

CONSIDERACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LA MASA EN DIAGRAMAS DE MANEJO DE LA DENSIDAD

Fernando Castedo-Dorado¹, Pedro Álvarez-Álvarez², Felipe Crecente-Campo³ y Marcos Barrio-Anta⁴

¹ Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias. Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria, Universidad de León (Campus de Ponferrada). Avda. de Astorga s/n. 24400-PONFERRADA (León, España). Correo electrónico: fcasd@unileon.es

² Departamento de Producción Vegetal. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela. Campus universitario s/n. 27002-LUGO (España). Correo electrónico: palvarez@lugo.usc.es

³ Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela. Campus universitario s/n. 27002-LUGO (España). Correo electrónico: felipecc@lugo.usc.es

⁴ Departamento de Biología de Organismos y Sistemas. Universidad de Oviedo. Escuela Universitaria de Ingenierías Técnicas. c/Gonzalo Gutiérrez de Quirós s/n. 33600-MIERES (Asturias, España). Correo electrónico: barriomarcos@uniovi.es

Resumen

Se presenta la estructura de un diagrama de manejo de la densidad (DMD) para las masas de *Pinus radiata* D. Don en Galicia, considerando la estabilidad de la masa como uno de los posibles objetivos del régimen de claras. El DMD está compuesto por un sistema de cuatro ecuaciones, el índice de Hart-Becking para caracterizar la espesura y el coeficiente de esbeltez medio de la masa para valorar su estabilidad frente a daños por viento y nieve. El formato de las ecuaciones/relaciones está condicionado por las variables a representar en los ejes principales del diagrama (altura dominante en abscisas y número de pies/ha en ordenadas) y por la consistencia biológica de las mismas. Para la valoración de la estabilidad se incluyeron isolíneas del coeficiente de esbeltez medio de la masa (cociente entre la altura media y el diámetro medio) en el diagrama de manejo. Asimismo, para la representación de los esquemas de claras sobre el diagrama se consideró una disminución del número de pies debida a la existencia de mortalidad natural por competencia. La inclusión de esta variable permitió obtener evoluciones más realistas de la densidad, sobre todo en el intervalo anterior a la primera clara.

Palabras clave: *Índice de Hart-Becking, Sistema de ecuaciones simultáneas, Coeficiente de esbeltez, Función de mortalidad natural, Esquemas selvícolas de claras*

INTRODUCCIÓN

Conceptualmente, la gestión de la densidad es el proceso de control del espacio disponible para el crecimiento de los árboles por medio de dos herramientas: la densidad inicial de plantación y las claras posteriores (LONG, 1985;

NEWTON, 1997; NEWTON, 2003). La determinación de los niveles adecuados de densidad para una masa forestal en una situación determinada es un proceso complejo que depende de factores biológicos, tecnológicos, económicos y operacionales. El proceso requiere la selección de los límites de densidad superior e inferior; el prime-

ro se elige para obtener un aceptable crecimiento de la masa y un buen vigor de los árboles, mientras que el segundo se elige para mantener una aceptable ocupación del terreno. Por tanto, desde un punto de vista biológico, los niveles de densidad de la masa deben mantenerse entre el límite que marca el inicio del autoclareo y el que marca el cierre de copas (DEAN & BALDWIN, 1996). Sin embargo, el traslado de objetivos específicos de gestión a niveles apropiados de densidad es el paso más difícil en el diseño de regímenes de manejo de la densidad. Una de las formas más adecuadas para conseguirlo son los diagramas de manejo de la densidad.

Los diagramas de manejo de la densidad (DMD) son modelos estáticos de masa en los que se representa gráficamente la relación entre producción, densidad y mortalidad para los distintos estados de desarrollo de la masa (NEWTON & WEETMAN, 1994). Su utilidad básica radica en que permite realizar de una forma rápida y sencilla la comparación entre diferentes alternativas selvícolas de claras considerando diferentes propósitos (producción de madera de unas determinadas dimensiones, minimizar el tiempo requerido para un objetivo específico, etc.). Por tanto, el uso de los DMD es uno de los métodos más efectivos para el diseño, representación y evaluación de regímenes de densidad en masas regulares.

Por otra parte, los daños por viento y nieve son considerados un problema importante en todo el mundo, sobre todo en bosques gestionados por el hombre, en los que estos daños pueden originar graves pérdidas económicas. Existen diferentes herramientas que ayudan al selvicultor en la valoración de la estabilidad de las masas, es decir, en la estimación de su resistencia frente a daños por viento o nieve. Uno de los indicadores más sencillos de la estabilidad de un árbol individual o de una masa forestal es su coeficiente de esbeltez (OLIVEIRA, 1988; WANG et al., 1998; WILSON & OLIVER, 2000; HINZE & WESSELS, 2002), que se define como el cociente entre la altura total y el diámetro normal cuando ambas variables se miden en las mismas unidades. Diferentes estudios han mostrado que el valor del coeficiente de esbeltez (CE), considerado como una variable de árbol individual o de masa, está muy correlacionado con el combamiento o la rotura de fustes o el descalzamiento de árboles

(CREMER et al., 1982; BECQUEY & RIOU-NIVERT, 1987; WILSON & OLIVER, 2000; WONN & O'HARA, 2001). Debido a que CE es función, principalmente, del espaciamiento entre pies, es posible el control de la estabilidad de la masa mediante la gestión de la densidad (p. ej., WONN & O'HARA, 2001; CAMERON, 2002). Por tanto, la inclusión del coeficiente de esbeltez de la masa en los diagramas de manejo¹ permite determinar los riesgos de estabilidad asociados a diferentes regímenes de claras.

El objetivo de este trabajo es describir una metodología para el desarrollo de un modelo de masa que se pueda presentar de forma gráfica y que permita estimar de una manera rápida y fiable las variables dasométricas más importantes para el gestor. Asimismo, debe permitir diseñar y evaluar alternativas de clara para conseguir un determinado objetivo de producción y sobrescribir información relativa a la estabilidad de las masas que permita valorar el riesgo de daño por viento o por nieve que lleva asociada cada alternativa selvícola.

