

RÉGIMEN TÉRMICO EN TRONCOS DE *Pinus pinaster*: APLICACIÓN A LAS QUEMAS PRESCRITAS

Carmen Hernando, Mercedes Guijarro & Carmen Díez

Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria - Centro de Investigación Forestal. Departamento de Selvicultura. Apartado 8111, 28080 MADRID. Tel. (34) 1 3474196; Fax. (34) 1 3573107; email: fuego@inia.es

RESUMEN

Se ha estudiado el régimen térmico producido en torno a troncos de *Pinus pinaster* mediante quemas experimentales de hojarasca de esta especie, realizadas en laboratorio. Se ha analizado el efecto de tres niveles de humedad del combustible, tres niveles de velocidad del viento y dos valores de diámetro del tronco, midiendo los gradientes verticales de las temperaturas máximas y de los tiempos con temperatura superior a 60 °C registrados en la superficie de los troncos y en el cambium, tanto en la cara de barlovento como en la de sotavento. En general, estos parámetros del régimen térmico disminuyeron con la altura de medición y, debido al "efecto chimenea", fueron mayores en la cara de sotavento que en la de barlovento. La altura de chamuscado fue, asimismo, mayor a sotavento que a barlovento, pudiendo deducirse a partir de la altura máxima alcanzada por las llamas en dicha cara del tronco. En algunos ensayos se superó, en el cambium, la temperatura letal de 60° C.

Palabras clave: Comportamiento del fuego; Régimen térmico; Altura de chamuscado; Quemias prescritas; *Pinus pinaster*.

INTRODUCCIÓN

Pinus pinaster Ait. es una especie del área mediterránea occidental (España, Portugal,

Sur de Francia, Italia, Marruecos, Argelia y Túnez). En España se encuentra en casi toda la península, siendo el pino que ocupa mayor superficie naturalmente (RUÍZ DE LA TORRE, 1971) y el más ampliamente utilizado en las repoblaciones (MADRIGAL, 1998). En total ocupa un área superior a 1.300.000 ha, de las 14.066.000 ha de superficie forestal arbolada existente en nuestro país (MMA, 1997).

Por otro lado, cabe destacar el impacto que sobre las masas de esta especie tienen los incendios forestales. En el año 1995, de las 42.389 ha arboladas que ardieron, 10.996 ha fueron de *P. pinaster* (DGCONA, 1996).

En estas circunstancias, y ante determinadas carencias de información específica sobre el comportamiento del fuego en las masas de *P. pinaster*, se hace necesario profundizar en el conocimiento del fenómeno, a fin de proporcionar elementos de ayuda en la planificación de las tareas de prevención, entre las que cabe destacar las quemias prescritas, las operaciones de extinción y la evaluación de posibles daños.

El objetivo de este trabajo, dirigido en el sentido apuntado, es determinar, mediante ensayos realizados en laboratorio, la distribución de temperaturas que se produce en los troncos de *P. pinaster*, bajo diferentes condiciones de quemias, buscando indicadores fácilmente identificables que permitan predecir los posibles efectos del fuego en el

árbol. La metodología seguida posibilita, además de la selección minuciosa de las variables cuya influencia se quiere conocer y la reproducción de los ensayos, la detección de los posibles daños producidos por el calentamiento en el tronco, aislándolos del calentamiento producido en las copas y en las raíces.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los 33 ensayos necesarios para cumplir los objetivos previstos se realizaron en túnel de viento, al aire libre, que consta de un recinto térmico y de un ventilador, y se complementa con un sistema electrónico de captación de temperaturas (HERNANDO & GUIJARRO, 1990).

El **recinto térmico** es la parte del túnel en la que se dispone el combustible vegetal. Tiene una longitud de 8,50 m y una sección transversal de 2,00 m x 3,00 m. Las superficies que delimitan este recinto presentan las siguientes características:

- La entrada del túnel se encuentra situada a la salida de la cámara de estabilización del ventilador.
- Las paredes laterales están formadas por placas de amianto-cemento, de 2,00 x 0,20 m y 6 mm de espesor. Las placas son móviles en el sentido de la longitud del túnel, de modo que constituyen un cerramiento discontinuo. Este cerramiento protege al fuego de las perturbaciones exteriores que pudieran afectarle lateralmente, permitiendo, no obstante, el aporte de oxígeno, a la vez que posibilita visualizar el interior del recinto térmico.
- La salida del túnel (extremo opuesto al ventilador) se cierra, durante las quemas, con una tela metálica de 6 mm x 6 mm de luz. El mismo tipo de tela metálica cierra la parte superior del túnel desde el extremo superior de las placas de amianto-cemento.

En el interior del recinto, y a lo largo del metro central, se encuentra un tren móvil constituido por ocho vagoneas independien-

tes de 1,00 m x 0,80 m x 0,25 m. Las vagoneas están rellenas de grava recubierta con una capa de arena. De este modo forman una superficie de 8,00 x 0,80 m sobre la que se dispone el complejo de combustible a ensayar.

El **ventilador**, destinado a crear un flujo de aire que simule la acción del viento en el recinto térmico, está accionado por un motor con una potencia de 50 CV, y dotado con un sistema electrónico de variación del flujo, que permite obtener en la parte central del recinto térmico velocidades de viento comprendidas entre 1 y 7 m.s⁻¹.

