

MODELIZACIÓN DE VARIABLES DE COPA DE IMPORTANCIA EN INCENDIOS FORESTALES PARA *PINUS RADIATA* D. DON EN EL NOROESTE DE ESPAÑA

Ibán Gómez-Vázquez¹, Felipe Crecente-Campo¹, Ulises Diéguez-Aranda¹ y Fernando Castedo-Dorado²

¹ Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. R/Benigno Ledo. 27002-LUGO (España)

² 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

Resumen

En este trabajo se presenta el rango de variación de la densidad aparente de la cubierta de copas (CBD) y de la altura de la base de la cubierta de copas (CBH) para masas de *Pinus radiata* con necesidad de clara en el noroeste de España. Para ello se realizó un muestreo destructivo de 106 árboles que permitió modelizar el perfil vertical de combustible disponible. El modelo obtenido fue aplicado a 412 inventarios de parcelas permanentes de la especie con índice de Hart inferior a 0,20. Los resultados mostraron que las masas estudiadas se caracterizan por una baja CBH, lo que se traduce en una elevada probabilidad de transición del fuego de superficie a las copas, y por valores reducidos de CBD, lo que implica una limitada capacidad de propagación del fuego por los combustibles aéreos. Estos resultados difieren significativamente de los obtenidos por otros autores para la especie en Galicia. Las discrepancias pueden ser debidas a las diferentes metodologías utilizadas para la distribución vertical del combustible disponible y a las diferentes características de las parcelas empleadas. Estas variables representativas de las características del combustible aéreo fueron modelizadas satisfactoriamente a partir de variables de rodal, lo que permite una determinación precisa de las mismas con un bajo esfuerzo de muestreo. Los modelos desarrollados posibilitan simular diferentes alternativas selvícolas teniendo en cuenta el riesgo de inicio y propagación de incendios de copa, por lo que resultan herramientas útiles para la toma de decisiones en prevención de incendios forestales.

Palabras clave: *Incendios de copa, Combustible disponible, Distribución vertical del combustible, CBD, CBH*

INTRODUCCIÓN

Los incendios de copa provocan efectos severos en el suelo y la vegetación, por lo que afectan gravemente a los ecosistemas forestales. Además, sus peculiares características de comportamiento (elevada longitud de llama y velocidad de propagación) hacen imposible su control por acción directa.

La probabilidad de inicio y la velocidad de propagación de los fuegos de copas pueden ser estimadas mediante diferentes modelos (VAN WAGNER (1977) y CRUZ *et al.* (2004) para la probabilidad de inicio, ROTHERMEL (1991) y CRUZ *et al.* (2005) para la velocidad de propagación). Estos modelos requieren determinar el grado de discontinuidad vertical de la cubierta arbórea y

cuantificar el combustible disponible del dosel de copas (el que se consumiría en el frente de llamas de un incendio de copas activo). Para definir esta información se utilizan generalmente dos variables: la densidad aparente de la cubierta de copas (*canopy bulk density*, CBD) y la altura de la base de la cubierta de copas (*canopy base height*, CBH).

CBD ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) se define como el peso seco de combustible disponible en la cubierta de copas por unidad de volumen. En rodales uniformes CBD se puede estimar como el valor de la carga de combustible disponible (*available canopy fuel load*, CFL, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) dividido por la longitud media de la cubierta de copa viva (m), (VAN WAGNER, 1977), obteniéndose así un valor de CBD “medio” (CBD_m). Esta alternativa asume que la biomasa aérea está distribuida uniformemente en el dosel de copas, hecho que no es cierto incluso en masas uniformes (MITSOPOULOS & DIMITRAKOPOULOS, 2007). Por ello, SCOTT & REINHARDT (2001) proponen dividir idealmente el rodal en secciones de 0,3 metros de altura, y definen la CBD “efectiva” como el valor máximo de CBD calculado a partir de una suavización del perfil vertical de combustible disponible utilizando una media móvil de 4,5 m.

