



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-419

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Análisis integral de la apertura de masas arbóreas: densidad aparente de copas versus velocidad del viento a media llama

MOLINA MARTÍNEZ, J.R.¹, MUÑOZ NAVARRO, J.A.¹ y RODRÍGUEZ Y SILVA F.¹

¹ Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales. 14071, Córdoba

Resumen

Las masas arbóreas modifican los parámetros meteorológicos, creando un microclima cuyas particularidades dependen en mayor o menor medida de sus características dasométricas. Los tratamientos preventivos sobre las masas arbóreas inciden en la apertura de las masas arbóreas, con objeto de la disminución de la densidad aparente de copas y la progresión energética del fuego. Sin embargo, también provocan un incremento de la velocidad del viento a media llama. En este trabajo, se pretende incidir en las condiciones que dificultan la transición del fuego de superficie a las copas del arbolado, así como a la geometría de la llama que evita el contacto de la misma con el dosel (reduciendo el estancamiento expansivo de la llama). Se realizó un estudio estadístico en diferentes masas arbóreas con objeto de identificar relaciones fidedignas entre el coeficiente de fricción y las variables dasométricas (densidad, área basal, fracción de cabida cubierta,...). Dicho análisis permitió obtener una relación logarítmica entre el coeficiente de fricción y la densidad aparente de las copas con una alta correlación ($R^2 = 0,84$). El diseño de tratamientos preventivos (áreas preventivas de defensa, bandas colindantes,...) requiere de un estudio del comportamiento potencial del fuego considerando un análisis conjunto de los efectos de las actuaciones sobre la densidad aparente de copas y el incremento en la velocidad del viento.

Palabras clave

Tratamiento preventivo, coeficiente de fricción, llama, velocidad de propagación, longitud de llama.

1. Introducción

Los cambios socioeconómicos y la acentuación del cambio climático (FLANNIGAN ET AL., 2006; CARDIL ET AL., 2014) han modificado el régimen de incendios forestales, facilitando la progresión energética del fuego y la ocurrencia de eventos de mayor virulencia. La mayor acumulación de biomasa y la ausencia de aprovechamientos forestales facilitan la transición del fuego de superficie a las copas del arbolado y la ocurrencia de incendios fuera de la capacidad de extinción de los dispositivos de extinción. Los incendios de copa constituyen eventos de gran complejidad, tanto desde el punto de vista de la prevención y/o mitigación de sus impactos como de la supresión de las llamas (RUÍZ-GONZÁLEZ Y ALVÁREZ GONZÁLEZ, 2011).

El modelo tradicional de comportamiento del fuego de copas se fundamenta en la observación del incremento de la velocidad de propagación en relación a la velocidad de progresión en la superficie del dosel, utilizando para ello incendios acontecidos en Norteamérica (ROTHEMEL, 1991; FINNEY, 2004). Esta modelización incorpora un coeficiente de fricción de la masa arbolada de 0,4, independientemente de las características de la masa arbórea. Sin embargo, existen antecedentes europeos (QUECK ET AL., 2012) que muestran una relación entre la fricción y la densidad aparente de la masa. En sintonía con este estudio, una aproximación realizada en España (MOLINA, 2015) ha considerado que el coeficiente de fricción de un bosque viene impuesto por el área basal de la masa

(relación entre el tamaño y la densidad del arbolado). Dado que el viento es el factor más influyente en la progresión del sólido en llamas (VIEGAS, 2004), y su efecto directo tanto en la propagación como en la seguridad de los combatientes, se requiere de mejoras en la modelización del coeficiente de fricción, que puedan repercutir en la velocidad del viento a media llama requerida por los simuladores de comportamiento del fuego.

Otra aproximación estándar para la modelización de la propagación por las copas considera que la progresión del fuego depende de la velocidad del viento, la humedad del combustible y la densidad aparente de copas (CRUZ ET AL., 2006). La densidad aparente de copas se define como la cantidad de combustible aéreo disponible por unidad de volumen de la copa. Diferentes aproximaciones han sido desarrolladas para la estimación de este parámetro, siendo las más utilizadas las ecuaciones alométricas en base a parámetros tradicionalmente recolectados por inventarios forestales. En España, existen ecuaciones para la estimación del combustible disponible para *Pinus nigra* (JIMÉNEZ ET AL., 2013; MOLINA ET AL., 2014), *Pinus radiata* (RUÍZ-GONZÁLEZ Y ALVÁREZ GONZÁLEZ, 2011) y *Pinus pinea* (MOLINA ET AL., 2011). Existen otros estudios o inventarios destinados al cálculo de la cantidad de carbono retenido por los recursos naturales, que aunque no utilizan las tipologías de combustibilidad estándares, pueden ser utilizadas como aproximaciones para el resto de especies mediterráneas (AGUDO ET AL., 2007).

