, considerando la proximidad relativa de cada uno de los inventarios. Para la validación de las predicciones de humedad del suelo obtenidas se procedió a su comparación con las mediciones tomadas por los sensores de humedad instalados en las parcelas. El análisis comparativo se basó fundamentalmente en la desviación cuadrática media. La comparación se realizó mediante intervalos de tiempo diarios y mensuales.

Dado que las predicciones del modelo fueron sensibles a la proporción de raíces finas en cada capa del suelo, y al no disponerse de dicha información, se determinó la proporción de raíces finas que maximizaba el ajuste de los datos observados de la humedad de suelo en cada parcela. Se realizaron un total de 100 simulaciones de modelo para cada parcela variando la

proporción de raíces en la capa superficial entre 0,01-0,99. Se seleccionó el reparto de las raíces finas correspondiente al valor de desviación cuadrática media más baja entre la humedad del suelo observada y la predicha. Los ensayos de Wilcoxon indicaron una reducción estadísticamente significativa de la desviación cuadrática media entre proporciones de raíces finas calibradas y no calibradas. Finalmente, se elaboró un conjunto de datos de los promedios mensuales de humedad del suelo, incorporando observaciones de campo complementadas con las predicciones del modelo para el período del que no se disponía datos.

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO

Para el análisis físico-químico del suelo, se tomaron de cada parcela 3 submuestras de suelo de 350 gramos cada una en puntos distintos. Las submuestras fueron agrupadas en una única muestra representativa del suelo de la parcela. Todas las muestras fueron tomadas a una profundidad que oscilaba entre los 25 y los 30 cm. Los análisis de la muestras del suelo se realizaron en julio de 2013 (Tabla 5).

Tabla 5. Resumen de los datos de suelo obtenidos en el análisis de las muestras de suelo recogidas en las parcelas de regeneración (CIC: Capacidad de intercambio catiónico; SD: desviación estándar; D: diámetro; ppm: partes por millón).

Variable	Media	SD	Mínimo	Máximo
Carbonato cálcico equivalente (%)	1.07	0.38	0.00	2.00
Conductividad eléctrica (dS·m ⁻¹)	0.06	0.02	0.04	0.13
CIC (meq·100g ⁻¹)	21.85	5.18	14.50	33.40
Elementos gruesos (D>mm) (%)	67.34	9.03	50.30	89.30
Limo grueso (0.02 < D < 0.05 mm) (%)	13.30	3.30	9.60	22.20
Limo fino (0.002 < D < 0.02 mm) (%)	25.74	3.95	16.30	32.20
Arcilla (D < 0.002 mm) (%)	14.01	2.46	8.50	19.00
Arena (0.05 < D < 2 mm) (%)	46.95	6.71	37.60	65.60
Potasio (ppm)	189.54	76.07	89.00	400.00
Magnesio (ppm)	373.00	82.82	225.00	548.00
Calcio (ppm)	3104.50	878.11	1814.00	5541.00
Sodio (ppm)	20.07	3.81	13.00	32.00
Nitrógeno total Kjeldahl (%)	0.21	0.06	0.11	0.31
Fósforo (ppm)	6.89	4.45	2.00	21.00
Materia orgánica (%)	5.38	1.96	2.95	10.53
pH-KCl	5.71	0.34	4.89	6.62
pH-H ₂ O	6.70	0.28	6.05	7.32
Relación Carbono/Nitrógeno	14.99	2.88	8.79	19.70

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.4.1. MODELIZACIÓN

Se desarrolló modelos para la predicción de la densidad anual del regenerado de primer año, de la mortalidad anual del regenerado y del crecimiento medio anual de las plántulas, utilizando los valores obtenidos en las 28 parcelas de regeneración natural. Como predictores se emplearon variables relacionadas con el clima, la estructura de la masa, la topografía, el suelo y la gestión forestal.

Previamente a la construcción de los modelos, se realizó un examen exploratorio de las diferentes variables clasificándolas en los siguientes grupos de factores: climáticos, topográficos, dasométricos y edáficos. Se evaluó de manera individual el efecto de cada predictor sobre la variable respuesta y la importancia de cada variable explicativa respecto a otras del mismo grupo. El estudio del efecto de cada predictor por separado y el ejercicio de evaluación de los predictores por grupos de factores, permitió tener una visión más global y un mayor conocimiento de los datos con los que se trabajaron, ya que al añadir variables explicativas de campos diferentes, existe la posibilidad de que la información aportada por una variable por separado sea diferente a la aportada cuando se encuentra junto a otras. Ello se debe a que hay predictores que explican la mayor parte de la variabilidad de tal modo que al añadirles otras variables de ámbitos distintos, estas últimas no resultan ser significativas pese a serlo por separado.

Para la predicción de las variables objeto de estudio se utilizaron modelos de efectos mixtos dada la capacidad de dichos modelos para explicar la correlación espacial y temporal entre las observaciones y para operar con datos descompensados (Pinheiro & Bates 2000). Esta elección metodológica está justificada al trabajarse con datos procedentes de parcelas de inventario permanentes de modo que al haber remediciones (observaciones repetidas para una misma parcela en años consecutivos) es previsible la existencia de correlaciones espaciales y temporales entre los datos. Este fenómeno se debe a que todas las parcelas pertenecen a un mismo ecosistema forestal y presentan unas condiciones ecológicas semejantes incrementándose en consecuencia la probabilidad de que existan valores similares entre parcelas.

En el diseño de los modelos mixtos se utilizó la identidad de la parcela como efecto aleatorio con el objetivo de incorporar en el modelo la desigualdad entre parcelas fruto de las diferencias en las características de sitio, edáficas y estructurales de la masa. No se consideró el año como posible efecto aleatorio ya que las diferencias del número de plántulas de primer año, de la tasa de mortalidad y del crecimiento del regenerado están altamente relacionadas con las diferencias climáticas interanuales, de tal modo que la inclusión del año como un efecto aleatorio dificultaría la evaluación del efecto de las variables climáticas en los procesos estudiados.

En la construcción de los modelos mixtos se realizaron transformaciones de los predictores empleando logaritmos y raíces cuadradas para la mejora del ajuste de los modelos, así como también, para la búsqueda de tendencias no monotónicas.

En el proceso de modelización, se estudió la interacción entre los predictores para evaluar la dependencia del efecto de una variable explicativa con respecto al efecto de otra.

Una de las particularidades de los datos de regeneración obtenidos radica en la alta presencia de densidades nulas (ausencia de regenerado) en algunas de las parcelas muestreadas a lo largo del tiempo, suceso que se vincula al reducido tamaño de las parcelas de inventario y a la naturaleza estocástica del proceso de regeneración natural. Para lidiar con la problemática de la inflación de ceros se recurrió a la construcción de un modelo de dos etapas (*Hurdle model*) en el que se explica un mismo proceso en dos fases diferentes (Hamilton & Brickell 1983).

La primera etapa se destinó a la predicción de la probabilidad de aparición de regenerado en un año dado por medio de la regresión logística (Ec. (1)) utilizando la función de enlace logit (Ec. (2)) basada en datos binomiales relativos a la presencia o ausencia de nuevo regenerado por parcela y año. La segunda etapa tuvo como objetivo predecir la densidad de plántulas de primer año condicionada a la probabilidad de ocurrencia. Para ello se utilizaron modelos de regresión binomial negativa con efectos mixtos (Ec. (3)). Se recurrió a la regresión binomial negativa dado que se trabajó con datos de conteo (número de plántulas por unidad de superficie) y se descartó la regresión de Poisson al existir sobredispersión de los datos (desigualdad entre la media y la varianza).

Finalmente, la densidad inicial esperada del regenerado de primer año se obtuvo como el producto de la probabilidad de ocurrencia con la densidad del regenerado de primer año condicionada por la probabilidad de ocurrencia (Ec. (4)), logrando, en consecuencia, una mayor comprensión de la dinámica inicial del regenerado, al permitir analizar por separado los factores que influyen en la aparición del regenerado y los que afectan a la cantidad del mismo.

A diferencia del modelo de densidad de plántulas de primer año, en el modelo de mortalidad no fue necesario desarrollar un modelo de dos etapas (*Hurdle model*) al no existir problemas de inflación de ceros. Para su construcción se emplearon modelos de regresión binomial negativa con efectos mixtos (Ec. (5)).

Para la modelización tanto del crecimiento primario medio anual como del crecimiento secundario medio anual se utilizaron modelos lineales de efecto mixtos (Ec. (6) y Ec. (7)). Para su construcción, y dada la inexistencia de datos de crecimiento en las parcelas no sometidas a intervención, se emplearon únicamente datos procedentes de las parcelas aclaradas.