Por su parte, CBH (m) se considera como la altura mínima de la cubierta sobre el nivel del suelo a la que existe una cantidad de combustible suficiente para que el fuego mantenga la combustión vertical, es decir, la menor altura a la que CBD alcanza un determinado valor mínimo (SCOTT & REINHARDT, 2001; MITSOPOULOS & DIMITRAKOPOULOS, 2007). No existe unanimidad en cuanto a la definición exacta de esta altura, si bien suele ser aceptada la propuesta de SANDO & WICK (1972), que fijan el valor de CBH como la menor sección de 0,3 m a la que se alcanza una CBD superior a $0,037 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Sin embargo, otros autores (VAN WAGNER, 1977) consideran que CBH se puede estimar como la distancia entre el suelo y la altura media de la base de la cubierta de copa viva. En este trabajo, esta variable se denominará CBH_m .

La estimación de CBD efectiva y CBH considerando el perfil vertical de combustible disponible, aunque relativamente precisa, no es muy eficiente. Por ello, desde el punto de vista práctico, es necesario modelizar dichas varia-

bles mediante variables de rodal fácilmente obtenibles en un inventario forestal.

Los objetivos de este trabajo son: (i) cuantificar el rango de variación de CBD efectiva y CBH para masas de *Pinus radiata* D. Don con necesidad de clara en el noroeste de España mediante la caracterización del perfil vertical de combustible disponible; (ii) comparar estos valores con los obtenidos suponiendo una distribución uniforme del combustible en el dosel de copas; y (iii) modelizar la relación existente entre CBD efectiva y CBH con variables de rodal sencillas de medir.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se utilizaron tres fuentes de datos: (i) un muestreo destructivo de 161 árboles para estimar la carga de combustible disponible en función de variables de árbol; (ii) un muestreo destructivo de 106 árboles para obtener la distribución del combustible disponible a lo largo de la altura del árbol; y (iii) 412 inventarios de parcelas permanentes para estimar las variables de combustible de copa y de rodal. Se han escogido aquellos inventarios con un valor del índice de Hart (WILSON, 1946) [$IH = 10000/(\sqrt{N}H_0)$] inferior a 0,20, al ser éste el valor máximo observado en las parcelas en las que se apearon árboles. Este valor de *IH* se puede considerar como indicativo de la necesidad de claras en *P. radiata* (BALBOA-MURIAS et al., 2006).

Las parcelas se localizaron por toda el área de distribución de *P. radiata* en el noroeste de España, y fueron subjetivamente seleccionadas para representar el rango existente de edades, densidades e índices de sitio. El tamaño de parcela osciló entre 600 y 1200 m^2 , dependiendo de la densidad de la masa. Para cada combinación parcela-inventario se calcularon las siguientes variables de rodal: edad (*t*), número de pies por hectárea (*N*), área basimétrica (*G*, $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$), diámetro medio cuadrático (d_g , cm), altura dominante (H_0 , m) y diámetro dominante (D_0 , cm).

Los árboles apeados fueron seleccionados en las proximidades de algunas de esas parcelas permanentes, cortándose en cada sitio un árbol de las clases sociológicas sumergido, intermedio y dominante/codominante. Una vez apeado, cada árbol se

dividió en secciones de un metro de longitud, determinándose para cada sección el peso seco correspondiente a las siguientes fracciones: ramas entre 2,5 y 7,5 cm de grosor, ramas entre 0,6 y 2,5 cm de grosor, ramillas de grosor inferior a 0,6 cm y acículas. El peso seco se obtuvo mediante secado de las muestras a 65°C durante 48 horas.

