

INFLUENCIA DE LA PENDIENTE Y DE LA CARGA DE ACICULAS MUERTAS DE *PINUS HALEPENSIS* EN EL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO: MODELOS DESARROLLADOS EN LABORATORIO

M. GUIJARRO

Area de Silvicultura y Mejora Forestal. CIFOR-INIA
Apdo. 8111. 28080 Madrid. ESPAÑA

J. C. VALETTE

Equipe de Prévention des Incendies de Forêt
Laboratoire de Recherches Forestières Méditerranéennes. INRA
Avenue Vivaldi, 84000 Avignon. FRANCIA

RESUMEN

Se estudia en laboratorio el comportamiento del fuego en una cubierta de acículas muertas de *Pinus halepensis*, considerando siete pendientes (-30° , -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$, $+30^\circ$) y tres cargas del combustible (0,4, 0,8 y $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$). Los ensayos se realizan sobre un combustible homogéneo de acículas secas, pero no anhidras. El régimen del fuego es estacionario para todos los valores de la carga entre -30° y $+10^\circ$ y a $+20^\circ$ sólo para la carga de $0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Para las cargas de 0,4 y $0,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, la velocidad de combustión está relacionada lineal y significativamente con la velocidad de propagación. Esta relación es menos estrecha para la carga de $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. La tasa de residuos tiende a aumentar entre -30° y $+20^\circ$ y disminuye al aumentar la carga. Los otros parámetros (temperaturas máximas y áreas limitadas por las curvas de variación de la temperatura y la isoterma de 60°C) dependen de la pendiente y aumentan con la carga.

Este trabajo se inscribe en un estudio más global del INIA y del INRA para la elaboración de modelos de predicción del comportamiento del fuego.

PALABRAS CLAVE: Comportamiento del fuego

Modelo

Pinus halepensis

Región mediterránea

INTRODUCCION

Pinus halepensis es una de las especies arbóreas dominantes en las formaciones forestales mediterráneas. Se extiende, formando masas puras, por la mitad oriental de España, desde Málaga hasta Gerona, así como por las islas Baleares; en Francia constituye formaciones en mosaico sobre terrenos calizos

Recibido: 4-11-94

Aceptado para su publicación: 15-3-95

entre el Ródano y la frontera italiana; se encuentra asimismo en Italia, Grecia, el Magreb y, en menor medida, en Turquía y Siria (Quezel, Barbero, 1992). Además, la repoblación artificial lo ha introducido en muchas regiones que le eran extrañas. Es, por otra parte, un árbol de gran poder expansivo, facilitado por su abundante fructificación anual y su piñón de pequeño tamaño, ala grande y elevada potencia germinativa (Ruiz de la Torre, 1971).

La composición florística de su sotobosque se caracteriza por especies, en general, muy inflamables (*Brachypodium ramosum*, *Stipa tenacissima*, *Anthyllis cytisoides*, *Thymus vulgaris*, *Rosmarinus officinalis*, *Quercus coccifera*...) (Elvira, Hernando, 1989; Valette, 1990).

Además, la estructura estratificada de estas formaciones y la mala poda natural hacen a estos pinares muy combustibles. Esta combustibilidad viene agravada por el hecho de que las acículas muertas que caen al principio del verano son retenidas por las ramas muertas y el estrato arbustivo.

Por ello no es extraño que en la región mediterránea, los pinares de *Pinus halepensis* resulten afectados por numerosos incendios (a título de ejemplo, se puede señalar que en 1993, de las 33.388 ha arboladas afectadas por el fuego en España, 15.696 ha eran de *Pinus halepensis* -ICONA, 1994-).

En estas condiciones, el conocimiento del comportamiento del fuego en este tipo de medio resulta de gran importancia para la prevención (utilización del fuego como herramienta en la ordenación del combustible), la planificación de operaciones de extinción y la evaluación de posibles daños a la vegetación.

En la facilidad que presentan las masas de coníferas para iniciar y propagar un incendio juega un papel fundamental la capa de acículas muertas que cubre el suelo. Por ello, diversos autores han profundizado en el estudio de la propagación del fuego en cubiertas muertas monoespecíficas de coníferas, entre otros Rothermel, Anderson (1966); Delaveaud (1981); Ventura *et al.*, (1988); McAlpine, Xanthopoulos (1989).

A diferencia del efecto de la cantidad de combustible en la propagación del fuego, el efecto de la pendiente ha sido poco estudiado. Rothermel (1972) introduce en su modelo un «factor de pendiente» a partir de experiencias realizadas en laboratorio con pendientes del 25, 50 y 75 p. 100. Este factor es una función del coeficiente de empaquetamiento del combustible (relación entre el volumen real del combustible y su volumen aparente) y del cuadrado de la tangente del ángulo de la pendiente.

A partir de ensayos realizados en laboratorio con fuegos descendentes, Van Wagner (1988) propone modelos parabólicos para describir la velocidad de propagación en función de la pendiente. Esta velocidad decrece entre 0° y -22°, aumentando entre -22° y -45°. Dicho aumento es atribuido al deslizamiento de acículas inflamadas hacia la zona situada delante del frente de fuego.

En este marco del estudio del comportamiento del fuego se lleva a cabo el presente trabajo, desarrollado en el Laboratoire de Recherches Forestières Méditerranéennes del INRA en Avignon (Francia), en colaboración con el Centro de Investigación Forestal del INIA (Madrid).

El objetivo de este trabajo es determinar la influencia de la pendiente y de la carga del combustible (o, dicho más exactamente, de la cantidad de energía disponible por unidad de superficie) en el comportamiento del fuego en una cubierta de acículas muertas de *Pinus halepensis*, elaborando modelos predictivos

de los parámetros de comportamiento del fuego, mediante ensayos realizados en laboratorio.

Estos resultados serán posteriormente comparados con las predicciones del sistema BEHAVE, considerando, por tanto, un combustible más fino que el utilizado para desarrollar el modelo de Rothermel (1972). Servirán, asimismo, para validar el modelo de comportamiento del fuego que está elaborando el Danish Institute of Fire Technology de Birkerød (Dinamarca) en el marco del contrato de la Unión Europea EV5V-91-0015, en el que colabora el Equipe de Prévention des Incendies de Forêt del INRA.

