



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-165

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Régimen de claras y adaptación del pino albar al cambio climático: una aproximación mediante modelización

AMEZTEGUI, A.^{1,2}, CABON, A.^{1,2}, DE CÁCERES, M.^{1,2} y COLL, L.^{1,2,3}

¹ CREAF, Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals

² Centre Tecnològic Forestal de Catalunya CEMFOR-CTFC

³ Departament d'Enginyeria Agroforestal, Universitat de Lleida

Resumen

Las claras ejercen un efecto positivo no sólo en el crecimiento sino también en el vigor de los árboles, favoreciendo la adaptación de las masas a la escasez de precipitaciones prevista en la mayoría de escenarios climáticos futuros. Los efectos del régimen de claras en el crecimiento y productividad del pino albar son bien conocidos, pero se desconocen aún sus consecuencias sobre el balance hídrico y, en concreto, durante cuánto tiempo tras la intervención se reduce el estrés por sequía. En este estudio utilizamos un modelo de dinámica forestal y un modelo de balance hídrico para simular, bajo tres escenarios climáticos, la influencia a largo plazo de distintos regímenes de claras en el crecimiento de masas de pino albar y evaluar las consecuencias sobre el estrés hídrico. En estaciones húmedas, intensidades de clara bajas o moderadas (<30%) suponen un aumento de la producción, sin que el estrés hídrico se vea afectado. En estaciones xéricas, la reducción del estrés por sequía durante periodos largos requiere claras intensas que pueden suponer pérdidas de productividad importantes. Un compromiso razonable entre ambos objetivos parece obtenerse a intensidades medias (30 - 40%), pero los resultados sugieren que deben evitarse recetas generales que no tengan en cuenta las particularidades de la masa a intervenir.

Palabras clave

Gestión forestal, balance hídrico, estrés por sequía, servicios ecosistémicos

1. Introducción

La reducción de la densidad mediante claras es una de las técnicas selvícolas más ampliamente aplicadas, buscando normalmente mejorar el estado sanitario de la masa y concentrar el crecimiento de la misma en unos pocos individuos, de manera que se incremente la calidad y valor de la madera (DEL RÍO et al. 2008). Además, las claras presentan ventajas en cuanto a adaptación de los árboles a la sequía: en primer lugar, aumentan la cantidad de agua que penetra en el suelo, ya que disminuyen las pérdidas por interceptación de la cubierta; además, el menor número de individuos hace que se reduzca la evapotranspiración conjunta de la masa, aumentando la disponibilidad hídrica; por último, el agua disponible en el suelo se reparte entre menos árboles, por lo que éstos ven mejorado su estado hídrico (MARTÍN-BENITO et al. 2010; DEL CAMPO et al. 2011). Por todo ello, cada vez es más frecuente plantearse la realización de claras para hacer frente a la disminución de precipitaciones y el aumento de los periodos de sequía que cabe esperar en el actual contexto de cambio climático (LINDNER et al. 2010).

Sin embargo, el mayor crecimiento de los pies residuales tras una clara lleva a que los efectos de dicho tratamiento sean temporales, y su duración e intensidad dependen tanto del régimen de claras aplicado como de las condiciones de la estación, fundamentalmente del clima. Por ello, si se quiere utilizar las claras como método para paliar los efectos adversos del cambio climático, es necesario evaluar antes cuál será la respuesta a largo plazo de distintos tipos de claras bajo diferentes escenarios climáticos.

Existen numerosos estudios que han monitorizado los efectos de las claras en masas de pino albar (*Pinus sylvestris* L.), y algunos de ellos incluyen evaluaciones a largo plazo de los efectos sobre el crecimiento, la resistencia y resiliencia a eventos de sequía (MONTERO et al. 2001; PELTOLA et al. 2002; DEL RÍO et al. 2008). Sin embargo, aún no disponemos de información sobre cómo el cambio climático puede afectar a la respuesta de los bosques a los diferentes regímenes de claras. La dificultad para evaluar esta cuestión es doble: por un lado, requiere monitorizar durante una serie temporal larga los efectos de distintos regímenes de claras sobre las variables de interés. Por otro lado, existe una inherente imposibilidad de evaluar los efectos de climas futuros mediante estudios observacionales. En este trabajo proponemos hacer frente a estas limitaciones mediante la modelización de los procesos objeto de estudio, utilizando para ello dos modelos: uno de dinámica forestal y otro de balance hídrico.

2. Objetivos

El primer objetivo de este trabajo es evaluar si la aproximación propuesta, mediante modelos de simulación, permite caracterizar y predecir la dinámica post-clara en masas de pino albar. Esto se evaluará comparando los valores de crecimiento, diámetro y área basimétrica obtenidos en este trabajo con estudios observacionales previos.

