

Control de la densidad y proporciones de especies en masas mixtas

Miren del Río¹,
Sonia Condés²,
Ana Aguirre³

¹ Profesora de Investigación, Instituto de Ciencias Forestales ICIFOR-INIA, CSIC

² Profesora Titular de Universidad, Departamento de Sistemas y Recursos Naturales. Universidad Politécnica de Madrid

³ Profesora ayudante. Doctor, Departamento de Sistemas y Recursos Naturales. Universidad Politécnica de Madrid

Las masas mixtas juegan un papel importante en la adaptación al cambio climático; sin embargo, todavía existen pocas herramientas para su gestión. En este trabajo presentamos un método para el control de la densidad y las proporciones de especies en masas mixtas. Primero se revisan el concepto de línea de máxima densidad y el índice de densidad de Reineke máximo en masas puras, que son específicos de cada especie. En segundo lugar, se introduce el coeficiente de equivalencia de la densidad (DEC) entre especies, que permite relacionar la densidad de las especies en la mezcla considerando que tienen distintas capacidades de carga. Posteriormente se explica cómo calcular la densidad de la masa y las proporciones de especies en masas mixtas mediante el uso de los DEC. Finalmente, se expone cómo aplicar estos conceptos para la regulación de la densidad y las proporciones de especies en masas mixtas.

Palabras clave: Masas mixtas, Índice de densidad de Reineke, proporción de especies, claras

INTRODUCCIÓN

Existen numerosas evidencias de que las masas mixtas ofrecen una serie de ventajas frente a las masas puras, como una productividad mayor y más estable, mayor resistencia y resiliencia frente a perturbaciones bióticas y abióticas o una mejor provisión de servicios ecosistémicos (Jactel et al., 2017; Calama et al., 2021; Pardos et al., 2021; del Río et al., 2022). Como consecuencia, ante un escenario de cambio climático, las políticas forestales y los instrumentos de planificación a distintas escalas, europea, nacional y regional, recogen la promoción y mantenimiento de

bosques más diversos como una de las medidas para la adaptación y la mitigación del cambio climático.

A pesar del creciente número de estudios sobre masas mixtas, mayormente centrados en el efecto de la interacción entre especies en el crecimiento, todavía son escasas las herramientas de gestión disponibles para este tipo de masas. Actualmente, existen algunos modelos de crecimiento válidos para masas mixtas que pueden utilizarse para analizar distintos escenarios selvícolas (por ejemplo, Calama et al., 2021; Rodríguez de Prado et al., 2023). Sin embargo, las guías de

gestión o modelos selvícolas para masas mixtas no suelen ofrecer información cuantitativa detallada y, con frecuencia, no consideran los efectos de la interacción de especies en la dinámica de las masas forestales (Piqué et al., 2017).

La regulación de la densidad de la masa y del espacio disponible para cada individuo es la base de la mayor parte de los tratamientos selvícolas y uno de los pilares fundamentales de la selvicultura. Un ejemplo son las normas selvícolas que reflejan la evolución de la densidad de la masa con la edad o con el desarrollo de la altura dominante. En masas puras, con frecuencia se utiliza la línea de autoaclareo o línea de máxima densidad de la especie como referencia para el control de la densidad. La línea de máxima densidad fue definida por Reineke en 1933, representa la relación entre el máximo número de pies por hectárea que pueden ocupar un rodal y el diámetro medio cuadrático de los mismos, y es específica para cada especie, aunque puede cambiar según las condiciones de la estación (Condés et al., 2017; Aguirre et al., 2018). Por lo tanto, el número de árboles de un tamaño dado que caben

en una hectárea varía según la especie, es decir, la capacidad de carga es distinta para cada especie en una determinada estación, aspecto que se debe considerar en la regulación de la densidad en masas mixtas.

Las normas selvícolas basadas en la línea de máxima densidad proponen mantener la masa en un intervalo de densidades definido como un porcentaje de la máxima densidad, normalmente expresada mediante el máximo valor del Índice de densidad de Reineke, SDI_{max} , (ver sección siguiente). Long (1985) propuso como intervalo de referencia general para la gestión el 35-60 % del SDI_{max} , aunque otros estudios proponen otros intervalos adaptados a distintas condiciones particulares. Por ejemplo, para la gestión de repoblaciones de pino negral, pino silvestre y pino laricio, del Río et al. (2006) proponen los intervalos de 25-45 %, 35-50 % y 25-55 % del SDI_{max} de cada especie, respectivamente.

En este trabajo mostramos un método para el control de la densidad en masas mixtas a partir de las relaciones de máxima densidad de las especies en masas puras (Pretzsch y del Río, 2020). Exponemos el método

a partir del ejemplo de la mezcla de especies pino silvestre-haya, pero se podría extender a cualquier otra mezcla.