Todos los procesos de análisis de datos y ajustes de modelos se realizaron con el software R 3.3.0 (R Core Team 2016). Los modelos mixtos se ajustaron utilizando las funciones “glmer”, “glmer.nb” y “lmer” del paquete estadístico “lme4” (Bates et al. 2014). Empleando “glmer” en el ajuste de los modelos mixtos de regresión logística, “glmer.nb” en los modelos mixtos de regresión binomial negativa y “lmer” en los modelos mixtos de regresión lineal.

$$p(y = 1|x)_i = \pi(x) = \frac{1}{1 + e^{-[(\beta_0 + b_{0i}) + (\beta + b)X_1]}} \quad (1)$$

$$g(x) = \log \left[\frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} \right] = (\beta_0 + b_{0i}) + (\beta_n + b_n)X_1 \quad (2)$$

$$N.plántulas_{ic} = \frac{\Gamma(y + \theta)}{\Gamma(\theta) \cdot y!} \cdot \frac{\mu^y \cdot \theta^\theta}{(\mu + \theta)^{y+\theta}} \quad (3)$$

$$N.plántulas_i = p(y = 1|x)_i \cdot N.plántulas_{ic} \quad (4)$$

$$Mortalidad_i = \frac{\Gamma(y + \theta)}{\Gamma(\theta) \cdot y!} \cdot \frac{\mu^y \cdot \theta^\theta}{(\mu + \theta)^{y+\theta}} \quad (5)$$

$$Crec.primario_i = (\beta_{n+1} + b_{n+1}) + (\beta_n + b_k)X_2 + \varepsilon \quad (6)$$

$$Crec.secundario_i = (\beta_{n+1} + b_{n+1}) + (\beta_n + b_k)X_2 + \varepsilon \quad (7)$$

donde $p(y = 1|x)_i$ es la probabilidad de regeneración en la parcela i ; $N.plántulas_{ic}$ es la densidad del regenerado de primer año condicionada por la probabilidad de ocurrencia en la parcela i (n° pies·ha⁻¹); $N.plántulas_i$ es la densidad estimada del regenerado de primer año en la parcela i (n° pies·ha⁻¹); $Mortalidad_i$ es la densidad de plántulas muertas en la parcela i (n° pies·ha⁻¹); $Crec.primario_i$ es el crecimiento medio anual en altura predicho del regenerado en la parcela i (cm·plántula⁻¹año⁻¹); $Crec.secundario_i$ es el crecimiento medio anual en diámetro predicho del regenerado en la parcela i (mm·plántula⁻¹año⁻¹); β expresa los parámetros del modelo de efectos fijos; b denota parámetros del modelo de efectos aleatorios; X_1 y X_2 denotan vectores de variables explicativas independientes y ε representa el residuo con una distribución normal de media igual a cero y varianza igual a σ^2 .

3.4.2. SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE MODELOS

El proceso de evaluación y selección de los modelos fue iterativo y sistemático basándose en la selección de predictores adecuados considerando la significación estadística de los parámetros del modelo, realizando pruebas de razón de verosimilitud (*Likelihood-ratio test*), evaluando la colinealidad y analizando el comportamiento lógico de los modelos y la congruencia de los resultados con el conocimiento científico biológico y ecológico actual. En el proceso de análisis solamente se consideraron los modelos cuyos coeficientes eran estadísticamente significativos ($t\text{-valor} \geq |2|$, $p\text{-valor} \leq 0,05$). Con el propósito de ajustar modelos parsimoniosos y obtener modelos con estadísticas de ajuste aceptables, en la selección de variables, se utilizó el Criterio de Información Akaike (AIC) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC). Se empleó el test ANOVA para la detección de mejoras significativas, desde el punto de vista estadístico, entre modelos alternativos anidados.

Para la evaluación de los modelos logísticos a parte de los criterios anteriormente comentados se calcularon los valores de AUC (Área Bajo la Curva) de las curvas ROC (Característica Operativa del Receptor) para analizar el poder predictivo de los modelos. La bondad de ajuste de los modelos se analizó utilizando el estadístico Chi-Cuadrado (χ^2) y el estadístico de Hosmer-Lemeshow, así como también calculando el R^2 de McFadden y de Cox y Snell.

En cuanto a los modelos de regresión binomial negativa se realizó una evaluación de la distribución de los residuos mediante la construcción de diagramas de dispersión para comprobar el cumplimiento de las asunciones de homocedasticidad y normalidad. Asimismo, se realizó un análisis cuantitativo de los residuos calculando los coeficientes de simetría y de aplastamiento. Se estimó también la significación global de los modelos con el test de Wald y el Likelihood Ratio test. Finalmente, para la evaluación del ajuste del modelo a los datos, se consideró el valor de la devianza residual de los modelos.

En el proceso de evaluación de los modelos de regresión lineal se consideró la distribución de los residuos, descartándose todos aquellos modelos que incumplían alguna de las asunciones de linealidad, homocedasticidad y normalidad.

4. RESULTADOS

4.1. PROBABILIDAD Y DENSIDAD DEL REGENERADO DE PRIMER AÑO

El modelo de probabilidad de regeneración mostró como mejores predictores la precipitación acumulada en los meses de primavera y el desarrollo de prácticas silvícolas.

El modelo de densidad del regenerado de primer año no presentó predictores comunes con el modelo de probabilidad. Concretamente, los factores más correlacionados con la cantidad de regenerado, y en consecuencia, los predictores del mejor modelo de densidad desde el punto de vista predictivo, fueron el tiempo transcurrido desde la realización de las claras, el área basimétrica extraída en las actuaciones silvícolas, la humedad del suelo del mes de mayo y la temperatura media de las mínimas del mes de junio.

Tanto en el modelo de probabilidad de regeneración como en el modelo de densidad, los predictores relacionados con la gestión forestal presentaron los mayores niveles de significación, anteponiéndose al efecto del resto de predictores de los modelos (Tabla 6).

Tabla 6. Valores de los parámetros de efectos fijos de los modelos de probabilidad de regeneración y de densidad del regenerado de primer año (ABelim: área basimétrica eliminada; Coef.: coeficiente; Ec.: ecuación; Hsuelo5: humedad media del suelo del mes de mayo; Interv: intervención; Pprim: precipitación acumulada en los meses de primavera; SE: error estándar; Sign.: significación estadística; Tmin6: Temperatura media de las mínimas del mes de junio; Tpostinterv: tiempo transcurrido desde la intervención; ***: altamente significativo).

Modelo	Ec.	Predictor	Coef.	Valor	SE	z-valor	p-valor	Sign.
Probabilidad de ocurrencia	1	Intercepto	β_0	-5.08	1.29	-3.95	7.79E-05	***
		Interv	β_1	5.45	1.65	3.29	9.93E-04	***
		Pprim	β_2	0.07	0.02	3.39	7.01E-04	***
Densidad regenerado de primer año	3	Intercepto	β_3	12.95	1.12	11.56	2.00E-16	***
		Tpostinterv	β_4	-0.32	0.09	-3.67	2.40E-04	***
		ln(ABextraída)	β_5	0.82	0.22	3.81	1.41E-04	***
		ln(Hsuelo5)	β_6	2.01	0.56	3.59	3.35E-04	***
		Tmin6	β_7	-0.27	0.08	-3.44	5.89E-04	***

El valor de McFadden R^2 del modelo de probabilidad fue de 0,44 y el p-valor de Hosmer-Lemeshow de 0,13, ambos, valores que en términos de bondad de ajuste, denotan el buen poder predictivo del modelo y el buen ajuste de los datos. Referente al poder de discriminación, el modelo de probabilidad demostró ajustarse bien a la realidad con un valor del área bajo la curva ROC de 0.90 (Figura 4).

La devianza residual del modelo de densidad del regenerado de primer año, fue de 61.86 y la varianza de los efectos aleatorios de las parcelas fue de 0.05. El modelo cumplió con los criterios de homocedasticidad y normalidad. En el análisis cuantitativo de la distribución de los residuos del modelo de densidad, el valor del coeficiente de asimetría o sesgo (Skewness) fue de 0,70 y el del coeficiente de concentración (Curtosis) de 5.15.

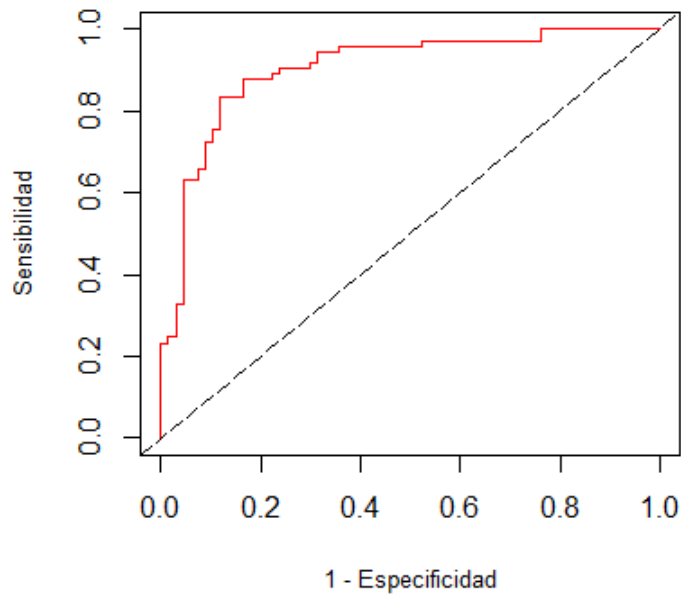


Figura 4. Curva ROC del modelo de probabilidad de regeneración (Línea roja: Probabilidad pronosticada por el modelo; línea discontinua: línea de referencia).