Se consideró como combustible disponible la biomasa correspondiente a las acículas y a las ramillas finas (grosor inferior 0,6 cm), al ser éstas las fracciones habitualmente consumidas en un fuego de copas (STOCKS *et al.*, 2004). Para estimar la cantidad de combustible disponible en cada árbol se desarrollaron modelos alométricos que relacionan los pesos de dichas fracciones con una o más variables de árbol individual:

$$w = \alpha_0 X_i^{\alpha_i} + e \quad [1]$$

donde w es el peso seco de la fracción considerada (acículas $-w_r$ o ramillas finas $-w_{b6}$), X_i son las variables independientes ($i = 1, \dots, n$), α_i son los parámetros a estimar en el ajuste y e es el error del modelo.

Las ecuaciones para ambas fracciones de biomasa se ajustaron simultáneamente empleando el método de los momentos generalizado (GMM) implementado en el procedimiento PROC MODEL de SAS/ETS® (SAS Institute Inc. 2004). Dicho método permite obtener estimaciones eficientes de los parámetros en condiciones de heterocedasticidad, como las que presentan habitualmente los datos de biomasa. Asimismo, corrige el problema de dependencia entre los errores de los modelos de ambas fracciones (BI *et al.*, 2010).

La distribución vertical del combustible disponible para cada árbol se determinó siguiendo la metodología propuesta por ALEXANDER *et al.* (2004). En primer lugar, para los 106 árboles apeados con este propósito se calculó el ratio de combustible acumulado (tanto para acículas $-Rw_r$, como para las ramillas finas $-Rw_{b6}$) y la altura relativa (Rh) para cada sección de un metro, comenzando por el ápice del árbol. Posteriormente se modelizó la relación entre estas variables mediante la función logística:

$$Rw = 1 / [1 + \exp(\beta_0 - \beta_1 Rh)] + e \quad [2]$$

donde Rw es el ratio de combustible acumulado, Rh es la altura relativa, β_0 y β_1 son los parámetros

metros a determinar en el ajuste y e es el error del modelo.

Los perfiles verticales de combustible disponible para cada parcela fueron construidos considerando secciones horizontales de 0,3 m de altura comenzando desde el suelo (SANDO & WICK, 1972). Para cada sección se calculó el valor de combustible disponible acumulado (Rw_r y Rw_{b6}) mediante la Ec. [2] y, posteriormente, el valor sin acumular. Este valor se multiplicó por la carga de combustible disponible (w_r y w_{b6}) estimada para cada árbol mediante la Ec. [1]. La suma de la biomasa correspondiente a cada una de las secciones para cada árbol permitió obtener la distribución vertical de combustible disponible para cada parcela. Posteriormente se determinó el valor de la CBD efectiva y de la CBH según la metodología expuesta en SCOTT & REINHARDT (2001): la CBD efectiva se calculó como el valor máximo de CBD obtenido a partir de una suavización del perfil de combustible disponible usando una media móvil de 4,5 m, y la CBH se calculó como la menor sección de 0,3 m a la que se alcanza una CBD superior a 0,037 kg·m³.

Para determinar la relación existente entre la CBD efectiva y la CBH con variables de rodal, se utilizaron modelos alométricos. La selección de las variables explicativas se llevó a cabo usando un procedimiento de regresión paso a paso (*stepwise regression*), linealizando previamente los modelos alométricos mediante transformación logarítmica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las ecuaciones que permiten estimar la biomasa correspondiente a las acículas (w_r , kg) y a las ramillas de grosor inferior a 6 mm (w_{b6} , kg) a partir de variables de árbol individual son las siguientes:

$$w_r = 0,02023d^{1,899}; R^2 = 0,6968; REMC = 2,832 \text{ kg} \quad [3]$$

$$w_{b6} = 0,01605d^{1,864}; R^2 = 0,7903; REMC = 1,553 \text{ kg} \quad [4]$$

donde d es el diámetro normal (cm) y R^2 y REMC son los estadísticos de bondad de ajuste coeficiente de determinación y raíz del error medio cuadrático, respectivamente.