La descripción del estrato arbóreo desempeña un papel clave en la planificación preventiva de un territorio, pudiendo simplificar el mismo a tres parámetros: altura a la primera rama, combustible aéreo disponible y densidad aparente de copa (SCOTT AND REINHARDT, 2001). La realización de tratamientos preventivos debería modificar el comportamiento del fuego de copas (AGEE ET AL., 2005), hecho sólo asumible en la aproximación de CRUZ ET AL. que será la utilizada para este estudio. De igual modo, la apertura severa de la masa condiciona a una mayor exposición para la aparición de combustible superficial y a una modificación del viento a media llama, lo que puede condicionar a una mayor predisposición para la transición a fuego de copas (MOLINA, 2015).

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es la evaluación del efecto de la disminución de la espesura de las masas arbóreas sobre dos parámetros esenciales en la propagación del fuego de copas: la velocidad del viento y la densidad aparente de copa. La valoración de ambos parámetros se realizará de modo conjunto, estableciendo puntos de maximización de los efectos de ambas variables para la mitigación de la progresión energética del fuego. Se considerarán como situaciones más eficientes aquellas que por agregación de ambos parámetros generen más beneficios (criterio de Kaldor-Hicks) para la mitigación de los impactos del fuego.

3. Metodología

Área de estudio

Este trabajo se desarrolla en el marco de dos Comunidades Autónomas (Andalucía y Castilla-La Mancha) y cuatro provincias (Almería, Ciudad Real, Córdoba y Jaén) (Figura 1). La selección responde a criterios meteorológicos, ambientales y dasométricos:

- Almería: la velocidad del viento es muy acusada en esta provincia dada la exposición de las masas arbóreas. Se disponen de registros de hasta 55 km/h.
- Ciudad Real: esta zona permitió el testado entre masas testigo, de gran densidad, y masas con aprovechamiento de biomasa, de menor densidad y semejanza en el resto de parámetros considerados.
- Córdoba: esta zona fue considerada de interés dada la presencia de *Pinus pinea*, la cual dispone de una morfología de copa muy diferente al resto de pinares considerados.

- Jaén: la selección obedece a la topografía abrupta y gran cantidad de cañones, donde se producen fenómenos locales de viento, no considerados en el resto de áreas de estudio.

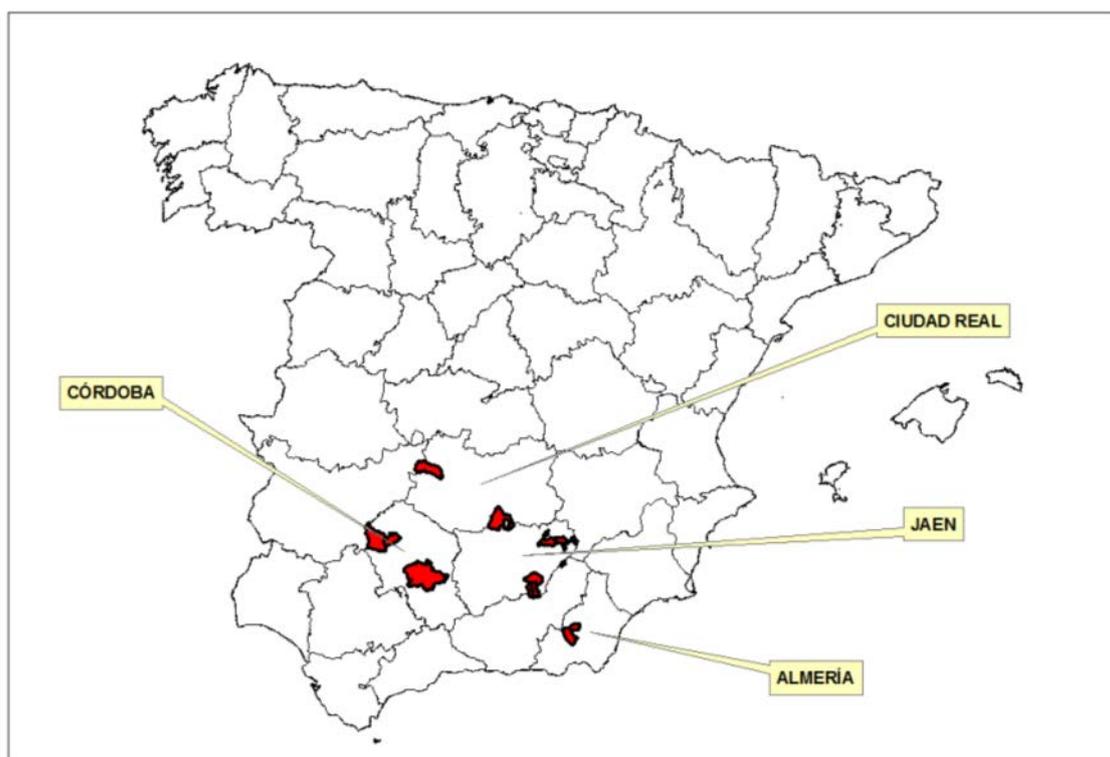


Figura 1. Localización de las zonas de estudio.