Además, también pretendemos determinar el papel de las condiciones estacionales y el escenario climático en la respuesta de las masas de pino albar a diferentes regímenes de claras. En concreto, evaluaremos el papel de dichos factores sobre (a) la productividad de las masas (evaluada como área basimétrica final, crecimiento, y distribución diamétrica al final del turno); y (b) el estado hídrico (evaluado mediante un índice de estrés hídrico).

Por último, este trabajo pretende identificar la existencia de compensaciones o *trade-offs* entre el aumento de producción y la mejora del estado hídrico inducidas por las claras. La existencia de estos mecanismos de compensación indicaría que no es posible maximizar los beneficios de las claras sobre ambos objetivos a la vez, obligando a los gestores a favorecer un régimen u otro dependiendo del objetivo prioritario de la gestión, de la estación y del clima.

3. Metodología

Para llevar a cabo los objetivos expuestos, utilizamos dos modelos de distinta índole, que han sido previamente validados y testados por separado. En primer lugar, utilizamos SORTIE-ND para simular el crecimiento y mortalidad de las masas estudiadas tras la realización de las claras. SORTIE-ND es un modelo de dinámica forestal espacialmente explícito y basado en el individuo (CANHAM et al. 2005), que ha sido ampliamente utilizado en diversos ecosistemas forestales de todo el mundo (AMEZTEGUI ET AL. 2016). SORTIE-ND calcula de manera independiente el crecimiento de cada individuo, en función de su tamaño, el clima (precipitación y temperatura anual) y la cantidad de competencia ejercida por los vecinos. Esto lo hace especialmente adecuado para simular el efecto de las claras en un contexto de cambio climático. Los parámetros necesarios para determinar el crecimiento del pino albar en función de dichas variables se obtuvieron de GÓMEZ-APARICIO ET AL. (2011).

Por otro lado, los cálculos de balance hídrico y estrés por sequía se llevaron a cabo mediante el modelo desarrollado por DE CÁCERES ET AL. (2015), e incluido en el paquete de R *medfate*. Dicho modelo determina la disponibilidad de agua en el suelo a resolución diaria, en función del clima diario, de las características del suelo (textura, profundidad, contenido en roca), y de la estructura de la vegetación (que determina la evapotranspiración). De esta manera permite calcular el nivel de estrés por sequía al que está sometida la vegetación en todo momento.

Para testar la validez de nuestra aproximación, simulamos tres masas de pino albar bajo distintas condiciones estacionales (húmeda, mélica y xérica), de manera que se capturara la variabilidad ambiental que encuentra esta especie en Cataluña, donde crece desde los valles húmedos del Valle de Arán, hasta en las laderas semiáridas de las montañas de Prades o los puertos de Beseit. En cada una de estas masas, definimos una estructura inicial de tipo regular, generada para cada estación a partir de una distribución normal con un diámetro medio cuadrático de 12.5 cm, una desviación estándar de 1.87 cm y un número de pies acorde al SDI de Reineke para esta especie y al clima (CONDÉS ET AL. 2017). Dicho diámetro medio corresponde aproximadamente a la edad de aplicación de las primeras claras según las orientaciones de gestión para el pino albar en Cataluña (ORGEST, PIQUÉ ET AL. 2011). Las características de estación y dasométricas de cada una de las masas estudiadas se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características dasométricas y estacionales de las parcelas estudiadas

	Húmeda	Mélica	Xérica
Temperatura media anual (°C)	8.7	12.0	12.5
Precipitación anual (mm)	828.0	714.3	564.3
Índice de aridez de Martonne	44.3	32.5	25.1
Densidad (pies/ha)	2510	2377	2278
Área basimétrica	31.4	29.7	28.6

Una vez definidas las condiciones iniciales de cada una de las tres parcelas de estudio (Tabla 1), dichas masas fueron creadas en SORTIE-ND, y a cada una de ellas se le aplicaron 8 tratamientos de reducción de la densidad: un control, en el que no se realizó ninguna clara, y otros siete en los que el área basimétrica se redujo un 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70%, respectivamente. Dicho tratamiento se aplicó cuando la masa tenía un diámetro medio cuadrático de 12,5 cm, de acuerdo a las recomendaciones de gestión en la zona (PIQUÉ ET AL. 2011). Posteriormente se simuló la dinámica de estas masas durante 90 años bajo tres escenarios climáticos: uno sin cambio, donde los valores climáticos medios y la variabilidad fueron los mismos que en el periodo 2000-2010; otro moderado, que corresponde a las predicciones regionalizadas acorde al escenario de emisiones del IPCC B2; y finalmente un escenario severo, correspondiente al escenario de emisiones A2. En resumen, el número de tratamientos testado fue de 72 (3 estaciones x 8 regímenes de claras x 3 escenarios climáticos). Cada tratamiento fue replicado 10 veces, resultando un total de 720 simulaciones realizadas.

