

# MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA DE COMBUSTIBLES FINOS EN EL DOSEL DE COPAS DE RODALES REGULARES DE *PINUS PINASTER*: EFECTO DE CLARAS COMBINADAS CON PODAS

Andrea Hevia Cabal<sup>1,2</sup>, Alejandra Crabiffosse Barrero<sup>1</sup>, Juan Majada Guijo<sup>2</sup>, Juan Gabriel Álvarez González<sup>1</sup> y Ana Daría Ruiz González<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unidad de Gestión Forestal Sostenible. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Santiago de Compostela. Campus Universitario s/n. 27002-LUGO (España)

<sup>2</sup> Centro Tecnológico Forestal y de la Madera. Finca Experimental La Mata s/n. 33820-GRADO (Asturias-España). Correo electrónico: andrea.hevia@usc.es

## Resumen

Los modelos de predicción del riesgo de inicio y propagación de fuegos de copas requieren conocer, entre otros parámetros, la altura de la base de la cubierta de copas (CBH) y la densidad aparente del combustible en la cubierta (CBD), cuyos valores dependen directamente de la distribución de la carga de combustibles finos en el dosel de copas. Estas dos variables no pueden medirse directamente en campo, siendo necesario contar con modelos que permitan estimarlas a partir de variables dasométricas sencillas de obtener. Para el desarrollo de estos modelos, se ha empleado un dispositivo de parcelas de ensayo de podas y claras instalado en cuatro rodales regulares de *Pinus pinaster* Ait. (cada uno con tres niveles de clara y tres niveles de poda combinados entre sí) en Asturias. Ambos tratamientos modificaron el valor de CBD efectivo, de 0,132 (control) a 0,038 kg·m<sup>-3</sup> (poda del 40% con clara fuerte), y CBH, de 0,90 (control) a 3,45 m (poda del 40% con clara fuerte). La función biparamétrica de Weibull fue ajustada para las distribuciones de los combustibles finos, siendo la altura dominante, la altura de la copa y el número de pies por hectárea las variables dasométricas que mejor se relacionaron con los parámetros de dicha función de densidad.

Palabras clave: *Canopy bulk density, Canopy base height, Función de densidad, Weibull*

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años existe un gran interés en la evaluación del riesgo de que un incendio de superficie se trasmite a las copas de los árboles y posteriormente se propague por ellas. Las razones de este interés son dos: por una parte la dificultad de su extinción y el peligro que supone para los medios humanos que los combaten, y por otra los graves daños medio-ambientales

que provocan, con tasas de mortalidad en el arbolado cercanas al 100%.

VAN WAGNER (1977), utilizando un acercamiento semi-físico, desarrolló unos criterios para rodales de coníferas que son ampliamente admitidos y que permiten estimar si el conjunto de las características de un fuego de superficie y de la cubierta forestal bajo la que se desarrolla son adecuadas para que ese fuego de superficie se transmita a las copas de los árboles y, posteriormente,

cómo va a ser su avance. Este autor distingue, por tanto, dos fases en el proceso: la iniciación, o transmisión del fuego de superficie a las copas, y la propagación posterior de ese fuego de copas, diferenciando en esta fase los fuegos de copa activos, pasivos e independientes. Estos criterios, junto con modelos de probabilidad de iniciación de fuegos de copa como los propuestos por XANTHOPOULOS (1990), ALEXANDER (1998), CRUZ (1999) o CRUZ et al. (2003a; 2004; 2006), y ecuaciones para estimar el comportamiento de esos fuegos como las propuestas por ROTHERMEL (1991), el FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP (1992), CRUZ (1999) o CRUZ et al. (2005) constituyen la base de la mayoría de los simuladores de predicción del comportamiento de fuego de copas (FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP, 1992; FINNEY, 1998; SCOTT, 1999; REINHARDT & CROOKSTON, 2003; ALEXANDER et al., 2006; ANDREWS, 2008).

El criterio de VAN WAGNER (1977) para la fase de iniciación se basa en comparar la intensidad lineal del fuego de superficie con una intensidad lineal crítica ( $I'_L$ ), de modo que si no se supera ese límite crítico es previsible que el fuego no se transmita a las copas. Los valores de la intensidad lineal del fuego de superficie se pueden estimar empleando el modelo de ROTHERMEL (1972) y van a depender fundamentalmente del tipo de combustible que está manteniendo ese fuego, de su humedad (tanto de los combustibles vivos como de los muertos), de la pendiente y de la velocidad del viento. Por otro lado, la intensidad lineal crítica ( $I'_L$ ) se puede estimar empleando la siguiente ecuación:

$$I'_L = \left[ \frac{CBH \cdot (460 + 25,9 \cdot FMC)}{100} \right]^{3/2}$$

donde CBH es la altura de la base de la cubierta de copas (Canopy base height, m) y FMC es la humedad foliar (Foliar moisture content, %).

SANDO & WICK (1972) sugieren considerar CBH como la altura a la que hay suficiente combustible en las copas como para propagar verticalmente el fuego desde la superficie y establecen un límite mínimo de densidad aparente de combustibles para fijar esa altura. Otros autores (CRUZ et al., 2003b) discuten esa forma de definir CBH y sugieren otras definiciones más sencillas, como la altura de inicio de la copa viva

del árbol del rodal más cercana al suelo, o la altura media a la que comienzan las copas en el rodal. Sin embargo, según SCOTT & REINHARDT (2001), CBH no se corresponde con ninguna de estas dos definiciones, sobre todo cuando se trata de rodales con más de un estrato arbóreo.