El trabajo se desarrolla en bosques de coníferas, abarcando cuatro especies con amplia distribución nacional y europea: *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea* y *Pinus halepensis*. La selección de estas especies no sólo responde a criterios de distribución espacial, sino también a diferencias estructurales y morfológicas (morfología de la copa, crecimientos y existencias, poda natural y adaptaciones al estrés hídrico, densidades finales,...). Este trabajo pretende aportar una visión a nivel global y no a nivel de una especie individual, con objeto de que sea una herramienta fácil para el usuario final, el gestor forestal.

Evaluación del coeficiente de fricción (CF)

En primer lugar, se realizó un muestreo de puntos de interés para la medición del coeficiente de fricción del viento en función de las características de la masa. El único requerimiento era la presencia de un área sin vegetación, sin efecto de fricción de la masa, junto a las masas evaluadas. De forma simultánea a la medición automática del viento, se realizó un inventario con parcelas circulares de 10 m de radio en la masa arbórea, excepto en las parcelas de *P. sylvestris*, con 12,6 m de radio. El inventario se realizó en base a la alineación de la estación con la dirección del viento, con objeto de la búsqueda de relaciones entre los parámetros dasométricos y la velocidad del viento dentro del dosel.

El valor del coeficiente de fricción (CF) oscila entre 0 y 1, siendo mayor la disipación de la energía cinética de las masas de aire cuanto menor sea este valor; así pues, un valor de 0 indica que la velocidad del viento dentro de una masa arbórea es cero, mientras que un valor de 1 indica que no existe fricción y la velocidad del viento es similar en el interior y exterior de la masa. Las mediciones se realizaron posicionando una estación de referencia en la zona despejada a 6 m de altura (registros habituales de la Unidad Móvil de Meteorología y Transmisiones) y diferentes estaciones dentro del

dosel a una altura de 2 m (fuego de superficie). Se utilizaron cuatro estaciones de meteorología Skywatch Geos con sus correspondientes trípodes para su posicionamiento a diferentes alturas sobre el nivel del suelo, y un registro periódico de información cada 10 s, tanto de velocidad media como velocidad media de las máximas en el intervalo.

Una vez recopilada toda la información, se procedió a un análisis estadístico considerando los valores medios de los parámetros dasométricos y de fricción para cada una de las parcelas de muestreo. Se utilizó el software SPSS® para todos los análisis estadísticos. En un primer lugar, se realizó un análisis de correlación mediante Spearman entre variables dasométricas y coeficiente de fricción, mostrando aquellas que se encontraban correlacionadas ($R^2 > 0,65$). Posteriormente, se procedió a un análisis de regresión lineal y no lineal (logarítmico, inverso, cuadrático, potencial, exponencial y de crecimiento) entre cada variable y el coeficiente de fricción. De igual forma, se testó un análisis de regresión multivariable, realizando previamente un Análisis de Componentes Principales (PCA), con objeto de la optimización del número de parámetros. La evaluación de los diferentes modelos se fundamentó en el coeficiente de determinación y el nivel de significancia ($p < 0,05$).

La densidad aparente de copas depende de la carga de combustible disponible por árbol, la densidad de la masa y la longitud media de las copas. La estimación de la carga de combustible requiere de inventarios dendrométricos o del empleo de ecuaciones alométricas. En los puntos de muestreo de Córdoba (Belmez, Fuenteobajuna) y Jaén (Beas de Segura y Segura de la Sierra) se procedió a un inventario dendrométrico de árboles tipo, con objeto del conocimiento de la carga de combustible aéreo disponible ante la incidencia de un fuego de copas. Se construyeron ecuaciones alométricas para *P. pinaster* (MOLINA ET AL., 2014) y *P. pinea* (MOLINA ET AL., 2011) en el sur de la Península Ibérica con variables tradicionalmente recolectadas por los inventarios forestales. Para el caso de *P. sylvestris*, se dispuso tanto de inventarios dasométricos (Centro Operativo Provincial de Almería) y la información proporcionada por el “I Inventario de Sumideros de Carbono en Andalucía” (AGUDO ET AL., 2007), como de las ecuaciones alométricas de WIDLONSKY ET AL. (2003). En el caso de *P. halepensis*, aunque se tiene proyectado un inventario dendrométrico para el año 2017, ante la ausencia actual de dicha información se procederá al empleo de la información global proporcionada por la Junta de Andalucía.