MATERIAL Y METODOS

Combustible

Los ensayos se realizan con acículas procedentes de la capa superior de la cubierta muerta de un pinar de *Pinus halepensis* situado en el sureste de Francia. En el laboratorio se eliminan las acículas en descomposición, las ramillas y los diversos residuos, con el fin de no conservar más que las acículas intactas (braquiblastos incluidos).

Material

El dispositivo experimental (Fig. 1) está integrado por una bandeja soporte del combustible, constituida por una placa de aluminio de 2 mm de espesor, 1 m de ancho y 1,5 m de largo. Esta bandeja es inclinable en el sentido de su longitud y contiene dos capas de placas de amianto-cemento de 1 cm de espesor cada una. Estas placas evitan el precalentamiento del combustible situado delante del frente de fuego y las deformaciones térmicas de la bandeja.

La bandeja descansa sobre una balanza de sensibilidad de 1 g y rango 60 kg.

El dispositivo se sitúa en el interior de un recinto cúbico de 4 m de lado, cerrado por sus cuatro caras, que se encuentra en una nave cerrada, pero equipada con un evacuador de humos.

Se colocan 20 termopares con sonda de 15 cm de longitud y 1 mm de diámetro sobre la bandeja, según el eje de simetría de ésta. Estos termopares están situados en cuatro planos verticales (a 37,5 cm, 67,5 cm, 97,5 cm y 127,5 cm del extremo de la bandeja donde se inicia el fuego) y cinco planos horizontales a 0 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm y 100 cm del plano superior del combustible. Los dieciséis termopares más cercanos al combustible son de tipo K (níquel-cromo/níquel-aluminio), y los cuatro superiores, de tipo T (cobre/cobre-níquel).

El equipo experimental cuenta asimismo con un cronómetro y un dispositivo de medición del avance del fuego. Este está constituido por once interruptores situados cada 15 cm a lo largo de la bandeja y montados en serie sobre un circuito eléctrico. Desde la patilla de cada interruptor se tiende un hilo de algodón paralelo a la línea de inicio del fuego, hasta una patilla situada en el borde opuesto de la bandeja, lo que mantiene el circuito en posición de cerrado. Cuando el frente de fuego entra en contacto con el hilo, lo quema, y el interruptor

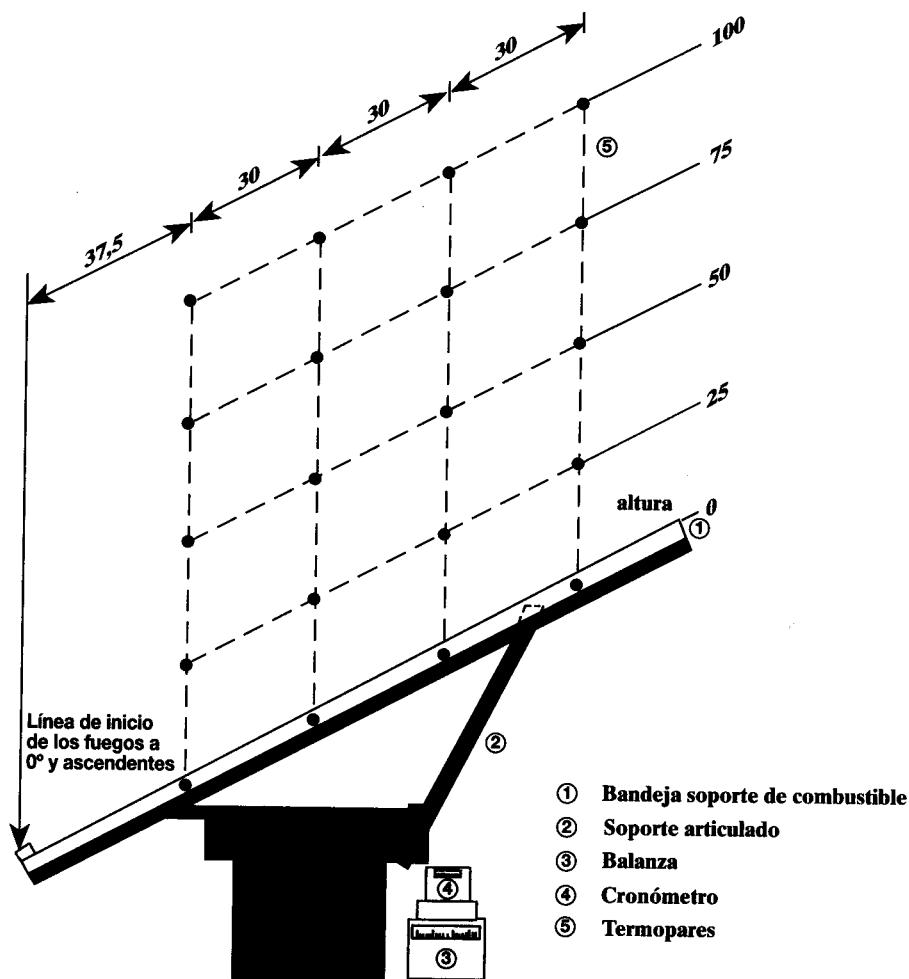


Fig. 1.-Dispositivo experimental
Experimental device

abre el circuito eléctrico. Este sistema permite detectar el punto más avanzado del frente de fuego.

Todos los sistemas de medición (cronómetro, balanza, termopares y dispositivo de medición del avance del fuego) están conectados a un registrador de

datos, que mide y almacena a intervalos de un segundo, las señales analógicas o numéricas procedentes de cada canal.

Métodos

Los factores considerados para el estudio son:

- La pendiente: -30° , -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$, $+30^\circ$.
- La carga del combustible (masa de combustible por unidad de superficie): 0,4, 0,8 y $1,2 \text{ kg/m}^2$.

Para cada condición de pendiente y carga se realizan tres repeticiones.

Los ensayos se llevan a cabo con combustible seco en estufa a 60°C durante al menos veinticuatro horas, para obtener un estado cercano al anhidro.

Para la realización del ensayo se constituye sobre la bandeja una capa homogénea de acículas con la cantidad necesaria para conseguir la carga seleccionada. Se determina el espesor (como el valor medio de treinta mediciones) y el contenido de humedad de esta capa, así como las condiciones climáticas del recinto. El fuego se inicia mediante 5 ml de alcohol repartidos a lo largo de un extremo del banco; las llamas de esta línea de fuego desencadenan el inicio de los registros.