LÍNEA DE MÁXIMA DENSIDAD EN MASAS PURAS

La máxima densidad o máxima capacidad de carga para una especie se puede describir a través de la línea de autoaclareo, o línea de máxima densidad basada en la expresión de Reineke (1933), que relaciona la máxima densidad o número de pies máximo (N_{max}) por hectárea con el diámetro medio cuadrático de la masa (dg). Este autor encontró que la relación entre estas dos variables sigue la expresión $N_{max} = a \cdot dg^b$ con $b = -1,605$, común para todas las especies, que en escala doble logarítmica es una recta con pendiente -1,605.

Partiendo de la línea de máxima densidad, Reineke define el índice de densidad de la masa o índice de densidad de Reineke (SDI , del inglés *stand density index*) como el número de pies por hectárea para un dg de referencia igual a 25 cm (ecuación 1).

$$SDI = N \cdot \left(\frac{25}{dg} \right)^b \quad Ec.1$$



donde N es el número de pies por hectárea de la masa forestal y dg su diámetro medio cuadrático, en cm. El índice de densidad de Reineke máximo (SDI_{max}) es, por lo tanto, el N_{max} de la masa para un dg de 25 cm.

El valor obtenido al comparar el SDI de una masa con el valor máximo que se podría alcanzar para el mismo dg de referencia (SDI_{max}) indica la densidad relativa (RD , *relative density*), $RD = SDI/SDI_{max}$. La expresión del RD se puede generalizar para cualquier dg como el número de pies de un tamaño dado que presenta la masa respecto al máximo para ese mismo tamaño ($RD=N/N_{max}$). El máximo valor de RD para una masa pura es de 1, es decir, cuando la masa se encuentre en máxima densidad.

Desde el trabajo de Reineke en 1933 se han realizado numerosos estudios en los que se ha constatado que la pendiente no es siempre la misma, sino que varía con la especie y con las condiciones de la estación (p. ej. Condés et al., 2017; Aguirre et al., 2018; Rodríguez de Prado et al., 2020). En la Figura 1a y b se presentan las líneas de máxima densidad para pino silvestre y haya según los valores obtenidos por Condés et al. (2017) para una estación con un valor promedio del índice de Martonne (Precipitación/(Temperatura+10)) de 70 mm/°C. En este ejemplo, las expresiones de las líneas de máximas densidad son:

$$P. \text{ silvestre: } N_{max} = 146489 \cdot dg^{-1,511} \quad Ec.2$$

$$\text{Haya: } N_{max} = 442413 \cdot dg^{-1,909} \quad Ec.3$$

Como se observa en la Figura 1, el haya parte de una mayor densidad máxima que el pino silvestre cuando el tamaño medio de los árboles es pequeño, pero esta relación se revierte para mayores tamaños como consecuencia del exponente b más negativo (pendiente más negativa Fig. 1b). Es decir, para un diámetro cuadrático medio elevado, la densidad máxima del pino es mayor que la de haya (mayor capacidad de carga). La línea de máxima densidad se puede expresar a su vez en términos de área basimétrica, $G_{max} = a' \cdot dg^{b+2}$, multiplicando en ambos lados de la ecuación por $dg^2 \cdot \pi / 40\,000$ (Fig. 1c).

Sustituyendo en las Ec. 2 y Ec. 3 el dg por 25 cm se obtienen los SDI_{max} para pino silvestre y haya, respectivamente, es decir, 1 130 pies/ha para pino silvestre y 950 pies/ha para haya.

COEFICIENTES DE EQUIVALENCIA DE DENSIDAD ENTRE ESPECIES

Como las distintas especies forestales ocupan de distinta manera el espacio y, por consiguiente, presentan distintos valores de máxima densidad de la masa o distintas capacidades de carga, se necesita considerar estas diferencias cuando se trabaja en masas mixtas. Para ello, resultan especialmente útiles los coeficientes de equivalencia de densidad entre especies, que relacionan las distintas capacidades de carga entre especies. Dadas dos especies 1 y 2, cuyas líneas de máxima densidad vienen dadas por: $N_{max1} = a_1 \cdot dg_1^{b1}$ y $N_{max2} = a_2 \cdot dg_2^{b2}$

el coeficiente de equivalencia de densidad entre la especie 1 y la especie 2 dependiente del diámetro medio cuadrático de ambas especies ($DEC_{1/2}(dg_1, dg_2)$) viene dado por el cociente de la máxima densidad de la especie 1 entre la de la especie 2,

$$DEC_{1/2}(dg_1, dg_2) = \frac{N_{max1}}{N_{max2}} = \frac{a_1}{a_2} \cdot dg_1^{b1} \cdot dg_2^{-b2} \quad Ec.4$$