Para ambas fracciones, el diámetro normal resultó ser suficiente para explicar más del 70% de la variabilidad observada. Todas las estima-

ciones de los parámetros resultaron significativas al nivel del 5%.

Por otra parte, las ecuaciones que permiten estimar la cantidad de combustible acumulado por alturas relativas son las siguientes:

$$Rw_l = 1/[1+\exp(2,645-11,00Rh)]; \quad [5]$$

$$R^2 = 0,8362; \text{ REMC} = 0,1549$$

$$Rw_{b6} = 1/[1+\exp(3,407-7,574Rh)]; \quad [6]$$

$$R^2 = 0,8461; \text{ REMC} = 0,1512$$

Tanto para las acículas como para las ramillas, la función logística explicó en torno al 84% de la variabilidad existente. En la Figura 1 se representan los modelos ajustados superpuestos a los pares de valores de Rw_l - Rh y Rw_{b6} - Rh obtenidos en campo, apreciándose que, en general, las curvas obtenidas siguen adecuadamente las tendencias de los datos observados.

En la Tabla 1 se muestran los valores medio, máximo y mínimo, así como la desviación estándar de las variables de combustible CFL, CBD efectiva, CBD_m , CBH y CBH_m . Como se aprecia, el valor promedio de la CBD efectiva es de $0,10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, muy inferior al obtenido por RUIZ-GONZÁLEZ & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ (2011) para masas *Pinus radiata* en Galicia ($0,21 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). La explicación a esta notable diferencia puede encontrarse en que estos autores asumen que todo el combustible disponible se distribuye proporcionalmente al perfil de copa a lo largo de la longitud de copa viva; sin embargo, de acuerdo con los

datos experimentales obtenidos en este estudio, por debajo de la altura de la base de la copa viva existe también combustible disponible, lo que origina un perfil vertical del combustible disponible más suavizado y un valor inferior de la CBD efectiva. Por esta misma razón, el valor promedio de CBH es también inferior al obtenido por RUIZ-GONZÁLEZ & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ (2011).

El valor promedio de la CBD efectiva obtenido en este estudio es sólo ligeramente superior al valor mínimo de $0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, por debajo del cual se suele asumir que la capacidad de propagación de un fuego de copas activo se reduce considerablemente (CRUZ et al., 2005). Según este resultado, y teniendo en cuenta únicamente el criterio de VAN WAGNER (1977), la mayoría de las masas de *P. radiata* con necesidad de clara propagarán con dificultad un fuego de copas. Sin embargo, el valor relativamente bajo de la CBH obtenido hace que aumente la probabilidad de inicio de fuego de copas. RUIZ-GONZÁLEZ & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ (2011) también encontraron que para edades inferiores a 20 años (como es el caso de la mayoría de las parcelas consideradas en este trabajo) los valores de CBH implicaban un aumento de la probabilidad de inicio de fuego de copas.

Teniendo en cuenta conjuntamente los valores de CBD efectiva y CBH, y aplicando los criterios de VAN WAGNER (1977), se puede afirmar que las masas de *P. radiata* con necesidad de clara en el

