



**6º CONGRESO FORESTAL
ESPAÑOL**

6CFE01-355

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz



Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Simulación de subida de fuego a copas en túnel de viento: resultados preliminares para la validación de modelos aplicados a la prevención de incendios

MADRIGAL OLMO, J.^{1*}, HERNANDO LARA C.¹, GUIJARRO GUZMÁN M.¹, DÍEZ GALILEA C.¹, CARRILLO GARCÍA, C.¹

¹INIA, Centro de Investigación Forestal, Dpto. Selvicultura y Gestión de los Sistemas Forestales, Laboratorio de Incendios Forestales. Ctra. Coruña Km 7,5 28040 Madrid. *incendio@inia.es

Resumen

Se presentan los resultados preliminares de una serie de 20 ensayos llevada a cabo en el túnel de viento del INIA. El seguimiento y la monitorización de los ensayos permitieron describir el proceso de inflamación de los verticilos de ramas de *Pinus pinaster* sometidas a un frente dinámico de fuego generado por matorral de *Ulex europaeus*. En cada uno de los ensayos, se obtuvieron más de 100 variables, cuyo análisis ha posibilitado generar los *inputs* de los modelos de subida de fuego a copas más frecuentemente utilizados. Además, el análisis de las imágenes obtenidas durante los ensayos ha permitido caracterizar la geometría de las llamas y su influencia en la inflamación de los verticilos y la fracción de copa quemada. Los resultados obtenidos son una primera aproximación de experimentación a escala *quasi-real* del proceso de subida del fuego a copas, que se espera contribuya a la validación de algunos de los modelos utilizados por los técnicos responsables de prevención y extinción de incendios forestales. La mejora del ajuste de algunos de los parámetros de los modelos analizados podría constituir una importante ayuda para la gestión de los combustibles y la mejor valoración del riesgo en función de la estructura de la masa y de los tratamientos preventivos.

Palabras clave: prevención, extinción, grandes incendios, geometría de las llamas

1. Introducción

Los grandes incendios forestales (GIFs) constituyen un 0,4% del total del número de incendios en España, sin embargo son responsables de aproximadamente un 38% de la superficie afectada por los incendios en nuestro país (fuente: BDIF del MAGRAMA <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/incendios.aspx>). En los últimos años, son cada vez más frecuentes los denominados “mega-incendios” (MGIF), aquellos grandes incendios fuera de la capacidad de extinción que implican gran movilización de medios y con situaciones de emergencia de difícil gestión. Todo ello genera que la superficie afectada por estos incendios sea muy superior a las 500 ha tradicionalmente consideradas como GIF. En dichos MGIFs, que afectan en mayor o menor medida a superficie arbolada, resulta difícil que no se produzca la subida de fuego a las copas, e incluso la propagación por copas, debido a las fuertes intensidades generadas y a la estructura de muchas de nuestras masas, con gran continuidad horizontal y vertical.

Los modelos de inicio y propagación por copas, desarrollados y evaluados hasta la fecha, presentan aún grandes controversias sobre su validez y el uso adecuado de las variables más frecuentemente utilizadas para predecir la probabilidad de subida a las copas (Cruz & Alexander 2010). Esto a su vez plantea dificultades en la toma de decisiones, tanto en tareas de extinción como en la planificación de la prevención, ya que son necesarios criterios

eficaces basados en datos contrastados para optimizar las acciones más adecuadas a cada situación que permitan reducir el peligro potencial de los incendios de copa. Por otro lado, y con el ánimo de prevenir los incendios de copa a través de la modificación de los modelos de combustibles, se están proponiendo las quemas bajo arbolado como alternativa más económica y eficaz a los tratamientos selvícolas. Predicciones poco ajustadas a las condiciones de los modelos de combustible de nuestro país podrían establecer ventanas de prescripción que generen eventuales escapes de la quema o daños a las copas. Los modelos de subida de fuego a copas más utilizados internacionalmente (ver revisión en Cruz & Alexander 2010) no han sido contrastados en España, con lo que los técnicos utilizan las salidas de dichos modelos con gran incertidumbre. Desde el punto de vista académico, se han establecido criterios selvícolas para reducir el peligro potencial de subida a las copas basándose en alguno de dichos modelos (Molina et al. 2011). No obstante, no existe una validación de estos resultados ya que hasta ahora existen pocas experiencias para evaluarlos mediante quema experimental o con datos procedentes de incendios reales.