El flujo de integración entre ambos modelos fue el indicado en la Figura 1. SORTIE simula el crecimiento y mortalidad anual de cada uno de los árboles, y genera un fichero con la composición y estructura actualizada de la parcela. Dicho fichero es importado por el modelo de balance hídrico, que determina el índice de área foliar (LAI) de la parcela, y en función del clima, suelo y estructura, calcula la evapotranspiración, el contenido de agua en el suelo, y la conductancia de las plantas. Para este estudio, las condiciones edáficas se consideraron constantes, con una profundidad de 50 cm, una textura limosa y un contenido en rocas del 10% en volumen. Una vez conocida la conductancia, calculamos el estrés hídrico diario ($Est_{día}$) como $1 - \text{conductancia}$, mientras que el estrés hídrico anual se calculó como la media de $Est_{día}$ durante los 30 días consecutivos más secos del año. Finalmente, el índice de estrés durante el conjunto del periodo estudiado se definió como la media de los 5 años con mayor estrés hídrico anual.

4. Resultados

Los valores de área basimétrica, densidad de pies, diámetro medio cuadrático y distribución diamétrica obtenidos mediante simulación resultaron similares a los obtenidos en otros estudios observacionales previos. Dependiendo de la intensidad de clara, la estación y el escenario climático

testado, el área basimétrica observada tras 90 años de simulación varió entre 30 y 55 m²ha⁻¹. Observamos un efecto no lineal de la intensidad de clara en el área basimétrica final, de manera que los valores máximos se obtuvieron en todos los casos para intensidades medias, cuando se extraía entre el 20 y el 40% del área basimétrica. Sin embargo, el área basimétrica máxima se obtuvo a diferentes intensidades de clara en función de las condiciones de estación y el escenario climático (Figura 2a). En la estación húmeda, la mayor producción se obtuvo para intensidades de clara del 30%, mientras que en las estaciones mésica y xérica ningún tratamiento resultó en valores finales de área basimétrica significativamente mayores que el control. En todos los casos, el área basimétrica final decayó sensiblemente para intensidades altas de claras (>40% de extracción), ya que el mayor crecimiento de los pies remanentes no pudo compensar la fuerte disminución de densidad provocada por la clara. Las diferencias entre escenarios climáticos fueron relativamente pequeñas y no variaban con la intensidad de clara.