DATOS UTILIZADOS

Los datos utilizados en este trabajo proceden de una red de 223 parcelas que la *Unidade de Xestión Forestal Sostible* de la Universidad de Santiago de Compostela estableció en 1995 para elaborar modelos forestales de crecimiento. Dicha red de parcelas está distribuida por las zonas en las que *Pinus radiata* está presente en Galicia, y trata de cubrir las diferentes edades, densidades y calidades de estación existentes en masas puras y regulares de esta especie. El tamaño de parcela osciló entre 625 m² y 1200 m², dependiendo de la densidad de la masa, para obtener un mínimo de 30 árboles en cada parcela. Se etiquetaron con una chapa numerada todos los árboles de cada parcela y en ellos se realizaron dos mediciones perpendiculares del diámetro normal utilizando una forcípula con graduación milimétrica. Asimismo, se midió con hipsómetro la altura total de 30 árboles elegidos aleatoriamente en cada parcela, y de la proporción, en función de la superficie de la misma, de los 100 pies más gruesos por hectárea con aspecto de dominantes. Se anotaron también

variables descriptivas de cada árbol, como por ejemplo si estaban vivos o muertos.

En el invierno de 1998 y de 2004 se remediaron 155 y 46 parcelas, respectivamente, de las 233 instaladas inicialmente. El resto de parcelas se descartaron por haber sido afectadas por fuego, por haber sido clareadas muy intensamente, o por haber desaparecido como consecuencia de la corta a hecho de la masa en la que estaban localizadas.

Para cada inventario y parcela seleccionada se calcularon las siguientes variables de masa: edad (t), número de pies por hectárea (N), diámetro medio cuadrático (d_g), diámetro medio aritmético (\bar{d}), altura media aritmética (\bar{h}), altura dominante (H_0 , definida como la altura media de los 100 árboles más gruesos por hectárea), índice de sitio (IS), volumen total (V) y maderable (V_m) de masa, biomasa aérea total de la masa (W_t) y biomasa de los fustes de la masa (W_s). El volumen total y maderable se calculó a partir de una ecuación de volumen maderable de árbol individual desarrollada por CASTEDO-DORADO et al. (2007) que es función del diámetro normal, la altura total y el diámetro comercial límite. Los volúmenes comerciales se determinaron teniendo en cuenta la amplitud diamétrica de cada parcela y considerando intervalos de diámetros comerciales límite de 5 cm. El índice de sitio se definió como la altura dominante para una edad de referencia de 20 años, utilizando las curvas de calidad desarrolladas por DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2005). La biomasa seca para cada fracción del árbol (acículas, ramillos, ramas finas,

ramas gruesas, madera del tronco y corteza del tronco) fue estimada a partir del sistema de ecuaciones de biomasa compatibles desarrollado por MERINO et al. (2005).

En la tabla 1 se presentan los estadísticos descriptivos más importantes de la muestra de parcelas utilizada.

CONSTRUCCIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE MANEJO DE LA DENSIDAD

Componentes de los DMD

La estructura básica de un DMD está compuesta por dos ecuaciones y un índice de caracterización de la espesura. La caracterización del nivel de espesura de la masa se realiza mediante índices que relacionan el tamaño de un árbol medio "representativo" (p. ej., árbol de altura, diámetro o volumen medio) con la densidad expresada en número de pies por hectárea. Entre estos índices se encuentran el índice de REINEKE (1933), la regla de autoclareo de YODA et al., (1963), el índice de densidad relativo (DREW & FLEWELLING, 1979) o el índice de espaciamiento relativo (WILSON, 1946). La principal ventaja de todos estos índices es que son independientes de la calidad de estación y de la edad (LONG, 1985; MCCARTER & LONG, 1986). En este trabajo, siguiendo la propuesta de BARRIO & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ (2005) y de BARRIO et al. (2006), se ha optado por construir un diagrama de manejo de la densidad basado en el índice de espaciamiento relativo (conocido habitualmente como

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
t (años)	23,43	5,00	47,00	8,78
N (pies.ha ⁻¹)	917,94	191,66	2048,00	440,25
d_g (cm)	24,11	8,02	51,56	9,09
\bar{d} (cm)	23,12	7,86	49,87	8,88
\bar{h} (m)	18,02	5,23	32,72	5,42
H_0 (m)	20,61	5,77	35,17	5,57
IS (m)	19,61	10,80	27,65	3,50
V (m ³ .ha ⁻¹)	334,40	14,20	1021,80	159,32
W_t (Mg.ha ⁻¹)	161,76	11,09	486,29	74,73
W_s (Mg.ha ⁻¹)	130,84	4,75	410,22	65,63

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de la muestra de parcelas utilizadas en este trabajo

índice de Hart-Becking). Se trata de un índice de fácil interpretación y de amplio uso en Europa para la determinación de la necesidad y del peso de las claras; además, al incluir en su formulación la altura dominante de la masa, es particularmente útil para el diseño de esquemas de claras ya que, desde el punto de vista biológico, la altura dominante es una de las variables más adecuadas para establecer los intervalos de clara.

Asumiendo una disposición de los árboles en el terreno en malla cuadrada (caso habitual en plantaciones), la expresión de este índice es la siguiente:

$$IH (\%) = \frac{100}{\sqrt{N}H_0} 100 \quad [1]$$

donde *IH* es el índice de Hart-Becking (en porcentaje), *N* es el número de pies por hectárea, y *H*₀ es la altura dominante.

Con respecto a las dos ecuaciones básicas que constituyen el diagrama, su formulación viene condicionada por las variables representadas en los ejes principales del diagrama y por la consistencia biológica de las mismas. A su vez, las variables de los ejes del diagrama están condicionadas por el índice de caracterización de espesura elegido. En este trabajo, el uso del índice de Hart-Becking obliga a que sean el número de pies/ha y la altura dominante las variables representadas en los ejes.