En España, se llevó a cabo en mayo de 2012 la primera quema experimental destinada a estudiar el comportamiento del fuego de copas, en el marco del proyecto de investigación RTA2009-00153-C03-02 “Protección contra incendios forestales: condiciones de inicio, propagación e impacto socioeconómico de los fuegos de copa en masas de pinares. Los resultados obtenidos están aún en fase de análisis (Vega et al. 2012).

2. Objetivos

En el contexto del proyecto anteriormente citado, se han ejecutado 20 quemas experimentales en túnel de viento con el objeto de validar algunos de los modelos más utilizados de subida a copas y de obtener variables que puedan ser de ayuda a los gestores para mejorar las predicciones y establecer criterios fiables para planificar los tratamientos preventivos, disminuyendo el potencial de subida del fuego a las copas.

3. Metodología

Dispositivo experimental y toma de datos

Los ensayos se llevaron a cabo en el túnel de viento del INIA (Figura 1a), dispositivo experimental al aire libre que consta de un recinto térmico de 8 m x 2 m x 3 m y de un ventilador con el correspondiente difusor para reducir las turbulencias, que permite simular velocidades del viento de hasta 7 m/s. El interior del recinto térmico dispone de 8 vagonetas de 1 m x 0,8 m rellenas de arena, sobre la que se dispone el material vegetal a ensayar. La parte superior del túnel (3 m de altura) está recubierta de una malla de acero con paso de 6 mm para evitar el escape de pavesas.

Para generar un frente dinámico de fuego capaz de simular una subida de fuego a copas, en las vagonetas se reconstruyó la estructura original de una masa de *Ulex europaeus* procedente de Galicia (Altura media=66 cm; Carga media=3,4 kg/m²). En la misma zona se podaron ramas vivas de los verticilos inferiores de *Pinus pinaster*. Todo el material vegetal fue transportado al Laboratorio de Incendios Forestales del INIA-CIFOR y conservado en cámara frigorífica hasta su ensayo para minimizar las pérdidas de humedad. En la zona superior del túnel de viento se dispuso una estructura para soportar dichas ramas a 150 cm, 200 cm y 250 cm de altura sobre el nivel de las vagonetas (Figura 1b).

Los ensayos se ejecutaron durante los veranos de 2011 y 2012 con una temperatura media de 26°C, una humedad relativa de 42%, viento exterior nulo o con leves brisas de 0,1-0,3 m/s que no afectaron a la propagación del fuego en el interior del túnel. Se seleccionaron velocidades del viento, generadas por el ventilador en el recinto térmico, de 1 y 2 m/s a media llama. Antes de cada ensayo se determinaron la humedad (mediante secado en estufa a 100°C hasta peso constante) y la proporción de vivo y muerto en el combustible de superficie. Se realizaron ensayos con humedad del combustible similar a la de campo (Humedad del combustible fino vivo=100%; Humedad del combustible fino muerto=42%). Dado que el material vegetal se fue desecando lentamente durante su mantenimiento en cámara frigorífica, las quemas se realizaron con una humedad media del 60% del matorral vivo y 19% en el caso del matorral muerto. Inmediatamente antes de cada uno de los ensayos, se pesó la rama objeto del mismo de la que se seleccionó una muestra de 10 ramillos a los que se midió el diámetro y la longitud, y colocó una chapa para su posterior identificación. La humedad de ensayo de las acículas, determinada con una submuestra extraída de la muestra de ramillos, varió entre 109 y 177%, con una humedad media del 132%.