Si ambas especies tienen el mismo diámetro medio cuadrático, la Ec.4 se simplifica en la siguiente expresión,

$$DEC_{1/2}(dg) = \frac{a_1}{a_2} \cdot dg^{b1-b2} \quad Ec.5$$

mientras que para un diámetro de referencia común de 25 cm, el coeficiente de equivalencia de densidad ($DEC_{1/2}$) resulta en el cociente entre los índices de máxima densidad de las dos especies (Ec.6).

$$DEC_{1/2} = SDI_{max1}/SDI_{max2} \quad Ec.6$$

Por lo tanto, el coeficiente de equivalencia de densidad entre especies depende del tamaño de las especies. Si en la expresión de las líneas de máxima densidad el parámetro b (pendiente de la recta en escala doble logarítmica) fuese común para las dos especies, el valor de $DEC_{1/2}$ siempre sería el cociente de los índices de máxima densidad de la masa de las dos especies, lo que simplificaría enormemente su aplicación.

En el ejemplo que estamos tratando, la máxima densidad del pino silvestre es $SDI_{max}=1\,130$ pies/ha, mientras que

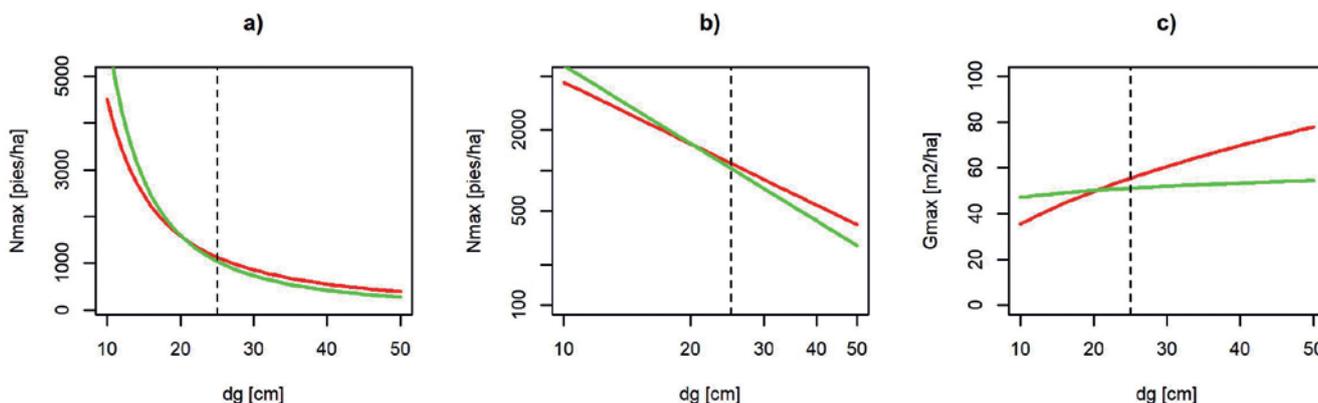


Figura 1: Línea de máxima densidad o de autoclareo para pino silvestre (línea roja) y haya (línea verde) expresada en número de pies por hectárea según diámetro medio cuadrático (a), su transformación doble logarítmica (b) y en términos de área basimétrica según diámetro medio cuadrático (c). La línea vertical discontinua representa el diámetro de referencia (25 cm).

la del haya es 950 pies/ha, por lo que el $DEC_{pino/haya}$ es 1,19 (Ec.6); es decir, por cada haya de 25 cm caben 1,19 pinos del mismo tamaño, o lo que es lo mismo, en una hectárea caben 1,19 veces más pinos que hayas de dicho de diámetro. Si sustituimos las líneas de máxima densidad de cada especie en la Ec.4, se pueden obtener valores del $DEC_{pino/haya}(dg_{pino}, dg_{haya})$ para distintos diámetros medios cuadráticos de las dos especies. Como se observa en la Tabla 1, para un diámetro medio cuadrático de 10 cm para ambas especies, el $DEC_{pino/haya}(10)$ es 0,83, es decir, inferior al obtenido para un diámetro de 25 cm, mientras que para un diámetro de 50 se eleva a 1,57, reflejando la mayor ocupación del espacio de las hayas grandes. Si tenemos diferentes diámetros medios de las dos especies, por ejemplo, 30 cm para pino y 20 para haya, el $DEC_{pino/haya}(30,20)$ toma un valor mucho menor (0,59) (Tabla 1), indicando que, lógicamente, caben más hayas que pinos para esos dos tamaños. Hay que tener en cuenta que los coeficientes de equivalencia se pueden expresar en términos inversos, es decir, en nuestro ejemplo, $DEC_{haya/pino}$.