La precipitación acumulada en los meses de primavera y la realización de claras presentaron relaciones positivas y estadísticamente significativas con la probabilidad de regeneración, por lo que a medida que aumentan las precipitaciones en los meses de primavera se incrementa la probabilidad de germinación y por lo que la realización de claras favorece la aparición del regenerado.

El área basimétrica extraída en las claras y la humedad del suelo del mes de mayo se correlacionaron positivamente con la densidad del regenerado de primer año, por lo que a mayor porcentaje de área basimétrica extraída, mayor densidad del regenerado de primer año (Figura 5) y por lo que a mayor humedad del suelo en el mes de mayo, mayor número de plántulas por unidad de superficie (Figura 6).

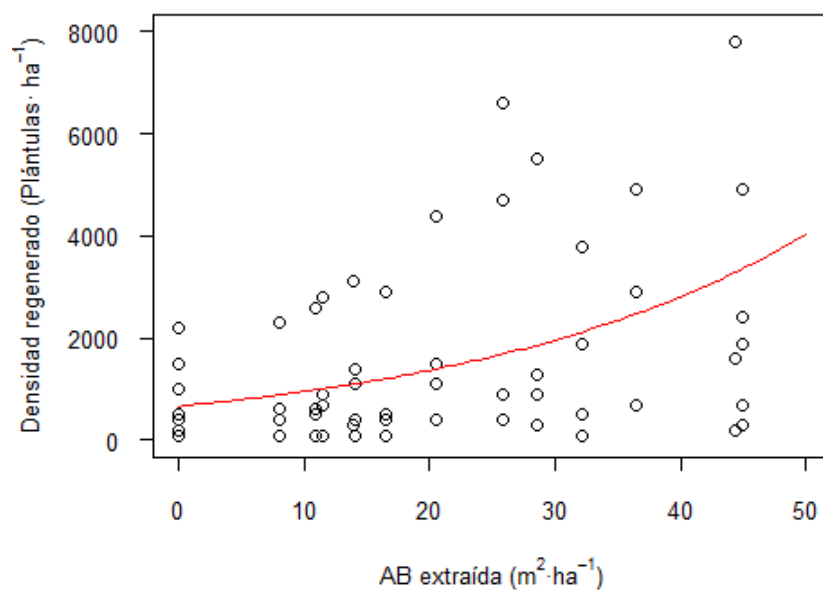


Figura 5. Efecto del área basimétrica extraída en las claras sobre la densidad del regenerado de primer año.

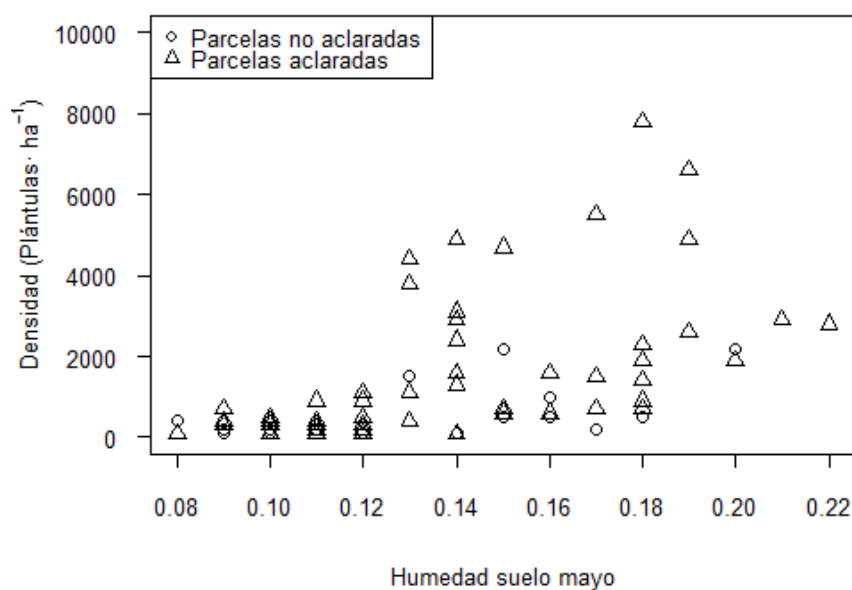


Figura 6. Efecto de la humedad media del suelo del mes de mayo sobre la densidad del regenerado de primer año.

Por el contrario, la densidad del regenerado de primer año se correlacionó negativamente con la temperatura media de las mínimas del mes de junio y con el tiempo transcurrido desde la realización de las claras. En consecuencia, a medida que asciende la temperatura media de las mínimas en el mes de junio, decrece el número de plántulas nacidas (Figura 7) y a medida que aumenta el tiempo transcurrido desde la realización de las claras, disminuye la densidad del nuevo regenerado.

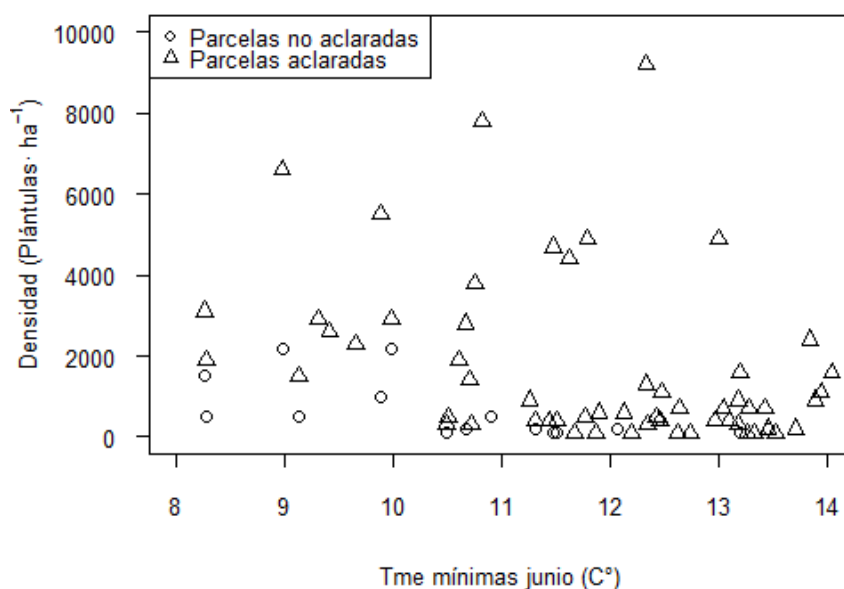


Figura 7. Efecto de la temperatura media de las mínimas del mes de junio sobre la densidad del regenerado de primer año (Tme: Temperatura media).

Además de los factores fundamentales de los modelos globales definidos, se detectaron otras variables correlacionadas con la probabilidad de germinación y la densidad del regenerado, que presentaron un nivel de significación menor al de los predictores de los modelos.

Concretamente, la humedad media del suelo del mes de mayo se correlacionó con la probabilidad de regeneración y la humedad relativa media de las máximas del mes de enero se correlacionó con la densidad del regenerado de primer año. Ambas variables presentaron correlaciones de carácter positivo, por lo que a mayor humedad del suelo durante el mes de mayo, mayor probabilidad de aparición de regenerado y por lo que a mayor humedad relativa media de las máximas en el mes de enero, mayor número de plántulas nacidas por unidad de superficie (Figura 8).