El matorral se dispuso en tres vagonetas contiguas (3 m lineales), de modo que el frente producido generara la intensidad suficiente para provocar la ignición de las ramas situadas sobre el mismo. Para caracterizar el régimen térmico del fuego de matorral se colocaron termopares a lo largo de los 3 m lineales a diferentes alturas (entre 0 y 150 cm). Así mismo y para evaluar el calor recibido por las ramas y el régimen térmico de la columna de convección, se diseñaron unas termopilas calibradas según la metodología propuesta en Madrigal et al. (2011) a diferentes alturas: 150 cm, 200 cm y 250 cm. Los ensayos fueron registrados en vídeo en vista lateral, y mediante análisis de imagen (programa Image Tool®) se obtuvo una caracterización de la geometría de las llamas, la densidad aparente de las ramas, la discontinuidad vertical y la velocidad de propagación del fuego de superficie generado por el matorral. Se tomaron, también, datos de tiempo de residencia de las llamas en las ramas, tiempo de ignición de las ramas y duración de las llamas. A la finalización de las quemas experimentales, se pesaron los residuos del tojo y de las ramas de pino, para valorar el combustible consumido por clases de tamaño.

Variables consideradas y tratamiento estadístico

Se procesaron más de 100 variables por ensayo según el dispositivo experimental descrito. Además, se disponía de datos previos de caracterización de la inflamabilidad y el poder calorífico de *Ulex europaeus* de la misma zona de procedencia (Madrigal et al. 2012) y se aplicaron los criterios de ponderación de carga de combustible vivo y muerto establecidos en Marino et al. 2012. La ignición de las copas (variable binaria SI/NO), la duración de la llama en las ramas (t_r , en s) y la fracción de copa consumida (FCC, % de biomasa consumida) fueron las variables dependientes seleccionadas para caracterizar la inflamabilidad de las ramas en las condiciones de ensayo y la subida de fuego a las copas.

En primer lugar, se exploraron las variables procedentes de las imágenes laterales captadas con vídeo visible. Mediante un modelo lineal múltiple PLS (algoritmo NIPALS) se analizó la influencia de la geometría de llama (Área, Perímetro, Longitud de los ejes, Alturas, Ángulos, Elongación, Redondez y Compactación) y la disposición de los combustibles en la subida de fuego a las copas. Se exploró el funcionamiento de los modelos de inicio de fuego de copas de Van Wagner (1977) y Cruz et al. (2004) aplicados a las condiciones de ensayo mediante

validación cruzada (*crossvalidation*) utilizando como criterio de subida a las copas que la Fracción de Copa Consumida (FCC, %) fuera de al menos el 25% de la biomasa de las ramas ($P=1$ si $FCC \geq 25\%$; $P=0$ si $FCC < 25\%$). Finalmente se generaron sendos modelos logísticos utilizando las variables que determinan la subida de fuego a copas según los citados modelos de Van Wagner y de Cruz et al.: intensidad del fuego de superficie (se consideró la *Intensidad de Byram*, kW/m), combustible del estrato de superficie consumido por el fuego (SFC, kg/m²), humedad de las acículas (FMC, %), humedad del combustible fino muerto de superficie (EFFM, %), altura de las ramas (CBH, *Canopy Base Height*, m), separación entre el matorral y las ramas (FSG, *Fuel Strata Gap*, m) y velocidad del viento (se extrapoló la velocidad a media llama a la velocidad a 10 m, necesaria para introducir en los modelos, U_{10} , km/h). Se utilizó el paquete STATISTICA 7.0®.



Figura 1. Túnel de viento del INIA en vista lateral donde se muestra la geometría y avance de la llama analizados con el programa Image Tool®. En rojo, la geometría de la llama procedente del fuego de superficie y en amarillo la generada en la copa. Se muestra los valores de longitud de eje mayor y menor de la llama, ángulo de llama (α) y los valores considerados para las variables CBH (altura de la primera rama viva) y FSG (discontinuidad entre matorral y copa).