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE DENSIDAD EN MASAS MIXTAS

Ala hora de estimar el índice de densidad para una masa mixta se debe tener en cuenta que la capacidad de carga es distinta para ambas especies, por lo que no tiene sentido sumar directamente los valores del SDI de cada una de ellas, sino que es necesario expresar el índice de densidad en términos de una de las especies mediante el uso de los coeficientes de equivalencia de la densidad entre especies (DEC). Si tomamos como referencia la línea de máxima densidad de la especie 2 ($N_{max2} = a_2 \cdot dg_2^{b2}$), al calcular el índice de densidad de la masa mixta como suma de las densidades de las dos especies, tendremos que transformar el índice de densidad de la especie 1 a la de referencia (especie 2) mediante el $DEC_{1/2}$.

$$SDI_{1+2 \rightarrow 2} = \frac{SDI_1}{DEC_{1/2}} + SDI_2 \quad Ec.7$$

$dg_{haya} \backslash dg_{pino}$	10	20	25	30	40	50
10	0,83	0,29	0,21	0,16	0,10	0,07
20	3,10	1,09	0,78	0,59	0,38	0,27
25	4,75	1,67	1,19	0,90	0,58	0,42
30	6,73	2,36	1,69	1,28	0,83	0,59
40	11,65	4,09	2,92	2,22	1,43	1,02
50	17,84	6,26	4,47	3,39	2,20	1,57

Tabla 1. Coeficientes de equivalencia entre las máximas densidades de pino silvestre y haya ($DEC_{pino/haya}(dg_{pino}, dg_{haya})$) dependiente de los diámetros medios cuadráticos de ambas especies.

O lo que es lo mismo,

$$SDI_{1+2 \rightarrow 2} = SDI_1 \cdot DEC_{2/1} + SDI_2 \quad Ec.8$$

Donde $SDI_{1+2 \rightarrow 2}$ es el índice de densidad de la masa mixta expresada en términos de la especie 2, SDI_1 y SDI_2 son los índices de densidad de la especie 1 y de la especie 2 en la masa mixta y $DEC_{1/2}$ el coeficiente de equivalencia de la densidad entre las especies 1 y 2, en este caso el correspondiente al diámetro de referencia 25 cm, siendo $DEC_{2/1}$ el inverso de $DEC_{1/2}$.

Si se quiere trabajar directamente con los valores de la densidad de las masas, obtenemos la siguiente expresión

$$N_{1+2 \rightarrow 2} = \frac{N_1}{DEC_{1/2}(dg_1, dg_2)} + N_2 \quad Ec.9$$

Donde $N_{1+2 \rightarrow 2}$ es la densidad de la masa mixta expresada en términos de la especie 2, N_1 y N_2 son las densidades de la especie 1 y de la especie 2 en la masa mixta y $DEC_{1/2}(dg_1, dg_2)$ el coeficiente de equivalencia de la densidad entre las especies 1 y 2, dependiente del dg de ambas especies.

Cuando se expresan los índices de densidad en términos relativos, $RD = N/N_{max} = SDI/SDI_{max}$, ya se están considerando las diferentes capacidades de carga, por lo que la densidad relativa de una masa mixta ($RD_{(1+2)}$) sí se puede calcular directamente como la suma de las densidades relativas de ambas especies ($RD_{(1+2)} = RD_1 + RD_2 = SDI_1/SDI_{max1} + SDI_2/SDI_{max2}$). Es fácil ver que el índice de densidad de la mezcla en términos de la especie 2 (Ec.8) se puede obtener también como $SDI_{(1+2 \rightarrow 2)} = RD_{(1+2)} \cdot SDI_{max2}$.



CÁLCULO DE LA PROPORCIÓN DE ESPECIES EN MASAS MIXTAS

La proporción de especies en una masa mixta se puede calcular utilizando distintas variables de masa. En la práctica forestal es común expresar la proporción de especies en términos o bien del número de pies por hectárea o bien del área basimétrica. Sin embargo, estos dos métodos de calcular la proporción de especies no consideran la distinta capacidad de ocupación o capacidad de carga de las dos especies. Por ello, se recomienda el uso de la proporción de especies por área ocupada (p_1 , p_2 , donde $p_1 + p_2 = 1$), que se basa en la proporción en términos del índice de densidad de la masa, calculando los índices de densidad como se ha explicado en la sección anterior. La proporción por área ocupada se puede calcular fácilmente a través de los *DEC*, como se describe en las ecuaciones 10 y 11.

En ellas, $DEC_{1/2}$ es el coeficiente de equivalencia de la densidad correspondiente a 25 cm en las dos especies. O bien, de la misma manera que para la densidad, a partir de los datos N y dg de la masa y los valores $DEC_{1/2}(dg_1, dg_2)$ dependientes de los correspondientes diámetros, expresado en las ecuaciones 12 y 13.