Finalizado el ensayo, se recogen y pesan los residuos de la combustión.

Los parámetros considerados para evaluar el comportamiento del fuego son:

- Tasa de residuos TR, adimensional.
- Velocidad de propagación del fuego VP, en $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Velocidad de combustión VC, en $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Temperatura máxima por altura de medición TMAX, en $^\circ\text{C}$.
- Area limitada por las curvas de variación de la temperatura y la isoterma de 60°C , por altura de medición, AREA, en $^\circ\text{C} \cdot \text{s}$.

El cociente entre el peso de los residuos de la combustión y el peso inicial del combustible proporciona la tasa de residuos.

La velocidad de propagación se define como la primera derivada de la función $L=f(t)$ (longitud recorrida en función del tiempo).

Considerando los puntos de coordenadas $(L_i; t_i)$, siendo L_i la distancia entre la línea de inicio del fuego y el hilo i -ésimo del dispositivo de medición del avance del fuego y t_i el tiempo transcurrido entre el inicio del fuego y la rotura del hilo i -ésimo, y teniendo en cuenta que para $t_i=0$ $L_i=0$, se establece la ecuación:

$$L=A \times t^B$$

Cuando la nube de puntos indica que la función $L=f(t)$ puede describirse adecuadamente con una regresión lineal de orden 1, es decir $B=1$, esto significa que el régimen del fuego es estacionario y la velocidad de propagación es entonces igual a A.

Cuando B no es igual a 1, esto significa que el régimen del fuego es no estacionario.

De manera análoga se determina la velocidad de combustión con respecto a la función $PM=f(t)$ (pérdida de masa en función del tiempo), considerando las pérdidas de masa registradas en el momento de la rotura de los hilos (es decir, para los mismos valores de t_i que para la velocidad de propagación).

Para el análisis de los resultados en cuanto a temperaturas máximas, el valor considerado en un nivel de medición determinado es el máximo de las cuatro temperaturas máximas registradas en cada ensayo.

Para intentar evaluar la energía recibida en un punto dado, se considera el área delimitada por la curva de variación de la temperatura con el tiempo y la isoterma de 60° C. Se elige este valor de la isoterma por ser la temperatura letal para la materia viva, a la que las proteínas comienzan a desnaturalizarse (Walker *et al.*, 1983).

El valor de AREA considerado en el análisis de resultados, para un nivel dado, es la media de las cuatro áreas registradas en cada ensayo.

RESULTADOS Y DISCUSION

La Tabla 1 presenta, para cada una de las pendientes y de las cargas consideradas, las características de los ensayos en cuanto a contenido de humedad CH y espesor del combustible δ .

TABLA 1
CARACTERISTICAS INICIALES DE LOS ENSAYOS: CONTENIDO DE HUMEDAD CH Y ESPESOR δ DEL COMBUSTIBLE

Initial characteristics of the experiments: fuel moisture content CH and depth δ

Pte	Carga	Pendiente			δ (mm)		
-30°	0,4	2,65	4,13	2,15	19,3	21,0	20,0
	0,8	1,29	2,71	2,34	41,2	40,2	37,0
	1,2	1,59	2,27	3,37	56,3	55,2	54,3
-20°	0,4	3,09	3,62	2,93	19,0	17,8	20,2
	0,8	2,79	3,16	3,57	35,4	35,6	33,8
	1,2	1,80	3,24	3,45	51,7	51,3	49,3
-10°	0,4	1,90	2,55	2,24	18,5	19,7	18,7
	0,8	1,43	1,87	2,09	37,8	33,9	39,2
	1,2	2,15	2,15	1,66	51,0	51,7	52,8
0°	0,4	4,08	3,33	2,34	17,3	20,3	17,3
	0,8	3,38	0,98	2,43	37,2	38,9	37,2
	1,2	2,33	2,00	2,16	56,2	52,2	52,5
+10°	0,4	4,47	2,67	1,96	18,5	19,5	19,6
	0,8	3,08	3,24	1,89	36,3	39,7	35,8
	1,2	2,47	2,53	2,10	53,9	53,3	54,7
+20°	0,4	2,16	3,01	3,59	21,7	22,4	17,8
	0,8	2,38	2,92	3,16	38,6	38,4	37,8
	1,2	1,65	2,46	3,00	60,0	58,9	58,3
+30°	0,4	2,47	3,58	2,70	20,8	19,8	18,6
	0,8	2,59	2,02	4,10	37,6	39,5	37,6
	1,2	2,78	4,02	1,56	56,0	55,0	57,2

La Tabla 2 presenta los valores medios y errores típicos para el espesor δ , la densidad aparente ρ_b y el coeficiente de empaquetamiento β para cada valor de carga.

TABLA 2
VALORES MEDIOS Y ERRORES TIPICOS (ENTRE PARENTESIS) DEL
ESPESOR δ , LA DENSIDAD APARENTE ρ_b Y EL COEFICIENTE DE
EMPAQUETAMIENTO β DEL COMBUSTIBLE PARA LOS TRES
VALORES DE CARGA DEL COMBUSTIBLE

Mean values and standard errors (between brackets) of fuel depth δ , bulk density ρ_b and packing ratio β

Carga ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	δ (mm)			ρ_b ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)			β		
0,4	19,4	(3,3)	a	20,69	(0,32)	a	0,028	(0,0004)	a
0,8	37,6	(0,4)	b	21,36	(0,25)	ab	0,029	(0,0003)	ab
1,2	54,4	(0,6)	c	22,12	(0,25)	b	0,030	(0,0003)	b

Dentro de cada columna, los valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas según el test de Newmann-Keuls ($\alpha = 0,01$).

Into each column, the values with the same letter have no significant differences in the Newmann-Keuls test ($\alpha = 0.01$).

La Tabla 3 presenta, para cada una de las pendientes y de las cargas consideradas, los resultados obtenidos en los ensayos en cuanto a tasa de residuos TR, velocidad de propagación VP y velocidad de combustión VC.