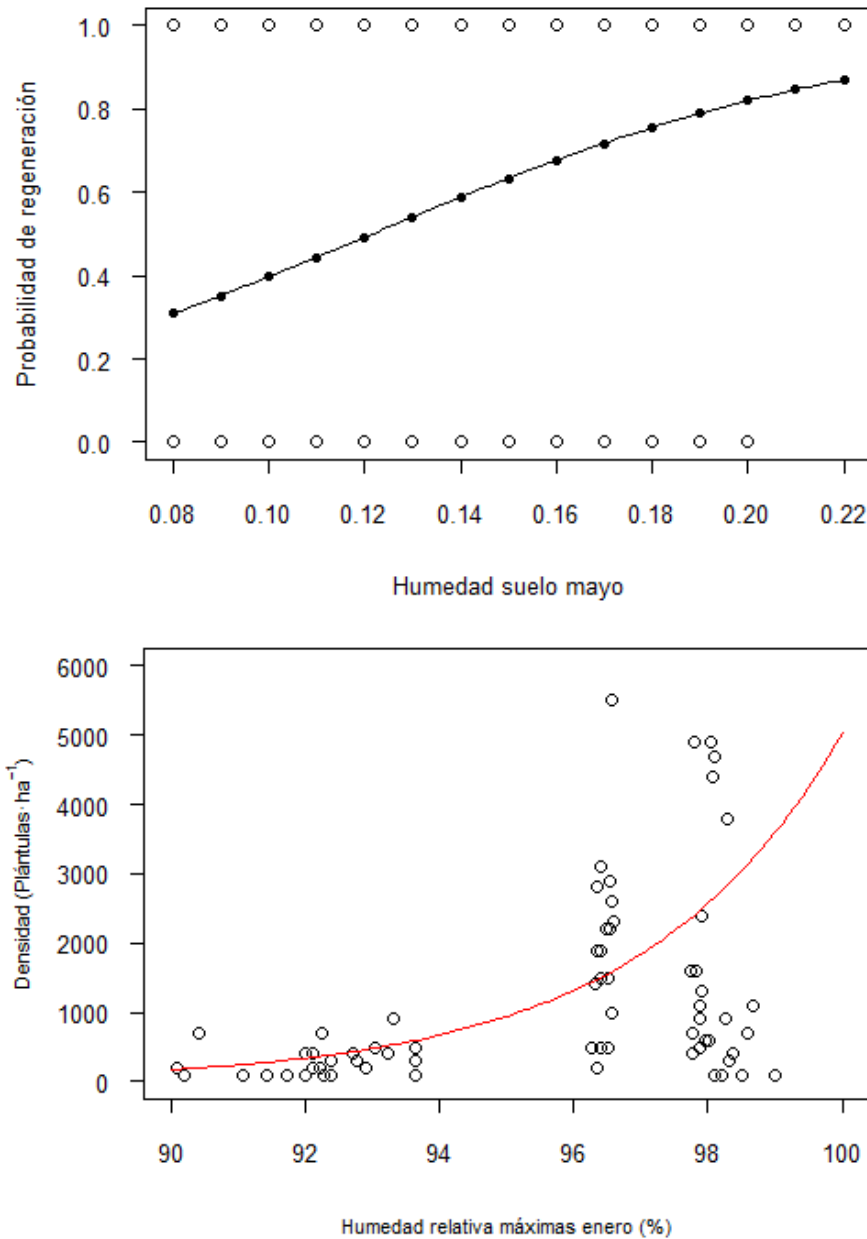


Figura 8. Efecto de la humedad media del suelo del mes de mayo sobre la probabilidad de regeneración (gráfico superior) y efecto de la humedad relativa media de las máximas del mes de enero sobre la densidad del regenerado de primer año (gráfico inferior).

Asimismo, se encontró una fuerte influencia de la estructura de la masa sobre las condiciones microclimáticas de las parcelas. Concretamente, se detectó la existencia de una correlación negativa entre el área basimétrica remanente de la masa y la humedad media del suelo del mes de mayo, por lo que a mayor área basimétrica, menor humedad del suelo en el mes de mayo (Figura 9).

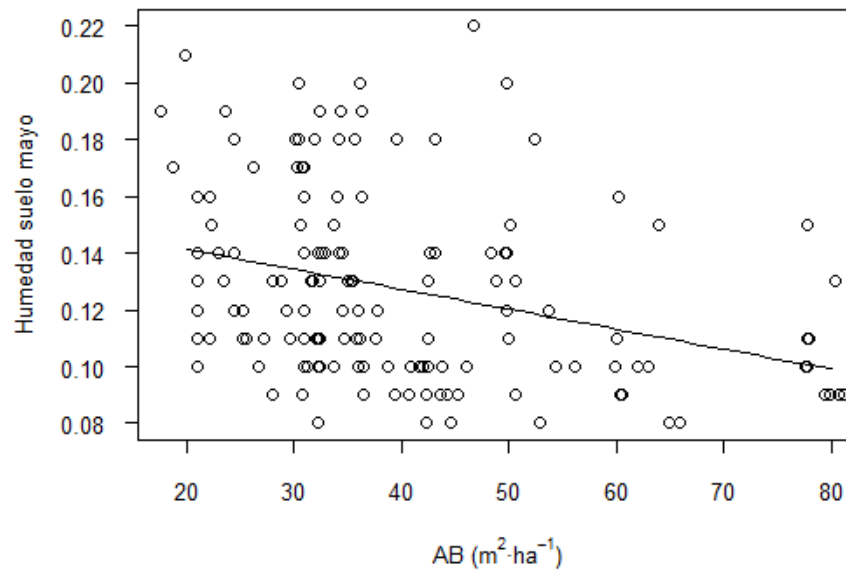


Figura 9. Efecto del área basimétrica sobre la humedad del suelo en el mes de mayo (AB: Área basimétrica).

4.2. MORTALIDAD ANUAL DEL REGENERADO

Los predictores que minimizaron los errores de estimación y que conformaron el mejor modelo de mortalidad anual del regenerado fueron la edad del regenerado y la humedad relativa de los meses de verano (Tabla 7).

La devianza residual del modelo de mortalidad fue de 137 y la varianza de los efectos aleatorios de las parcelas fue de 0.04. El modelo cumplió con los criterios de homocedasticidad y normalidad. En el análisis cuantitativo de la distribución de los residuos del modelo, el valor del coeficiente de asimetría o sesgo (Skewness) fue de 0,30 y el del coeficiente de concentración (Curtosis) de 0.72.

Tabla 7. Valores de los parámetros de efectos fijos del modelo de densidad de plántulas regeneradas muertas (Coef.: coeficiente; Ec.: ecuación; Hrverano: humedad relativa media de los meses de verano; SE: error estándar; Sign.: significación estadística; ***: altamente significativo; **: bastante significativo).

Modelo	Ec.	Predictor	Coef.	Valor	SE	z-valor	p-valor	Sign.
Mortalidad	5	Intercepto	β_8	39.13	11.88	3.29	9.88E-04	***
		Edad	β_9	-0.50	0.15	-3.42	6.36E-04	***
		Hrverano	β_{10}	-7.71	2.90	-2.66	7.88E-03	**

La edad del regenerado y la humedad relativa de los meses de verano se correlacionaron negativamente con la mortalidad del regenerado. Por consiguiente, a mayor edad del regenerado, menor cantidad de plántulas muertas (Figura 10) y a mayor porcentaje de vapor de agua en el aire durante los meses de estío, menor tasa de mortalidad.

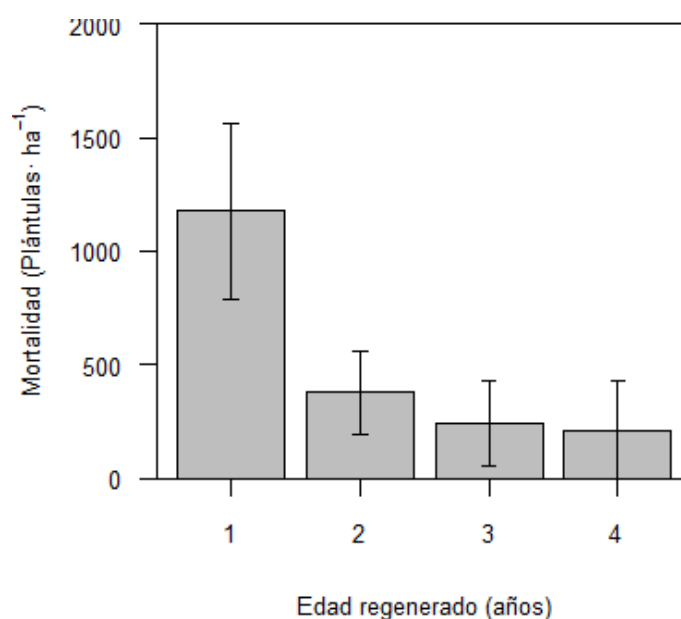


Figura 10. Efecto de la edad biológica del regenerado sobre la tasa de mortalidad del regenerado.

Por otro lado, en el tratamiento individual de los diferentes tipos de variables, se observó que la precipitación del mes de agosto, la temperatura media de las máximas del mes de julio, la humedad del suelo del mes de agosto y el pH del suelo, pese a no ser predictores del modelo global de mortalidad, presentaron por separado correlaciones estadísticamente significativas con la mortalidad anual del regenerado.

La precipitación y la humedad del suelo del mes de agosto se correlacionaron negativamente con la densidad del regenerado muerto, de manera que a medida que aumentan las lluvias durante el mes de agosto, disminuye la tasa de mortalidad (Figura 11) y a medida que aumenta la humedad del suelo en el mes de agosto, decrece el número de plántulas muertas.

Por el contrario, la temperatura media de las máximas del mes de julio y el pH del suelo se relacionaron positivamente con el proceso de mortalidad, de modo que a medida que ascienden las temperaturas alcanzadas en el mes de julio, aumenta la densidad de plántulas muertas y a medida que aumentan los niveles de pH del suelo, aumenta el número de brinzales muertos.