En términos de la densidad relativa la expresión de las proporciones de especies se simplifica a $p_1=RD_1/(RD_1+RD_2)$ y $p_2=RD_2/(RD_1+RD_2)$

Siguiendo con el ejemplo anterior ($SDI_{max\ pino} = 1.130$ pies/ha, $SDI_{max\ haya} = 950$ pies/ha, y $DEC_{pino,haya} = 1,19$), se puede determinar la proporción de cada especie de la siguiente manera: supongamos que, para el diámetro de referencia $dg = 25$ cm, el número de pies de pino en la masa mixta es $SDI_{pino} = 690$ pies/ha y el número de pies de haya $SDI_{haya} = 300$ pies/ha. Si se expresa el número total de pies en términos del haya de 25 cm, obtendríamos $SDI_{pino+haya \rightarrow haya} = SDI_{pino}/DEC_{pino/haya} + SDI_{haya} = 690/1,19 + 300 = 880$ pies/ha. La proporción de pino en la masa mixta sería por lo tanto $p_{pino} = (690/1,19)/880 = 0,66$, mientras que la proporción del haya sería $p_{haya} = 300/880 = 1 - p_{pino} = 0,34$.

Estos mismos valores se pueden

$$p_1 = \frac{SDI_1/DEC_{1/2}}{SDI_{1+2 \rightarrow 2}} = \frac{SDI_1/DEC_{1/2}}{SDI_1/DEC_{1/2} + SDI_2} = \frac{SDI_1}{(SDI_1 + SDI_2 \cdot DEC_{1/2})} \quad Ec.10$$

$$p_2 = \frac{SDI_2}{SDI_{1+2 \rightarrow 2}} = \frac{SDI_2}{SDI_1/DEC_{1/2} + SDI_2} \quad Ec.11$$

$$p_1 = \frac{N_1/DEC_{1/2}(dg_1, dg_2)}{N_{1+2 \rightarrow 2}} = \frac{N_1}{N_1 + N_2 \cdot DEC_{1/2}(dg_1, dg_2)} \quad Ec.12$$

$$p_2 = \frac{N_2}{N_{1+2 \rightarrow 2}} = \frac{N_2}{N_1/DEC_{1/2}(dg_1, dg_2) + N_2} \quad Ec.13$$

obtener trabajando en términos de las densidades relativas de ambas especies. Así, en la masa mixta se tendría una densidad relativa del pino, $RD_{pino} = SDI_{pino}/SDI_{max\ pino} = 690/1130 = 0,611$, y una densidad relativa de haya $RD_{haya} = SDI_{haya}/SDI_{max\ haya} = 300/950 = 0,316$, por lo que la densidad relativa de la mezcla sería $RD_{pino+haya} = 0,611 + 0,316 = 0,927$. A partir de dicho valor se puede obtener el índice de densidad de la mezcla en términos de haya: $SDI_{pino+haya \rightarrow haya} = RD_{pino+haya} \cdot SDI_{max\ haya} = 0,927 \cdot 950 = 880$ pies/ha, y las respectivas proporciones se podrían obtener como $p_{pino} = 0,611/0,927 = 0,66$ y $p_{haya} = 0,316/0,927 = 0,34$.

Si tenemos la situación frecuente de que los diámetros de las dos especies son diferentes, por ejemplo, para el pino 350 pies/ha de diámetro 30 cm y para el haya 350 pies/ha de diámetro 20 cm, la densidad de la mezcla, expresada en número de hayas de 20 cm, sería $N_{pino+haya \rightarrow haya} = 350/0,59 + 350 = 943$ pies/ha, ya que el $DEC_{pino/haya}(30, 20)$ es 0,59. La proporción de pino sería por lo tanto $p_{pino} = (350/0,59)/943 = 0,63$ y la de haya $p_{haya} = 350/943 = 0,37$.

Si se quisiera trabajar en términos de densidad relativa, es necesario saber el número máximo de pies por hectárea de ambas especies con los diámetros respectivos, que se podría calcular sencillamente sustituyendo los diámetros de 30 y 20 cm en las ecuaciones Ec.2 y Ec.3 respectivamente ($N_{max\ pino} = 859$

pies/ha y $N_{max\ haya} = 1453$ pies/ha). Las correspondientes densidades relativas serían $RD_{pino} = 350/859 = 0,408$ y $RD_{haya} = 350/1453 = 0,241$, por lo que $RD_{pino+haya} = 0,649$, de donde se pueden obtener la densidad de la mezcla en términos del haya de 20 cm, $N_{pino+haya \rightarrow haya} = 0,649 \cdot 1453 = 943$ pies/ha, y las proporciones de ambas especies $p_{pino} = 0,408/0,649 = 0,63$ y $p_{haya} = 0,241/0,649 = 0,37$.