Una vez que el fuego de superficie se ha transmitido a las copas, la segunda fase que distingue VAN WAGNER (1977) es la de propagación, y su criterio se basa en comparar la velocidad de propagación estimada para el fuego de copas activo, con una velocidad de propagación crítica ( $R'_{ACTIVO}$ ), de modo que si se supera ese umbral crítico es muy probable que el fuego de copas se propague junto con el fuego de superficie en lo que se denomina fuego de copas activo. En caso contrario, el fuego de copas no pasaría de ser un fuego de copas pasivo en el que se queman árboles aislados, o en grupos reducidos, pero sin un frente continuo. La velocidad de propagación para un fuego de copas activo se estima habitualmente con el modelo de ROTHERMEL (1991), basado a su vez en el modelo de ROTHERMEL (1972) que únicamente es válido para fuegos de superficie. Por otro lado, la velocidad de propagación crítica ( $R'_{ACTIVO}$ , m/min) se estima con la siguiente ecuación:

$$R'_{ACTIVO} = \frac{3}{CBD}$$

donde CBD es la densidad aparente del combustible en la cubierta de copas (Canopy bulk density,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

SCOTT & REINHARDT (2001) definieron CBD como la cantidad de combustible disponible en el dosel de copas por unidad de volumen. Aunque el concepto es sencillo, no existe consenso sobre qué se considera combustible disponible. VAN WAGNER (1977) considera que el principal combustible en las copas es el follaje vivo y que poco más se quema excepto en fuegos inusualmente intensos, aunque también añade que cuando existe abundante material muerto en las copas, este material debería ser tenido en cuenta al calcular el valor de CBD. Otros autores aconsejan considerar, además, otros combustibles. Por ejemplo, BROWN & BRADSHAW (1994) y REINHARDT et al. (1997; 2006a) consideran que los líquenes, musgos y una porción de las ramas vivas y muertas de

menos de 6 mm de grosor deben ser incluidos. Sin embargo, en la práctica, la falta de información sobre este tipo de combustibles difícilmente cuantificables hace que no sean tenidos en cuenta (CRUZ *et al.*, 2003b).

De lo anterior se deduce que hay dos variables estructurales del dosel de copas (CBD y CBH) que son esenciales para poder predecir si un fuego de superficie se transmite a las copas y, en caso de ser así, cómo va a evolucionar. Ninguna de esas dos variables puede ser medida directamente en campo, por lo que es necesario estimarlas. La metodología más sencilla de estimación de CBD se basa en suponer una distribución uniforme de los combustibles disponibles en el dosel de copas, de modo que el valor de CBD se obtiene dividiendo la biomasa de los combustibles disponibles (estimada, por ejemplo, con tarifas de biomasa de árbol individual por fracciones arbóreas) por el volumen que éstos ocupan (incluyendo el espacio entre los árboles) obtenido como el producto de la superficie que ocupa el rodal por la longitud del dosel de copas. SANDO & WICK (1972) consideran que la distribución vertical de los combustibles disponibles no es uniforme en el dosel, y proponen un método más complejo que se basa en la estimación del perfil vertical de combustible, para a partir de él, obtener los valores de CBD y CBH. Utilizando esta metodología, la aplicación “Fire and Fuel Extension” del simulador “Forest Vegetation Simulator” (FFE-FVS, BEUKEMA *et al.*, 1997; REINHARDT & CROOKSTON, 2003) define CBD efectivo como el valor máximo de la distribución vertical de la densidad aparente de combustibles de la cubierta de copas. Para obtener el perfil se consideran capas de 0,3 metros de altura (comenzando desde el suelo hasta alcanzar la altura máxima del dosel de copas), y se calcula la densidad de los combustibles existente en cada capa como el cociente entre la biomasa de esos combustibles y el volumen que ocupan (superficie del rodal multiplicada por 0,3 m). En el caso de que el perfil sea muy irregular se realiza un suavizado empleando una media móvil con una ventana de 4,5 metros. El valor de CBD efectivo se calcula como el valor máximo de ese perfil y el valor de CBH se calcula como la altura a la que se alcanza una densidad aparente de  $0,037 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Aunque en la Península Ibérica se han llevado a cabo numerosos avances en el estudio de las variables del complejo de combustible que influyen en el comportamiento del fuego en incendios de superficie en rodales de *Pinus pinaster* (FERNANDES *et al.*, 2004; FERNANDES & RIGOLOT, 2007; VEGA *et al.*, 1987; 2008), aún son pocos los trabajos relacionados con la estimación de las variables estructurales del dosel de copas CBD y CBH, y los que existen se han centrado en otras especies (CRECENTE-CAMPO *et al.*, 2009; RUIZ-GONZÁLEZ & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, 2011).