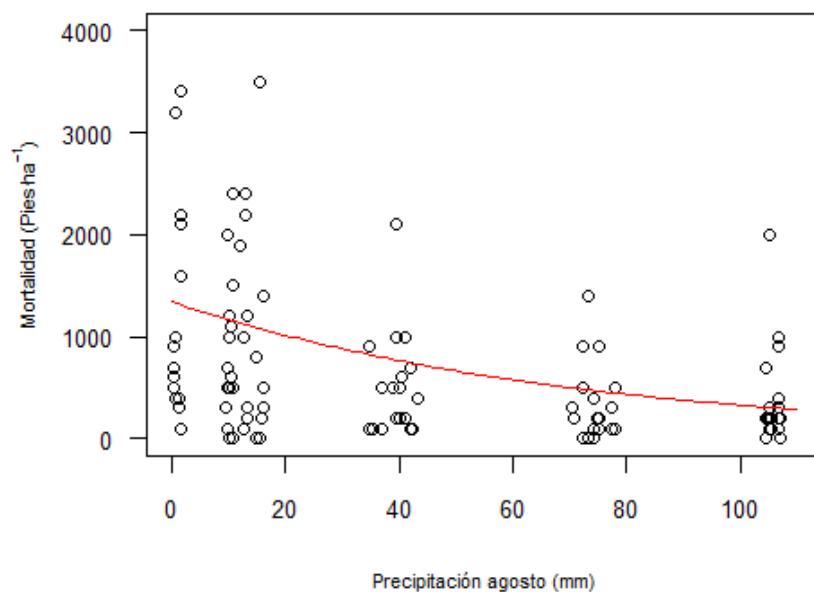


Figura 11. Efecto de precipitación acumulada en el mes de agosto sobre la tasa de mortalidad del regenerado.

4.3. CRECIMIENTO MEDIO ANUAL DEL REGENERADO

Los predictores del mejor modelo de crecimiento primario medio anual del regenerado fueron la humedad relativa del mes de abril y la pendiente topográfica. El modelo de crecimiento secundario medio anual presentó únicamente como predictor la evapotranspiración potencial de los meses de primavera (Tabla 8).

El valor de la varianza residual fue de 1.56 en el modelo de crecimiento primario y de 0.40 en el modelo de crecimiento secundario. La desviación estándar de los modelos de crecimiento primario y secundario, fue de 1,45 ($\text{cm}\cdot\text{año}^{-1}$) y de 0,40 ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$), respectivamente.

Tabla 8. Valores de los parámetros de efectos fijos de los modelos de crecimiento primario y secundario medio anual del regenerado (Coef.: coeficiente; Crec. primario: crecimiento primario medio anual; Crec. secundario: crecimiento secundario medio anual; Ec.: ecuación; ETPprim: evapotranspiración potencial media de los meses de primavera; Hr4: humedad relativa media del mes de abril; Pend: pendiente topográfica; SE: error estándar; Sign.: significación estadística; ***: altamente significativo; *: significativo).

Modelo	Ec.	Predictor	Coef.	Valor	SE	t-valor	p-valor	Sign.
Crec. primario	6	Intercepto	β_{11}	-27.11	4.93	-5.50	7.26E-07	***
		Hr4	β_{12}	0.49	0.08	6.28	3.55E-08	***
		Pend	β_{13}	-0.07	0.03	-2.56	1.29E-02	*
Crec. secundario	7	Intercepto	β_{14}	3.56	0.72	4.93	6.25E-06	***
		ETPprim	β_{15}	-0.02	0.00	-4.53	2.66E-05	***

El crecimiento en altura del regenerado se correlacionó positivamente con la humedad relativa del mes de abril y negativamente con la pendiente topográfica. De manera que a mayor humedad relativa media en el mes de abril, mayor crecimiento anual medio en altura del regenerado y de manera que a mayor pendiente topográfica, menor crecimiento primario del regenerado (Figura 12).

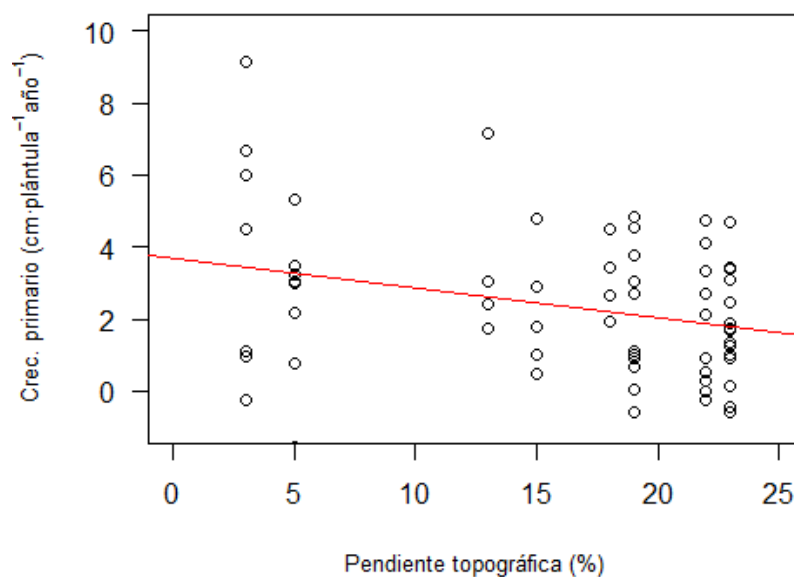


Figura 12. Efecto de la pendiente topográfica sobre el crecimiento primario medio anual del regenerado.

La evapotranspiración potencial mostró una relación negativa y significativa con el crecimiento secundario medio anual. Consecuentemente, a mayor evapotranspiración potencial en los meses de primavera menor crecimiento en diámetro de las plántulas.

Además de los predictores de los mejores modelos de crecimiento primario y secundario medio anual del regenerado, se identificaron otras variables influyentes en el proceso de crecimiento. Se encontraron relaciones estadísticamente significativas entre el crecimiento en altura y la temperatura media de las mínimas del mes de enero, así como también, con la precipitación acumulada en el mes de enero. Ambas relaciones resultaron ser positivas, por lo que a mayores temperaturas en el mes de enero, mayores incrementos anuales en altura de los brinzales y por lo que a mayor precipitación acumulada en el mes de enero, mayor crecimiento primario (Figura 13).

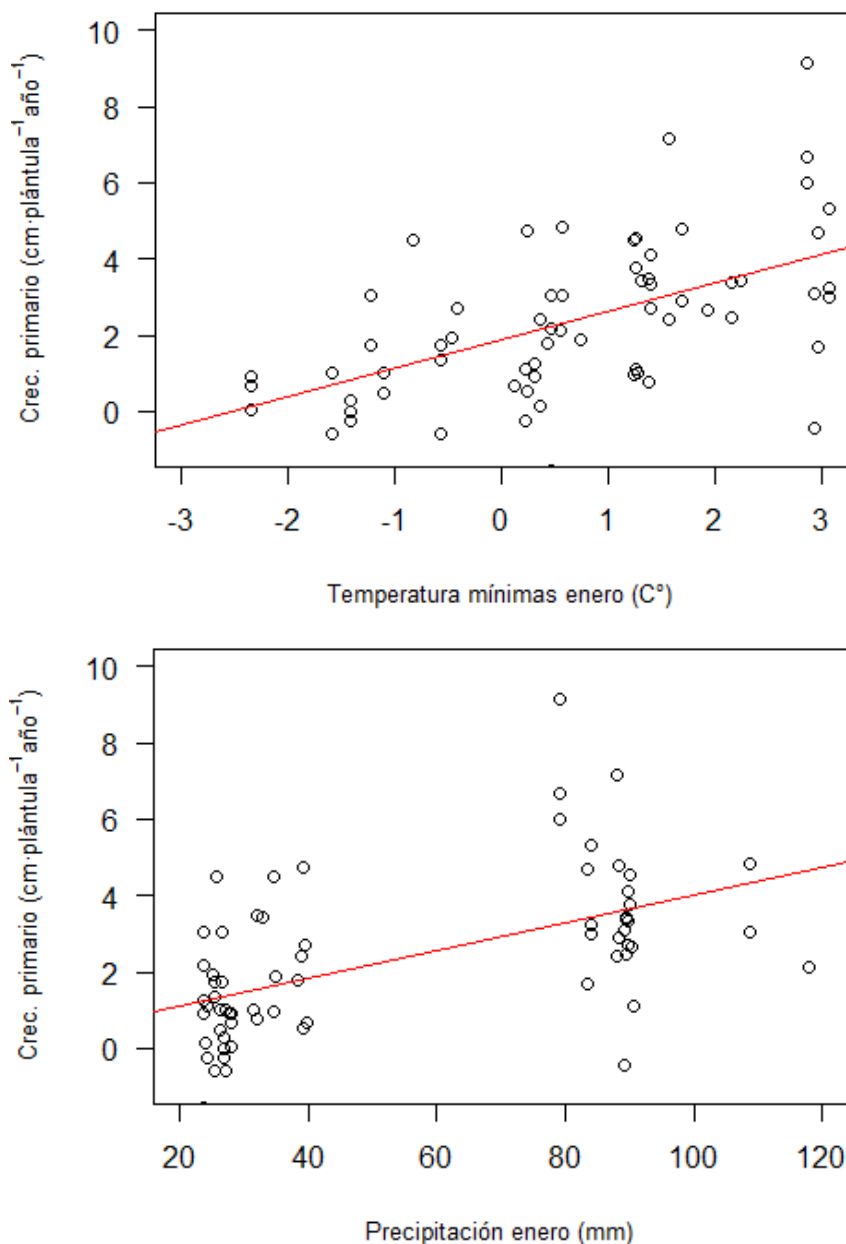


Figura 13. Efecto de la temperatura media de las mínimas del mes de enero (gráfico superior) y de la precipitación acumulada en el mes de enero (gráfico inferior) sobre el crecimiento primario medio anual del regenerado.