De la misma manera, a partir de la línea de máxima densidad para una mezcla dada se pueden calcular cuántos pies de cada especie de un tamaño cualquiera corresponden a una determinada proporción en área ocupada utilizando las expresiones de las proporciones de especies por área ocupada y la máxima densidad.

$$N_2 = N_{max1+2 \rightarrow 2} \cdot p_1 \cdot DEC_{1/2} \quad Ec.14$$

$$N_1 = N_{max1+2 \rightarrow 2} \cdot p_2 \quad Ec.15$$

Siguiendo con el ejemplo anterior, en el que el número de pies de la mezcla expresado en términos de haya es 943 pies por hectárea y el coeficiente de equivalencia es 0,59 para diámetros medios cuadráticos de pino y haya de 30 y 20 cm respectivamente, podemos decir que si la proporción de ambas especies es 0,5, esto significaría que el número real de pinos en la mezcla es $943 \cdot 0,5 \cdot 0,59 = 278$ pies/ha, y el número de hayas $943 \cdot 0,5 = 472$ pies/ha.

CONTROL DE LA DENSIDAD EN MASAS MIXTAS

La línea de máxima densidad para una mezcla determinada se puede utilizar como referencia para el control de la densidad, del mismo modo como se hace para masas puras, y así poder desarrollar guías selvícolas para masas mixtas. Siguiendo la aproximación ya comentada de Long (1985), se puede establecer un intervalo de densidades con respecto a la máxima densidad en el que mantener la densidad de la masa mixta, por ejemplo, un 35-60 % de la máxima densidad (Figura 2). Cuando la densidad de la masa sobrepase el valor más elevado de este intervalo, se deberá intervenir mediante una clara reduciendo la densidad. Esta reducción de la densidad no deberá sobrepasar el umbral inferior del intervalo.

En las masas mixtas, las claras deben controlar no solo la densidad sino también la mezcla de especies (Fig. 3). Una vez fijada la reducción de la densidad de la mezcla, esta se puede realizar manteniendo la proporción de la mezcla antes de la clara, o bien intervenir de manera que se favorezca el desarrollo de una determinada especie, por ejemplo, quitando menos densidad de esta especie de manera que aumente su proporción relativa en la masa.

En el ejemplo de la mezcla de pino-haya, la máxima densidad de la mezcla en términos de haya era 950 pies/ha. Si queremos reducir esta densidad al 50 % tendríamos que dejar 475 pies de haya con tamaño 25 cm. Si se quisiera hacer el reparto de manera que las proporciones de ambas especies fuesen 0,5 sería necesario dejar en cada hectárea $475 \cdot 0,5 = 238$ hayas y $475 \cdot 0,5 \cdot 1,19 = 283$ pinos. Ahora bien, si se quisiera favorecer al haya aumentando su proporción, por ejemplo, 0,7 de haya y 0,3 de pino (Fig. 3b), sería necesario dejar $475 \cdot 0,7 = 333$ pies/ha de haya y solamente $475 \cdot 0,3 \cdot 1,19 = 170$ pies/ha de pino.

Si los diámetros de las dos especies fuesen distintos de 25 cm o distintos entre las dos especies, habría que hacer los cálculos utilizando los coeficientes de equivalencia de la densidad dependientes del tamaño.

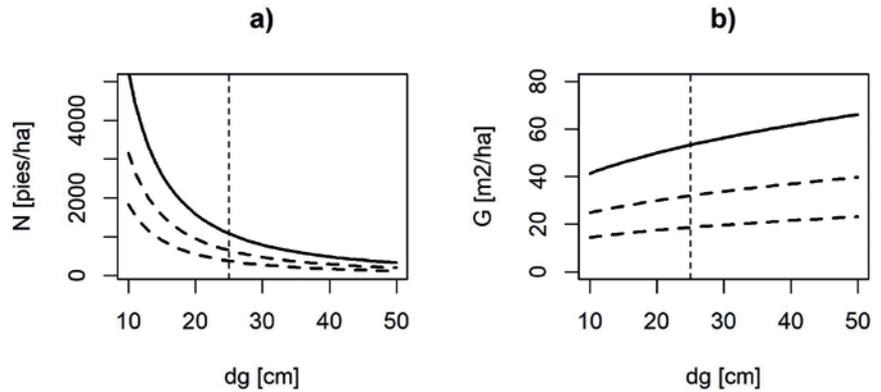


Figura 2. Línea de máxima densidad (línea negra continua) para la mezcla de pino silvestre y haya expresada en número de pies por hectárea (a) y en área basimétrica (b) junto a los valores de control (35 y 60 % del máximo) asumiendo proporciones de pino y haya iguales a 0,5.