Contenido de humedad del combustible

Aunque las acículas se almacenan a 60° C, su contenido de humedad no es nulo, ya que se hidratan durante la preparación del ensayo, ni igual en todos los ensayos, ya que esta hidratación depende a la vez de la duración de la preparación y de la humedad relativa del aire.

Sin embargo, el análisis de los datos no evidencia ninguna relación clara entre el contenido de humedad de las acículas y la temperatura o la humedad del aire.

El contenido de humedad del combustible varía entre 0,98 p. 100 y 4,47 p. 100; en este rango de variación no se observa ninguna relación clara con el comportamiento del fuego, debido a que se trata siempre de combustible muy seco.

Espesor del combustible

Para todos los valores de pendiente considerados, el espesor del combustible varía entre:

- 17,3 y 22,4 mm para la carga 0,4 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$.
- 33,8 y 41,2 mm para la carga 0,8 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$.
- 48,3 y 60,0 mm para la carga 1,2 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

TABLA 3
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS: TASA DE RESIDUOS TR,
VELOCIDAD DE PROPAGACION VP Y VELOCIDAD DE
COMBUSTION VC

Results of the experiments: remaining fuel ratio TR, rate of spread VP and rate of weight loss VC for the three fuel load values

-30°	0,4	0,108	0,113	0,108	3,385	3,104	3,691	1,194	1,089	1,329
	0,8	0,078	0,076	0,084	4,288	3,881	3,904	2,928	2,663	2,525
	1,2	0,064	0,066	0,068	4,417	3,977	4,104	4,399	4,178	4,287
-20°	0,4	0,120	0,150	0,113	2,868	3,051	3,459	1,020	1,025	1,201
	0,8	0,100	0,113	0,096	3,744	3,962	3,817	2,546	2,536	2,632
	1,2	0,088	0,083	0,085	4,821	4,665	4,482	4,349	4,436	4,332
-10°	0,4	0,205	0,150	0,185	3,684	3,230	3,696	1,127	1,046	1,117
	0,8	0,148	0,159	0,133	5,151	4,824	4,293	3,049	2,974	2,756
	1,2	0,134	0,163	0,164	6,584	7,345	7,530	4,991	5,254	5,125
0°	0,4	0,200	0,190	0,178	4,062	4,040	3,413	1,218	1,311	1,113
	0,8	0,179	0,146	0,171	5,197	5,845	5,800	3,061	3,544	3,359
	1,2	0,159	0,123	0,153	7,628	6,173	6,447	6,056	5,610	5,433
+10°	0,4	0,243	0,218	0,203	4,257	5,367	5,448	1,154	1,602	1,534
	0,8	0,261	0,166	0,234	7,075	7,522	8,478	3,600	4,338	4,323
	1,2	0,173	0,188	0,156	9,703	10,729	8,475	no estable		
+20°	0,4	0,213	0,243	0,258	8,844	11,109	8,817	2,392	2,860	2,220
	0,8	0,240	0,236	0,269	no estacionario			no estable		
	1,2	0,180	0,188	0,178	no estacionario			no estable		
+30°	0,4	0,195	0,213	0,225	no estacionario			no estable		
	0,8	0,189	0,204	0,203	no estacionario			no estable		
	1,2	0,143	0,149	0,161	no estacionario			no estable		

El análisis de varianza para δ pone de manifiesto que existen diferencias significativas entre los espesores medios de las tres cargas ($F=1411 > F_{0,01,2,69}$). El test de Newmann-Keuls indica (Tabla 2) que las tres medias son significativamente distintas entre sí ($\delta_{0,4} < \delta_{0,8} < \delta_{1,2}$).

Se observa que cuando la carga se triplica, el espesor medio no se multiplica más que por 2,8, lo que se debe a la compactación natural del combustible.

A partir de los datos del espesor del combustible se determinan la densidad aparente ρ_b :

$$\rho_b = CC/\delta \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$$

siendo CC la carga del combustible y el coeficiente de empaquetamiento β :

$$\beta = \rho_b/\rho_p \quad (\text{adimensional})$$

siendo ρ_p la densidad de las partículas que integran el combustible, en este caso $737 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. (Daligault, 1991).

El análisis de varianza para ρ_b pone de manifiesto que existen diferencias significativas entre las densidades medias de las tres cargas ($F = 6,89 > F_{(01,2,60)}$). El test de Newmann-Keuls (Tabla 2) indica que sólo difieren significativamente las densidades aparentes para las cargas de $0,4$ y $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

Lógicamente, β presenta la misma variación que ρ_b , y sólo difieren significativamente los coeficientes de empaquetamiento para las cargas de $0,4$ y $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (Tabla 2).

Tasa de residuos

Como se observa en la Tabla 3, TR varía entre $0,064$ para las condiciones -30° y $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, y $0,258$ para -20° y $0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

Para una pendiente dada, la tasa de residuos tiende a disminuir cuando aumenta la carga, siendo esta tendencia menos clara en pendientes ascendentes.

Para una carga dada, la tasa tiene tendencia a aumentar entre -30° y $+20^\circ$, disminuyendo entre $+20^\circ$ y $+30^\circ$. La Figura 2 representa la variación de la tasa de residuos con la pendiente y la carga del combustible.

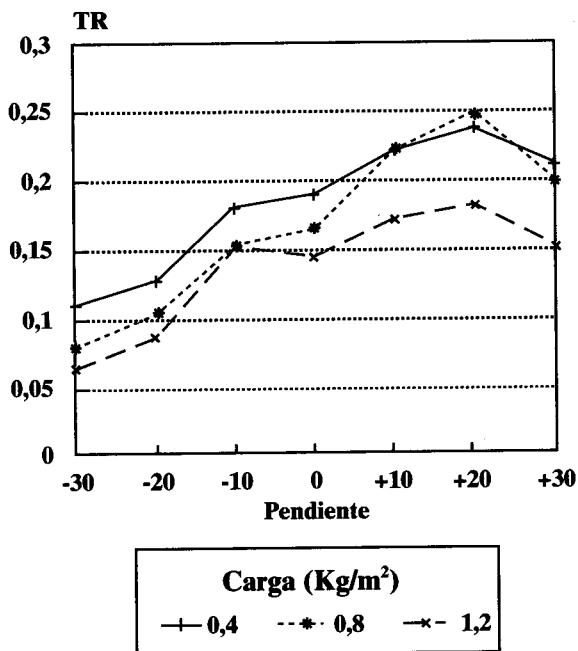


Fig. 2.-Variación de la tasa de residuos con la pendiente y la carga
Variation of remaining fuel with slope and fuel load

La relación entre TR y la pendiente, expresada a través de su tangente TAN, y la carga del combustible CC se recoge en la ecuación de regresión lineal múltiple, cuyos coeficientes de regresión y de determinación se presentan en la Tabla 4. Esta ecuación explica el 81 p. 100 de la variación de TR.