La primera de las ecuaciones del diagrama [2] relaciona el diámetro medio cuadrático con el número de pies por hectárea y la altura dominante. Esta formulación está basada en la relación entre la dimensión del árbol medio, la densidad y un indicador de productividad (p. ej., GOULDING, 1972; LONG & SHAW, 2005).

La segunda ecuación [3] relaciona el volumen de masa con el volumen de un árbol representativo (dado por el producto del diámetro medio cuadrático y la altura dominante) y el número de pies por hectárea (p. ej., MCCARTER & LONG, 1986; DEAN & BALDWIN, 1993; LUIS & FONSECA, 2004). En este trabajo, en vez de una ecuación de volumen total de masa, se ha usado una ecuación de volumen maderable que estima el volumen de masa hasta un determinado diámetro en punta delgada (*d_i*) como el producto del volumen total de masa (*V*) y una razón de masa (BURKHART, 1977), de tal forma que el

volumen total de masa es un caso especial de la expresión del volumen maderable (*V_m*) cuando *d_i* = 0. La razón de masa utilizada es una modificación del modelo propuesto originalmente por CLARK & THOMAS (1984) para árboles individuales. En definitiva, las dos ecuaciones básicas del diagrama de manejo son las siguientes:

$$d_g = b_0 N^{b_1} H_0^{b_2} \quad [2]$$

$$V_m = b_3 d_g^{b_4} H_0^{b_5} N^{b_6} \exp(b_7 d_i^{b_8} d_g^{b_9}) \quad [3]$$

donde *d_g* es el diámetro medio cuadrático (cm), *V_m* el volumen maderable de la masa (m³.ha⁻¹) hasta un cierto diámetro límite *d_i* (cm) y *b_j* (*j* = 0, 1, ... 9) son los coeficientes a ser estimados en el ajuste.

Adicionalmente, al disponer de estimaciones de la biomasa aérea de las parcelas para diferentes fracciones del árbol, ha sido posible añadir ecuaciones que permiten su determinación gráfica; una correspondiente a la biomasa aérea total de la masa [4] y otra a la biomasa de los fustes de la masa [5]. La formulación de las expresiones utilizadas es la misma que para la ecuación de volumen total de masa (primera parte de Ec. [3]).

$$W_t = b_{10} d_g^{b_{11}} H_0^{b_{12}} N^{b_{13}} \quad [4]$$

$$W_s = b_{14} d_g^{b_{15}} H_0^{b_{16}} N^{b_{17}} \quad [5]$$

donde *W_t* es la biomasa aérea total de la masa (m³.ha⁻¹), *W_s* es la biomasa del fuste (m³.ha⁻¹) y *b_j* (*j* = 10, 11, ... 17) son los coeficientes a estimar en el ajuste.

Por último, se incorporó a los diagramas de manejo un elemento muy importante en el diseño y representación gráfica de las alternativas selvícolas: una función de mortalidad natural. Esta función estima la disminución del número de pies en la masa debida a la competencia intraespecífica por agua, luz, nutrientes, etc. En este trabajo se utilizó la ecuación de mortalidad desarrollada por CASTEDO-DORADO et al. (2007) a partir de los datos de densidad de las parcelas medidas en más de una ocasión. La expresión de esta ecuación, ya parametrizada, es la siguiente:

$$N_2 = \left(N_1^{-0,3161} + 1,053^{t_2-100} - 1,053^{t_1-100} \right)^{1/0,3161} \quad [6]$$

donde *N₁* y *t₁* representan el número de pies por hectárea y la edad en un instante inicial, respec-

tivamente, y N_2 es el número de pies por hectárea predichos a la edad t_2 .

Debido a que la ecuación [6] depende de la edad, no se puede utilizar para predecir la disminución del número de pies directamente sobre el diagrama, ya que éste no considera la edad como variable de entrada. Para solventar este problema se pueden emplear métodos gráficos o numéricos que hagan uso de las curvas de calidad de estación desarrolladas por DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2005) para la especie.

En la primera metodología basta con entrar con los valores de IS y H_0 de la masa en la figura 1 para estimar gráficamente la edad correspondiente. Alternativamente, para obtener una solución analítica fue necesario resolver para la edad la ecuación de crecimiento en altura dominante elaborada por DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2005) (ec.[7]). Al igual que para la resolución gráfica, también es necesario conocer previamente IS y H_0 de la masa.

$$t = \frac{\ln \left[1 - \left(\frac{H_0}{IS} \right)^{\frac{1}{1,755+12,44/X_0}} (1 - \exp(0,06738 \cdot 20)) \right]}{-0,06738}, \text{ con [7]}$$

$$X_0 = 0,5 \left[\ln IS + 1,755L_0 + \sqrt{(\ln IS + 1,755L_0)^2 - 4 \cdot 12,44L_0} \right], \text{ y}$$

$$L_0 = \ln [1 - \exp(-0,06738 \cdot 20)]$$

Ambas alternativas permiten representar directamente en el diagrama de manejo la función de mortalidad natural expresada como disminución del número de pies/ha con la altura dominante.