Se encontró correlaciones significativas entre el crecimiento diametral del regenerado y la humedad relativa máxima de los meses de primavera, temperatura media de las máximas del mes de enero y el porcentaje de área basimétrica extraída en las claras. Todas ellas, presentaron correlaciones de naturaleza positiva, de tal modo que aumentos bien en la humedad relativa máxima en los meses de primavera, en la temperatura media de las máximas en el mes de enero o en el porcentaje de área basimétrica extraída en las claras, conllevan crecimientos diametrales mayores del regenerado.

5. DISCUSIÓN

5.1. PROBABILIDAD Y DENSIDAD DEL REGENERADO DE PRIMER AÑO

La regeneración natural de las comunidades forestales es un proceso complejo, impulsado por diferentes factores y modelado por las características ecológicas y demográficas de las especies, así como también, por multitud de sucesos estocásticos (Paluch 2005).

Estudios varios predicen una nueva situación, con diferentes condiciones a las actuales, para los bosques. En la región mediterránea, la mayoría de los modelos climáticos prevén reducciones en la cantidad total de lluvias y aumentos en la estacionalidad, lo que conduce a períodos de sequía más largos e intensos (IPCC 2014). Por estas razones, conocer la respuesta de las especies forestales ante este proceso de cambio es crucial para predecir condiciones futuras y estar preparados ante nuevos escenarios de gestión. Dichos cambios, tendrán mayor influencia en los momentos críticos de la dinámica de los bosques, siendo especialmente susceptible la fase de regeneración. En base a ello, se estudió el efecto de la gestión forestal y de los principales condicionantes ambientales y ecológicos sobre los procesos de germinación, supervivencia y crecimiento del regenerado, en sus fases más incipientes.

Los resultados del presente estudio muestran que la gestión forestal tiene un efecto positivo y altamente significativo en la probabilidad de germinación y en la densidad del regenerado de primer año de *Pinus pinaster*.

Pinus pinaster es considerada una de las principales especies colonizadoras después de una perturbación (Gil et al. 1990). El temperamento robusto, la naturaleza intolerante a la sombra y la gran exigencia de luz que presenta la especie estudiada, justificaría por un lado, la relación positiva existente entre la probabilidad de regeneración y la realización de claras, y por otro lado, la correlación positiva entre el área basimétrica extraída en los tratamientos silvícolas y la cantidad de regenerado de primer año.

Estudios anteriores coinciden en que la radiación incidente regulada por la apertura del dosel arbóreo tiene una influencia significativa en la germinación de las semillas y en el desarrollo temprano de las plántulas (González et al. 2008). Existen varios ejemplos en los que se detectan mayores densidades de plántulas en masas con un dosel de copas más abierto (Fernandez et al. 2001; Rodríguez et al. 2008), quedando reflejada la naturaleza intolerante a la sombra de la especie. Sin embargo, otros autores consideran que la aparición natural de plántulas de *Pinus pinaster* es mayor bajo doseles cerrados, como consecuencia de la protección que el dosel confiere a las plántulas, reduciendo la radiación solar incidente y la temperatura del suelo, favoreciendo una mayor humedad relativa y minimizando, en consecuencia, el riesgo de daños en las plántulas por estrés hídrico (Valladares et al. 2005; Castro et al. 2011; Rodríguez et al. 2011). Pese a ello, los estudios de los efectos de la luz sobre el establecimiento natural de esta especie son escasos y hay poca información sobre cómo la variación de las características de la masa afectan al establecimiento natural y al crecimiento temprano del regenerado de *Pinus pinaster* en los bosques mediterráneos.

En relación con la gestión, los resultados confirman la existencia de una relación negativa entre el tiempo transcurrido desde la realización de las claras y la densidad del regenerado de primer

año. Este hallazgo, podría asociarse a los fenómenos de competencia inter e intraespecífica, de forma que, a medida que transcurre el tiempo desde la realización de las claras, el efecto de la competencia por los recursos, especialmente por la luz, se intensifica. Varios estudios de regeneración, coinciden con estos resultados, y corroboran que la competencia de las plántulas tiene una importante influencia en las fases de germinación, supervivencia y posterior desarrollo del regenerado (Alejano 2003).

Los hallazgos obtenidos prueban que tanto las condiciones climáticas como las edáficas de los meses de primavera, influyen de forma significativa en la probabilidad de regeneración y en la densidad del regenerado de *Pinus pinaster*.

Algunos autores consideran que la precipitación de primavera, identificada como una de las principales estaciones de lluvia en el clima mediterráneo, es el principal factor que condiciona el establecimiento natural del regenerado de *Pinus pinaster* (Rodríguez et al. 2011). En el estudio de Rodríguez et al. 2010, se demuestra que la formación de semillas está fuertemente asociada a la precipitación acumulada en la primavera del año previo al establecimiento del regenerado, y que el proceso de germinación está relacionado, positivamente y significativamente, con la precipitación acumulada durante los meses de primavera del año de establecimiento. Estos resultados, coinciden con los obtenidos en el presente estudio, donde la probabilidad de regeneración es altamente dependiente de las precipitaciones de primavera.

La correlación positiva y estadísticamente significativa de la humedad media del suelo del mes de mayo, tanto con la probabilidad de regeneración como con la densidad del regenerado de primer año, se debe a que la variación del estado hídrico del regenerado está íntimamente relacionada con los niveles de humedad del suelo (Rodríguez et al. 2007), y en consecuencia, con las condiciones ambientales.

Trabajos previos apuntan que la reducción del área basimétrica de la masa puede tener efectos positivos en el vigor de las plantas (López et al. 2009), eficiencia del uso de agua (Gebhardt et al. 2014), resiliencia frente a períodos de sequía (D'Amato et al. 2013) y en el contenido de agua del suelo (Ganatsios et al. 2010). Ello se pueden asociar al efecto de la estructura de la masa en la regulación de las pérdidas de agua por interceptación (Mazza et al. 2011; Molina & del Campo 2012), en la modulación de las pérdidas de agua por transpiración (Zhang et al. 2001) y en la repartición del agua disponible en el suelo entre la vegetación existente (Zhang et al. 2001). Estos procesos justificarían la correlación negativa encontrada entre el área basimétrica de la masa y la humedad relativa media del mes de mayo, que a su vez resulta ser, la variable microclimática más influyente en la probabilidad de regeneración y en la densidad del regenerado de primer año de *Pinus pinaster*.

Análogamente, la densidad del regenerado de primer año presenta correlaciones negativas con la temperatura media de las mínimas del mes de junio, de modo que la escasez de agua fácilmente disponible para las plantas en el suelo durante los meses de primavera, juntamente con las elevadas temperaturas de los meses de verano, conllevan bajas tasas de regeneración. Estos hallazgos, coinciden con los resultados obtenidos en otros estudios, en los que las bajas densidades del regenerado dependían de la escasez de lluvias y de las elevadas temperaturas (Rodríguez et al. 2010).

Existen varios trabajos centrados en el análisis de la respuesta germinativa de los pinos mediterráneos a las altas temperaturas, entre otros para *Pinus pinaster* (Tapias et al. 2001; Alvarez et al. 2007), *Pinus halepensis* (Martínez et al. 1995; Tapias et al. 2001), *Pinus pinea* (Tapias et al. 2001), *Pinus sylvestris* (Nuñez et al. 2003) y *Pinus nigra* (Tapias et al. 2001). La correlación negativa entre la temperatura media del mes de julio y la cantidad de regenerado de *Pinus pinaster*, se justificaría ya que las elevadas temperaturas junto con la recurrencia de las mismas, comprometen el regenerado. Concretamente, por encima de un rango determinado de temperaturas, que oscila entre los 40-45 °C, los tejidos vegetales sufren daños de carácter irreversible (García et al. 2013). Este fenómeno conlleva efectos perjudiciales para la planta, entre otros, el aumento de la transpiración de la planta, daños en los tejidos de las semillas imposibilitando la germinación de las mismas, daños en los tejidos de las plantas tras la desnaturalización de las proteínas, acumulación de sustancias tóxicas varias resultado de la aceleración de los procesos químicos y retrasos en el crecimiento fruto del consumo por parte de la planta de sus propias sustancias de reserva (Hocker 1984; Gandullo 1985; Gómez & Roselló 1997; Gómez 2002).

No se descarta la opción de asociar los problemas de germinación a los fenómenos de predación de semillas o a la pérdida de viabilidad de las semillas debida a factores abióticos puesto que son aspectos no considerados en el presente estudio.

