

MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO EN LOS INCENDIOS FORESTALES: MODELOS EMPÍRICOS DE PREDICCIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DESARROLLADOS EN TÚNEL DE VIENTO

M. Guijarro Guzmán, C. Hernando Lara, C. Díez Galilea y J. Madrigal del Olmo

Centro de Investigación Forestal. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Carretera de La Coruña km 7. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: guijarro@inia.es

Resumen

En la presente comunicación, se exponen modelos empíricos para la predicción de la velocidad de propagación del fuego en tres complejos de combustible: herbáceas, hojarasca de *Pinus pinea* L. y restos de corta de *Eucalyptus globulus* Labill. Los modelos se han elaborado a partir de los datos obtenidos en 91 quemas experimentales realizadas en el túnel de viento del CIFOR-INIA. Los modelos desarrollados destacan el efecto relevante de la velocidad del viento sobre la de propagación. En los tres complejos, las diferencias entre los valores observados y los predichos muestran un grado aceptable de estimación de la velocidad de propagación para velocidades del viento inferiores a 4 m.s⁻¹. El efecto de la velocidad del viento sobre la de propagación es más acusado en el complejo de combustible integrado por herbáceas, mientras que el complejo formado por restos de corta de eucalipto presenta la menor sensibilidad a la variación de la velocidad del viento.

Palabras clave: Quema experimental, Herbáceas, *Pinus pinea*, *Eucalyptus globulus*

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen una de las principales amenazas de los montes, principalmente en la Región Mediterránea, donde ocasionan graves pérdidas ambientales y económicas. Por ello, disponer de modelos fiables de predicción del comportamiento del fuego es importante para incrementar la seguridad y la eficacia de la extinción, mejorar la prevención y evaluar sus efectos. A pesar de la complejidad de los factores implicados en el comportamiento del fuego (características de los combustibles, topografía del terreno y condiciones meteorológicas), se han elaborado distintos modelos de

predicción, abordando el fenómeno desde diferentes puntos de vista y utilizando medios también diferentes. Estos modelos son básicamente de tres tipos (CATCHPOLE, 1994; MENDES-LOPES *et al.*, 2003): físicos, empíricos y mixtos.

Los *modelos físicos* están basados en las leyes universales de la física y de la química, aplicadas a la propagación del proceso de combustión (FONS, 1946; VAN WAGNER, 1967; THOMAS, 1967; ANDERSON, 1969; TELITSYN, 1974; ALBINI, 1985; GRISHIN, 1997; DUPUY & LARINI, 1998). Los *modelos empíricos* están basados en el análisis estadístico de datos obtenidos en fuegos experimentales realizados en laboratorio o en campo, en quemas controladas o en incen-

dios, sin incorporar ningún proceso físico. Mientras los modelos físicos han sido abordados principalmente en los Estados Unidos, los modelos empíricos se han desarrollado sobre todo en Canadá (*Canadian Forest Fire Danger Rating System*, Forestry Canada Fire Danger Group, 1992), en Australia (McARTHUR, 1966; 1967; NOBLE et al., 1980; CHENEY et al., 1993; MARS-DEN-SMEDLEY & CATCHPOLE, 1995, CHENEY et al., 1996) y en Europa para formaciones de matorral (VEGA et al., 1998; FERNANDES, 2001) y para fuegos de superficie en masas de *Pinus pinaster* (FERNANDES et al., 2002).

Los *modelos mixtos*, también denominados modelos semi-empíricos o semi-físicos, tratan de conjugar el empirismo y la teoría, de modo que los modelos elaborados presentan contenidos teóricos y experimentales más o menos importantes. Los modelos así contruidos permiten predecir ciertos aspectos del comportamiento del fuego. El principal modelo mixto o semi-empírico, y el más utilizado, es el desarrollado por ROTHERMEL (1972).

Los modelos de predicción del comportamiento del fuego permiten obtener, principalmente, la velocidad de propagación y la intensidad del fuego, y las dimensiones (altura o longitud) de las llamas.

En este marco, el objetivo del presente trabajo es desarrollar modelos empíricos para la predicción de la velocidad de propagación en distintos complejos de combustible forestal mediante ensayos realizados en túnel de viento, y evaluar el efecto sobre la misma de la velocidad del viento y la carga y la humedad del combustible.