Ajuste del sistema de ecuaciones

Las ecuaciones [2] a [5] definen conjuntamente un sistema de ecuaciones relacionadas, donde N y H_0 son variables exógenas (variables que aparecen solamente en la parte derecha de las ecuaciones y cuyos valores se determinan independientemente del sistema); V_m , W_t y W_s son variables endógenas (variables que el modelo intenta explicar o predecir y que sólo aparecen en el lado izquierdo de las ecuaciones); y d_g es una variable instrumental endógena (variable dependiente en una ecuación que también aparece en lado derecho de otras ecuaciones). Puesto que la variable d_g aparece tanto como variable dependiente como regresora en el sistema, existe una correlación entre los valores de d_g de la parte derecha de las ecuaciones y los componentes del error de d_g en la parte izquierda de la ecuación. Por esta razón, y puesto que también existe correlación entre los componentes del error de las ecuaciones del sistema, se ha aplicado el procedimiento de máxima verosimilitud con información completa (FIML), implementado en el procedimiento MODEL de SAS/ETS®

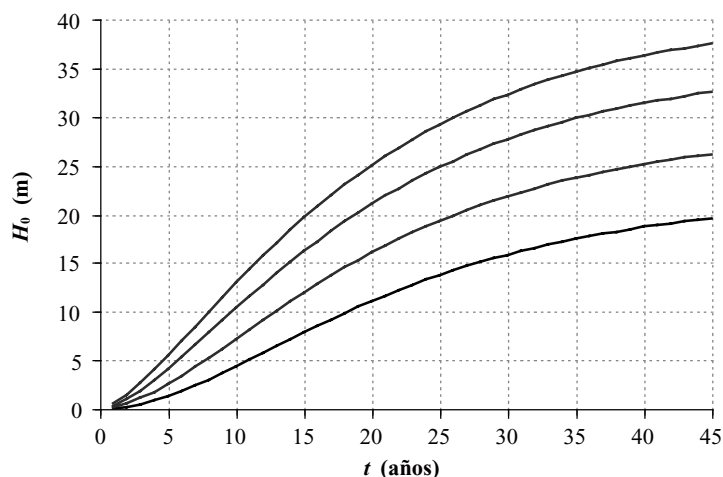


Figura 1. Curvas de crecimiento en altura dominante para *Pinus radiata* en Galicia para índices de sitio de 11, 16, 21 y 25 metros a la edad de referencia de 20 años. Fuente: DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2005)

(SAS INSTITUTE INC., 2004), para ajustar simultáneamente todas las ecuaciones del sistema.

Además, al existir más de una única observación de volumen maderable en cada parcela (la cubicación se ha realizado para intervalos de $d_i = 5$ cm), el número de observaciones para el volumen maderable de masa y para las restantes variables dependientes del sistema es distinto. Por ello, se creó una estructura especial de datos, adjudicando a cada una de las observaciones de volumen maderable en una parcela los mismos valores de las restantes variables de masa. Para tener en cuenta en el proceso de ajuste el desigual número de observaciones de volumen maderable en las distintas parcelas, se ponderaron las ecuaciones utilizando como peso la inversa del número de observaciones de cada parcela. Estos factores de ponderación fueron multiplicados y programados en el procedimiento MODEL de SAS/ETS® (SAS INSTITUTE INC., 2004) especificando las funciones

$$resid.d_g = resid.d_g / \sqrt{n_i}, \quad resid.W_s = resid.W_s / \sqrt{n_i} \quad \text{y} \quad resid.W_t = resid.W_t / \sqrt{n_i}$$

donde n_i es el número de observaciones de volumen maderable de cada parcela.

En la tabla 2 se muestran las estimaciones de los coeficientes y los estadísticos de bondad de ajuste (R^2 y REMC) para el sistema de ecuaciones [2-5]. Como se puede apreciar, todos los modelos mostraron buenos resultados en el ajuste, explicando más de un 91% de la variabilidad para el caso de la variable d_g y más de un 99% para las restantes variables dependientes. Asimismo, todos los coeficientes resultaron significativos al 5% de nivel de significación.

Representación de las isóneas de las diferentes variables

Una vez estimados los valores de los parámetros de las cuatro ecuaciones del sistema se estuvo en disposición de representar las isóneas de las diferentes variables involucradas en el diagrama. En primer lugar se expresó el nivel de espesura de la masa mediante el índice Hart-Becking. Las isóneas para este índice se obtuvieron resolviendo N en la ecuación [1] y dando valores a IH :

$$N = \frac{10000^2}{IH^2 H_0^2} \tag{8}$$

En segundo lugar se representaron las isóneas del diámetro medio cuadrático usando la ecuación [2], fijando d_g como constante y resolviendo N a través del rango de H_0 observadas en las parcelas de muestreo:

$$N = \left(\frac{d_g}{b_0 H_0^{b_2}} \right)^{1/b_1} \tag{9}$$

En tercer lugar se representaron las isóneas del volumen total, biomasa total aérea y biomasa de fuste, sustituyendo la ecuación [2] en las ecuaciones [3], [4] y [5], respectivamente; y resolviendo N a través del rango de H_0 observado y fijando V , W_t y W_s como constantes:

$$N = \left(\frac{V}{b_3 b_0^{b_3} H_0^{(b_2 b_4 + b_5)}} \right)^{\frac{1}{b_1 b_4 + b_6}} \tag{10}$$

$$N = \left(\frac{W_t}{b_{10} b_0^{b_{11}} H_0^{(b_2 b_{11} + b_{12})}} \right)^{\frac{1}{b_1 b_{11} + b_{13}}} \tag{11}$$

Ec.	Estimación de los parámetros							REMC	R2
[2]	$b_0= 105,2$ (13,23)	$b_1=-0,4565$ (0,0111)	$b_2= 0,5091$ (0,0263)					2,752	0,9160
[3]	$b_3=0,000035$ (7,16E-6)	$b_4= 2,000$ (0,0432)	$b_5= 0,9569$ (0,0316)	$b_6= 1,003$ (0,0189)	$b_7= -0,2788$ (0,0243)	$b_8= 3,101$ (0,0345)	$b_9= -2,708$ (0,0391)	12,03	0,9947
[4]	$b_{10}= 1,2E-5$ (2,47E-6)	$b_{11}= 1,885$ (0,0472)	$b_{12}= 1,140$ (0,0265)	$b_{13}= 0,997$ (0,0206)				4,802	0,9959
[5]	$b_{14}= 2,3E-5$ (4,13E-6)	$b_{15}= 1,928$ (0,0394)	$b_{16}= 0,9210$ (0,0220)	$b_{17}= 1,007$ (0,0171)				4,581	0,9951