Los objetivos de este trabajo son: (i) caracterizar las distribuciones verticales de densidad aparente del combustible de rodales jóvenes de *Pinus pinaster* en Asturias, (ii) analizar el efecto que los tratamientos de claras y podas, solos o combinados, tienen sobre esos perfiles, y (iii) modelizar la distribución vertical de densidad aparente empleando una función de densidad.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos provienen de una red experimental de ensayos de podas y claras que cuenta con 4 parcelas permanentes situadas en rodales jóvenes regulares de *Pinus pinaster* en Asturias. Los ensayos fueron instalados por el Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA) de la Consejería de Medio Rural y Pesca del Principado de Asturias, en el invierno de 2005-2006. El objetivo era evaluar los efectos de las podas y las claras en el crecimiento, desarrollo y calidad de la madera de las masas de esta especie en Asturias. En cada parcela se planteó un diseño factorial con dos factores: intensidad de poda e intensidad de clara. Se han considerado tres niveles de clara: control, clara débil (entre 10-15% del área basimétrica  $-G-$  extraída) y clara fuerte (entre 25-30% de  $G$  extraída) y tres niveles de poda (control, eliminación hasta un 15% de la longitud de copa y eliminación hasta un 40% de la longitud de copa) combinados entre sí.

Cada árbol fue numerado y se realizó un inventario diamétrico y de alturas de todos los pies de la masa. Además, se midió la altura de la base de la copa ( $h_{base}$ ) en todos los árboles y el diámetro de copa ( $d_c$ ) de una muestra represen-

tativa. A partir de estos datos se calcularon las principales variables de rodal, cuyos valores medio, mínimo, máximo y desviación estándar figuran en la Tabla 1.

Para el ajuste de las ecuaciones de biomasa se realizó un muestreo destructivo de 29 árboles seleccionados en tres parcelas temporales instaladas en tres masas jóvenes de *Pinus pinaster* gestionadas por el Servicio de Montes del Principado de Asturias. Los árboles apeados se seleccionaron de modo que su número por cada clase diamétrica fuera proporcional a su presencia en la parcela. Además, estos árboles no estaban podados ni mostraban malformaciones en tronco o copa, o cualquier otro tipo de desarrollo anómalo.

Las variables medidas en cada árbol, antes del apeo, fueron las siguientes: diámetro normal ( $d$ ), altura total ( $h$ ), altura de la base de la copa ( $h_{base}$ ), altura de la base de la copa viva ( $h_{basev}$ ) y diámetro de copa ( $d_c$ ). Para estas mediciones se utilizó forcípula de precisión milimétrica ( $d$ ) y Vertex III de precisión decimétrica ( $h$ ,  $h_{base}$ ,  $h_{basev}$  y  $d_c$ ). También se realizaron anotaciones sobre el estado sanitario, la posición sociológica y la forma del árbol.

Cada árbol se seccionó en trozas de 1 m de longitud, hasta una altura correspondiente a un diámetro de 4 cm en punta delgada. En cada troza se cortaron todas las ramas con tijeras de podar, caracterizándolas una a una mediante la medición de su diámetro en la inserción (con calibre digital), su longitud (con cinta métrica) y su peso (con balanza de precisión 0,01 g). Asimismo, se anotó el estado de cada rama (viva o muerta) y su posición en el tronco (verticilo y troza). Por último, se

seleccionaron la primera rama viva y la primera muerta de cada troza, que fueron fraccionadas en: acículas, ramillas (diferenciando entre ramillas con diámetros en punta delgada de 0 a 0,3 cm y de 0,3 a 0,6 cm), ramas finas (diámetros en punta delgada entre 0,6 y 2 cm) y ramas gruesas (diámetros en punta delgada de 2 a 7 cm). Al tratarse de una muestra de árboles jóvenes, la fracción de ramas gruesas mayores de 7 cm no estuvo representada. Todas estas fracciones fueron pesadas en campo (con una balanza de precisión 0,01 g) y empaquetadas por separado en bolsas plásticas, etiquetadas y selladas con cinta adhesiva, para evitar la pérdida de humedad.

Las muestras húmedas de las ramas, separadas por fracciones fueron llevadas a laboratorio para su posterior procesado y secado en estufa a 65°C. Estas muestras fueron pesadas en varias ocasiones, con una diferencia de al menos 24 horas, hasta peso constante, para la determinación de su peso seco.

Las fracciones arbóreas consideradas para los ajustes en este estudio fueron las acículas y las ramillas con un diámetro en punta delgada inferior a 0,6 cm. En un análisis preliminar se observó que los ajustes de las dos fracciones de ramillas (de 0 a 0,3 cm y de 0,3 a 0,6 cm) separadamente proporcionaban malos resultados, por lo que fue considerada una única fracción: ramillas con diámetros en punta delgada inferiores a 0,6 cm.

Los principales estadísticos descriptivos de los datos utilizados en este trabajo para la estimación de la biomasa arbórea de *Pinus pinaster* se muestran en la Tabla 2.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
$t$	10,00	7,00	14,00	2,13
$N$	1.577,35	1.060,17	2.408,12	266,69
$G$	11,71	3,18	23,04	5,46
$d_g$	9,52	5,40	14,56	2,54
$d_m$	9,49	5,30	14,37	2,61
$h_m$	6,07	3,77	9,22	1,37
$H_0$	7,37	4,51	11,24	1,52
$D_0$	14,30	7,62	22,53	3,68

**Tabla 1.** Características dasométricas del total de parcelas de ensayo de podas y claras. Nota:  $t$  = edad (años),  $N$  = número de pies por hectárea,  $G$  = área basimétrica ( $m^2 \cdot ha^{-1}$ ),  $d_g$  = diámetro medio cuadrático (cm),  $d_m$  = diámetro medio aritmético (cm),  $h_m$  = altura media (m),  $H_0$  = altura dominante (m),  $D_0$  = diámetro dominante (cm)