MATERIAL Y MÉTODOS

Dispositivo experimental y metodología

El dispositivo experimental utilizado para alcanzar el objetivo expuesto fue el “túnel de viento” del CIFOR-INIA. Este túnel consta de un recinto térmico de 8,00 m de longitud, 1,00 m de anchura y 3,00 m de altura; el suelo está constituido por ocho vagonetas de 1,00 m de longitud, 0,80 m de anchura y 0,25 m de altura, rellenas de arena, de modo que forman una superficie de 8,00 m x 0,80 m sobre la que se dispone el combustible. El túnel está equipado

con un ventilador que permite crear en el recinto térmico vientos de hasta 7,0 m.s⁻¹ de velocidad. En cada ensayo, el fuego se inicia estableciendo una línea de encendido mediante un cebo compuesto por una mecha de algodón impregnada en alcohol, que se sitúa sobre la superficie del combustible colocado en el extremo del recinto térmico adyacente a la salida del ventilador. Durante la propagación del fuego, se anota el tiempo de paso de la base del frente de llamas entre vagonetas; este tiempo permite calcular la velocidad de propagación del fuego.

Complejos de combustible y condiciones iniciales de los ensayos

Se seleccionaron tres complejos de combustible: herbáceas agostadas, hojarasca de *Pinus pinea* L. y restos de corta de *Eucalyptus globulus* Labill. El combustible necesario para la realización de los ensayos se obtuvo en las respectivas áreas de recogida (Tabla 1), transportándose al laboratorio de modo que no se modificó su integridad.

De los factores que influyen en la velocidad de propagación, los seleccionados como variables independientes para el presente estudio, de acuerdo con las posibilidades del dispositivo experimental, fueron la carga y la humedad del combustible y la velocidad del viento. Hay que señalar que, en el caso de los restos de corta de eucalipto, la variación de la carga total implica, además, diferencias en su composición y estructura. La tabla 1 muestra las condiciones iniciales de los ensayos.

Métodos estadísticos

En cada complejo de combustible, se realizó un análisis de la correlación entre las variables independientes y la velocidad de propagación para determinar la influencia de aquéllas sobre ésta. Con las variables cuya correlación con la velocidad de propagación resultó significativa ($p < 0,001$), se buscaron los modelos predictivos de dicha velocidad.

Los ajustes lineales se efectuaron con el método de los mínimos cuadrados y los no lineales con el algoritmo de Marquardt, seleccionando como mejores modelos, para cada complejo de combustible, los que presentaban mayor coeficiente de determinación ajustado

Complejo de combustible	Area de recogida	Carga de combustible (kg.m ⁻²)	Humedad del combustible (%)	Velocidad del viento (m.s ⁻¹)	Número de ensayos
Herbáceas agostadas	Guadalajara	0,108 – 0,400	5 – 16	0 – 6,2	26
Hojarasca de <i>P. pinea</i>	Madrid	0,491 – 1,045	8 – 17	0 – 7	45
Restos de corta de <i>E. globulus</i>	Pontevedra	3,860 – 10,869	9 – 32	0 – 7	20

Tabla 1. Condiciones iniciales de los ensayos

(r^2_{adj}), mayor significación de sus parámetros y mejor distribución de los residuos.

La comparación del efecto de las variables independientes sobre la velocidad de propagación se llevó a cabo con los modelos que presentaron ajustes aceptables en los tres combustibles, comparando los respectivos coeficientes de regresión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los tres complejos de combustible, el análisis de la correlación entre las variables independientes y la velocidad de propagación puso de manifiesto (Tabla 2) que sólo existía correlación significativa entre ésta y la velocidad del viento.

La influencia positiva de la velocidad del viento sobre la de propagación del fuego es ampliamente conocida. En efecto, el viento alimenta al fuego de oxígeno, favoreciendo su desarrollo, al mejorar la eficacia de la combustión. Origina, además, fenómenos de convección forzada, que desplazan aire caliente que seca la vegetación no quemada y, al inclinar las llamas hacia el combustible no quemado, incrementa la transmisión hacia éste de calor por radiación. La ausencia de la esperable correlación significativa entre la humedad del combustible y la velocidad de propagación podría deberse al escaso

rango de variación de esta variable en las condiciones en las que se realizaron los ensayos.