Una vez estimada la densidad aparente de copas se realizó un análisis estadístico con el fin de identificar relaciones significativas entre la densidad aparente de copas y el coeficiente de fricción de la masa. A semejanza que en los casos anteriores, se utilizará el coeficiente de determinación y el nivel de significancia como criterios para la selección. De igual forma y de cara a buscar herramientas prácticas para la gestión forestal, se testará la relación entre el coeficiente de fricción y diferentes variables proporcionadas por los inventarios de campo, como son el índice de copa viva (ratio entre la altura de copa viva y la altura total), el índice de copa total (ratio entre la altura de copa y la altura total), el coeficiente de esbeltez (ratio entre la altura y el diámetro), el ratio entre los diámetros de copa y fuste, el ratio entre la altura de copa y su diámetro y el ratio entre el área Basimétrica (AB) y z, siendo z el espacio vertical entre el sotobosque (o la superficie, en caso de no existir) y la primera rama viva. En caso de existir ramas muertas, se considera su efecto sobre la fricción como la mitad del ejercido por las ramas vivas, dado su menor volumen y resistencia a la fricción.

Análisis integral de la apertura de las masas arbóreas

Dada la limitación de extensión impuesta para el Congreso, se procederá a la evaluación de un escenario de los estudiados. El procedimiento metodológico es similar para todos los escenarios considerados y extrapolable a cualquier otra masa arbórea. Se procederá al diseño de varias intensidades de clara respecto a una masa testigo y a la identificación de la varianza experimentada por el coeficiente de fricción y la densidad aparente de copas. El software Visual Behave (RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2010) será utilizado para la simulación del fuego en los diferentes tratamientos, considerando el coeficiente de fricción y la densidad aparente obtenida por las relaciones estadísticas

generadas en apartados anteriores. De acuerdo al comportamiento potencial del fuego de superficie, a la transición del fuego de superficie a fuego de copa y a la propagación por las copas, se seleccionará el tratamiento más eficaz fruto del balance o integración del incremento de la velocidad del viento y la menor disponibilidad de combustible aéreo.

4. Resultados

Evaluación del coeficiente de fricción (CF)

El coeficiente de fricción medio en el inventario de campo adoptó valores comprendidos entre 0,08 y 0,78 para las parcelas estudiadas. Utilizando el software estadístico, se obtuvieron correlaciones significativas ($p < 0,05$) entre el coeficiente de fricción y la densidad de la masa ($R^2 = -0,843$), el coeficiente de fricción y la densidad aparente de copas ($R^2 = -0,851$) y el coeficiente de fricción y el índice AB/z ($R^2 = -0,833$). Además, estas dos últimas variables presentaron una alta correlación entre ellas (Tabla 1).

Tabla 1. Correlación y significancia entre el coeficiente de fricción (CF), la densidad de la masa (D), el índice o relación entre el área basimétrica y el espacio o hueco entre el combustible superficial y aéreo (AB/z) y la densidad aparente de copas (CBD).

Variable	CF	D (pies/ha)	AB/z (m/ha)	CBD (kg/m ³)
CF	1	-0,843**	-0,833*	-0,851*
D (pies/ha)	-0,843**	1	0,833*	0,673*
AB/z (m/ha)	-0,833*	0,833*	1	0,717*
CBD (kg/m ³)	-0,851*	0,673*	0,717*	1

** . La correlación es significativa $p < 0,001$

* . La correlación es significativa $p < 0,05$

El ajuste de un modelo o ecuación para la determinación del coeficiente de fricción presentó mejores resultados para la densidad aparente de copa ($R^2 = 0,849$), que para la densidad de la masa ($R^2 = 0,628$) y el índice AB/z ($R^2 = 0,422$). Dada la alta correlación existente entre este último índice y la densidad aparente de copas, se seleccionó la densidad aparente de copas como la variable de mayor interés para el estudio. El modelo más fidedigno no ha sido homogéneo, adoptando morfología logarítmica para el caso de la densidad aparente de copas (Tabla 2) y cuadrática para la densidad de la masa y el índice AB/z (Tabla 3). En el caso de la CBD, el modelo cuadrático también aportó muy buen ajuste ($R^2 = 0,842$), siendo muy superior al ajuste lineal, como se desprende de su coeficiente de determinación y el error absoluto medio.

Tabla 1. Modelización lineal y no lineal del coeficiente de fricción a partir de la densidad aparente de copas (kg/m³).