TABLA 4
VALORES DE LOS COEFICIENTES DE REGRESION Y DE DETERMINACION DE LA ECUACION
 $y = a_0 + a_1 \times CC + a_2 \times TAN + a_3 \times TAN^2$
 (CC = Carga del combustible ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), TAN = Tangente de la pendiente),
PARA LA TASA DE RESIDUOS TR, LA VELOCIDAD DE PROPAGACION VP Y LA VELOCIDAD DE COMBUSTION VC
Regression and determination coefficients of the equation
 $y = a_0 + a_1 \times CC + a_2 \times TAN + a_3 \times TAN^2$
 (CC = fuel load ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), TAN = slope tangent),
 for remaining fuel ratio TR, rate of spread VP and rate of weight loss VC

TR	0,2256	-0,0571	0,1102	-0,1291	0,8143
VP	3,2526	3,2135	8,7695	9,6001	0,8456
VC	-0,4903	4,7883	2,2168	1,8878	0,9525

Velocidad de propagación

En la Tabla 3 se observa que la velocidad de propagación varía entre 2,868 y 11,109 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ para todos los valores de pendiente y carga considerados. Valette *et al.*, (1994) destacan que estas velocidades son sistemáticamente superiores a las observadas, en las mismas condiciones, en las acículas muertas de *Pinus pinaster*, en donde varían entre 2 y 6 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

El régimen del fuego es estacionario entre -30° y $+10^\circ$, así como a $+20^\circ$ para la carga de $0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, siendo no estacionario en los demás casos.

Cuando el régimen del fuego es estacionario, la dispersión de las velocidades de propagación es pequeña, siendo mayor a $+10^\circ$ y $+20^\circ$ para $0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

La Figura 3 representa la variación de la velocidad de propagación con la pendiente y la carga del combustible. Esta velocidad aumenta con la pendiente a partir de -30° para la carga $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, y a partir de -20° para las otras dos cargas. Hay que destacar la posición atípica del punto (-10° , 1,2). El aspecto de las tres curvas indica una tendencia a un fuerte aumento en la velocidad con las pendientes ascendentes, lo que habría que confirmar con un dispositivo experimental de mayor longitud.

La variación de la velocidad de propagación en función de la pendiente y de la carga del combustible se refleja en la ecuación de regresión lineal múltiple, cuyos

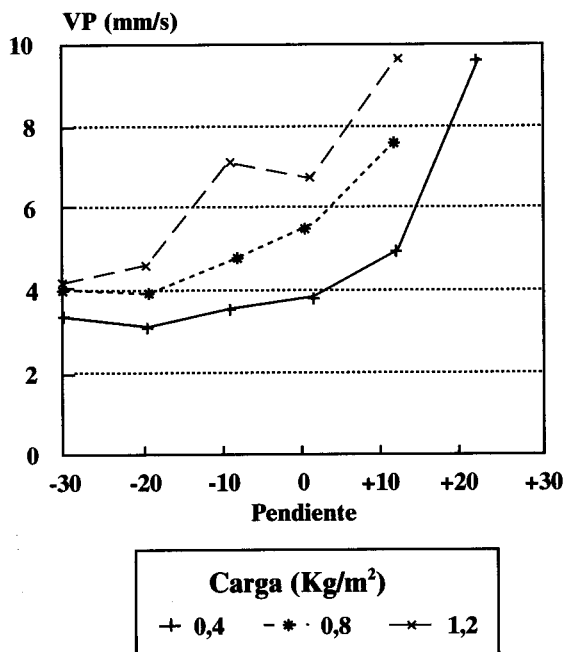


Fig. 3.—Variación de la velocidad de propagación con la pendiente y la carga
Variation of rate of spread with slope and fuel load

coeficientes de regresión y de determinación se recogen en la Tabla 4. Esta ecuación explica el 84 p. 100 de la variación de VP.

Velocidad de combustión

En la Tabla 3 se observa que la velocidad de combustión varía entre $1,020$ y $6,056 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ para todos los valores de pendiente y carga considerados. Como ocurre con la velocidad de propagación, las velocidades de combustión son superiores a las observadas, en las mismas condiciones, en las acículas muertas de *Pinus pinaster*, ya que, en este caso, dichas velocidades varían entre $0,5$ y $3,5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ (Valette *et al.*, 1994).

La velocidad de combustión es estable entre -30° y 0° cualquiera que sea la carga considerada; es estable asimismo a $+10^\circ$ para las cargas de $0,4$ y $0,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ y a $+20^\circ$ para la carga de $0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

La dispersión de VC es pequeña, excepto para las pendientes $+10^\circ$ y $+20^\circ$ con una carga de $0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

La Figura 4 representa la variación de la velocidad de combustión con la pendiente y la carga del combustible. Se observa que VC aumenta con la

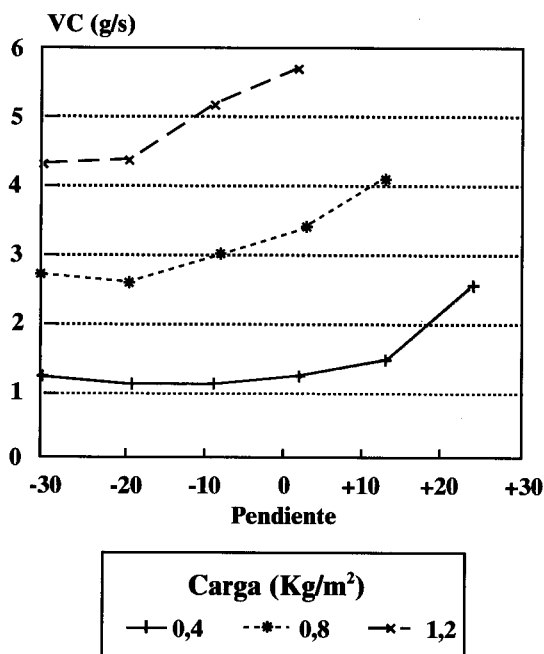


Fig. 4.-Variación de la velocidad de combustión con la pendiente y la carga
Variation of rate of weight with slope and fuel load

pendiente a partir de -30° para $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, a partir de -20° para $0,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, y a partir de -10° para $0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Para una pendiente dada, VC aumenta con la carga del combustible.