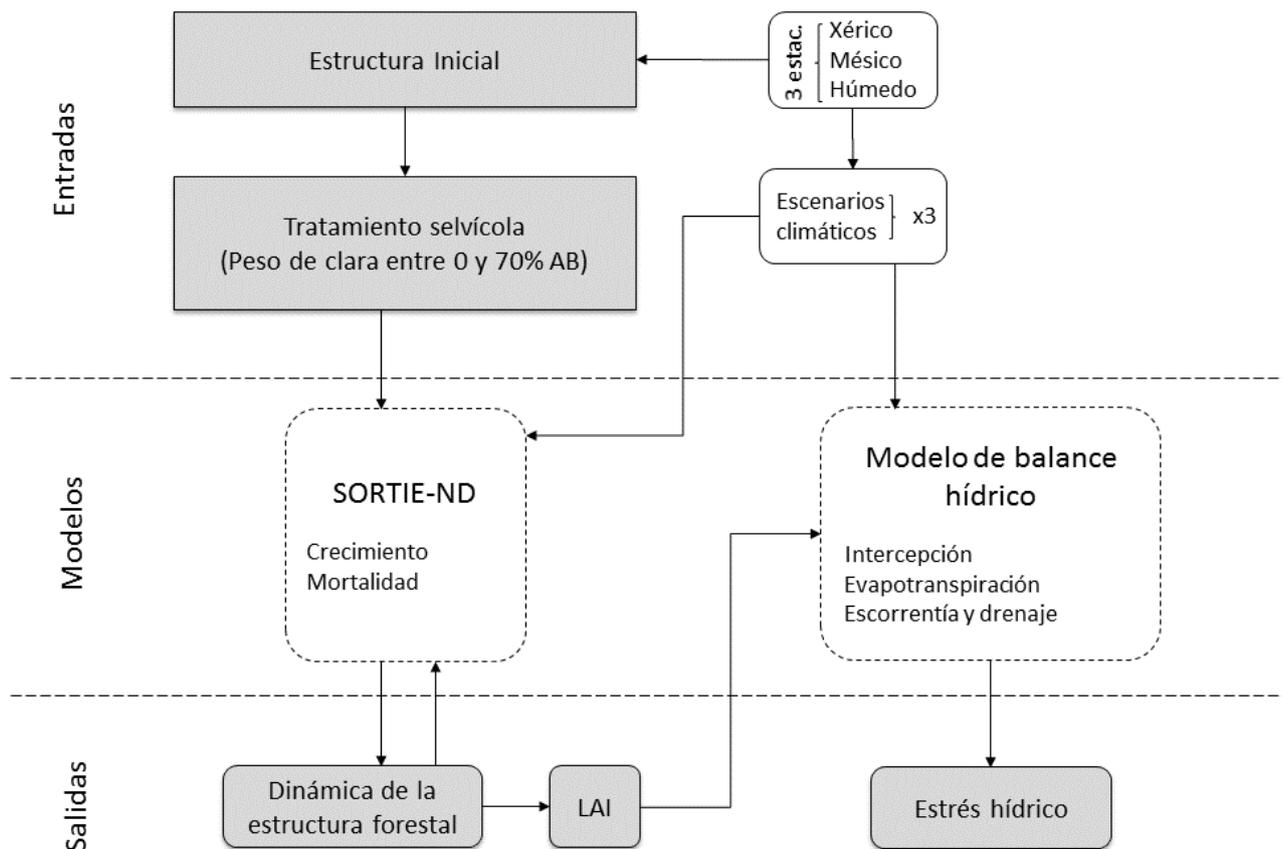


Figura1. Esquema del procedimiento seguido para realizar las simulaciones del efecto del régimen de claras y el escenario climático en la productividad y estado hídrico de tres parcelas de pino albar simuladas. El diagrama muestra la integración entre SORTIE-ND y el modelo de balance hídrico incluido en medfate. Las características de la estación definen la estructura inicial, que se introduce en SORTIE-ND. Tras aplicar los 8 tratamientos selvícolas definidos, SORTIE-ND simula el crecimiento y mortalidad de la masa en función de la competencia y el clima, proporcionando salidas anuales de estructura y composición de la masa. Dichos ficheros de salida son utilizados, junto con los datos climáticos, por el modelo de balance hídrico, que calcula la interceptación, evapotranspiración, escorrentía y drenaje profundo. Estos valores sirven a su vez para determinar el estrés hídrico de los árboles remanentes.

El estrés hídrico resultó mayor cuanto más xérica fuera la estación o más severo el escenario climático testado (Figura 2b). En las parcelas control, el índice de estrés hídrico estaba por debajo de 0.5 (valor en el que se estima que se pueden observar fenómenos generalizados de mortalidad por sequía) en la estación húmeda, independientemente del escenario climático testado. En la estación xérica, en cambio, las parcelas control siempre presentaban valores del índice de estrés superiores a 0.5. La estación méstica presentaba una situación intermedia, ya que los valores de estrés de las parcelas control estaban por encima o debajo de 0.5 en función del escenario climático testado. En general, las claras provocaron una disminución consistente del estrés sufrido por los árboles, y las diferencias entre escenarios climáticos fueron menores cuanto mayor fue la intensidad de clara. Para los tratamientos más fuertes (reducción del área basimétrica del 70%) el índice de estrés se mantuvo cercano a cero para todas las parcelas y escenarios climáticos testados.