Con estos datos se ajustaron ecuaciones alométricas que relacionan la biomasa (peso seco) de las diferentes fracciones arbóreas con variables dimensionales representativas de estos árboles. Posteriormente el valor de la biomasa estimado con estas ecuaciones fue multiplicado por una función de ponderación que varía entre 0 y 1 y que depende, entre otras cosas, de la altura límite considerada, que permite estimar la biomasa acumulada hasta una altura cualquiera del árbol. El proceso de ajuste de las ecuaciones para la estimación de biomasa está detallado en los trabajos de CRABIFFOSSE (2009; 2010). En la Tabla 3 se muestran las ecuaciones empleadas en la estimación del combustible disponible (en este caso, biomasa de las ramillas de diámetro en punta delgada inferior a 0,6 cm y acículas).

Los valores de CBD y CBH de cada parcela se han calculado empleando la metodología del FFE-FVS, que a su vez está basada en la metodología propuesta por SANDO & WICK (1972) El esquema de dicha metodología ha sido ya expuesto en el apartado introductorio.

Para la comparación de medias de CBH y CBD efectivo entre tratamientos se realizó un

análisis de varianza, incluyendo la poda y la parcela como factores fijos. Para ello fue utilizado el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS INSTITUTE INC, 2004).

Una vez obtenidas las distribuciones verticales de densidad aparente en cada parcela, antes y después de los tratamientos, se ha procedido a ajustar la función de densidad de probabilidad (pdf) de Weibull a cada una de ellas. Su expresión matemática es la siguiente:

$$f(h_i) = \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{h_i - k}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{h_i - k}{b}\right)^c\right]$$

donde  $f(h_i)$  representa la frecuencia relativa, en tanto por uno, de la densidad aparente del rodal a la altura  $h_i$  medida desde el suelo;  $k$  es la altura mínima a partir de la cual los valores de la función densidad son mayores que 0, es decir, la altura de la base de la copa del árbol más bajo de la parcela;  $b$  es un parámetro de escala y  $c$  un parámetro de forma.

Las estimaciones de los parámetros  $b$  y  $c$  se han obtenido por mínimos cuadrados ordinarios empleando el procedimiento NLIN del paquete

Variable	Media	Máximo	Mínimo	Desv. est.	Cv
$d$ (cm)	9,17	15,2	4,15	2,94	32,07
$h$ (m)	7,45	11,53	3,06	2,55	34,21
Peso ramas finas (kg)	1,85	4,75	0,38	1,01	54,79
Peso ramillas (kg)	0,72	1,83	0,10	0,48	67,16
Peso acículas (kg)	3,84	13,25	0,52	3,00	78,07
Peso total (kg)	21,3	67,29	3,66	14,8	69,49

**Tabla 2.** Estadísticos descriptivos de los 29 pies de *Pinus pinaster* empleados en el ajuste de funciones para la estimación de la biomasa arbórea. Nota: Cv = coeficiente de variación (%)

Fracción	Modelo
<b>Ramillas</b>	$W_{hm} = W_{rm} \cdot \left(1 - \exp\left[-\left(\frac{h_i'}{0,4639}\right)^{1,9796}\right]\right)$ , donde $W_{rm} = 0,0918 \cdot d^{0,9308}$
<b>Acículas</b>	$W_{hac} = W_{ac} \cdot \left(1 - \exp\left[-\left(\frac{h_i'}{0,6727}\right)^{1,7191}\right]\right)$ , donde $W_{ac} = 0,0509 \cdot d^{2,1818} \cdot R_c^{3,6929}$

**Tabla 3.** Modelos para la estimación de la biomasa acumulada hasta una altura límite para las fracciones finas de *Pinus pinaster*. Nota:  $W_{hm}$  y  $W_{hac}$  = biomasa acumulada de ramillas y acículas, respectivamente, hasta una altura límite (kg);  $W_{rm}$  y  $W_{ac}$  = biomasa total de ramillas y acículas, respectivamente (kg);  $R_c$  = ratio de copa (cociente entre la longitud de copa y  $h$ ) y  $h_i'$  = altura límite en valor relativo, con origen en la base de la copa

estadístico SAS/STAT® (SAS INSTITUTE INC, 2004). Posteriormente se ha procedido a modelizar la función de densidad mediante el ajuste de ecuaciones que relacionen sus parámetros con las principales variables de rodal. Para ello se utilizaron procedimientos gráficos y el método de selección de variables *stepwise* implementado en el procedimiento REG del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS INSTITUTE INC, 2004). Por último, se ha analizado la bondad del ajuste de las funciones modelizadas, comparándolas con las observadas mediante el empleo del test Kolmogorov-Smirnov.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Variaciones en los valores de CBD y CBH

En la Tabla 4 se muestran los resultados de los valores de CBD efectivo y CBH obtenidos para cada uno de los tratamientos en las parcelas de ensayo. Se incluyen además los valores de la altura a la que se alcanzan los máximos de densidad aparente en los perfiles verticales, es decir, la altura a la que se alcanza el valor de CBD efectivo según la metodología propuesta por SANDO & WICK (1972). Por último, también se incluyen los porcentajes de incremento de la intensidad lineal crítica ( $I_L$ ) y de la velocidad de propagación crítica ( $R_{ACTIVO}$ ) que, según el modelo de VAN WAGNER (1977), regulan la transición de un fuego de superficie a un fuego de copas y la tipología de éste (activo o pasivo), respectivamente. El incremento de la intensidad

lineal crítica, provocado por el hecho de elevar el valor de CBH, se ha calculado suponiendo que no hay variación en los valores de FMC.