4. Resultados y Discusión

Análisis de imagen: geometría de llama y disposición de combustibles

El modelo PLS generado con las variables analizadas en vídeo visible que presentó mejor ajuste ($R^2Y=0,88$; $R^2X=0,51$; 2 componentes; Q^2 Stone-Geiser=0,72) predice la duración de llama en las ramas ($t_r=0$ cuando no hubo ignición) en función de variables geométricas de la llama procedente del matorral (Elongación, Compactación, Ángulo de llama, Longitud de llama, Altura media de llama), de la separación entre ramas y matorral (FSG), de la Velocidad de propagación del frente de fuego y del Volumen aparente de la copa (m³). Las variables que más influyen en la construcción del modelo (mayores valores del estadístico VIP, *Variable Importance in Projection*) son la *Elongación* (ratio entre la longitud del eje mayor y menor de la llama) y el *Ángulo de llama*, de tal forma que para las condiciones de ensayo se obtuvieron más igniciones y durante más tiempo cuando la llama tuvo formas más alargadas y permanecía más vertical. Estos resultados, que coinciden con observaciones de campo de los técnicos responsables de la extinción, sobre todo durante quemas prescritas bajo arbolado, indicarían que los ensayos detectan en mayor medida la componente radiativa de la llama que el efecto de la columna de convección. De hecho, no se observaron igniciones si la llama no permanecía en contacto directo con las ramas. Por tanto, a la escala de trabajo ensayada, no se consiguió simular una columna convectiva capaz de producir la ignición de la copa.

Validación de modelos de Van Wagner (1977) y Cruz, Alexander & Wakimoto (2004)

Para la validación de estos modelos se probó con las variables Ignición (S/N) y con FCC, fijándose un límite de al menos el 25% de biomasa consumida de ramas para considerar una subida efectiva de fuego a copas (figura 2a). La validación del modelo de Van Wagner, el más utilizado por los servicios forestales debido a que está incluido en las herramientas del sistema BEHAVE (Behave Plus, Nexus, Farsite, www.fire.org), muestra un ajuste moderado con los datos de ensayo (60% de aciertos para la variable Ignición, 55% de aciertos para la variable $FCC \geq 25\%$). El calor efectivo de la combustión para el *Ulex europaeus* obtenido en un estudio anterior (Madrigal et al. 2012) es el que se utilizó para estimar la I_{Byram} , sin embargo la mayoría de autores utilizan el poder calorífico para el cálculo de dicha variable, ofreciendo por tanto un mayor valor de la intensidad del fuego de superficie. Por otro lado CBH es la altura de la primera rama viva medida desde el suelo, sin embargo es también frecuente asumir que en realidad esta variable es coincidente con la FSG definida por Cruz et al. (2004), esto es, la discontinuidad entre el combustible de superficie y el de copa. Recalculando la I_0 de Van Wagner para estas condiciones los mejores resultados de validación se obtuvieron para predecir la variable Ignición de copa (75% de aciertos). En todos los casos, la mayoría de los errores consisten en falsos negativos, esto es, en algunos de los ensayos el modelo no predice subida a las copas que sí se produjo. Este modelo parte de la premisa de que el calor recibido por las copas procede de la convección generada por el fuego de superficie, y en los ensayos realizados el análisis de la geometría de la llama mostró que la ignición y la duración de la llama dependieron fundamentalmente del contacto de las llamas del frente de fuego de superficie con la copa. En estas condiciones, el modelo de Van Wagner no predice ignición porque la intensidad del fuego de superficie no es lo suficientemente alta, sin embargo los ensayos mostrarían que aún en estos casos, si existe contacto de llama, la ignición de copa puede ser efectiva. El valor medio de la constante C del modelo calculada para aquellos ensayos en los que hubo ignición de copas ($FCC \geq 25\%$, $C=0,010$; rango 0,006-0,021) coincide con el valor propuesto por Van Wagner, con lo que se puede considerar que los errores proceden más del efecto de la escala y de la influencia del resto de las variables (I_{Byram} y Humedad de la acícula). No obstante, diversos autores (ver revisión de Cruz y Alexander 2010) consideran que el mencionado modelo es muy conservador y presenta una tendencia a subestimar la probabilidad de subida a las copas ya que excluye el efecto directo de la radiación producida por las llamas en contacto con la acícula y sobreestima el efecto “retardante” de la humedad de la acícula en dicho proceso (figura 2b).