De acuerdo con estos resultados, se buscaron modelos predictivos de la velocidad de propagación que sólo incluyeran como variable la velocidad del viento. Teniendo en cuenta la bibliografía consultada (NELSON & ADKINS, 1986; BEER, 1993; NAPOLI & CARREGA, 1997), los modelos predictivos probados fueron:

$$V = a + b \cdot U$$
$$V = \exp(a + b \cdot U)$$
$$V = a + b \cdot U^c$$
$$V = a(U + 1)^b$$

donde V es la velocidad de propagación del fuego y U la velocidad del viento. La Tabla 3 recoge los valores de los parámetros y su error estándar, así como el coeficiente de determinación y el error estándar de las ecuaciones ajustadas para cada complejo de combustible, expresado V en m.min⁻¹ y U en m.s⁻¹. En esta Tabla se han destacado, en negrita, las mejores ecuaciones de predicción de la velocidad de propagación, para cada combustible, de acuerdo con los criterios expuestos en el apartado anterior.

Los modelos obtenidos confirman el efecto relevante de la velocidad del viento sobre la de propagación, ya que explican, en las mejores ecuaciones encontradas, entre el 81 y el 96 % de la variabilidad de V. La diferencia entre los valores observados y los predichos por las ecuaciones

Complejo de combustible	Variable independiente		
	Carga de combustible	Humedad del combustible	Velocidad del viento
Herbáceas agostadas	0,1429	0,9840	0,0000***
Hojarasca de <i>P. pinea</i>	0,2180	0,3270	0,0000***
Restos de corta de <i>E. globulus</i>	0,3437	0,1911	0,0000***

Tabla 2. Análisis de la correlación entre las variables independientes y la velocidad de propagación. Valor de p y significación (***) = $p < 0,001$

Complejo	Modelo	Parámetro (e.s.)	Ajuste	Error estándar
Herbáceas agostadas	$V = a + b \cdot U$	$a = -1,529 (1,010)$ $b = 2,305 (0,278)$	$r^2 = 0,7407$	2,9644
	$V = \exp(a + b \cdot U)$	$a = -0,348 (0,123)$ $b = 0,498 (0,034)$	$r^2 = 0,8998$	0,3614
	$V = a + b \cdot U^c$	$a = 0,706 (1,085)$ $b = 0,364 (0,381)$ $c = 1,974 (0,542)$	$r_{\text{adj}}^2 = 0,7849$	2,6452
	$V = a (U + 1)^b$	$a = 0,423 (0,072)$ $b = 1,650 (0,107)$	$r^2 = 0,9088$	0,3447
	$V = a + b \cdot U$	$a = 0,018 (0,163)$ $b = 0,527 (0,036)$	$r^2 = 0,8312$	0,6570
Hojarasca de <i>Pinus pinea</i>	$V = \exp(a + b \cdot U)$	$a = -1,137 (0,078)$ $b = 0,373 (0,017)$	$r^2 = 0,9149$	0,3142
	$V = a + b \cdot U^c$	$a = 0,405 (0,169)$ $b = 0,092 (0,066)$ $c = 1,878 (0,353)$	$r_{\text{adj}}^2 = 0,8512$	0,6098
	$V = a (U + 1)^b$	$a = 0,223 (0,009)$ $b = 1,332 (0,041)$	$r^2 = 0,9614$	0,2117
Restos de corta de <i>Eucalyptus globulus</i>	$V = a + b \cdot U$	$a = 0,091 (0,182)$ $b = 0,298 (0,045)$	$r^2 = 0,7066$	0,5481
	$V = \exp(a + b \cdot U)$	$a = -1,148 (0,117)$ $b = 0,259 (0,029)$	$r^2 = 0,8147$	0,3531
	$V = a + b \cdot U^c$	$a = 0,424 (0,160)$ $b = 0,002 (0,023)$ $c = 3,386 (0,489)$	$r_{\text{adj}}^2 = 0,7171$	0,5238
	$V = a (U + 1)^b$	$a = 0,227 (0,031)$ $b = 0,958 (0,152)$	$r^2 = 0,6862$	0,4595

Tabla 3. Valores de los parámetros (error estándar), coeficiente determinación y error estándar de las ecuaciones ajustadas para cada complejo de combustible

seleccionadas (Figura 1) muestran un grado aceptable de estimación de la velocidad de propagación para valores bajos de ésta. Estas velocidades se alcanzan con viento inferior a $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, valor a partir del cual la dispersión de V aumenta.