Los resultados del análisis de varianza indican diferencias en los valores medios de CBH y CBD efectivo por tratamientos. La media más baja de CBH corresponde al control (0,90 m). Las claras aumentan ligeramente este valor, aunque las diferencias no son significativas. Por el contrario, como es evidente, las podas sí que aumentan el valor medio de CBH de forma significativa, con incrementos que varían entre el 87% de la poda del 15% (1,68 m) y el 241% de la poda del 40% (3,07 m). La combinación de tratamientos aumenta el valor medio de CBH entre un 106% para la clara débil con poda del 15% y un 283% para la clara fuerte con poda del 40%. Esta última combinación es la que muestra el valor medio más alto de CBH (3,45 m), aunque no es significativamente diferente de los valores obtenidos en la combinación de clara débil con poda del 40% (3,03 m) o del tratamiento exclusivo de poda del 40% (3,07 m). Las variaciones de la altura de la base de la copa (CBH) suponen, a igualdad del valor de humedad foliar (FMC), que la intensidad lineal crítica necesaria para que un fuego de superficie transite hacia las copas aumente. En los tratamientos analizados ese aumento puede llegar a ser de un 651%, en el caso de clara fuerte combinada con poda del 40%, superándose el 100% de incremento en todos los tratamientos salvo en las dos claras sin combinar con podas, en las que el incremento varía entre el 15% de la clara débil y el 24% de la clara fuerte.

Tratamiento	CBH	CBD efectivo	Altura de CBD	Incremento de $I_L$	Incremento de $R_{ACTIVO}$
Control	0,90c	0,132a	2,48		
Poda 15%	1,68b	0,094b	3,00	155	40
Poda 40%	3,07a	0,055c,d	3,75	530	141
Clara débil	0,99c	0,109a,b	2,70	15	21
Clara fuerte	1,04c	0,090b	2,70	24	46
Clara débil-poda 15%	1,85b	0,077b,c	3,15	195	70
Clara fuerte-poda 15%	2,00b	0,064c	3,15	231	108
Clara débil-poda 40%	3,03a	0,045c,d	3,90	518	191
Clara fuerte-poda 40%	3,45a	0,038d	3,90	651	251

**Tabla 4.** Valores medios de CBH (m) y CBD efectivo ( $kg \cdot m^{-3}$ ) obtenidos para los distintos tratamientos de clara y poda combinados. Se incluye también la altura a la que se alcanzan los valores de CBD (m) y el incremento de la intensidad lineal crítica ( $I_L$ , %) y de la velocidad de propagación crítica ( $R_{ACTIVO}$ , %) como consecuencia de realizar los tratamientos. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ( $\alpha = 95\%$ )

En cuanto a los valores de CBD efectivo, la media más alta se obtuvo en el tratamiento control (0,132 kg·m<sup>-3</sup>). Las claras reducen el valor de CBD efectivo, aunque las diferencias con el control sólo son significativas en el caso de la clara fuerte, con una reducción de un 32%. Las podas reducen significativamente el valor medio de CBD efectivo respecto al control, con una media de reducción de un 29% para la poda del 15% y de un 59% en el caso de la poda del 40%. La combinación de claras y podas reduce significativamente el valor de CBD efectivo con respecto al control, esas reducciones varían entre el 41% observado en la clara débil combinada con la poda del 15% y el 75% observado en la clara fuerte combinada con la poda del 40%. Hay que destacar que, con la única excepción del control, los valores medios de CBD efectivo obtenidos para los restantes tratamientos están por debajo del valor límite de 0,10 kg·m<sup>-3</sup> empíricamente deducido por AGEE (1996) y aceptado por otros autores (ALEXANDER, 1998; CRUZ et al., 2005) por debajo del cuál la probabilidad de propagación de un fuego activo de copas se reduce considerablemente. Por otra parte, las alturas a las que se alcanzan los valores de CBD efectivo varían entre los 2,48 m del control y los 3,90 metros de la poda del 40% combinada con cualquiera de las dos claras.

Los valores de CBD efectivo obtenidos son mucho más bajos que los observados por RUIZ-GONZÁLEZ & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ (2011) para *Pinus radiata* en Galicia (media de 0,212 kg·m<sup>-3</sup>),

o los valores de CBD obtenidos por CRUZ et al. (2003b) para *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus ponderosa* en la zona oeste de Norte América (0,18 kg·m<sup>-3</sup>), por MITSOPOULOS & DIMITRAKOPOULOS (2007) para masas regulares de *Pinus halepensis* en Grecia, por REINHARDT et al., (2006b) para masas mixtas irregulares no aclaradas de *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus contorta* en Idaho, o por CRECENTE-CAMPO et al. (2009) para *Pinus sylvestris* en Galicia. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en este estudio se ha trabajado con masas jóvenes y la carga de combustible aéreo está fuertemente relacionada con el desarrollo del rodal.