Análogamente a VP, se ha determinado la ecuación de regresión lineal múltiple que relaciona la velocidad de combustión con la pendiente y la carga del combustible; sus coeficientes de regresión y de determinación se reflejan en la Tabla 4. Esta ecuación explica el 95 p. 100 de la variación de VC.

Relación entre VP y VC

Se ha buscado la relación entre VP y VC en las condiciones en las que ambas velocidades son estables.

La Figura 5 representa los puntos de coordenadas (VC; VP). La forma de las nubes de puntos obtenidas conduce a proponer, para cada una de las tres cargas consideradas, la relación lineal de la forma:

$$VP = a_0 + a_1 \times VC$$

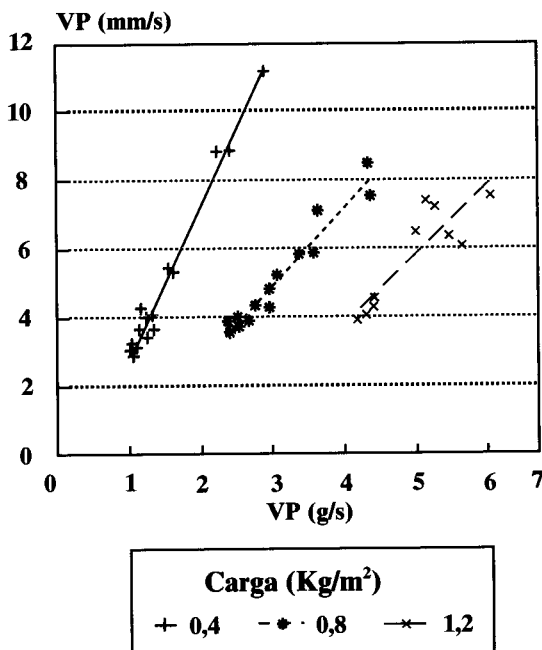


Fig. 5.-Variación de la velocidad de propagación y la velocidad de combustión, según la carga
Variation of rate of spread and rate of weight loss according to fuel load

Los valores de los coeficientes de regresión y de determinación de estas ecuaciones se presentan en la Tabla 5

TABLA 5

VALORES DE LOS COEFICIENTES DE REGRESION Y DE DETERMINACION DE LA ECUACION $VP = a_0 + a_1 \times VC$ PARA LOS TRES VALORES DE CARGA DEL COMBUSTIBLE

Regression and determination coefficients of the equation $VP = a_0 + a_1 \times VC$ for the three fuel load values

Carga (Kg/m ²)	a_0	a_1	R^2
0,4	-1,5532	4,4412	0,9810
0,8	-2,3668	2,4189	0,9503
1,2	-4,0333	1,9944	0,7817

Este tipo de ecuación es adecuado para las cargas de 0,4 y 0,8 kg · m⁻² (explica respectivamente el 98 y el 95 p. 100 de la variación de VP). Sin embargo, y como pone de manifiesto la nube de puntos correspondiente, no es válido para 1,2 kg · m⁻² (la ecuación sólo explica el 78 p. 100 de la variación de VP), lo que se debe probablemente al efecto de la compactación del combustible (ver apartado «Espesor del combustible»).

Temperaturas máximas

La Tabla 6 presenta, para cada pendiente, cada carga del combustible y cada uno de los cinco niveles de medición, la media de las temperaturas máximas de las tres repeticiones por condición de ensayo.

TABLA 6
VALORES MEDIOS DE LAS TEMPERATURAS MAXIMAS

Mean values of the maximum temperatures

Pen.	Carga	TMAX0	TMAX25	TMAX50	TMAX75	TMAX100
-30°	0,4	717	162	102	87	72
	0,8	804	413	210	142	118
	1,2	786	508	358	228	176
-20°	0,4	739	200	132	95	80
	0,8	776	403	289	161	124
	1,2	787	648	444	255	177
-10°	0,4	737	252	136	104	90
	0,8	758	551	313	214	165
	1,2	786	753	559	345	244
0°	0,4	673	246	129	104	87
	0,8	788	578	317	207	166
	1,2	796	651	462	317	244
+10°	0,4	662	307	154	113	93
	0,8	721	583	390	221	165
	1,2	783	743	557	389	273
+20°	0,4	683	383	210	156	136
	0,8	722	625	469	338	256
	1,2	771	784	693	555	402
+30°	0,4	773	579	413	298	257
	0,8	783	715	589	454	340
	1,2	812	886	813	662	416

Para cada condición de pendiente y carga del combustible, la temperatura máxima se observa en el nivel 0 (excepto en el caso de pendiente $+30^\circ$ y carga $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$). Estos máximos varían entre 650°C (a $+10^\circ$ y $0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) y 918°C (a $+30^\circ$ y $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$).

En todos los puntos de medida, la temperatura máxima registrada es superior a la temperatura letal de 60°C .

En el nivel 0, las medias de las temperaturas máximas varían entre 662°C y 812°C , son relativamente independientes de la pendiente y aumentan con la carga.

La temperatura de ignición de la materia vegetal, que Anderson (1970) señala como igual a $346 \pm 40^\circ \text{C}$, se alcanza, en el nivel 100, para la pendiente de $+30^\circ$ y las cargas de $0,8$ y $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, así como para la pendiente de $+20^\circ$ y la carga de $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Este umbral se alcanza con la carga de $0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ hasta el nivel 25 con una pendiente de $+20^\circ$ y hasta el nivel 50 con una pendiente de $+30^\circ$.