Tabla 2. Estimación de los parámetros (error estándar entre paréntesis) obtenida en el ajuste simultáneo del sistema de ecuaciones [2-5] para predecir d_g , V_m , W_t y W_s .

$$N = \left(\frac{W_s}{b_{14} b_0^{h_{15}} H_0^{(b_2 h_{15} + b_{16})}} \right)^{\frac{1}{b_2 h_{15} + b_{16}}} \quad [12]$$

En la figura 2 se muestra el DMD construido superponiendo las trayectorias de las relaciones *densidad-tamaño*; es decir, las isolíneas de H_0 , las isolíneas de d_g y las isolíneas de V en el gráfico bivalente H_0-N (no se han incluido las isolíneas de W_i y W_s para una mejor interpretación del diagrama). Los valores de las variables representadas en el DMD oscilaron entre los valores mínimos y máximos observados en las parcelas utilizadas para el ajuste.

La ecuación [2], de volumen maderable de masa (V_m), no tiene solución para N , de ahí que en el diagrama se hayan representado las isolíneas para V . Para la estimación de V_m bastaría con multiplicar el valor de V obtenido en el diagrama por la razón de masa (r) dada por la expresión:

$$r = \left[\exp(-0,2788 d_i^{3,101} d_g^{-2,708}) \right] \quad [13]$$

En la ecuación [13], el valor del diámetro comercial límite (d_i) es elegido por el usuario, mientras que el de d_g puede leerse directamente en el diagrama.

Inclusión del coeficiente de esbeltez en los DMD

Existen diferentes acepciones del coeficiente de esbeltez de una masa forestal en función de las alturas o diámetros representativos de la masa considerados. Según muchos autores (p. ej., MITCHELL, 2000; WONN & O'HARA, 2001; HINZE & WESSELS, 2002) la altura media aritmética y el diámetro medio aritmético de la masa son las variables más adecuadas para determinar el CE medio de la masa, es decir:

$$CE = \frac{\bar{h}}{\bar{d}} \quad [14]$$

donde \bar{h} y \bar{d} son la altura y el diámetro medio aritmético de la masa, respectivamente.

Como estas dos variables no estaban incluidas en el diagrama, ha sido necesario relacionarlas con otras que sí lo estaban, como es el caso de H_0 y d_g . Así, mediante sencillos modelos lineales se consiguieron ajustes que explicaron más de un 96,8% y de un 99,8% de la variabilidad de los datos de \bar{h} y \bar{d} , respectivamente, y que proporcionaron una distribución de residuos insesgada. Las expresiones de estos modelos, ya parametrizados, son las siguientes:

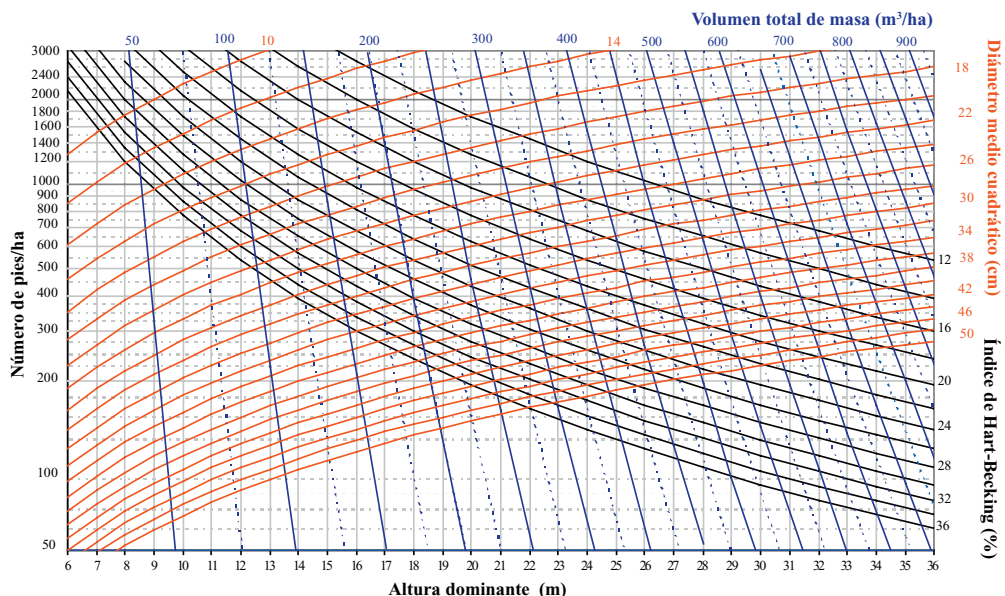


Figura 2. Diagrama de manejo de la densidad considerando las variables dependientes volumen total de masa y diámetro medio cuadrático

$$\bar{h} = -1.712 + 0.9574H_0 \quad [15]$$

$$\bar{d} = -0.4155 + 0.9761d_g \quad [16]$$

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación [12]:

$$CE = \frac{-1,712 + 0,9574H_0}{-0,4155 + 0,9761 b_0 N^{\bar{h}} H_0^{b_2}} \quad [17]$$

Las isóneas para CE se obtuvieron resolviendo N a través del rango observado de H₀ y fijando CE como constante:

$$N = \left(\frac{-1,712 + 0,9574H_0 - (0,4155CE)}{0,9761 b_0 H_0^{b_2} CE} \right)^{\frac{1}{\bar{h}}} \quad [18]$$

En la figura 3 se muestran las isóneas correspondientes al rango de valores de CE 40-110, que es la amplitud encontrada para esta variable en las parcelas de muestreo. Como se aprecia en dicha figura, las isóneas de CE son descendentes de la izquierda a derecha del diagrama; esta disposición gráfica implica que para un mismo valor de densidad, la estabilidad disminuye con la altura de la masa, lo que es coherente con la evidencia empírica.