La validación del modelo experimental de Cruz, Alexander y Wakimoto (modelo logístico) ofrece mejor ajuste para la variable FCC (85% aciertos para el punto de corte de 0,5 y 90% aciertos para el punto de corte de 0,2). De nuevo, los escasos errores son falsos negativos, achacables a la escala de trabajo y al mayor efecto de la radiación en nuestro dispositivo. No obstante este modelo, a pesar de estar desarrollado con quemas experimentales a gran escala, se comporta razonablemente bien en túnel de viento.

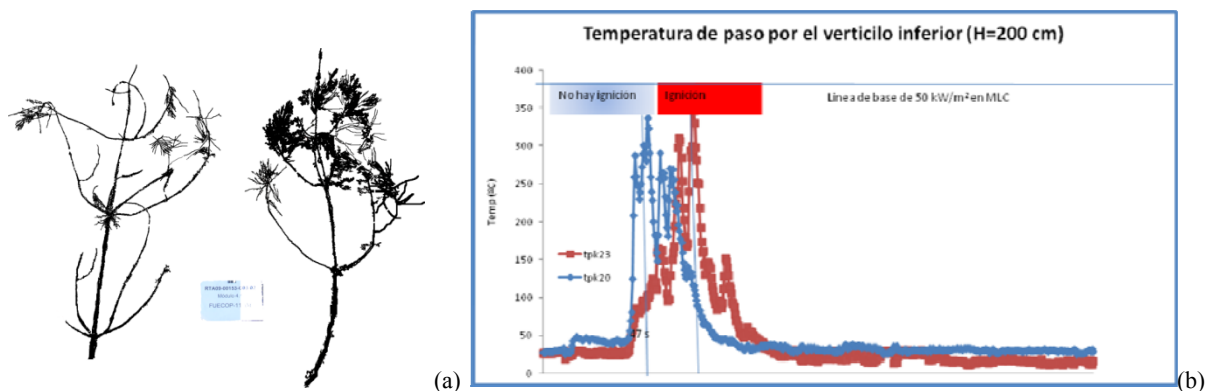


Figura 2. (a) Aspecto de las ramas tras un ensayo con consumo de la acícula del verticilo inferior (CBH=2 m) y consumición parcial del superior (CBH=2,5 m) (b) Curva de temperaturas para el verticilo inferior (FMC 120 %). Se muestra que la potencia recibida por las ramas es inferior a 50 kW/m^2 según datos previos obtenidos en laboratorio. En estas condiciones la ignición del verticilo se produjo tras un tiempo de residencia de llama de 36 s y temperaturas elevadas ($>150^\circ\text{C}$) durante 47 s. El verticilo superior (CBH=2,5 m), cuya rama recibió radiación directa de llama durante 12 s no produjo un consumo significativo de acículas.

Tabla 1. Validación cruzada para los modelos analizados de subida de fuego a copas. Se muestran las mejores validaciones obtenidas para el modelos de Van Wagner (asumiendo $\text{CBH}=\text{FSG}$) y Cruz et al. (para un punto de corte de la logística de 0,2).

Validación cruzada modelo Van Wagner			
Ignición (S/N)	Observados		
		Sí	No
Predichos	Sí	13	1
	No	4	2
		%Aciertos	75%
Validación cruzada Modelo Cruz et al.			
FCC>25% (S/N)	Observados		
		Sí	No
Predichos	Sí	12	0
	No	2	6
		%Aciertos	90%

Modelos logísticos preliminares de subida del fuego a las copas

A la vista de los resultados anteriores, se consideró interesante explorar modelos logísticos experimentales usando las variables de sendos modelos analizados (Figura 3). El modelo logístico (Ignición S/N) utilizando las variables del modelo de Van Wagner (Humedad de acícula, CBH, I_{Byram}) ofrece un porcentaje de aciertos del 85% (Pseudo- $R^2=0,53$; punto de corte de 0,8). Muestra como variables significativas CBH ($p=0,0834$) y la I_{Byram} ($p=0,0048$), sin embargo la humedad de la acícula no mostró significación ($p=0,2816$). El modelo logístico de mejor ajuste para las variables del modelo de Cruz et al. (Ignición cuando $\text{FCC} \geq 25\%$) ofrece el mismo porcentaje de aciertos (85%) pero mejor ajuste general del modelo (Pseudo- $R^2=0,74$; punto de corte 0,7). En este caso, resultaron significativas ($p < 0,01$) las variables que definían la intensidad del fuego de superficie (EFFM, SFC) y en cambio no lo fueron las que definían la discontinuidad vertical (FSG) y la velocidad del viento (U_{10}).