Para comparar el efecto de la velocidad del viento sobre la velocidad de propagación, se han seleccionado las ecuaciones de predicción de la forma $V = \exp(a + b \cdot U)$, que presentan ajustes aceptables en los tres complejos de combustibles estudiados (Tabla 3). Comparando los coeficientes de regresión “b”, el efecto de la velocidad del viento sobre la de propagación es más acusado en las herbáceas, mientras los restos de corta de eucalipto presentan la menor sensibilidad a la variación de la velocidad del viento (Figura 2). Así, el incremento de la velocidad del viento en $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ supone, aproximadamente, un aumento del 65 % de V en las herbá-

ceas, del 45 % en la hojarasca de pino piñonero y del 30 % en los restos de corta de eucalipto. Este efecto está en relación, principalmente, con la densidad aparente de la capa de combustible ($1,63 \pm 0,20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ en las herbáceas, $13,46 \pm 0,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ en la hojarasca de pino piñonero, y $26,50 \pm 1,99 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ en los restos de corta de eucalipto), que influye directamente sobre la disponibilidad de oxígeno para la combustión y en los mecanismos de transmisión de calor.

CONCLUSIONES

Las quemas experimentales llevadas a cabo en el túnel de viento permiten desarrollar modelos sencillos para la predicción de la velocidad de propagación en diferentes complejos de combustible forestal. Estos modelos ponen de relie-

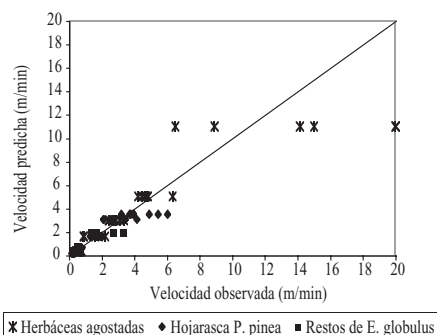


Figura 1. Velocidad de propagación observada vs. predicha

ve el efecto preponderante de la velocidad del viento sobre la de propagación. Su grado de ajuste es aceptable para velocidades del viento inferiores a 4 m.s^{-1} . Además, las ecuaciones destacan la diferente sensibilidad de los diversos combustibles a la variación de la velocidad del viento.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBINI, F.A.; 1985. A model for fire spread in wildland fuels by radiation. *Combust. Sci. Technol.* 44: 65-76.
- ANDERSON, H.E.; 1969. *Heat transfer and fire spread*. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden. USA. Research Paper INT-69.
- BEER, T.; 1993. The speed of a fire front and its dependence on wind speed. *Int. J. Wildland Fire* 3(4): 193-202.
- CATCHPOLE, E.A.; 1994. A review of physical fire models, 1945-1975. In: *Curso Wildland Fire Behaviour Modelling*: 1-44. Universidad de Coimbra. Coimbra.
- CHENEY, N.P.; GOULD, J.S. & CATCHPOLE, W.R.; 1993. The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grasslands. *Int. J. Wildland Fire* 3(1): 31-44.
- CHENEY, N.P.; GOULD, J.S. & MCCAW L.; 1996. Projeet Vesta: Research initiative into the effects of fuel structure and fuel load on behaviour of wildfires in dry eucalypt forest. In: *Proceedings of the 13th Conference on*

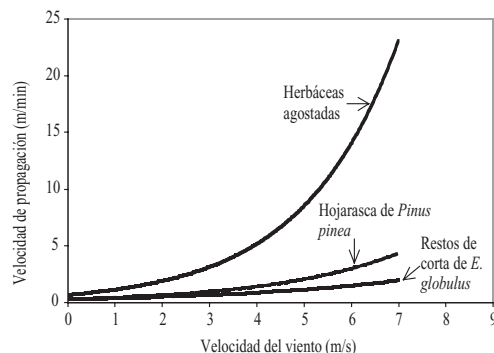


Figura 2. Velocidad de propagación vs. Velocidad del viento

Fire and Forest Meteorology: 375-378. Lorne. Australia.