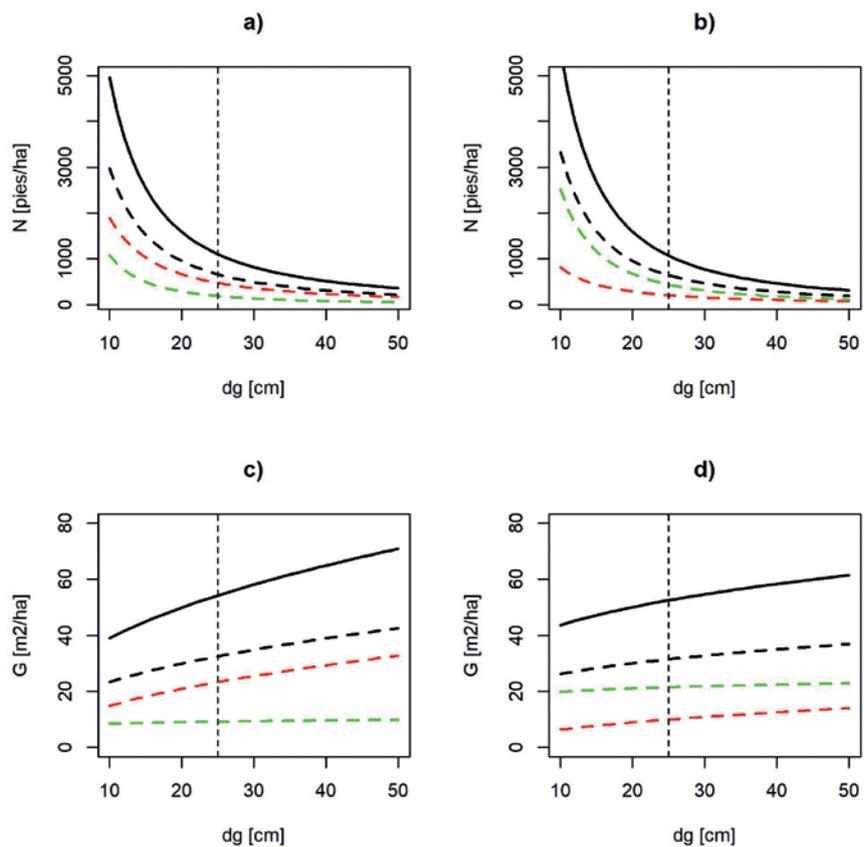


Figura 3. Línea de máxima densidad (línea negra continua) para la mezcla de pino silvestre y haya expresada en número de pies por hectárea (a y b) y en área basimétrica (c y d). La línea negra discontinua representa el valor más elevado que se aconseja alcanzar (60 % del máximo), y las líneas roja y verde los valores correspondientes para pino y haya, respectivamente, asumiendo proporciones de pino 0,7 y haya 0,3 (a y c) o pino 0,3 y haya 0,7 (b y d).

APLICACIONES PARA LA GESTIÓN DE MASAS MIXTAS

En este trabajo se muestran las bases metodológicas para poder diseñar esquemas selvícolas en masas mixtas a partir de las líneas de autoclareo o de máxima densidad de las especies que conforman la mezcla. El uso de los coeficientes

de equivalencia de la densidad entre especies permite considerar las distintas capacidades de carga de las especies y, de este modo, calcular la densidad de la masa mixta y las proporciones de especies por área de una manera que reflejan mejor la ocupación de la estación por las especies y el nivel de competencia.

En nuestro ejemplo en mezclas pino silvestre-haya se han utilizado los coeficientes de equivalencia y las líneas de máxima densidad para el control de la densidad en masas mixtas, a la vez que se controla la composición específica. No obstante, estos mismos conceptos se podrían aplicar para la adaptación de tablas de producción de masas puras a tablas de producción de masas mixtas con distintas proporciones de especies, así como para el diseño de plantaciones mixtas teniendo en cuenta la distinta capacidad de carga de cada especie a lo largo de su desarrollo.

Aquí mostramos una aplicación sencilla basada en las líneas de máxima densidad de pino y haya para unas condiciones climáticas determinadas. Como ya se ha indicado, estudios recientes indican que la máxima densidad para una especie depende de las condiciones

climáticas de la estación (Condés et al., 2017; Aguirre et al., 2018; Rodríguez de Prado et al., 2020), por lo que se podrían desarrollar normas selvícolas adaptadas a las distintas condiciones climáticas, así como para posibles condiciones más adversas de cambio climático.

En esta aproximación al control de la densidad en masas mixtas se asume que la densidad en masas mixtas no es mayor que la que cabría esperar si las especies tienen la misma capacidad de carga que en masas puras. Sin embargo, se ha constatado que, generalmente, la máxima densidad es mayor en masas mixtas que en puras (Pretzsch y Biber, 2016), en muchos casos derivada de una mejor ocupación del dosel de copas por las distintas especies. Esto implica que, si se estima la máxima densidad para una mezcla determinada a partir de la proporción de especies y de las densidades

máximas de las especies creciendo en masas puras, se infraestimaría su valor. Para evitar este sesgo, Pretzsch y del Río (2020) proponen utilizar el coeficiente de modificación de la densidad en masas mixtas (CMD), que pondera la máxima densidad obtenida a partir de los valores de las masas puras ($CMD = SDI_{max_mixta} / SDI_{max_pura}$). La mayor densidad observada en masas mixtas se podría considerar cuando se planifican claras en masas mixtas.