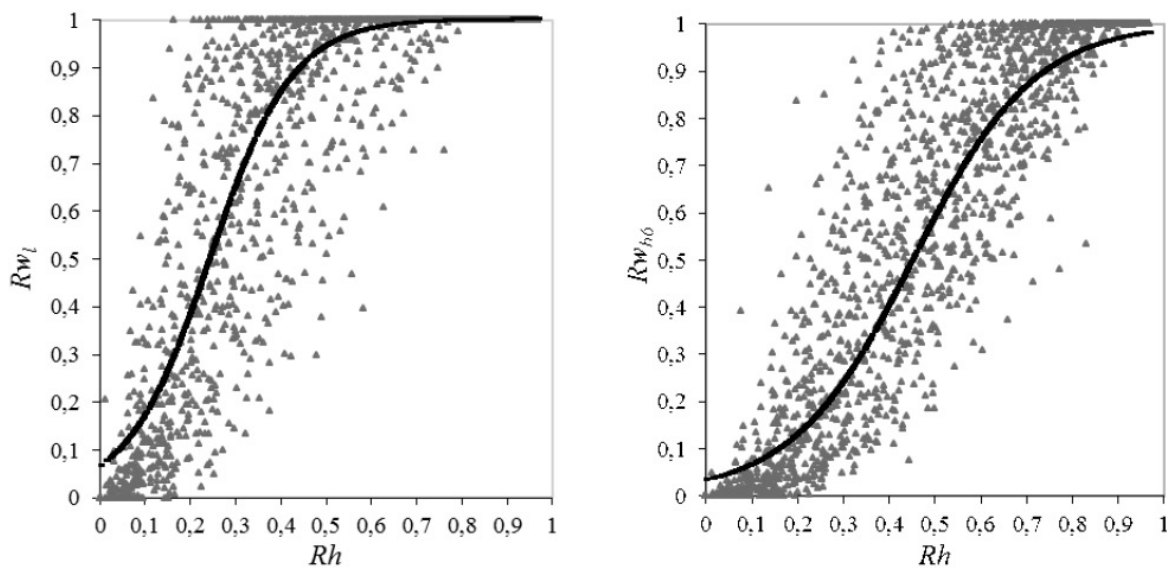


Figura 1. Representación gráfica de los modelos para la estimación del combustible acumulado (acículas, Rw_l , izquierda; ramillas finas, Rw_{b6} , derecha) por alturas relativas (Rh). Los puntos representan los valores observados

	CFL (kg·m ⁻²)	CBD (kg·m ⁻³)	CBD _m (kg·m ⁻³)	CBH (m)	CBH _m (m)
Media	1,128	0,1016	0,1216	6,934	9,486
Máximo	2,559	0,1873	0,2464	13,80	21,78
Mínimo	0,4563	0,05296	0,05194	1,500	2,187
Desv. estándar	0,2869	0,02398	0,03044	2,575	4,047

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las variables CFL, CBD efectiva, CBD_m, CBH y CBH_m

noroeste de España tienen una probabilidad bastante elevada de inicio de fuegos de copa, pero una baja capacidad para su propagación, es decir, sufrirán principalmente fuegos pasivos de copa.

Por último, las expresiones resultantes de la modelización de las variables de copa a partir de variables de rodal fueron las siguientes:

$$CBD = 0,03800N^{0,05413}G^{0,9708}H_0^{-0,9474}, \quad [7]$$

$$R^2 = 0,9609; REMC = 0,004760 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \quad [8]$$

$$CBD = 0,03800N^{0,05413}G^{0,9708}H_0^{-0,9474}, \quad [8]$$

$$R^2 = 0,9789; REMC = 0,3756 \text{ m} \quad [9]$$

$$CFL = 0,02496N^{0,05504}G^{0,9455}, \quad [9]$$

Como se aprecia, el número de pies por hectárea, el área basimétrica y la altura dominante son las variables de rodal que mejor explican la CBD efectiva y la CBH. En los dos casos, los modelos explican un elevado porcentaje de la variabilidad observada. En el caso de CFL el modelo explica prácticamente la totalidad de la variabilidad existente (99,9%) a partir del número de pies por hectárea y el área basimétrica.

Todos los parámetros de las ecuaciones [7], [8] y [9] resultaron significativos ($p < 0,05$) y sus estimaciones tienen sentido biológico. Asimismo, la distribución de los residuos presentó un patrón aleatorio en torno a cero y una varianza homogénea.