- DUPUY, J.L. & LARINI, M.; 1998. PIF97 Model. A radiative and convective model for fire spread through a porous fuel bed including fire-induced flow effects. In: *Proceedings of the III International Conference on Forest Fire Research & 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*: 779-799. Luso-Portugal.
- FERNANDES, P.A.M.; 2001. Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal. *For. Ecol. Manage.* 144: 67-74.
- FERNANDES, P.; BOTELHO, H. & LOUREIRO, C.; 2002. Models for the sustained ignition and behavior of low-to-moderately intense fires in maritime pine stands. In: D.X.Viegas (ed.), *Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research & 2002 Wildland Fire Safety Summit. Luso (Portugal)*. Millpress Science Publishers. Rotherdam. CDROM
- FONS, W.L.; 1946. Analysis of fire spread in light forest fuels. *J. Agric. Res.* 72(3): 93-121.
- FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP; 1992. *Development and structure of the Canadian Forest Fire Behaviour Prediction System*. Inf. report ST-X-3. Forestry Canada.
- GRISHIN, A.M.; 1997. *Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them*. Publishing House of the Tomsk State. Tomsk. Russia.
- MARSDEN, J.B. & CATCHPOLE, W.R.; 1995. Fire behaviour modelling in Tasmanian button-grass moorlands. II Fire behaviour. *Int. J. Wildland Fire* 5(4): 215-228.

- MCARTHUR, A.G.; 1966. Weather and grassland fire behaviour. *Forest and Timber Bureau, Leaflet 100*: 1-23. Forest Research Institute. Canberra.
- MCARTHUR, A.G.; 1967. Fire behaviour in eucalypt forests. *Forest and Timber Bureau, Leaflet 107*: 1-36. Forest Research Institute. Canberra.
- MENDES-LOPES, J.M.C.; VENTURA, J.M.P. & AMARAL, J.M.P.; 2003. Flame characteristics, temperature-time curves, and rate of spread in fires propagating in a bed of *Pinus pinaster* needles. *Int. J. Wildland Fire* 12(1): 67-84.
- NAPOLI, A. & CARREGA, P.; 1997. EFAISTOS. *Experiments and simulations for improvement and validation of behaviour models of forest fires*. Contract n° ENV4-CT96-0299. Intermediate Report, September 1st 1996 to August 31st 1997. Bruxelles.
- NELSON, R.M. & ADKINS, C.W.; 1986. Flame characteristics of wind-driven surface fires. *Can. J. For. Res.* 16(6): 1293-1300.
- NOBLE, I.R., BARY, G.A.V. & GILL, A.M.; 1980. McArthur's fire danger meters expressed as equations. *Aust. J. Ecol.* 5: 201-203.
- ROTHERMEL, R.C.; 1972. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Research Paper INT-115.
- THOMAS, P.H.; 1967. Some aspects of the growth and spread of fire in the open. *Forestry* 40: 139-164.
- TELITSYN, H.P.; 1974. Flame radiation as a mechanism of fire spread in forests. In: N.H. Afgan & J.M. Beer (ed.), *Heat transfer in flames*: 441-449. Wiley. New York.
- VAN WAGNER, C.E.; 1967. *Calculations on forest fire spread by flame radiation*. Forestry Branch Pub. 1185. Canadian Department of Forestry.
- VEGA, J.A.; CUIÑAS, P., FONTÚRBEL, T.; PÉREZ-GOROSTIAGA, P. & FERNÁNDEZ, C.; 1998. Predicting fire behaviour in Galician (NW Spain) shrubland fuel complexes. In: *Proceedings of the III International Conference on Forest Fire Research & 14th Conference on Fire and Forest Meteorology. Luso. Portugal*: 713-728. Millpress Science Publishers. Rotherdam. CDROM