Modelo	R ²	Error Absoluto	Constante	b ₁	b ₂
Lineal	0,755	0,08 (±0,04)	0,712	-1,854	
Logarítmica	0,849	0,06 (±0,03)	-0,181	-0,300	
Inversa	0,770	0,07 (±0,05)	0,151	0,029	
Cuadrática	0,842	0,06 (±0,03)	0,912	-4,423	6,466
Potencia	0,674	0,08 (±0,06)	0,065	-0,858	
Crecimiento	0,714	0,07 (±0,02)	-0,091	-5,777	
Exponencial	0,714	0,07 (±0,02)	0,913	-5,777	

Tabla 3. Modelización lineal y no lineal del coeficiente de fricción a partir de la densidad de la masa (pies/ha).

Modelo	R ²	Error Absoluto	Constante	b ₁	b ₂
Lineal	0,464	0,25 (±0,14)	0,600	0,000	
Logarítmica	0,571	0,10 (±0,07)	1,916	-0,253	
Inversa	0,512	0,10 (±0,08)	0,145	87,193	
Cuadrática	0,628	0,15 (±0,16)	0,854	-0,001	6,937E-7
Potencia	0,487	0,10 (±0,08)	30,617	-0,749	
Crecimiento	0,399	0,09 (±0,10)	-0,470	-0,001	
Exponencial	0,399	0,09 (±0,10)	0,625	-0,001	

El análisis multivariable no aportó ninguna mejora respecto a los modelos bivariados. No se apreció significancia estadística entre variables, excepto en el caso de que las variables se encontrasen correlacionadas, y por tanto, eliminadas alguna de ellas del análisis.

El análisis comparado entre los valores observados y estimados del coeficiente de fricción generó un error absoluto medio de 0,06. No se apreciaron errores significativos en ninguno de los valores extremos del coeficiente de fricción, aportando una baja desviación estándar. De igual forma, tampoco se apreció una tendencia a la infra ni a la sobreestimación (Figura 2).

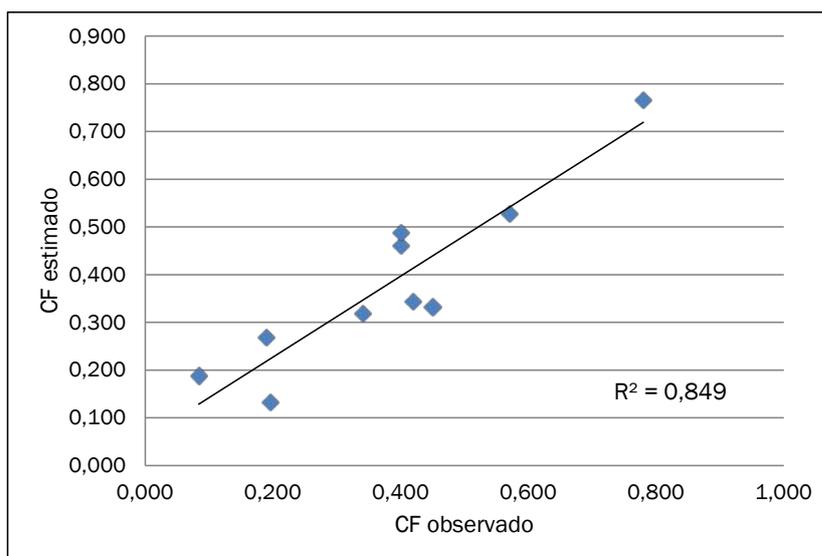


Figura 2. Valores observados (inventario de campo) versus valores estimados mediante modelo logarítmico CBD.

Análisis integral de la apertura de las masas arbóreas

El análisis integral de la apertura de las masas arbóreas ha sido aplicado a un escenario de la provincia de Almería (Calar Alto, Sierra de Los Filabres). La masa arbórea se corresponde con un bosque de *P. sylvestris*, actualmente sin sotobosque leñoso dada su alta fracción de cabida cubierta (Figura 3).



Figura 3. Estación Skywatch Geos a 6 metros de altura en una línea sin vegetación (izquierda); estación Skywatch Geos a 2 m de altura en el interior de la masa de *P. sylvestris*.

Se proponen tres alternativas de manejo del combustible en este escenario: no tocar dejando la masa con una dinámica natural, una clara por lo bajo con objeto preventivo (extrayendo ejemplares de diámetro normal menor de 19 cm) y una clara por lo alto con objeto del aprovechamiento de biomasa y la creación de una discontinuidad en la continuidad del combustible foliar (extrayendo ejemplares de diámetro normal mayor de 21 cm). La apertura de la masa generaría un espacio potencial para la colonización de especies colonizadoras, modificando el modelo de combustible a un modelo híbrido HPM1 en un corto período de tiempo (RODRÍGUEZ Y SILVA & MOLINA, 2012). A efectos del comportamiento del fuego, se consideró un escenario meteorológico fruto de condiciones medias de las máximas en época estival: una humedad del combustible fino muerto (hcfm) del 5%, una humedad foliar del 100% y una velocidad del viento de 35 km/h. A nivel dasométrico o del combustible aéreo, todas las actuaciones conllevaron cambios a nivel de altura media, altura a la primera rama viva y, en consecuencia, en la distancia o hueco entre el combustible superficial y aéreo ("z"), la fracción de cabida cubierta y la densidad aparente de copas (Tabla 4). La modificación de la densidad aparente de copas conllevó una modificación del coeficiente de fricción para cada intensidad de corta, de acuerdo al modelo obtenido a raíz de este trabajo. El coeficiente de fricción osciló en este escenario entre 0,22 y 0,4.