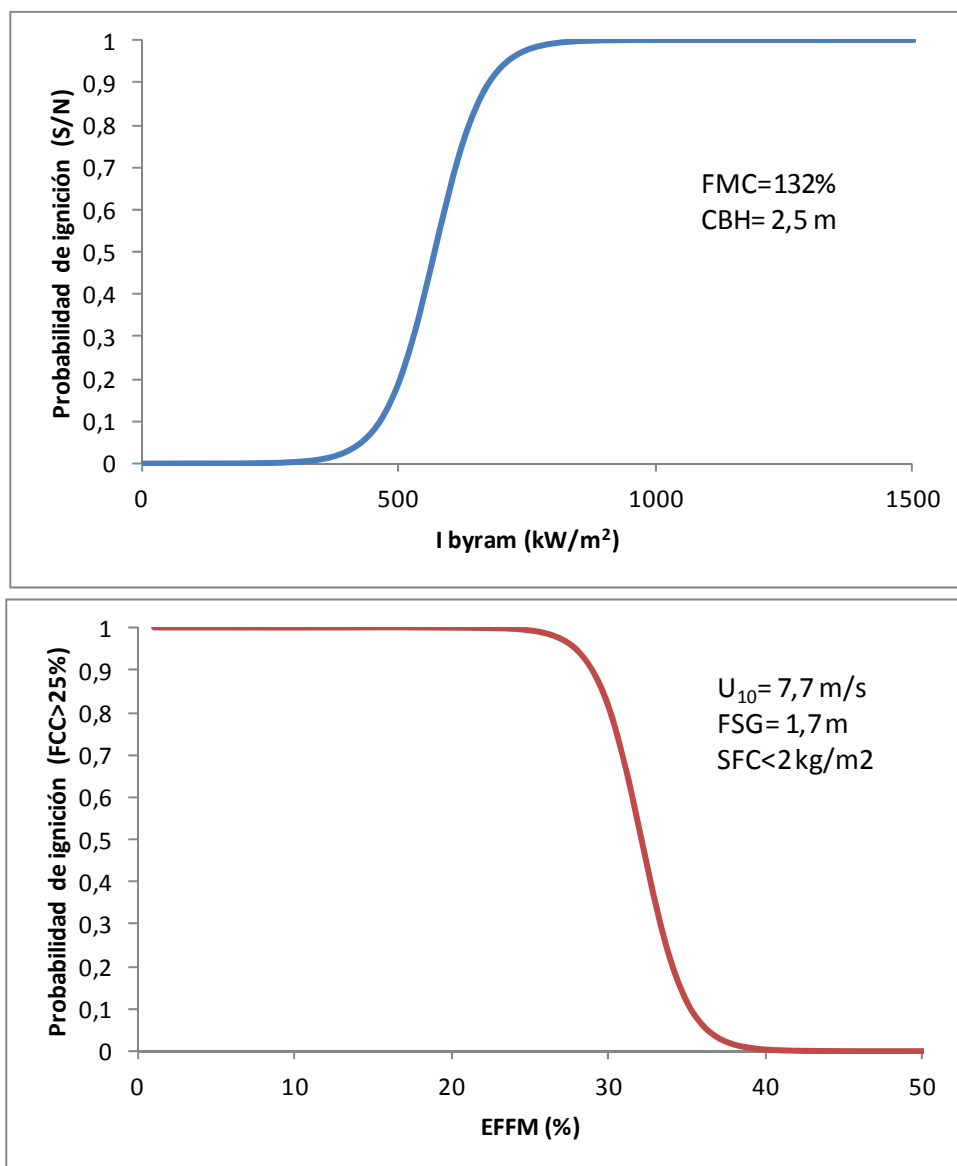


Figura 3. Comportamiento de los dos modelos logísticos generados en túnel de viento. Arriba se muestra el modelo de probabilidad de ignición de copas en función de las variables incluidas en el modelo de Van Wagner. Abajo se muestra el modelo de probabilidad de que la fracción de copa quemada (FCC, %) sea superior al 25% en función de las variables utilizadas en el modelo de Cruz et al.