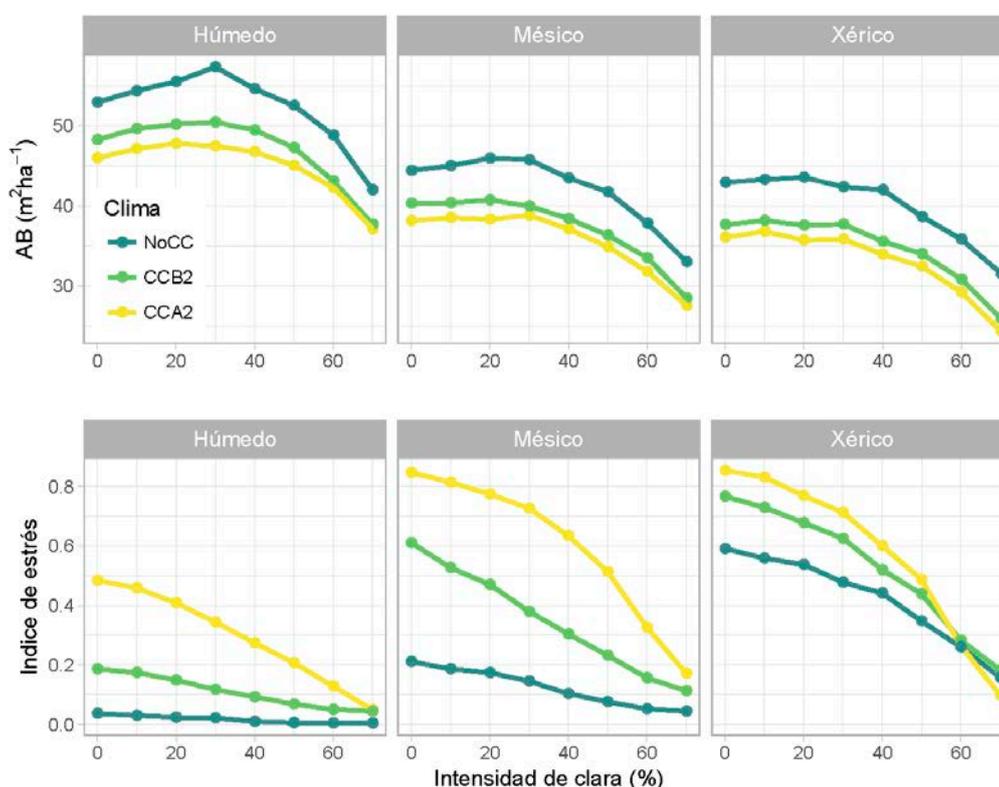


Figura2. Variación del área basimétrica final (A) y el máximo estrés hídrico (B) en función de la intensidad de clara, la estación y el escenario climático.

La reducción de la densidad mediante claras provocó un aumento inmediato en el crecimiento de la masa, medido como incremento de área basimétrica (Figura 3a). Sin embargo, dicho efecto se fue reduciendo paulatinamente, ya que el crecimiento de las parcelas aclaradas se fue reduciendo con el transcurso de los años – más rápidamente cuanto mayor fuera la intensidad de la clara – mientras que el crecimiento de las parcelas control se mantuvo o incluso se incrementó ligeramente con el tiempo. Como consecuencia, el crecimiento de las parcelas tratadas era indistinguible de los controles transcurridos 40 – 50 años desde la ejecución del tratamiento. Las diferencias en crecimiento entre escenarios climáticos resultaron mayores cuanto menor fuera el peso de la clara, y por lo tanto fueron máximas para las parcelas control.

En cuanto el estrés hídrico, la tendencia fue lógicamente a aumentar con el tiempo para los escenarios de cambio climático, que predicen un aumento importante de temperaturas y una reducción leve de la precipitación. En las estaciones húmedas, sin embargo, este aumento fue muy escaso, e incluso inexistente en aquellas parcelas en que se habían aplicado claras (Figura 3b). En cambio, en la estación xérica el valor del índice de estrés era bastante alto al final de las simulaciones, incluso con pesos de clara del 30%. Sólo las claras drásticas (peso cercano al 70% del área basimétrica) evitaron que el índice de estrés superara los valores que indicarían riesgo alto de mortalidad para la masa (que se estima ocurriría a partir de valores del índice de 0.5). En el caso de la estación méstica, una intensidad media de claras (30%) sólo resultaría efectiva en ausencia de cambio climático o si éste es moderado, pero no sería capaz de evitar los altos valores de estrés en caso de darse el escenario más drástico (A2).