Las modificaciones en los valores de CBD efectivo suponen un incremento de la velocidad de propagación crítica con respecto al control que varía entre un 21% (clara débil) y un 251% (clara fuerte con poda del 40%), lo que implica que es mucho más difícil que, en el caso de que el fuego de superficie se transmita a las copas, se produzca un fuego de copas activo.

#### Ajuste y modelización de la función de densidad de Weibull

En la Tabla 5 figuran los valores medio, máximo, mínimo y desviación estándar de los parámetros *b* y *c* de la función de densidad de Weibull ajustada por mínimos cuadrados a las distribuciones verticales de densidad aparente de cada parcela y tipo de tratamiento.

Los resultados del análisis de varianza realizado para analizar si existen diferencias signifi-

Tratamiento	Parámetro <i>b</i>				Parámetro <i>c</i>			
	Media	Máx.	Mín.	Desv. est.	Media	Máx.	Mín.	Desv. est.
Control	3,35	4,06	2,61	0,64	2,22b,c	2,41	1,95	0,20
Poda 15%	3,32	4,15	2,62	0,64	2,52b	2,85	2,25	0,26
Poda 40%	3,48	4,15	2,81	0,65	3,34a	3,61	3,05	0,22
Clara débil	3,31	4,19	2,59	0,68	2,13c	2,45	1,96	0,20
Clara fuerte	3,34	4,24	2,59	0,71	2,14c	2,45	1,97	0,19
Clara débil-poda 15%	3,23	3,93	2,57	0,59	2,42b,c	2,47	2,35	0,05
Clara débil-poda 40%	3,26	3,99	2,56	0,62	2,43b,c	2,48	2,35	0,05
Clara fuerte-poda 15%	3,06	3,75	2,34	0,56	3,01a	3,39	2,67	0,26
Clara fuerte-poda 40%	3,09	3,82	2,33	0,60	3,07a	3,44	2,67	0,28

**Tabla 5.** Valores medio, máximo, mínimo y desviación estándar de los parámetros *b* y *c* de la función de densidad de Weibull en función del tratamiento. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ( $\alpha = 95\%$ )

cativas entre los valores medios de las estimaciones de los parámetros en función del tratamiento, indicaron que no existen diferencias significativas entre los valores del parámetro  $b$ . Sin embargo, sí que se encontraron diferencias significativas entre los valores del parámetro  $c$  al realizar la poda del 40% y al realizar la clara fuerte combinada con cualquier tipo de poda.

La estimación de los valores de CBD efectivo y CBH se puede abordar mediante dos metodologías: (i) desarrollar modelos que permitan estimar directamente estas variables a partir de variables de rodal sencillas de obtener (CRUZ et al., 2003b o RUIZ-GONZÁLEZ & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, 2011) y (ii) modelizar el perfil de la densidad aparente del combustible. La segunda alternativa presenta la ventaja de que se puede utilizar para estimar los valores de CBD efectivo y, sobre todo CBH, para cualquier otra definición diferente de la utilizada en este trabajo. Hay que tener en cuenta que si bien en este estudio se ha definido CBH como la altura a la cual se alcanza una densidad aparente de  $0,037 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (SANDO & WICK, 1972), otros autores establecen límites de densidad aparente diferentes.

A la vista de los análisis gráficos se observó cómo el parámetro  $b$  mostraba una relación lineal con las alturas del rodal, tanto con la altura dominante como con la altura media, y también con el diámetro dominante. En cuanto al parámetro  $c$  sólo se observó una cierta tendencia lineal con la altura media de la base de la cubierta de copas. Los modelos lineales finalmente obtenidos mediante el método de selección de variables *stepwise* para cada uno de los parámetros son los siguientes:

$$b = 0,5462 \cdot H_0 - 0,27466 \cdot \bar{h}_{\text{base}}$$

$$R^2 = 0,9288 \quad EMC = 0,032$$

$$c = 1,605 - 0,60174 \cdot \bar{h}_{\text{base}} + 0,00037 \cdot N$$

$$R^2 = 0,3974 \quad EMC = 0,143$$

Donde  $H_0$  es la altura dominante (m);  $\bar{h}_{\text{base}}$  es la altura media de la base de la cubierta de copas;  $N$  es la densidad del rodal ( $\text{pies}\cdot\text{ha}^{-1}$ );  $R^2$  es el coeficiente de determinación y  $EMC$  es el error medio cuadrático. En el caso del parámetro  $b$ , el modelo explica un porcentaje muy alto de la variabilidad observada (cerca del 93%), pero en el caso del parámetro  $c$  no llega al 40% y la precisión del

modelo es muy baja, poniendo de manifiesto la dificultad para su modelización. Este hecho ya se ha observado al emplear la función de densidad de Weibull para modelizar la distribución de otras variables como los diámetros o las secciones normales (ÁLVAREZ-GONZÁLEZ et al., 1999 o GARCÍA-GÜEMES et al., 2002).

Con las ecuaciones ajustadas se han estimado los valores de los parámetros  $b$  y  $c$  para cada parcela y tratamiento, y se han comparado las distribuciones verticales de densidad aparente observadas y las estimadas con la función de Weibull así modelizada. Pese a la poca fiabilidad del modelo obtenido para el parámetro  $c$ , los resultados del test de bondad del ajuste de Kolmogorov-Smirnov, para un nivel de significación del 20%, no mostraron diferencias significativas entre las distribuciones observadas y las modelizadas.