Sobre la base de las observaciones expuestas se ha buscado un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre TMAX, y los tres parámetros: pendiente, expresada a través de su tangente TAN, carga CC ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) y nivel de medición NM (cm), obteniéndose la ecuación:

$$\text{TMAX} = 416 + 318 \times \text{CC} - 5,54 \times \text{NM} - 199 \times \text{TAN} + 187 \times \text{TAN}^2$$

Este modelo explica el 85 p. 100 de la variación de TMAX.

Áreas bajo las curvas

Los registros de la variación de la temperatura con el tiempo han permitido determinar, para cada punto de medición, el área comprendida entre la curva $T = f(t)$ y la recta $T = 60^\circ \text{C}$.

Aunque estas áreas no pueden relacionarse con una magnitud física, permiten expresar en una unidad «temperatura $\times$ tiempo» la cantidad de energía recibida durante el ensayo en los puntos en los que se encuentran los extremos de los termopares. (En rigor, la temperatura medida es la de la «soldadura caliente» de los termopares y no la de la fase gaseosa de la combustión, ya que sus calores específicos son muy diferentes.)

La Tabla 7 presenta, para cada pendiente, cada carga del combustible y cada uno de los cinco niveles de medición, la media de las áreas de las tres repeticiones por condición de ensayo.

Para cada condición de pendiente y carga del combustible, las áreas máximas se observan en el nivel 0. Para todos los niveles, y para cada pendiente, el área aumenta significativamente con la carga. Pero, en general, para cada una de las tres cargas, el área disminuye desde la pendiente de -30° hasta la pendiente de 0° y aumenta entre $+10^\circ$ y $+30^\circ$.

La forma de la nube de puntos conduce a buscar una ecuación parabólica:

$$\text{AREA} = a_0 + a_1 \times \text{TAN} + a_2 \times \text{TAN}^2$$

Esta ecuación sólo puede establecerse aceptablemente para el nivel 0.

TABLA 7
VALORES MEDIOS DE LAS AREAS LIMITADAS POR LA CURVA
 $T = f(t)$ Y LA ISOTERMA $T = 60^\circ \text{C}$

Mean values of the areas between $T = f(t)$ curve and $T = 60^\circ \text{C}$ isotherm

T°	Carga	AREA 0	AREA 1	AREA 2	AREA 3	AREA 4
-30°	0,4	40.383	6.087	1.991	412	110
	0,8	69.994	24.408	11.771	5.164	2.513
	1,2	79.684	36.511	24.413	14.197	8.766
-20°	0,4	37.823	7.190	4.016	1.290	356
	0,8	52.568	23.092	14.757	7.506	3.864
	1,2	64.155	40.108	26.582	13.421	7.699
-10°	0,4	27.297	6.142	3.172	1.490	566
	0,8	40.098	19.502	11.530	6.851	4.303
	1,2	44.991	31.587	23.037	11.920	7.372
0°	0,4	19.859	6.681	2.918	1.364	584
	0,8	33.327	22.448	12.822	6.585	4.000
	1,2	43.480	28.920	17.741	9.554	5.835
+10°	0,4	19.563	7.700	4.154	1.960	931
	0,8	28.678	19.212	12.530	7.430	4.886
	1,2	39.039	26.078	17.764	11.061	7.430
+20°	0,4	23.044	7.566	4.706	3.251	2.411
	0,8	29.287	15.788	10.351	6.833	5.016
	1,2	50.952	28.069	19.217	13.284	9.642
+30°	0,4	24.918	10.569	6.077	3.781	2.729
	0,8	36.300	21.059	13.404	8.715	6.286
	1,2	48.566	29.124	20.553	14.134	10.432

La Tabla 8 presenta los coeficientes de correlación y de determinación de estas ecuaciones, para cada valor de carga.

TABLA 8
VALORES DE LOS COEFICIENTES DE REGRESION Y DE
DETERMINACION DE LA ECUACION
 $\text{AREA } 0 = a_0 + a_1 \times \text{TAN} + a_2 \times \text{TAN}^2$
PARA LOS TRES VALORES DE CARGA DEL COMBUSTIBLE

Regression and determination coefficients of the equation

$\text{AREA } 0 = a_0 + a_1 \times \text{TAN} + a_2 \times \text{TAN}^2$
for the three fuel load values

Carga	r	r^2	r	r^2
0,4	22.866	-15.769	33.022	0,9810
0,8	32.807	-30.125	60.972	0,9503
1,2	43.419	-23.968	67.345	0,7817

CONCLUSIONES

El contenido de humedad del combustible (secado en estufa para no introducir este factor como variante), aunque no resulta nulo, permanece muy bajo (0,98 p. 100 a 4,47 p. 100). Esto explica probablemente que no se haya puesto de manifiesto la influencia de dicho factor en el comportamiento del fuego. Sería interesante completar esta serie de ensayos con contenidos de humedad del combustible más elevados, cercanos a los valores encontrados en el monte durante el verano (7-10 p. 100) y al contenido de humedad de extinción (25-30 p. 100).

La pendiente y la carga del combustible influyen fuertemente en el comportamiento del fuego en la cubierta de acículas muertas de *Pinus halepensis*, aunque esta influencia no se manifiesta del mismo modo en los diversos parámetros de comportamiento.

El régimen del fuego es estacionario para todos los valores de la carga entre -30° y $+10^\circ$, y a $+20^\circ$ sólo para la carga de $0,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. En las demás condiciones, el régimen es no estacionario. Para obtener conclusiones definitivas, sería necesario realizar ensayos en un dispositivo experimental de mayor longitud, lo que permitiría observar el posible paso del régimen no estacionario (fase de inicio del fuego) al régimen estacionario.

Por lo que respecta a la velocidad de combustión, es estable cuando el régimen del fuego es estacionario, excepto a $+10^\circ$ para la carga de $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

Cuando el régimen del fuego es estacionario, para las cargas de $0,4$ y $0,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, la velocidad de combustión está relacionada lineal y significativamente con la velocidad de propagación. Esta relación es menos estrecha para la carga de $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

En las condiciones consideradas para los ensayos, y cuando el régimen del fuego es estacionario, el combustible se quema simultáneamente en todo su espesor. Por contra, cuando el régimen del fuego es no estacionario, el fuego avanza más rápidamente sobre la superficie del combustible que en profundidad; esto confirma las mediciones realizadas en las quemas controladas y las observaciones hechas en los incendios forestales.