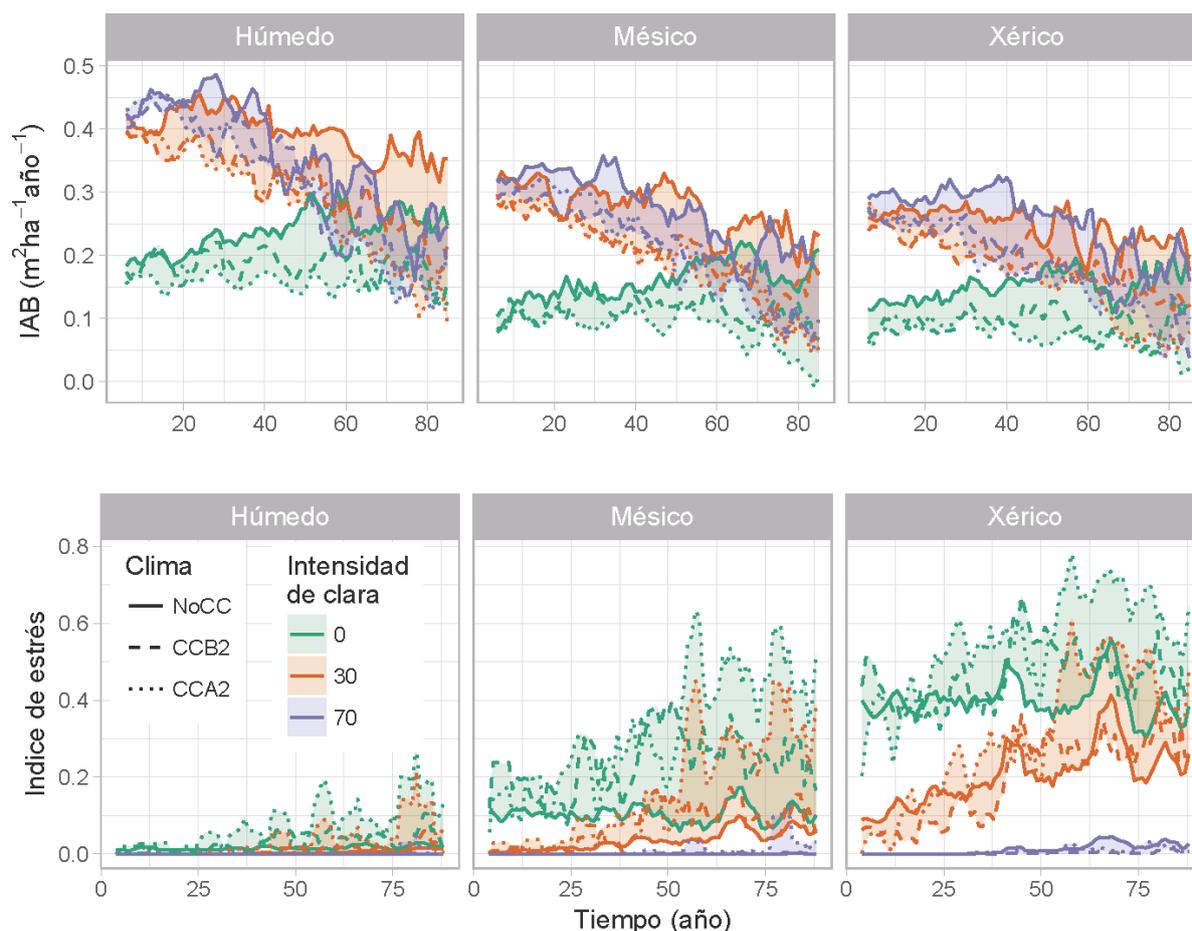


Figura3. Variación a lo largo del tiempo del incremento en área basimétrica (arriba) y el índice de estrés hídrico (abajo) en función de la intensidad de clara, la estación y el escenario climático para tres masas de pino albar simuladas. Nótese que por mayor claridad sólo se muestran los valores correspondientes al tratamiento control, una clara moderada (30%) y una clara muy intensa (70%). Los valores representan medias móviles a lo largo de 5 años, para evitar que la variabilidad interanual impida observar las tendencias a largo plazo.

Por último, el análisis conjunto de los efectos de clara, estación y clima en la productividad y estrés hídrico mostró la imposibilidad de maximizar ambos efectos al mismo tiempo, sobre todo en las parcelas de estación más xérica. Así, para reducir el estrés hídrico de los árboles a unos valores aceptables (<0.5) son necesarias claras muy fuertes, lo cual repercutiría negativamente en la producción de la parcela. En el caso de las parcelas de carácter méstico se observó lo mismo para el escenario climático más extremo, mientras que en el escenario moderado (B2), una clara con un peso

del 30% permitiría reducir el índice de estrés a valores inferiores a 0.5, sin repercusiones negativas en el área basimétrica final de la parcela (Figura 4). En el caso de la estación mélica y el escenario sin cambio climático, al igual que en la estación más húmeda – en este caso para cualquier escenario climático – los valores de estrés hídrico permanecieron por debajo de 0.5 independientemente del tratamiento aplicado, lo que indica que en este caso el peso óptimo de clara podría determinarse en base a criterios estrictamente productivistas.

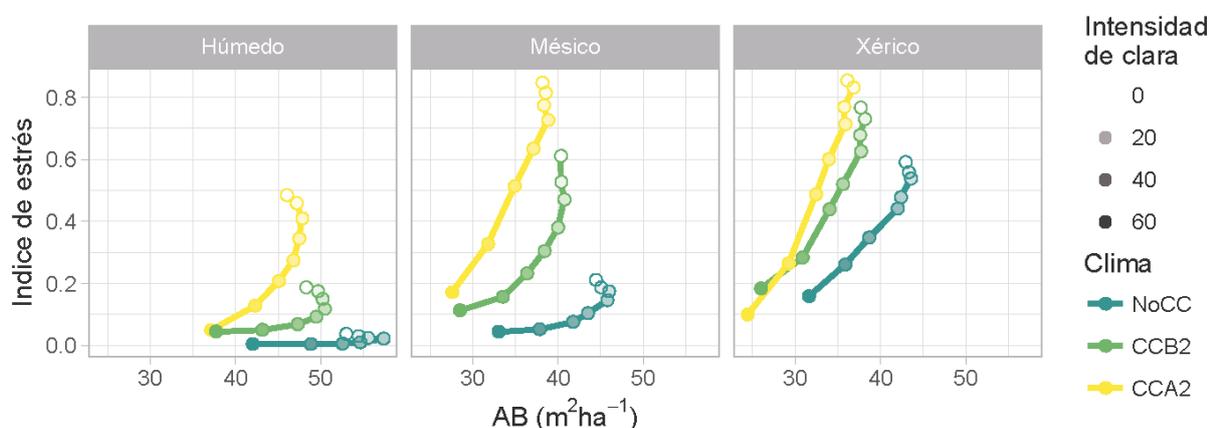


Figura 4. Relación entre el área basimétrica final y el índice de estrés hídrico para parcelas de pino albar en función de la intensidad de clara (definida por la intensidad de los puntos), la estación, y el escenario climático (NoCC: sin cambio climático, CCB2: escenario moderado (B2); CCA2: escenario severo).