Estos resultados sugieren que el empleo de la función de densidad de Weibull para modelizar la distribución vertical de la densidad aparente de los combustibles finos en rodales de *Pinus pinaster* es una alternativa a los métodos de estimación directa de CBD efectivo y CBH a partir de ecuaciones que relacionen estas variables con variables de rodal sencillas de obtener en campo.

## CONCLUSIONES

La aplicación de podas y claras aumentó, en todos los casos, el valor de CBH, disminuyendo el riesgo de que un incendio de superficie se transmita a las copas (al incrementar la intensidad lineal crítica). Asimismo, la aplicación de los tratamientos redujo el valor de CBD efectivo, dificultando que una vez iniciada la transición, el fuego se propague como fuego de copas activo (puesto que sería necesaria una velocidad de avance mayor para suministrar el flujo de combustible necesario para alimentar al frente). En definitiva, el incremento de los umbrales críticos para la iniciación y la propagación del fuego por las copas que se produce en respuesta a los tratamientos de podas y/o claras implica que son necesarias mayores velocidades del viento y/o menores humedades de los combustibles tanto muertos como vivos para que una masa pueda desarrollar fuego de copas en alguna de sus tipologías. El mejor tratamiento, desde el punto de vista de la prevención de incen-



dios, fue la clara fuerte combinada con una poda del 40% de la copa, con reducciones de un 75% para los valores de CBD efectivo y un 283% para los valores de CBH, estimada ésta según la metodología de SANDO & WICK (1972).

Sin embargo, hay que destacar que el presente estudio aborda solo parcialmente el análisis de la potencialidad de las masas de *Pinus pinaster* para desarrollar fuego de copas, puesto que no se ha analizado cómo los tratamientos de poda/clara afectan a las características del complejo de combustibles de superficie y por tanto al comportamiento del fuego en dicha fase. No hay duda de que si los restos de los tratamientos quedan en el monte la carga de combustibles de superficie aumenta y con ello la intensidad de la fase superficial. Asimismo, la apertura de la masa provocaría un incremento en el combustible de sotobosque así como una variación en los regímenes estacionales y diarios de variación de la humedad de los combustibles. Por último, también se vería afectada la circulación del viento por debajo del dosel de copas.

La función de densidad de Weibull permitió modelizar adecuadamente la distribución de la densidad aparente del combustible, para diferentes escenarios selvícolas en masas jóvenes de *Pinus pinaster*. La altura dominante, la altura de la base de la copa y la densidad de la masa mostraron ser las variables de rodal que mejor se relacionaban con los parámetros de dicha función. La modelización del perfil en su totalidad tiene la ventaja de que permite estimar las variables CBD efectivo y CBH del rodal con una gran flexibilidad. Este hecho tiene gran importancia para ésta última variable, dado que no existe consenso sobre el criterio más adecuado para su determinación.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGEE, J.; 1996. The influence of forest structure on fire behaviour. *In: S.L. Cooper & C.A. Redding (eds.), Proceedings of the 17<sup>th</sup> Annual Forest Vegetation Management Conference: 52-68.* University of California.
- ALEXANDER, M.E.; 1998. *Crown fire thresholds in exotic pine plantations of Australasia.* Ph.D. thesis, Australian National University. Canberra, Australia.
- ALEXANDER, M.E.; CRUZ, M.G. & LOPES, A.M.G.; 2006. CFIS: a software tool for simulating crown fire initiation and spread. *In: D.X. Viegas (ed.), Proceedings of 5th International Conference on Forest Fire Research.* Elsevier B.V., Amsterdam.
- ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; SCHRÖDER, J.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. & RUIZ-GONZÁLEZ, A.D.; 2002. Modelling the effects of thinnings on the diameter distribution of even-aged Maritime pine stands. *Forest Ecol. Manage.* 165(1-3): 57-65.
- ANDREWS, P.L.; 2008. *BehavePlus fire modeling system, version 4.0: Variables.* USDA, Forest Service, General Technical Report RMRS-GTR-213WWW.
- BEUKEMA, S.J.; GREENOUGH, D.C.; ROBINSON, C.E.; KURTZ, W.A.; REINHARDT, E.D.; CROOKSTON, N.L.; BROWN, J.K.; HARDY, C.C. & STAGE, A.R.; 1997. An introduction to the fire and fuels extension to FVS. *In: R. Teck, M. Mauer & J. Adams (eds.), Proceedings of the Forest Vegetation Simulator conference: 191-195.* USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. INT-373.
- BROWN, J.K. & BRADSHAW, L.S.; 1994. Comparisons of particulate emissions and smoke impacts from presettlement, full suppression and prescribed natural fire periods in the Selway-Bitterroot Wilderness. *Int. J. Wildland Fire* 4(3): 143-155.
- CRABIFFOSSE, A.; 2009. *Estimación de la biomasa arbórea por alturas en masas jóvenes de regeneración natural de Pinus pinaster Aiton. en Asturias.* Proyecto Fin de Carrera. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.
- CRABIFFOSSE, A.; 2010. *Estimación de características de copa y su relación con tratamientos selvícolas (poda y clara) y el riesgo de incendio de copa en masas jóvenes de regeneración natural de Pinus pinaster Aiton en Asturias.* Trabajo Fin de Máster. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo.
- CRECENTE-CAMPO, F.; POMMERENING, A. & RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; 2009. Impacts of thinning on structure, growth and risk of crown FIRE in a *Pinus sylvestris* L. plantation in northern Spain. *Forest Ecol. Manage.* 257: 1945-1954.