CONCLUSIONES

Los combustibles aéreos de masas de *Pinus radiata* con necesidad de clara se caracterizan por una baja CBH, lo que se traduce en una alta probabilidad de inicio de fuego de copas. Sin embargo, los reducidos valores de la CBD efectiva ($0,1 \pm 0,023 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) implican una baja capacidad de propagación del fuego por los combustibles aéreos. Estos resultados difieren significativamente de los obtenidos por otros autores para la especie en Galicia. Las discre-

pancias pueden ser debidas a las diferentes metodologías utilizadas para la distribución vertical del combustible disponible y a las diferentes características de las parcelas consideradas.

Los modelos desarrollados para la estimación de las principales variables de combustible aéreo son bastante precisos, puesto que explican un alto porcentaje de la variabilidad observada, requiriendo un bajo esfuerzo de muestreo. Estos modelos permiten simular diferentes alternativas selvícolas teniendo en cuenta el riesgo de inicio y propagación de incendios de copa, por lo que pueden ser de gran utilidad en la toma de decisiones en prevención de incendios forestales.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) a través del proyecto de investigación AGL2008-02259/FOR. Parte de los trabajos llevados a cabo en este estudio fueron desarrollados durante una estancia de investigación del segundo autor en la Universidad de León, financiada por la Xunta de Galicia y cofinanciada con fondos FSE.

BIBLIOGRAFÍA

- ALEXANDER, M.E.; STEFNER, C.N.; MASON, J.A.; STOCKS, B.J.; HARTLEY, G.R.; MAFFEY, M.E.; WOTTON, B.M.; TAYLOR, S.W.; LAVOIE, N. & DALRYMPLE, G.N.; 2004. Characterizing the jack pine-black spruce fuel complex of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME). *In: Natural Resources Canada, Forestry Service, Northern Forestry Centre, Information Report NOR-X-393*: 49. Edmonton, Alberta.
- BALBOA-MURIAS, M.A.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; MERINO, A. & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G;

2006. Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. *Forest Ecol. Manage.* 237: 29-38.
- BI, H.; LONG, Y.; TURNER, J.; LEI, Y.; SNOWDON, P.; LI, Y.; HARPER, R.; ZERIHUN, A. & XIMENES, F.; 2010. Additive prediction of aboveground biomass for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. *Forest Ecol. Manage.* 259: 2301-2314.
- CRUZ, M.G.; ALEXANDER, M.E. & WAKIMOTO, R.H.; 2004. Modelling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *For. Sci.* 50: 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.
- MITSOPOULOS, I.D. & DIMITRAKOPOULOS, A.P.; 2007. Canopy fuel characteristics and potential crown fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests. *Ann. For. Sci.* 64: 287-299.
- ROTHERMEL, R.C.; 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. In: *USDA For. Ser., Intermountain Forest and Range Experiment Station, Res. Pap. INT-438*. Ogden, Utah.
- 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.
- SANDO, R.W. & WICK, C.H.; 1972. A method of evaluating crown fuels in forest stands. *USDA For. Ser., Research paper NC-84*.
- SAS INSTITUTE INC.; 2004. *SAS/ETS® 9.1 User's Guide*. SAS Institute Inc., Cary, N.C.
- SCOTT, J.H. & REINHARDT, E.D.; 2001. *Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior*. USDA For. Ser., Rocky Mountain Research Station, Res. Pap. RMRS-RP-29.
- STOCKS B.J., ALEXANDER M.E., WOTTON B.M., STEFNER C.N., FLANNIGAN M.D., TAYLOR S.W., LAVOIE N, MASON J.A., HARTLEY G.R., MAFFEY M.E., DALRYMPLE G.N., BLAKE T.W., CRUZ M.G. & LANOVILLE R.A.; 2004. Crown fire behaviour in a northern jack pine-black spruce forest. *Can. J. For. Res.* 34: 1548-1560.
- VAN WAGNER, C.E.; 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Can. J. For. Res.* 7: 23-34.
- WILSON, F.G.; 1946. Numerical expression of stocking in terms of height. *J. For.* 44: 758-761.