5.2. MORTALIDAD ANUAL DEL REGENERADO

Los resultados obtenidos indican que la edad del regenerado y la humedad relativa media de los meses de verano presentan correlaciones altamente significativas y de naturaleza negativa, con la mortalidad anual del regenerado de *Pinus pinaster*. Resultados que coinciden con otros estudios en los que la tasa de mortalidad del regenerado depende mayoritariamente de la edad de las plántulas y de la influencia de la sequía (Rodríguez et al. 2011; Calama et al. 2014).

La relación negativa entre la humedad relativa media de los meses de verano y la mortalidad del regenerado manifiesta que la regeneración natural de *Pinus pinaster* presenta limitaciones importantes en condiciones de sequía intensa y en ambientes xéricos. Comportamiento lógico ya que *Pinus pinaster* es una especie estenoica con un rango estrecho de condiciones óptimas en términos de precipitación (Gandullo & Sánchez 1994). Este fenómeno, está corroborado por varios autores que sostienen que el estrés hídrico condiciona la germinación de *Pinus pinaster* y que la precipitación de verano del año de establecimiento está relacionada con la supervivencia de las plántulas (Rodríguez et al. 2010; Nuñez et al. 2013).

La sequía estival, es en consecuencia, uno de los factores de estrés más importantes que afecta al establecimiento natural de las plántulas de *Pinus pinaster* en los sistemas mediterráneos. En un escenario de cambio climático, con sequías más severas, el impacto de las mismas sobre las plántulas emergidas, podría agravarse. El alcance de dicha posibilidad debe de ser estudiado, en vista de las graves consecuencias que supondría para la regeneración natural de *Pinus pinaster* en los pinares mediterráneos.

Los resultados del presente estudio muestran que el pH del suelo está positivamente correlacionado con la mortalidad de las plántulas de *Pinus pinaster*. Aspecto lógico que viene justificado por la ecología de la especie y por la influencia de dicho parámetro en el

intercambio de nutrientes para el crecimiento de las plantas mediante el control de la solubilidad de los minerales del suelo (Barnes et al. 1998).

5.3. CRECIMIENTO MEDIO ANUAL DEL REGENERADO

El crecimiento medio anual en altura del regenerado presenta una correlación altamente significativa con la humedad relativa y la pendiente topográfica. La humedad relativa es la variable climática más influyente en el crecimiento primario del regenerado, particularmente, la humedad relativa media del mes de abril del mismo año. Estos hallazgos coinciden con otros estudios en los que el crecimiento primario medio anual del regenerado está condicionado por el clima y la topografía del terreno (Nuñez et al. 2009; Ruano et al. 2009).

La alta influencia de la pendiente del terreno sobre el desarrollo primario del regenerado se debe a que los factores del medio físico condicionan las características de la estación sobre la que se desarrolla el regenerado (Alejano 2003). La relación negativa existente entre la pendiente del terreno y el crecimiento primario medio anual, podría justificarse, dado que en las zonas con mayor pendiente topográfica las fuerzas erosivas son mayores y consecuentemente, la profundidad del suelo suele ser menor. Y por otro lado, ya que los terrenos con fuertes pendientes, suelen caracterizarse por presentar tasas de infiltración bajas y escorrentías superficiales elevadas, que se traducen, en una menor disponibilidad de agua para las plantas.

Los resultados obtenidos indican que la evapotranspiración potencial de los meses de primavera presenta una relación estadísticamente significativa con el crecimiento secundario medio anual. Relación lógica dada la interconexión existente entre la precipitación, temperatura y evapotranspiración, todos ellos condicionantes ambientales capaces de limitar la humedad ambiental y, en consecuencia, restringir el crecimiento de los árboles (Bogino & Bravo 2008).

La precipitación y la temperatura explican la mayor parte de la varianza total del crecimiento radial en las especies de pino que crecen en la Península Ibérica. Varios autores han corroborado la existencia de una influencia local y regional positiva del clima sobre el crecimiento radial de *Pinus pinaster*. Avalando en los resultados obtenidos que el crecimiento radial de *Pinus pinaster* está positivamente correlacionado con la precipitación antes y durante la estación de crecimiento (Bogino & Bravo 2008; Rodríguez et al. 2010).

Nuestros hallazgos confirman en consecuencia que el crecimiento radial de *Pinus pinaster* presenta una gran dependencia de las variables climáticas, demostrando a su vez, ser un buen candidato como herramienta precisa para estudiar el efecto del cambio global en el crecimiento de las especies de pinos mediterráneos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SILVÍCOLAS

En la actualidad, hay un gran desconocimiento de cómo los factores ambientales influyen en la dinámica inicial del regenerado de *Pinus pinaster*. La inmensa mayoría de los estudios desarrollados hasta el momento en la región mediterránea, se han centrado en el análisis de los efectos del fuego, por lo que se deben realizar esfuerzos para investigar y modelar la regeneración natural de dicha especie.

Los resultados obtenidos en el presente estudio indican la existencia de un elevado número de factores relacionados con la emergencia, supervivencia y crecimiento de las plántulas. La gestión forestal influye positivamente en la probabilidad de aparición y en la densidad del regenerado de *Pinus pinaster*. Asimismo, el área basimétrica de la masa está negativamente relacionada con la humedad del suelo. En cuanto a la mortalidad, la edad de las plántulas es la variable más correlacionada con la densidad del regenerado muerto y presenta un efecto negativo. El efecto del clima en el crecimiento medio anual del regenerado de *Pinus pinaster* se antepone a todos los grupos de factores evaluados.

En vista de los resultados obtenidos y de los pronósticos climáticos desfavorables para la región mediterránea, cabría pensar que lo más conveniente para fomentar la regeneración natural de *Pinus pinaster* y garantizar la permanencia de la masa, sería realizar una gestión forestal más activa en la zona de estudio. No obstante, es necesario potenciar la investigación en el campo de la regeneración natural de *Pinus pinaster*, para corroborar y contrastar estos resultados.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alejano R. 2003. La regeneración de pinares mediterráneos naturales con especial referencia a *Pinus nigra* ssp. *salzmannii*. Cuad la Soc Española Ciencias For. 15:77–87.
- Alía R, García del Barrio JM, Iglesias Sauce S, Mancha Núñez JA, de Miguel y del Ángel J, Nicolás Peragón JL, Pérez Martín F, Sánchez de Ron D. 2009. Regiones de procedencia de especies forestales en España. Organismo. Madrid.
- Alvarez R, Valbuena L, Calvo L. 2007. Effect of high temperatures on seed germination and seedling survival in three pine species (*Pinus pinaster*, *P. sylvestris* and *P. nigra*). Int J Wildl Fire. 16:63–70.
- Barnes BV, Zak D, Denton SR, Spurr SH. 1998. Soil. In: For Ecol. New York: John Wiley & Sons; p. 255–278.
- Barrio M, Castedo F, Diéguez U, Álvarez JG, Parresol BR, Rodríguez R. 2006. Development of a basal area growth system for maritime pine in northwestern Spain using the generalized algebraic difference approach. Can J For Res [Internet]. 36:1461–1474. Available from: <https://doi.org/10.1139/x06-028>
- Bates DM, Machler M, Bolker BM, Walker SC. 2014. Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4. J Stat Softw. 67.
- Bogino S, Bravo F. 2008. Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. Ann For Sci [Internet]. 65:506. Available from: <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2008025>
- Cáceres M De, Martínez J, Coll L, Llorens P, Casals P, Poyatos R, Pausas JG, Brotons L. 2015. Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: The role of forest structural changes vs. climate changes. Agric For Meteorol [Internet]. 213:77–90. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.06.012>
- Calama R, Pardos M, Mayoral C, Madrigal G, Conde M, Sánchez-González M. 2014. Supervivencia del regenerado de *Pinus pinea* L. en la meseta norte. Previsiones en un contexto de cambio climático. Cuad la Soc Española Ciencias For. 40:151–158.
- Calvo L, Santalla S, Valbuena L, Marcos E, Tárrega R, Luis-Calabuig E. 2007. Post-fire natural regeneration of a *Pinus pinaster* forest in NW Spain. Plant Ecol. 197:81–90.
- Castro J, Allen CD, Molina M, Marañón S, Sánchez Á, Zamora R. 2011. Salvage Logging Versus the Use of Burnt Wood as a Nurse Object to Promote Post-Fire Tree Seedling Establishment. Restor Ecol. 19:537–544.
- Ceballos L, Ruiz de la Torre J. 2001. Árboles y arbustos de la España peninsular. Fundación. Madrid.
- D'Amato AW, Bradford JB, Fraver S, Palik BJ. 2013. Effects of thinning on drought vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems. Ecol Appl. 23:1735–1742.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. 2009. Harmonized World Soil Database (version 1.1). Laxenburg, Austria: FAO, Rome, Italy and IIASA.
- Fernandes PM, Rigolot E. 2007. The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). For Ecol Manage [Internet]. [cited 2017 Jul 21]; 241:1–13. Available from:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112707000394>