Al no existir para Galicia datos concretos sobre la relación entre CE medio de la masa y la presencia o ausencia de daños por viento o nieve para *Pinus radiata*, se tuvieron en cuenta los valores disponibles para esta especie en otras regiones. Así, de acuerdo con las observaciones de CREMER et al. (1982), GADOW & BREDEKAMP (1992) y HINZE & WESSELS (2002) se consideró un valor de CE igual a 90 como valor razonable del umbral que delimita la zona de estabilidad de la masa.

Asimismo, en la figura 3 se han representado las tres zonas de estabilidad propuestas por BECQUEY & RIOU-NIVERT (1987): estable, poco estable e inestable. Estas tres zonas están basadas en la existencia de un efecto conjunto del CE medio de la masa y su H₀ y se consideran aplicables a masas uniformes de coníferas en zonas templadas del planeta (MITCHELL, 2000). De hecho, tal y como se aprecia en la figura 3, la isónea de CE = 90 considerada de acuerdo con la bibliografía coincide de forma bastante aproximada con el límite entre la zona inestable y la de estabilidad intermedia definidas por BECQUEY & RIOU-NIVERT (1987).

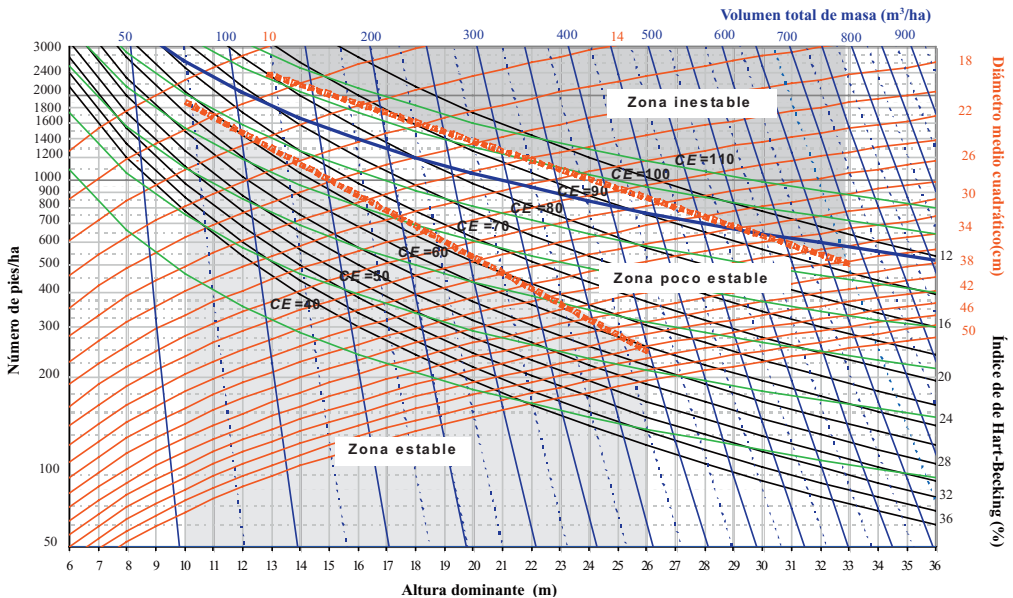


Figura 3. Diagrama de manejo incluyendo las isóneas para el coeficiente de esbeltez de la masa y las zonas de estabilidad definidas por BECQUEY & RIOU-NIVERT (1987)

UTILIZACIÓN DE LOS DMD

Como ya se ha comentado, los diagramas de manejo de la densidad se utilizan fundamentalmente para diseñar y evaluar esquemas selvícolas de claras. En el uso de los diagramas de manejo de la densidad desarrollados en este trabajo existen tres factores que determinan el esquema de clara: (i) el status de la masa a la edad de corta, (ii) los límites superior e inferior de la espesura, y (iii) la estabilidad de la masa. El primero de los valores puede ser definido por el punto resultante de cualquier combinación lógica de dos de las siguientes variables: H_0 , d_g , N , V , V_m , W_i y W_s a la edad de turno. La selección de los límites superior e inferior de densidad a menudo representa un compromiso entre el máximo crecimiento de la masa y el máximo crecimiento del árbol individual y su vigor (LONG, 1985). A efectos prácticos, los límites superior e inferior pueden fijarse como aquellos valores de IH que evitan la existencia elevada de mortalidad natural y que permitan mantener una adecuada ocupación del terreno, respectivamente. En este

caso, y de acuerdo con la bibliografía (RODRÍGUEZ SOALLEIRO *et al.*, 2002; MERINO *et al.*, 2005), se consideró un valor de $IH = 16\%$ como límite superior de densidad para mantener un adecuado vigor de los árboles y evitar la excesiva mortalidad por competencia. Por último, la estabilidad de la masa (explícitamente definida mediante el CE medio de masa) condiciona también las trayectorias de esquemas de claras alternativos al no poder sobrepasarse ciertos valores umbrales de CE . Como se ha comentado, en este trabajo el umbral de CE medio de masa se definió por la isolínea correspondiente al valor de 90.

En la figura 4 se muestra el desarrollo de una masa de pino radiata sometida a un régimen particular de claras para obtención de madera para sierra. El esquema de gestión consiste en tres operaciones de claras y una situación objetivo a la edad de turno (punto g) definida por $H_0 = 28$ metros y $d_g = 36$ cm. La rotación de las claras se estableció por un incremento en H_0 de 5 metros, de acuerdo con los esquemas de clara propuestos para esta especie en Galicia (RODRÍGUEZ SOALLEIRO *et al.*, 2002; MERINO *et al.*, 2005).