Un total de 8 alternativas (testigo, 4 tipologías de clara por lo bajo y 3 tipologías de clara por lo alto) fueron propuestas, modificando la densidad remanente desde 600 pies/ha (testigo) hasta 280 pies/ha. La velocidad de propagación del fuego de superficie (V_p) fluctuó entre 1-12 m/min y la longitud de llama entre 1 -9 m. En la masa testigo, dada la geometría de la llama con el escenario meteorológico propuesto (7,7 km/h de velocidad del viento a media llama), no se produjo la transición del fuego de superficie a fuego de copas. En cuanto a las alternativas de manejo, los resultados son dispares. Mientras tres de las alternativas arrojaron un comportamiento potencial activo de copas (Tabla 4), cuatro de ellas consiguieron mitigar la transición a un fuego pasivo de copas. En caso de fuego activo de copas, la velocidad de propagación fue estimada mediante el modelo de Cruz (V_p Cruz) (CRUZ ET AL., 2006) y el modelo UCO (V_p UCO) (RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2017), alcanzando velocidades entre 52-55 m/min y 47-49 m/min, respectivamente (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis integral de la apertura de un pinar de *P. sylvestris* en Calar Alto (Almería, Sierra de Los Filabres) en base a la intensidad de la actuación propuesta y el comportamiento potencial del fuego.

Parámetro	No tocar	Clara por lo bajo				Clara por lo alto		
Intensidad de la actuación								
Diámetro de corta (cm)	-	16*	17*	18*	19*	23**	22**	21**
Densidad remanente (pies/ha)	600	480	400	320	280	500	480	400
Modelo de combustible superficial								
Modelo UCO 40	HR3	HPM1				HPM1		
Escenario meteorológico								
hcfm (%)	5	5	5	5	5	5	5	5
Humedad Vivo (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Viento (km/h)	35	35	35	35	35	35	35	35
Combustible aéreo								
Altura media (m)	8,35	8,90	9,20	9,56	9,70	7,86	7,78	7,50
Hueco vertical o "z" (m)	3,06	3,30	3,40	3,55	3,60	2,87	2,84	2,72
Fracción da cabida cubierta (%)	90	80	75	72	70	80	76	72
Densidad aparente de copas (kg/m ³)	0,27	0,23	0,19	0,16	0,15	0,21	0,20	0,16
Coeficiente de fricción								
CF	0,22	0,26	0,31	0,36	0,40	0,29	0,31	0,37
Comportamiento potencial del fuego								
Tipología de fuego potencial	Superficie	Pasivo	Pasivo	Activo	Activo	Pasivo	Pasivo	Activo
Vp (m/min)	< 1	8-10	10-12	-	-	2-4	10-12	-
Longitud llama (m)	< 1	6-9	3-6	6-9	6-9	3-6	3-6	6-9
Vp Cruz (m/min)	-	-	-	52-55	52-55	-	-	52-55
Vp UCO (m/min)	-	-	-	47-49	47-49	-	-	47-49

*corta de todos los pies con diámetro inferior a este valor

**corta de todos los pies con diámetro superior a este valor

5. Discusión

El rango de condiciones geográficas y topográficas utilizadas (cuatro provincias administrativas) y la utilización de un rango de velocidad del viento comprendido entre 1-55 km/h, suponen un amplio abanico de posibilidades de testado del modelo generado. Las variables independientes del modelo también dispusieron de un aceptable rango de variación de acuerdo a las condiciones de los bosques mediterráneos: densidad (250-1260 pies/ha), área basimétrica (4,82-84,87 m²/ha), hueco vertical (0- 5 m) y densidad aparente de copas (0,04-0,35 kg/m³). Estas condiciones facilitan su extrapolación geográfica a otras zonas de estudio.

El análisis estadístico identifica a la densidad de la masa, la densidad aparente de copa y el índice AB/z como las variables de mayor importancia para la estimación del coeficiente de fricción, de forma análoga a otros estudios (MOLINA, 2015; QUECK ET AL., 2015). El índice AB/z defiende la

importancia de las ramas bajas, incluido el papel del ramaje muerto para aumentar la fricción de la masa. En este sentido, estudios futuros irán encaminados a la identificación de las diferencias o efecto relativo de la presencia de ramaje vivo y muerto en el coeficiente de fricción. Este coeficiente adopta valores muy pequeños cuando el ramaje se encuentra muy cercano al sotobosque, situación que debiese ser atípica en las masas densas de coníferas, si se encuentran gestionadas o incluidas en un proyecto de ordenación de montes.