5. Discusión

Nuestros resultados muestran que la aproximación propuesta en este estudio, mediante integración de dos modelos de características muy diferentes, resultó adecuada para predecir la dinámica post-clara en las masas de pino albar estudiadas. A pesar del carácter puramente teórico del trabajo, los valores de área basimétrica, diámetro medio y densidad obtenidos tras las claras fueron muy similares a los obtenidos en estudios observacionales previos, y muestran que el modelo de dinámica forestal es capaz de simular de forma realista la liberación en crecimiento ejercida por las claras. El diámetro medio en las parcelas aclaradas de forma más intensa era ~1.5 veces superior a las parcelas control a la mitad de la simulación (45 años) y el doble al final de la misma (90 años), valores cercanos a los observados para pino albar en España (MONTERO ET AL. 2001, DEL RÍO ET AL. 2008). El crecimiento, medido como incremento de área basimétrica por hectárea y año, se dobló tras la realización de claras moderadas, también en acuerdo con estudios previos (DEL RÍO ET AL. 2008; SOHN ET AL. 2016), mientras que los valores de área basimétrica al final de la simulación (cuando la masa tendría 110 años) se corresponden con los observados en masas maduras en Cataluña (PIQUÉ et al. 2011). Además, estudios previos han observado que la máxima producción de las parcelas se obtiene habitualmente a intensidades medias, ya que cuando las claras son muy fuertes, el mayor crecimiento de los pies remanentes no es suficiente para compensar la descapitalización que supone la fuerte reducción de densidad.

En este estudio hemos asumido que valores del índice de estrés hídrico inferiores a 0.5 suponen un riesgo importante de mortalidad generalizada en la parcela. De hecho, estudios previos han apuntado que pérdidas de conductividad superiores al 50% constituyen un umbral a partir del cual se producen daños irreversibles en coníferas (BRODRIBB et al. 2010). En estaciones xéricas y con los valores climáticos actuales, el índice de estrés ya superaba el umbral de 0.5, lo cual corresponde con los fenómenos de mortalidad y decaimiento observados en el límite sur de distribución de la especie en Cataluña (MARTÍNEZ-VILALTA & PIÑOL, 2002). Aunque el efecto de las

claras en la reducción del estrés hídrico fue mayor en las estaciones xéricas, dicho efecto desapareció en unos pocos años, salvo en el caso de las claras más intensas. Sin embargo, en las estaciones méxicas el efecto de un peso de clara del 30% aún se podía percibir entre 20 y 40 años después del tratamiento, dependiendo del escenario climático. Esto apunta a que, en un escenario de sequías más intensas y frecuentes se requerirán menores rotaciones de clara para mantener los efectos positivos en la masa residual (SOHN et al. 2016).

En esta línea, nuestros resultados apuntan a que la reducción del estrés mediante claras puede ser una buena opción selvícola para incrementar la resistencia del pino albar a la sequía. No obstante, bajo condiciones muy severas (estaciones xéricas y escenarios climáticos severos), la mejora de las condiciones hídricas no parece suficiente, y serían necesarias intervenciones muy drásticas y frecuentes para garantizar la persistencia de la especie. En las estaciones húmedas y méxicas, que albergan las masas de pino albar más productivas, es posible obtener un compromiso entre la productividad y la mejora del estado hídrico a través de la aplicación de claras de intensidad media (~30% de extracción del área basimétrica). Sin embargo, la respuesta de las masas situadas en estaciones méxicas parece muy dependiente del escenario climático considerado, lo que sugiere ser cauto a la hora de aplicar tratamientos de manera generalizada.