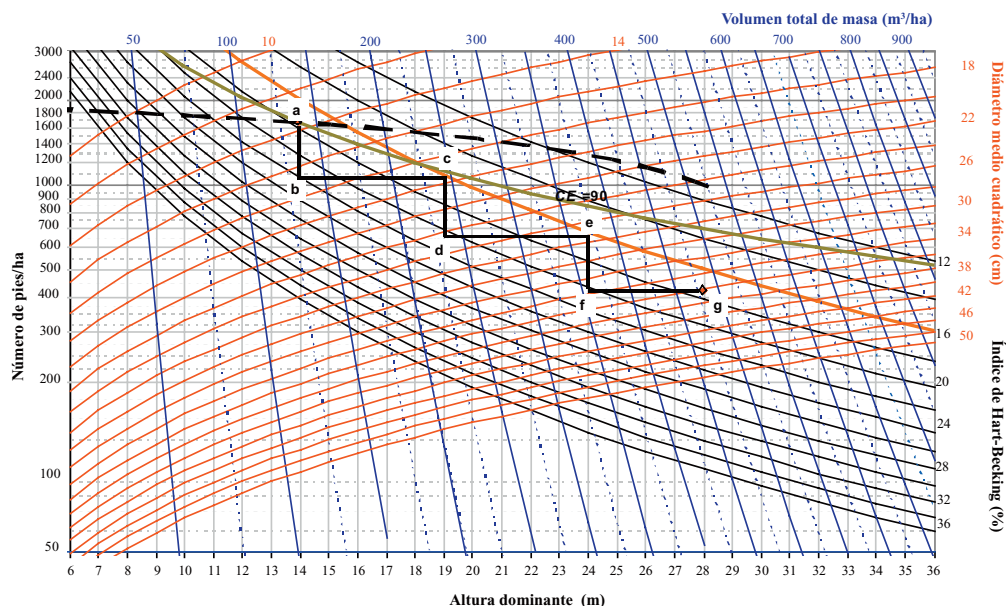


Figura 4. Diagrama de manejo de la densidad y secuencias de evolución de una masa bajo dos regímenes de manejo distintos: uno considerando tres operaciones de clara (línea negra continua) y otro sin operaciones de clara (línea negra discontinua)

Usando estos valores, la secuencia de las tres claras para alcanzar el punto objetivo se determina como una escalera ascendente hacia atrás (Figura 4, línea negra continua). Por tanto, los segmentos verticales y horizontales de esta "escalera", representan el momento de clara y el segmento post-clara, respectivamente. Como se puede apreciar en la figura 4, los segmentos post-clara se han dibujado paralelos al eje x asumiendo que no existe mortalidad en el período entre claras. Aunque el modelo de mortalidad natural [6] predice una disminución del número de pies para todas las fases de desarrollo de la masa (y la mortalidad independiente de la competencia puede ocurrir a cualquier edad), a efectos prácticos parece razonable asumir que no hay disminución del número de pies entre operaciones de clara (p. ej., AMATEIS et al., 1997). Muchos otros autores han utilizado una asunción similar en la construcción de DMD basados en diferentes índice de densidad para otras especies (p. ej., MCCARTER & LONG, 1986; DEAN & BALDWIN, 1993; KUMAR et al., 1995; LUIS & FONSECA, 2004; BARRIO et al., 2006). Sin embargo, esta suposición debe ser tomada con cautela, especialmente para largos períodos de tiempo entre claras (MACK & BURK, 2005). Teniendo en cuenta estas consideraciones, la función de mortalidad se aplicó sólo antes del primer tratamiento de clara, por lo que, consecuentemente, el segmento pre-clara no es paralelo al eje de las x (Figura 4). La determinación de la edad de la corta final y de la edad asociada a cada operación de clara puede llevarse a cabo gráficamente o analíticamente empleando las curvas de calidad de estación desarrolladas para esta especie por DIÉGUEZ-ARANDA et al. (2005) (ver Figura 1 y ec. [7], respectivamente).

Este esquema selvícola que incluye cortas de mejora (claras) fue comparado con un esquema alternativo (Figura 4, línea negra de puntos) que parte de la misma densidad que el punto a del esquema selvícola anterior (momento en que se ejecuta la primera clara), pero sin considerar ningún tratamiento de claras. Como se aprecia, para obtener una masa con la misma altura dominante a la edad de turno que en la alternativa anterior, el número de pies/ha ha disminuido de 2000 a 750 a causa de la mortalidad natural. Además, la estabilidad de la masa no está asegurada a par-

tir del punto a en el diagrama, al encontrarse dentro de la zona de inestabilidad delimitada por la isolínea de CE medio de la masa igual a 90.

CONCLUSIONES

La metodología desarrollada en este trabajo pretende servir de soporte o ayuda en el diseño de esquemas de claras para masas puras y regulares teniendo en cuenta tanto aspectos productivos como de estabilidad mecánica frente a daños por viento y nieve. El coeficiente de esbeltez medio de la masa (usado para valorar el riesgo de daños) se incluyó satisfactoriamente en los diagramas de manejo de la densidad, permitiendo así diseñar esquemas selvícolas que reduzcan la susceptibilidad de la masa frente a los factores abióticos comentados. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que esta metodología sólo considera la estabilidad intrínseca de la masa, por lo que, para una aproximación más realista de los daños finales esperados, deberían tenerse en cuenta también otros factores ambientales y de gestión (extrínsecos a las masas) de gran importancia.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación AGL2004-07976-C02-01.

Notas

¹ Si bien a lo largo de todo el artículo se ha usado habitualmente el término "manejo" en vez del de "gestión" (más utilizado en España), ambos hacen referencia al mismo concepto.