Las cuatro especies utilizadas (*Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea* y *Pinus halepensis*) eliminan la susceptibilidad debida a la morfología de las copas y a la carga disponible en éstas, al menos en cuanto a especies de coníferas se refiere. Un análisis a nivel de especie (dada la diferencia en la morfología de copa entre *Pinus pinea* y *Pinus pinaster*) podría aportar unos resultados más ajustados, pero de mayor complejidad para el empleo por parte de los gestores forestales. Aun así, se han utilizado cuatro especies de coníferas ampliamente extendidas y con dispar morfología (*Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea* y *Pinus halepensis*), utilizando un rango aceptable de densidad aparente de copa (WIDLOSKI ET AL., 2003; MOLINA ET AL., 2011, 2014), lo que posibilita su extrapolación a cualquier otra especie de coníferas. No obstante, será necesario un testado previo para su uso o extrapolación en masas de frondosas o masas mixtas.

La relación o modelo establecido entre el coeficiente de fricción (velocidad del viento a media llama) y la densidad aparente de copas permite realizar una primera aproximación al equilibrio o balance entre los puntos positivos (discontinuidad del combustible, disminución de la densidad aparente de copas) y negativos (incremento de la velocidad del viento) de una actuación de clara o apertura de masa determinada, en relación con el comportamiento potencial del fuego. Por tanto, esta herramienta permite la evaluación de varias alternativas dentro de un escenario potencial, optimizando la eficacia y eficiencia de las actuaciones. El empleo de la densidad aparente de copas como variable independiente permite la incorporación de los efectos de una poda, clara y poda-clara, y facilita su interpretación en relación a la modificación de la velocidad de propagación ante la progresión energética del fuego por las copas del arbolado (CRUZ ET AL., 2006; RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2017).

La disponibilidad de un modelo de estimación del coeficiente de fricción a partir de la modificación de las características de la masa arbórea permite un análisis integral de los tratamientos, de cara tanto a la gestión desde el punto de vista de la prevención de incendios (clara por lo bajo en el ejemplo aplicado de la Tabla 4) como desde el punto de vista de la explotación maderera (clara por lo alto en el ejemplo aplicado de la Tabla 4), permitiendo una visión multifuncional del monte. Resulta de especial importancia, la consideración en un análisis a medio plazo de la dinámica de la vegetación. En el escenario estudiado, se espera una modificación del modelo original (HR) a un modelo HPM (RODRÍGUEZ Y SILVA & MOLINA, 2012), dada la puesta en luz originada por el tratamiento y el período de rotación de los tratamientos en el medio forestal. La apertura de la masa y aparición del matorral podría suponer incluso una disminución del hueco vertical o "z", dado que el crecimiento en altura del matorral podría ser superior al crecimiento derivado en la altura a la primera rama derivado por la realización de una clara por lo bajo. Una clara por lo alto supone una disminución de la altura de la masa y de la primera rama viva, pero los pies extraídos poseen un valor económico, que pueden repercutir en la mejora del propio monte o en la reducción en la rotación de los tratamientos de mantenimiento.

De igual forma, resulta interesante poder evaluar diferentes alternativas de manejo de rodales en base a la tipología de la actuación y a la intensidad de la misma, de forma análoga a la Tabla 4. En este sentido, en el escenario forestal de Calar Alto, la actuación conservacionista de no tocar o únicamente podar parece la más razonable a tenor del comportamiento potencial del fuego, derivado del análisis conjunto entre el incremento de la velocidad del viento y el descenso de la densidad aparente de copas. Los claras o apertura de la masa arbórea suponen una disminución de la densidad de pies y de la densidad aparente de copas y un incremento de la velocidad del viento a

media llama, lo que podría incrementar la probabilidad de transición a fuego de copas. Aunque el incremento de la velocidad del viento condiciona a una mayor inclinación de la llama (RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2017), alejándose de la base de las copas, no es suficiente para evitar la transición bajo el escenario meteorológico considerado. En el caso de la realización de claras, tanto por lo bajo como por lo alto, es recomendable la realización de podas en el arbolado remanente. Los resultados a nivel de rodal también se ven condicionados por la necesidad de creación de zonas de seguridad, con una apertura completa o prácticamente completa de la masa arbórea en puntos estratégicos del territorio.