- Fernandez C, Voiriot S, Mévy JP, Vila B, Ormeño E, Dupouyet S, Bousquet-Mélou A. 2008. Regeneration failure of *Pinus halepensis* Mill.: The role of autotoxicity and some abiotic environmental parameters. For Ecol Manage. 255:2928–2936.
- Fernandez P, Navarro R, del Valle G. 2001. Estudio de la regeneración post-incendio en masas de *Pinus pinaster* Ait. en Andalucía. Actas del III Congr For Español, Cons Medio Ambient Junta Andalucía.:469–474.
- Ganatsios HP, Tsioras PA, Pavlidis T. 2010. Water yield changes as a result of silvicultural treatments in an oak ecosystem. For Ecol Manage [Internet]. 260:1367–1374. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.033>
- Gandullo J, Sánchez O. 1994. Estaciones ecológicas de los pinares españoles. ICONA, editor. [place unknown].
- Gandullo JM. 1985. Ecología vegetal. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar.
- García A, Gómez V, Aroca MJ, Bravo, Jose Alfredo Serrada Hierro R. 2013. Factores microclimáticos que afectan a la regeneración de *Pinus pinaster* Ait. en Tierra de Pinares (Segovia). VI Congr For Español.:1–17.
- García R, Palmero M, Espelta JM. 2017. Contrasting effects of fire severity on the regeneration of *pinus halepensis* mill. And resprouter species in recently thinned thickets. Forests. 8:13–15.
- Gebhardt T, Häberle KH, Matyssek R, Schulz C, Ammer C. 2014. The more, the better? Water relations of Norway spruce stands after progressive thinning. Agric For Meteorol [Internet]. 197:235–243. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.05.013>
- Gil L, Gordo J, Alía R, Catalán G, Pardos JA. 1990. *Pinus pinaster* Aiton en el paisaje vegetal de la Peninsula Iberica. Ecologia.:469–495.
- Gómez V. 2002. Micrometeorología de masas forestales de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.) en la vertiente norte del Sistema Central (Montes de Valsaín - Segovia). Consecuencias selvícolas [Internet]. [place unknown]: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15003161><http://cid.oxfordjournals.org/lookup/doi/10.1093/cid/cir991><http://www.scielo.cl/pdf/udecada/v15n26/art06.pdf><http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84861150233&partnerID=tZ0tx3y1>
- Gómez V, Roselló R. 1997. Investigación de las marras causadas por factores ecológicos de naturaleza meteorológica. Cuad la SECF. N°4:13–25.
- González J, Martínez C, Bravo F. 2008. Evaluating different harvest intensities over understory plant diversity and pine seedlings, in a *Pinus pinaster* Ait. natural stand of Spain. For Ecol Recent Adv Plant Ecol.:211–220.
- González SC, Bravo F. 2001. Density and population structure of the natural regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the High Ebro Basin (Northern Spain). For Res. 58:277–288.

- Hamilton DA, Brickell JE. 1983. Modeling methods for a two-state system with continuous responses. *Can J For Res.*:1117–1121.
- Haylock MR, Hofstra N, Klein Tank AMG, Klok EJ, Jones PD, New M. 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J Geophys Res Atmos.* 113.
- Hocker HW. 1984. Introducción a la biología forestal [Internet]. AGT. [place unknown]: AGT. Available from: <https://books.google.es/books?id=qZ1emgEACAAJ>
- Invasive Species Specialist Group (ISSG). 2015. Global Invasive Species Database, 2015. *Pinus pinaster* [Internet]. [cited 2017 Jul 21]. Available from: <http://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=43>
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York, NY, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- López BC, Gracia CA, Sabaté S, Keenan T. 2009. Assessing the resilience of Mediterranean holm oaks to disturbances using selective thinning. *Acta Oecologica.* 35:849–854.
- López G. 2006. Los Árboles y arbustos de la Península Ibérica e Islas Baleares : (especies silvestres y las principales cultivadas). Mundi-Pren. Madrid.
- Lucas ME, Candel D, García FA, Onkelinx T, Tíscar PA, Balandier P. 2016. *Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii* seedling recruitment is affected by stand basal area, shrub cover and climate interactions. *Ann For Sci.* 73:649–656.
- Madrigal J, Hernando C, Martínez E, Díez MGC. 2005. Regeneración post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. en la Sierra de Guadarrama (Sistema Central, España): modelos descriptivos de los factores influyentes en la densidad inicial y la supervivencia. *Invest Agrar Sist Recur.* 14:36–51.
- Martín S, Coll L. 2016. Unraveling the relative importance of factors driving post-fire regeneration trajectories in non-serotinous *Pinus nigra* forests. *For Ecol Manage.* 361:13–22.
- Martínez JJ, Marín A, Herranz JM, Ferrandis P, las Heras J De. 1995. Effects of High Temperatures on Germination of *Pinus halepensis* Mill. and *P. pinaster* Aiton subsp. *pinaster* Seeds in Southeast Spain. *Vegetatio* [Internet]. 116:69–72. Available from: <http://www.jstor.org/stable/20046539>
- Mazza G, Amorini E, Cutini A, Manetti MC. 2011. The influence of thinning on rainfall interception by *pinus pinea* L. in mediterranean coastal stands (castel Fusano-Rome). *Ann For Sci.* 68:1323–1332.
- Molina AJ, del Campo AD. 2012. The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations. *For Ecol Manage* [Internet]. 269:206–213. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.037>
- Nuñez MR, Bravo F, Calvo L. 2003. Predicting the probability of seed germination in *Pinus sylvestris* L. and four competitor shrub species after fire. *Ann For Sci.*:75–81.

- Nuñez MR, Pando V, Sierra de Grado R, Bravo F. 2009. Germinación de *Pinus pinaster* bajo condiciones de sequía y bajas temperaturas. 5º Congr For Español.:10.
- Nuñez MR, Sierra R, Alía R, Bravo F. 2013. Efecto del estrés hídrico y la oscilación de las temperaturas sobre la germinación de semillas de diversas procedencias de *Pinus pinaster* Ait. VI Congr For Español.:1–12.
- Paluch JG. 2005. The influence of the spatial pattern of trees on forest floor vegetation and silver fir (*Abies alba* Mill.) regeneration in uneven-aged forests. *For Ecol Manage.* 205:283–298.
- del Peso C, Bravo F, Ruano I, Pando V. 2012. Patrones de diseminación y nascencia de *Pinus pinaster* Ait. en Meseta Castellana. :161–174.
- Pinheiro JC, Bates DM. 2000. Mixed-effects models in S and S-PLUS. Springer.:528.
- R Core Team. 2016. R: A Language and Environment for Statistical Computing [Internet]. Available from: <https://www.r-project.org/>
- Rodríguez E, Bravo F, Spies TA. 2011. Effects of overstorey canopy, plant-plant interactions and soil properties on Mediterranean maritime pine seedling dynamics. *For Ecol Manage.* 262:244–251.
- Rodriguez E, Gratzer G, Bravo F. 2011. Climatic variability and other site factor influences on natural regeneration of *Pinus pinaster* Ait. in Mediterranean forests. *Ann For Sci.* 68:811–823.
- Rodríguez 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.
- Rodríguez E, Juez L, Guerra B, Bravo F. 2007. Análisis de la regeneración natural de *Pinus pinaster* Ait. en los arenales de Almazán-Bayubas (Soria, España). *For Syst* [Internet]. 16:25–38. Available from: <http://recyt.fecyt.es/index.php/IA/article/view/2222>
- Rodríguez JR, Serrada R, Lucas JA, Reyes A, del Río M, Torres E, Cantero Amiano A. 2008. Selvicultura de *Pinus pinaster* Ait. subsp. *mesogeensis* Fieschi & Gausen. *Compend Selvicultura Apl en España.*:399–430.
- 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.
- Saxton K, Rawls WJ, Romberger J, Papendick R. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci Soc Am J.* 50:1031–1036.
- Stolf R, Thurler ÁDM, Bacchi OOS, Reichardt K. 2011. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. *Rev Bras Ciência do Solo.* 35:447–459.
- Tapias R, Gil L, Fuentes P, Pardos JA. 2001. Canopy seed banks in Mediterranean pines of southeastern Spain: A comparison between *Pinus halepensis* Mill., *P. pinaster* Ait., *P. nigra* Arn. and *P. pinea* L. *J Ecol.* 89:629–638.

- Thornton PE, Hasenauer H, White MA. 2000. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. *Agric For Meteorol* [Internet]. [cited 2017 Jul 18]; 104:255–271. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192300001702>
- Thornton PE, Running SW. 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agric For Meteorol*. 93:211–228.
- Valladares F, Dobarro I, Sánchez-Gómez D, Pearcy RW. 2005. Photoinhibition and drought in Mediterranean woody saplings: Scaling effects and interactions in sun and shade phenotypes. *J Exp Bot*. 56:483–494.
- Zhang L, Dawes WR, Walker GR. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resour Res* [Internet]. 37:701–708. Available from: [papers2://publication/uuid/5D0EAE9C-D344-4112-8945-7107661CE531](https://pubs2://publication/uuid/5D0EAE9C-D344-4112-8945-7107661CE531)