6. Conclusiones

Tal y como se esperaba, nuestros resultados muestran que existe un *trade-off* o mecanismo de compensación entre la productividad y la reducción del estrés hídrico mediante claras. Además, dicho *trade-off* es dependiente de la estación y del clima, de manera que ambos objetivos sólo podrían compatibilizarse en las parcelas de carácter más húmedo. En general, la aplicación de claras reduce de manera importante el estrés hídrico de los árboles remanentes, pero en las estaciones más xéricas dicha reducción sólo es posible mediante tratamientos muy drásticos. En los casos más extremos, ni siquiera estos tratamientos parecen suficientes, y el riesgo de mortalidad asociado a la sequía parece sugerir que no se pueda favorecer la adaptación de la especie al cambio climático mediante claras. En las situaciones intermedias, existe un compromiso ente producción y mejora del estado hídrico que debe ser evaluado por los gestores caso por caso. En resumen, nuestros resultados apuntan a que debe evitarse aplicar directrices de gestión generalizadas que no tengan en cuenta las características propias de cada estación y el escenario climático más plausible para cada zona.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y el proyecto INFORMED (Era-Net FORESTERRA). Esta investigación es una contribución al programa CERCA de la Generalitat de Catalunya. Los datos climáticos fueron elaborados en el marco del proyecto MONTES. Los autores agradecen a Lorena Gómez-Aparicio la ayuda para la obtención de los parámetros de crecimiento de *Pinus sylvestris*.

8. Bibliografía

AMEZTEGUI, A; PAQUETTE, A; SHIPLEY, B; HEYM, M; MESSIER, C; GRAVEL, D. 2016. Shade tolerance and the functional trait - demography relationship in temperate and boreal forests. *Func. Ecol.* In press.

BRODRIBB, TJ; BOWMAN, D; NICHOLS, S; DELZON, S; BURLETT, R. 2010. Xylem function and growth rate interact to determine recovery rates after exposure to extreme water deficit. *New Phytol.* 188: 533-542.

CANHAM, C.D; MURPHY, L.E; PAPAİK, M.J. 2005. SORTIE-ND: Software for spatially explicit simulation of forest dynamics. Disponible en <http://sortie-nd.org>

CONDÉS, S; VALLET, P; BIELAK, K; BRAVO-OVIEDO, A; COLL, L; DUCEY, MJ; PACH, M; PRETZSCH, H, STERBA, H; VAYREDA, J; DEL RÍO, M. 2017. Climate influences on the maximum size-density relationship in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) stands. *For. Ecol. Manage.* 385: 295-307.

DE CÁCERES, M; MARTÍNEZ-VILALTA, J; COLL, L; LLORENS, P; CASALS, P; POYATOS, R; PAUSAS, J.G; 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. *Agríc. For. Meteorol.* 213, 77–90

DEL CAMPO, A.D; MOLINA, A.J; GARCIA-PRATS, A; TORRENT, J.A; LOPEZ-SARDA, L. 2011. Influencia de las claras sobre la trascolación y la humedad del suelo en masas repobladas de pino carrasco: resultados preliminares. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 32, 65–70.

DEL RÍO, M; CALAMA, R; CAÑELLAS, I; ROIG, S; MONTERO, G. 2008. Thinning intensity and growth response in SW-European Scots pine stands. *Ann. For. Sci.* 65, 308.

GÓMEZ-APARICIO, L; GARCÍA-VALDÉS, R; RUIZ-BENITO, P; ZAVALA, M.A. 2011. Disentangling the relative importance of climate, size and competition on tree growth in Iberian forests: implications for forest management under global change. *Glob. Chang. Biol.* 17, 2400–2414.

LINDNER, M; MAROSCHEK, M; NETHERER, S; KREMER, A; BARBATI, A; GARCIA-GONZALO, J; SEIDL, R; DELZON, S; CORONA, P; KOLSTRÖM, M; LEXER, M.J; MARCHETTI, M. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* 259, 698–709.

MARTÍN-BENITO, D; DEL RÍO, M; HEINRICH, I; HELLE, G; CAÑELLAS, I. 2010. Response of climate-growth relationships and water use efficiency to thinning in a *Pinus nigra* afforestation. *For. Ecol. Manage.* 259, 967–975.

MARTÍNEZ-VILALTA, J; PIÑOL, J. 2002. Drought-induced mortality and hydraulic architecture in pine populations of the NE Iberian Peninsula. *For. Ecol. Manage.* 161, 247–256.

MONTERO, G; CAÑELLAS, I; ORTEGA, C; DEL RÍO, M. 2001. Results from a thinning experiment in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) natural regeneration stand in the Sistema Ibérico Mountain Range (Spain). *For. Ecol. Manage.* 145, 151–161.

PELTOLA, H; MIINA, J; ROUVINEN, I; KELLOMÄKI, S. 2002. Effect of early thinning on the diameter growth distribution along the stem of Scots pine. *Silva Fenn.* 36, 813–825.

PIQUÉ, M., BELTRÁN, M., VERICAT, P., CERVERA, T., FARRIOL, R., BAIGES, T., 2011. Models de gestió per als boscos de pi roig (*Pinus sylvestris* L.): producció de fusta i prevenció d'incendis forestals. Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya, Barcelona, España.

SOHN, J.A; HARTIG, F; KOHLER, M; HUSS, J; BAUHUS, J. 2016. Heavy and frequent thinning promotes drought adaptation in *Pinus sylvestris* forests. *Ecol. Appl.* 26, 2190–2205.