Teóricamente, el valor del CMD puede variar con distintas proporciones de especies y para distintos tamaños medios de las especies que conforman la mezcla. Sin embargo, hoy en día no se dispone de suficiente información para poder identificar estos patrones de variación del CMD para la mayor parte de mezclas. Una alternativa es usar un valor promedio del CMD para una determinada mezcla obtenido a



partir de datos observados en masas sin intervención que se encuentren en densidades elevadas, tanto mixtas como en sus respectivas masas puras. Por ejemplo, Pretzsch y del Río (2020) dan un valor medio para pino silvestre y haya de 1,13, obtenido a partir de datos de distintas parcelas experimentales. Dado el escaso conocimiento sobre esta mayor densidad para distintas proporciones y composiciones específicas, consideramos más prudente no incluir el uso del CMD en el control de la densidad, aunque habrá que considerar que probablemente en algunos casos se esté infraestimando la máxima densidad, con el consiguiente impacto en el control de la densidad.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto IMFLEX PID2021-126275OB-C21 de investigación financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por FEDER *Una manera de hacer Europa*.



Bibliografía

- Aguirre A, del Río M, Condés S. 2018. Intra-and inter-specific variation of the maximum size-density relationship along an aridity gradient in Iberian pinewoods. *Forest Ecology and Management* 411: 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.017>
- Calama R, de-Dios-García J, del Río M, Madrigal G, Gordo J, Pardos M. 2021. Mixture mitigates the effect of climate change on the provision of relevant ecosystem services in managed *Pinus pinea* L. forests. *Forest Ecology and Management* 481: 118782. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118782>
- 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. *Forest Ecology and Management* 385: 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.059>
- del Río M, López E, Montero G. 2006. *Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de Pinus pinaster Ait., Pinus sylvestris L. y Pinus nigra Arn. en Castilla y León*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Castilla y León.
- del Río M, Pretzsch H, Ruiz-Peinado R, Jactel H, Coll L, Löf M, Aldea J, Ammer C, Avdagić A, Barbeito I, Bielak K, Bravo F, Brazaitis G, Cerný J, Collet C, Condés S, Drössler L, Fabrika M, Heym M ... Bravo-Oviedo A. 2022. Emerging stability of forest productivity by mixing two species buffers temperature destabilizing effect. *Journal of Applied Ecology* 59: 2730– 2741. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14267>
- Jactel H, Bauhus J, Boberg J, Bonal D, Castagneyrol B, Gardiner B, Gonzalez-Olabarria JR, Koricheva J, Meurisse N, Brockerhoff EG. 2017. Tree diversity drives forest stand resistance to natural disturbances. *Current Forestry Reports* 3: 223–243. <https://doi.org/10.1007/s4072-5-017-0064-1>
- Long JN. 1985. A practical approach to density management. *Forestry Chronicle* 61: 23-27.
- Pardos M, del Río M, Pretzsch H, Jactel H, Bielak K, Bravo F, Brazaitis G, Defossez E, Engel M, Godvod K, Jacobs K, Jansone L, Jansons A, Morin X, Nothdurft A, Oreti L, Ponette Q, Pach M, Riofrío J, Ruiz-Peinado R, Tomao A, Uhl E, Calama R. 2021. The greater resilience of mixed forests to drought mainly depends on their composition: Analysis along a climate gradient across Europe. *Forest Ecology and Management* 481: 118687. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118687>
- Piqué M, Vericat P, Beltrán M. 2017. Resource communication. ORGEST: Regional guidelines and silvicultural models for sustainable forest management. *Forest Systems* 26(2): eRC01S. <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-10627>
- Pretzsch H, Biber P. 2016. Tree species mixing can increase maximum stand density. *Canadian Journal of Forest Research* 46(10): 1179–1193. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0413>
- Pretzsch H, del Río M. 2020. Density regulation of mixed and mono-specific forest stands as a continuum: a new concept based on species-specific coefficients for density equivalence and density modification. *Forestry* 93(1): 1-15. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz069>
- Reineke LH (1933) Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *J Agr Res* 46, 627-638
- Rodríguez de Prado D, San Martín R, Bravo F, Herrero de Aza C. 2020. Potential climatic influence on maximum stand carrying capacity for 15 Mediterranean coniferous and broadleaf species. *Forest Ecology and Management* 460: 12. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117824>
- Rodríguez de Prado D, Vázquez Veloso A, Quian YF, Ruano I, Bravo F, Herrero de Aza C. 2023. Can mixed forests sequester more CO2 than pure forests in future climate scenarios? A case study of *Pinus sylvestris* combinations in Spain. *European Journal of Forest Research* 142: 91–105. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01507-y>