Por otra parte, el aumento de la carga del combustible acarrea una disminución de la tasa de residuos y, por tanto, el aumento de la eficacia de la combustión.

Las temperaturas máximas alcanzadas en distintos puntos entre 0 y 100 cm de la superficie del combustible aumentan con la carga del combustible y disminuyen con la distancia a la superficie del mismo y son siempre superiores a la temperatura letal (60°C).

Las áreas limitadas por las curvas $T = f(t)$ y la recta $T = 60^\circ \text{C}$ disminuyen asimismo con la altura a la cual se han registrado las temperaturas. Estas áreas disminuyen cuando la pendiente pasa de -30° a 0° y aumentan entre $+10^\circ$ y $+30^\circ$. Aumentan también con la carga del combustible.

Si se considera que estas áreas expresan, en cierto modo, la energía global recibida en los puntos donde son medidas por los termopares, estas conclusiones pueden relacionarse con las observaciones y las mediciones realizadas con ocasión de las quemas controladas o de los fuegos experimentales de poca intensidad. Se han observado, en efecto, daños más importantes sobre el medio durante fuegos

descendientes, tanto más lentos cuanto mayor es la pendiente, a pesar de que estos fuegos son más controlables que los ascendentes.

Los modelos propuestos para predecir el comportamiento del fuego son modelos lineales múltiples, es decir, se ha considerado que los efectos de la pendiente y de la carga del combustible son aditivos, lo que constituye la hipótesis más simple. Ensayos posteriores permitirán verificar la validez de esta hipótesis.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Convenio de Cooperación INIA-INRA y ha recibido el apoyo financiero del Contrato de la DG XII de la UE EV5V-91-0015 («Forest fire modeling»), del Conservatoire de la Forêt Méditerranéenne de Francia y de las Acciones de Reorientación y Actualización de la Formación del Personal Científico y Técnico del INIA.

Los autores quieren expresar su agradecimiento:

- A Joël Maréchal, del Equipe de Prévention des Incendies de Forêt (INRA), con el que M. Guijaro ha realizado los ensayos y analizado los datos.
- A Denis Portier y Frédéric Jean, del Equipe de Prévention des Incendies de Forêt (INRA), que han preparado el combustible y han participado en la realización de los ensayos.
- A Jesús de Miguel, del Area de Selvicultura y Mejora Forestal (CIFOR-INIA), que ha elaborado las figuras.

SUMMARY

Effects of slope and fuel load of *Pinus halepensis* needles beds on fire behaviour: models determined in the laboratory

Fire behaviour has been studied on an laboratory device in fuel beds of *Pinus halepensis* needles. The effect of slope (seven levels: -30° , -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$, $+30^\circ$) and fuel load (three levels: 0.4, 0.8, 1.2 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) has been analyzed. The experiments have been conducted on homogeneous oven-dried needles. Fire spreads steadily with all fuel loads and slopes between -30° and $+10^\circ$ and also at $+20^\circ$ with 0.4 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$. For fuel loads of 0.4 and 0.8 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, rate of weight loss is linearly related to rate of spread (the relation is significant); with 1.2 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ the relation is weaker. Remaining fuel ratio increases when slope increases from -30° to 0° and decreases when fuel load increases. Two other parameters (maximum temperatures and areas between temperature-time curve and isotherm 60°C) depend on slope and increase with fuel load.

This work takes place in a more global study of INIA and INRA to elaborate models to predict fire behaviour.

KEY WORDS: Fire behaviour
Mediterranean area
Models
Pinus halepensis

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANDERSON H. E., 1970. Forest fuel ignitibility. *Fire Technol.* 6: 312-319.
- DALIGAULT O., 1991. Caractéristiques physiques des aiguilles de pin. Mémoire de stage de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. INRA. Laboratoire de Recherches Forestières Méditerranéennes. Document interne PIF9112.
- DELAVERAUD P., 1981. Le feu, outil sylvicole? Utilisation pratique des données de combustibilité. Mémoire de troisième année. INRA. Station de Sylviculture Méditerranéenne. Avignon, 91 pp. + annexes.

- ELVIRA L., HERNANDO C., 1989. Inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque. Monografía INIA núm. 68. MAPA. Madrid, 99 pp.
- ICONA, 1994. Los incendios forestales en España durante 1993. MAPA. Publicaciones del Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, 76 pp.
- Mc ALPINE R. S., XANTHOLPOULOS G., 1989. Predicted vs. observed fire spread rates in ponderosa pine fuel beds: a test of american and Canadian System. Proceedings of the 10th. Conference on Fire and Forest Meteorology, Ottawa (Canada), 287-294.
- QUEZEL P., BARBERO M., 1992. Le Pin d'Alep et les espèces voisines. Forêt Méditerranéenne XIII, 3, 158-170.
- ROTHERMEL R. C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service. Research Paper. INT-115, 40 pp.
- ROTHERMEL R. C., ANDERSON H. E., 1966. Fire spread characteristics determined in the laboratory. USDA Forest Service. Research Paper. INT-30. 40 pp.
- RUIZ DE LA TORRE J., 1971. Árboles y arbustos de la España Peninsular. IFIE. ETSIM. Madrid, 512 pp.
- VALETTE J. C., 1990. Inflammabilités des espèces forestières méditerranéennes. Conséquences sur la combustibilité des formations forestières. Rev. For. Fr. núm. sp.: 76-92.
- VALETTE J. C., GUIJARRO M., MARECHAL J., DUPUY J. L., 1994. Influence of slope and fuel load on fire behaviour in pine needles fuel beds. Proceedings of the 2nd Conference on Forest Fire Research, Coimbra (Portugal).
- VAN WAGNER C. E., 1988. Effect of slope on fires spreading downhill. Can. J. For. Res. 18 (6): 818-820.
- VENTURA J. M. P., FERNANDES E. C., DURAO D. F. G., 1988. Combustao de residuos florestais. Alguns resultados. Actas das Jornadas Cientificas sobre Incendios Florestais. Coimbra. Tomo I, 2.3.1-14.
- WALKER J., RAISON R. J., KHANNA P. K., 1983. Fire. In: Australian soils. The human impact. J. S. Russel and R. F. Isbell editors. University of Queensland Press, St. Lucia, Queensland, Australia, pp. 185-216.