- CRUZ, M.G.; 1999. *Modeling the initiation and spread of crown fires*. M.Sc.Thesis. Univ. Montana. Missoula.
- CRUZ, M.G.; ALEXANDER, M.E. & WAKIMOTO, R.H.; 2003a. Assessing the probability of crown fire initiation based on fire danger indices. *Forestry Chronicle* 79 (5): 976-983.
- CRUZ, M.G.; ALEXANDER, M.E. & WAKIMOTO, R.H.; 2003b. Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America. *Int. J. Wildland Fire* 12: 39-50.
- CRUZ, M.G.; ALEXANDER, M.E. & WAKIMOTO, R.H.; 2004. Modelling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *For. Sci.* 50(5): 640-658.
- CRUZ, M.G.; ALEXANDER, M.E. & WAKIMOTO, R.H.; 2005. Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. *Can. J. For. Res.* 35: 1626-1639.
- CRUZ, M.G.; BUTLER, B.W.; ALEXANDER, M.E.; FORTHOFER, J.M. & WAKIMOTO, R.H.; 2006. Predicting the ignition of crown fuel above a spreading surface fire. Part I: model idealization. *Int. J. Wildland Fire* 15: 47-60.
- FERNANDES, P.M.; LOUREIRO, C.A. & BOTELHO, H.S.; 2004. Fire behaviour and severity in maritime pine stand under differing fuel conditions. *Ann. For. Sci.* 61: 537-544.
- FERNANDES, P.M. & RIGOLOT, E.; 2007. The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecol. Manage.* 241: 1-13.
- FINNEY, M.A.; 1998. *FARSITE: Fire area simulator-Model development and evaluation*. USDA For. Serv. Res. Pap. RMRS-RP-4.
- FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP; 1992. *Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System*. For. Can. Inf. Rep. ST-X-3.
- GARCIA GÜEMES, C.; CAÑADAS, N. Y MONTERO, G.; 2002. Modelización de la distribución diamétrica de las masas de *Pinus pinea* L. de Valladolid (España) mediante la función Weibull. *Inv. Agraria; Sist. Rec. For.* 11(2): 263-282.
- MITSOPOULOS, I.D. & DIMITRAKOPOULOS, A.D.; 2007. Canopy fuel characteristics and potential crown fire behaviour in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests. *Ann. For. Sci.* 64: 287-299.
- REINHARDT, E.D. & CROOKSTON, N.L. (Editors); 2003. *The Fire and Fuels Extension to the Forest Vegetation Simulator*. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-116.
- REINHARDT, E.D.; KEANE, R.E. & BROWN, J.K.; 1997. *First Order Fire Effects Model: FOFEM 4.0, user's guide*. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. INT-344.
- REINHARDT, E.D.; LUTES, D. & SCOTT, J.; 2006a. FuelCalc: A Method for Estimating Fuel Characteristics. In: P.L. Andrews & B.W. Butler (eds.), *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings: 273-282*. USDA Forest Service RMRS-P-41.
- REINHARDT, E.D.; SCOTT, J.; GRAY, K. & KEANE, R.; 2006b. Estimating canopy fuel characteristics in five conifer stands in the western United States using tree and stand measurements. *Can. J. For. Res.* 36: 2803-2814.
- ROTHERMEL, R.C.; 1972. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*.
- ROTHERMEL, R.C.; 1991. *Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains*. USDA, Forest Service, Res. Pap. INT-438.
- RUIZ-GONZÁLEZ, A.D. & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; 2011. Canopy bulk density and canopy base height equations for assessing crown fire hazard in *Pinus radiata* plantations. *Can. J. For. Res.* 41: 839-850.
- SAS INSTITUTE INC.; 2004. *SAS/STAT® 9.1 User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- SANDO, R.W. & WICK, C.H.; 1972. *A method of evaluating crown fuels in forest stands*. USDA Forest Service. Research paper NC-84.
- SCOTT, J.H.; 1999. Nexus: A System for Assessing Crown Fire Hazard. *Fire Management Notes* 59(2): 20-24.
- SCOTT, J.H. & REINHARDT, E.D.; 2001. *Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior*. USDA Forest Service. Research Paper RMRS-RP-29.
- VAN WAGNER, C.E.; 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Can. J. For. Res.* 7, 24-34.
- VEGA, J.A.; BARÁ, S.; ALONSO, M.; FONTURBEL, M.T. & GARCÍA, P.; 1987. Preliminary

- results of a study on short term effects of prescribed fire in pine stands in N.W. Spain. *Ecología Mediterránea* XII (4): 177-188.
- VEGA, J.A.; FERNÁNDEZ, C.; PÉREZ-GOROSTIAGA, P. & FONTURBEL, T.; 2008. The influence of fire severity, serotiny, and post-fire management on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in three burnt areas in Galicia (NW Spain). *Forest Ecol. Manage.* 256: 1596-1603.
- XANTHOPOULOS, G.; 1990. *Development of a wildland crown fire initiation model*. Ph.D. dissertation. Univ. Montana, Missoula, MT.