BIBLIOGRAFÍA

- AMATEIS, R.L.; BURKHART, H.E. & JIPING, L.; 1997. Modeling survival in juvenile and mature loblolly pine plantations. *Forest Ecol. Manage.* 90: 51-58.
- BARRIO, M. & ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G.; 2005. Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate

- oak stands and its use in designing thinning schedules. *Forestry* 78 (3): 209-216.
- BARRIO, M.; BALBOA, M.A.; CASTEDO, F.; DIÉGUEZ-ARANDA, U. & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; 2006. An ecoregional model for estimating volume, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). *Forest Ecol. Manage.* 223: 24-34.
- BECQUEY, J. & RIOU-NIVERT, P.; 1987. L'existence de zones de stabilité des peuplements. Consequences sur la gestion. *Rev. For. Franc.* 39: 323-334.
- BURKHART, H.E.; 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. *South. J. Appl. For.* 1: 7-9.
- CAMERON, A.D.; 2002. Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. *Forestry* 75: 25-35.
- CASTEDO-DORADO, F.; DIÉGUEZ-ARANDA, U. & ALVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; 2007. A growth model for *Pinus radiata* D. Don stands in northwestern Spain. *Ann. For. Sci.* 64: 453-467.
- CLARK, A. & THOMAS, C.E.; 1984. Weight equations for southern tree species. When are and what is needed. In: R.F. Daniels & P.H. Dunhan (eds.), *Proceedings of the 1983 southern forest biomass workshop*: 100-106. USDA Forest Service. Southern Forest Experimental Station.
- CREMER, K.W.; BOROUGH, C.J.; MCKINNEL, F.H. & CARTER, P.R.; 1982. Effect of stocking and thinning on wind damage in plantations. *N.Z.J. For. Sci.* 12: 244-268.
- DEAN, J.T. & BALDWIN, V.C.; 1993. *Using a density-management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations*. Southern Forest Experimental Station. Res. Pap., SO 275. USDA Forest Service.
- DEAN, T.J. & BALDWIN, V.C.; 1996. *Crown management and stand density*. In: Carter and Mason (eds.), *Growing tress in a greener world: industrial forestry in the 21 St. century; 35th LSU forestry symposium*: 148-159. Louisiana State University Agricultural Center, Louisiana Agricultural Experiment Station. Baton Rouge.
- DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BURKHART, H.E. & RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; 2005. Modelling dominant height growth of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations in northwestern Spain. *Forest Ecol. Manage.* 215: 271-284.
- DREW, T.J. & FLEWELLING, J.W.; 1979. Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. *For. Sci.* 25: 518-532.
- GADOW, K.V. & BREDEKAMP, B.; 1992. *Forest management*. Academica. Pretoria.
- GOULDING, C.J.; 1972. *Simulation technique for a stochastic model of growth of Douglas-fir*. Ph. D. Thesis. University of British Columbia. Vancouver.
- HINZE, W.H.F. & WESSELS, M.O.; 2002. Stand stability in pines: an important silvicultural criterion for the evaluation of thinnings and the development of thinning regimes: management paper. *South. Hemisphere For. J.* 196: 37-40.
- KUMAR, B.M.; LONG, J.N. & KUMAR, P.; 1995. A density management diagram for teak plantations of Kerala in peninsular India. *Forest Ecol. Manage.* 74: 125-131.
- LONG, J.N.; 1985. A practical approach to density management. *For. Chron.* 23: 23-26.
- LONG, J.N. & SHAW, J.D.; 2005. A density management diagram for even-aged ponderosa pine stands. *West. J. Appl. For.* 20: 205-215.
- LUIS, J.S.F. & FONSECA, T.F.; 2005. The allometric model in the stand density management of *Pinus pinaster* Ait. in Portugal. *Ann. For. Sci.* 61: 807-814.
- MACK, T.J. & BURK, T.E.; 2005. A model-based approach to developing density management diagrams illustrated with Lake States red pine. *North. J. Appl. For.* 22: 117-123.
- MCCARTER, J.B. & LONG, J.N.; 1986. A lodgepole pine density management diagram. *West. J. Appl. For.* 1(1): 6-11.
- MERINO, A. & BALBOA, M.A.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. *Forest Ecol. Manage.* 207: 325-339.
- MITCHELL, S.; 2000. *Forest health: preliminary interpretations for wind damage. Stand Density Management Diagrams*. For. Pra. Br., B.C. Min. For. Victoria.

- NEWTON, P.F. & WEETMAN, G.F.; 1994. Stand density management diagram for managed black spruce stands. *For. Chron.* 70: 65-74.
- NEWTON, P.F.; 1997. Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning. *Forest Ecol. Manage.* 98: 251-265.
- NEWTON, P.F.; 2003. Yield prediction errors of a stand density management program for black spruce and consequences for model improvement. *Can. J. For. Res.* 33: 490-499.
- OLIVEIRA, A.M.; 1988. The H/D ratio in maritime pine (*Pinus pinaster*) stands. In: A.R. Ek, S.R. Shifley and T.E. Burk (eds.), *Proceedings of the IUFRO Conference Forest Growth modelling and prediction*: 881-888. Minneapolis. IUFRO. Vienna.
- REINEKE, L.H.; 1933. Perfecting a stand density index for even-aged forest. *J. Agr. Res.* 46: 627-638.
- RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R.; SÁNCHEZ, F.; GORGOSO, J.; CASTEDO, F.; LÓPEZ, C. & GADOW, K.v.; 2002. Evaluating standard treatment options for *Pinus radiata* plantations in Galicia (north-western Spain). *Forestry* 75: 273-284.
- SAS INSTITUTE INC.; 2004. *SAS/ETS® 9.1 User's Guide*. SAS Institute Inc. Cary, N.C.
- WANG, Y.; TITUS, S.J. & LEMAY, V.M.; 1998. Relationships between tree slenderness coefficients and tree or stand characteristics for major species in boreal mixedwood forests. *Can. J. For. Res.* 28: 1171-1183.
- WILSON, F.G.; 1946. Numerical expression of stocking in terms of height. *J. For.* 44: 758-761.
- WILSON, J.S. & OLIVER, C.D.; 2000. Stability and density management in Douglas-fir plantations. *Can. J. For. Res.* 30: 910-920.
- WONN, H.T. & O'HARA, K.L.; 2001. Height:diameter ratios and stability relationships for four northern Rocky Mountain tree species. *West. J. Appl. For.* 16: 87-94.
- YODA, K.; KIRA, H.; OGAWA, H. & HOZUMI, K.; 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *J. Biol. Osaka City Univ.* 14: 107-129.