5. Conclusiones

Los resultados preliminares presentados en este estudio muestran que a pesar de las limitaciones de escala, los ensayos en túnel de viento pueden ser de ayuda en la validación y simulación de alguno de los procesos que rigen la subida de fuego a copas. Igualmente estos estudios pueden ayudar a explorar el efecto de algunas de las variables consideradas en la elaboración de los modelos. Se considera que los modelos desarrollados en el túnel pueden ayudar también a la toma de decisión para elaborar prescripciones de quema bajo arbolado donde la componente convectiva sea menos importante que en un gran incendio. El mejor resultado en la validación para el modelo experimental de Cruz et al. advierte sobre la posibilidad de que exista una mayor importancia relativa de la radiación emitida por la llama,

que no tiene en cuenta el modelo de Van Wagner. El estudio preliminar presentado servirá de base a futuras experiencias que permitan ofrecer información sobre las variables que más influyen en el fenómeno de subida a las copas, así como adecuar las predicciones a las condiciones de nuestros ecosistemas.

6. Agradecimientos

Este estudio se ha realizado en el contexto del proyecto del Plan Nacional RTA2009-00153-C03-02 “Protección contra incendios forestales: condiciones de inicio, propagación e impacto socioeconómico de los fuegos de copa en masas de pinares” (INFOCOPAS). Agradecemos al CIF-Lourizán el envío de muestras de combustible para la ejecución de los ensayos.

7. Bibliografía

- CRUZ, M.G.; ALEXANDER M.E.; 2010. Assessing crown fire potential in coniferous forests of western North America: a critique of current approaches and recent simulation studies. *Int J Wildland Fire* 19: 377-398.
- CRUZ, M.G.; ALEXANDER M.E.; WAKIMOTO R.H.; 2004. Modeling the Likelihood of Crown Fire Occurrence in Conifer Forest Stands. *For Sci* 50 (5): 640-658
- MADRIGAL, J.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C.; DÍEZ, C.; MARINO, E.; 2011. Estimation of peak heat release rate of a forest fuel bed in outdoor laboratory conditions. *J Fire Sci* 29(1): 53-70
- MADRIGAL, J.; MARINO, E.; HERNANDO, C.; GUIJARRO, M.; DÍEZ, C.; 2012. Evaluation of the flammability of gorse (*Ulex europaeus* L.) managed by prescribed burning. *Ann For Sci* 69(3): 387-397
- MARINO, E.; DUPUY, J.L.; PIMONT, F.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C.; LINN, R.; 2012. Fuel bulk density and fuel moisture content effects on fire rate of spread: a comparison between FIRETEC model predictions and experimental results in shrub fuels. *J Fire Sci* 30(4): 277-299
- MOLINA, J.R.; RODRÍGUEZ-SILVA, F.; HERRERA, M.A.; 2011. Potential crown fire behaviour in *Pinus pinea* stands following different fuel treatments. *Forest Systems* 20 (2): 266-277.
- VEGA, J.A.; HERNANDO, C.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; JIMÉNEZ, E.; GUIJARRO, M.; HERRERA, M.A.; FERNÁNDEZ ALONSO, J.M.; MADRIGAL, J.; MOLINA, J.R.; 2012. Protección contra incendios forestales: condiciones de inicio, propagación e impacto socioeconómico de los fuegos de copa en masas de pinares. En: V Simposio Nacional sobre Incendios Forestales SINIF, La Nucía (Alicante), 6-10 de Noviembre de 2012.
- VAN WAGNER, C. E. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Can J For Res.* 7: 23-34.