6. Conclusiones

El modelo de interrelación entre fricción y densidad aparente de copas supone una herramienta de indudable utilidad para el gestor forestal, permitiendo el análisis de diferentes alternativas de gestión de las masas arbóreas en relación al comportamiento del fuego. No obstante, se debe profundizar en el inventario de frondosas, con objeto de ampliar el rango y morfología de las especies y, en consecuencia, obtener una aproximación más fidedigna. Además, el conocimiento de la densidad aparente de copas por alturas permitiría el diseño efectivo de los trabajos de poda del arbolado.

7. Agradecimientos

Los autores desean agradecer al proyecto GEPRIF (RTA2014-00011-C06-03) por la financiación prestada para la realización del inventario de campo, así como al Centro Operativo Provincial del Plan INFOCA de la provincia de Almería para la realización de los trabajos de campo. El segundo de los autores desea agradecer a la “II Becas Semillero de Investigadores” de la Universidad de Córdoba.

8. Bibliografía

AGEE, J.; SKINNER, C.; 2005; Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest Ecol Mang* 211 83 – 96

AGUDO, R.; MUÑOZ, M.; PINO, O.; 2007. 1^{er} Inventario de sumideros de CO₂ en Andalucía. Consejería de Medio Ambiente-Junta de Andalucía-Dirección General de Gestión del Medio Natural. 168. Sevilla

CARDIL, A.; MOLINA, D.; KOBZIAR, L.; 2014. Extreme temperatures days and their potential impacts on southern Europe. *Nat hazards Earth Sys* 14 3005 – 3014

CRUZ, M.G.; BUTLER, B.W.; ALEXANDER, M.E.; 2006. Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part II: model evaluation. *Int J Wildland Fire* 15 61 – 72

FINNEY, M.A.; MARK, A.; 2004; FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. *Res. Pap. RMRS-RP-4*. 47. Ogden

FLANNIGAN, M.D.; AMIRO, B.D.; LOGAN, K.A.; STOCKS, B.J. WOTTON, B.M.; 2006. Forest Fires and Climate Change in the 21ST Century. *Mitig aCBDt strategies glob chang* 11 847 – 859

JIMÉNEZ, E.; VEGA, J.A.; FERNÁNDEZ-ALONSO, J.M.; VEGA-NIEVA, D.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; RUIZ-GONZÁLEZ, A.; 2013 Allometric equations for estimating canopy fuel load and distribution of pole-size maritime pine trees in five Iberian provenances. *Can J For Res* 43149 – 158

MOLINA, J.R.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; MÉRIDA, E.; HERRERA, M.A.; 2014. Modelling available crown fuel for *Pinus pinaster* Ait. stands in the “Cazorla, Segura and Las Villas Natural Park”. *J Environ Manage* 144 26 – 33

MOLINA, J.T.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; HERRERA, M.A.; 2011. Potential crown fire behavior in *Pinus pinea* stands following different fuel treatments. *Forest syst* 20 266-277

MOLINA, JR.; 2015. Validación y ajustes de los modelos de propagación de fuego de copa en la ordenación del paisaje forestal. En: RODRÍGUEZ Y SILVA, F. (ed.). Lecciones aprendidas en los incendios forestales. Página 146-166. SECF-Universidad de Córdoba-MAGRAMA-Junta de Andalucía. Córdoba.

QUECK, R.; BIENERT, A.; MAAS, H.G.; 2012. Wind fields in heterogeneous conifer canopies: parameterisation of momentum absorption using high-resolution 3D vegetation scans. *Eur J Forest Res* 176 131 - 165

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; GUIJARRO, M; MADRIGAL, J; JIMÉNEZ, E; MOLINA, J.R.; HERNANDO, C.; VÉLEZ, R.; VEGA, J.A.; 2017. Assessment of crown fire initiation and spread models in Mediterranean conifer forest by using data from field and laboratory experiments. *Forest syst* (In Press)

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; MOLINA, J.R.; 2012. Modeling Mediterranean forest fuels by integrating field data and mapping tools. *Eur J For res* 131 571 – 582

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; MOLINA, J.R.; MARTÍNEZ, J.F.; 2010. Manual Técnico de Aplicaciones Informáticas para la Defensa Contra Incendios Forestales. MANPAI XXI. 117. Córdoba

ROTHERMEL, R.C.; 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. USDA Forest Service. 46. Ogden

ROTHERMEL, R.C.; 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. USDA Forest Service. 46. Ogden

RUÍZ-GONZÁLEZ, A.; 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

SCOTT, J.H.; REINHARDT, E.D.; 2001. Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior. Forest Service. 59. Fort Collins

VIEGAS, D.X.; 2004. On the existence of a steady state regime for slope and wind driven fires. *Int J Wildland Fire* 13 101 – 117

WIDLOWSKY, J.; VERSTRAETE, M.; PINTY, B.; GOBRON, N.; 2003. Allometric Relationships of Selected European Tree Species. EC Joint Research Centre. 70. Ispra.