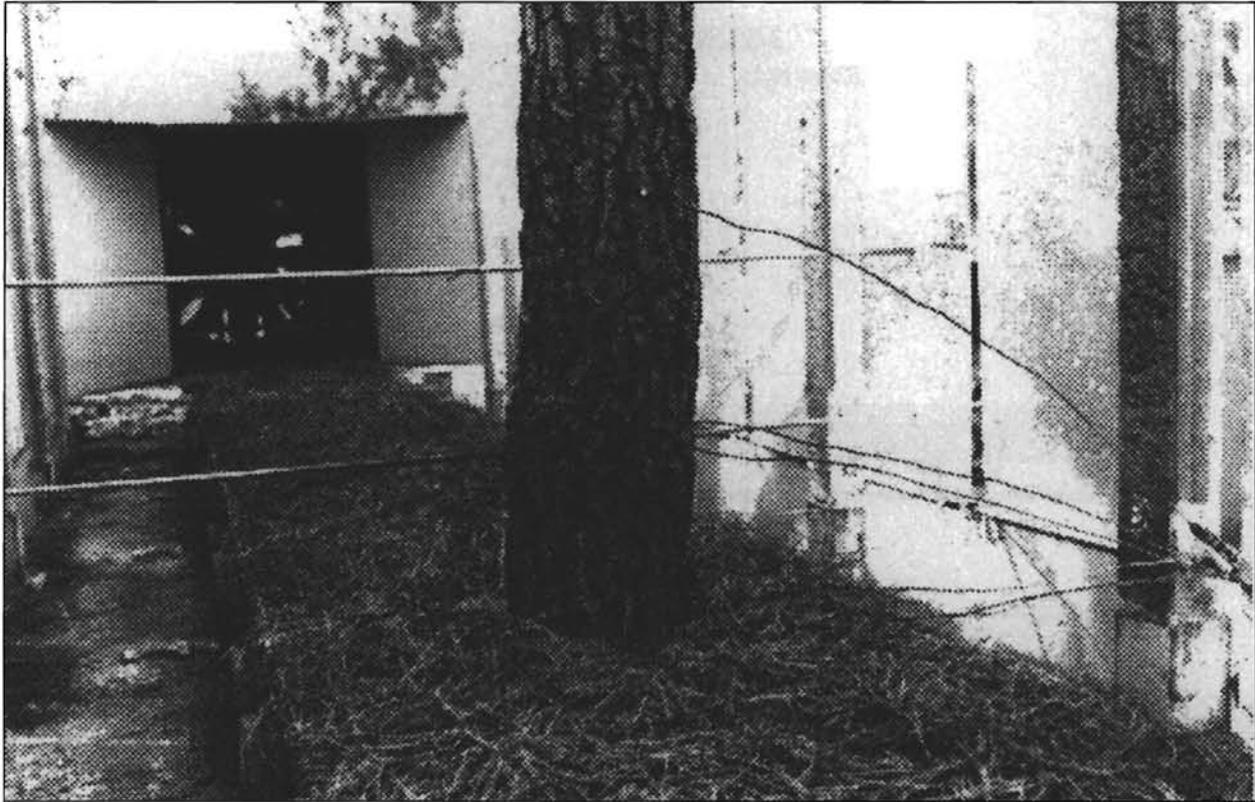
Entre el ventilador y la entrada del túnel se encuentra situada una cámara de estabilización, destinada a reducir la turbulencia del flujo de aire producido por el ventilador.

El **sistema electrónico** de captación de temperaturas tiene por objeto la captura y el almacenamiento de las temperaturas alcanzadas durante las quemas, en distintas posiciones en el interior del recinto térmico. Está formado por los siguientes elementos:

- Termopares de tipo K, con sonda de 1 m de longitud y 3 mm de diámetro. Permiten la medición de la temperatura en un rango de 0 a 1.200 °C.
- Un convertidor analógico-digital, al que se conectan los termopares mediante sus correspondientes cables de compensación.
- Un ordenador personal.

El complejo de combustible estuvo constituido por hojarasca (capas OL y OF) y troncos de *Pinus pinaster*. Dicho combustible se recogió en el Monte Coirego (Cotobade), enclavado en la provincia de Pontevedra. Las características del lugar y de la masa de los que procede el combustible son las siguientes:

- Tipo de suelo: granítico.
- Altitud: 650 m.
- Exposición: Norte-Oeste.
- Arbolado: *Pinus pinaster* Ait.
- Densidad: 1.150 pies/ha.
- Altura media: 14,5 m.
- Diámetro medio: 20 cm.



Fotografía 1. Aspecto del combustible, el tronco y los termopares en el túnel de viento antes de iniciar un ensayo

Edad: 25 años.

Espesor de la cubierta muerta (OL + OF):
6 cm.

Vegetación predominante en el sotobosque: *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn in Decken.

Otras: *Agrostis setacea*, *Lithodora diffusa* Lag., *Cytisus scoparius* (L.) Link.

En cada uno de los ensayos se dispuso la hojarasca a lo largo de seis vagonetas de $0,80 \text{ m}^2$ ($1,00 \text{ m} \times 0,80 \text{ m}$), introduciendo en la cuarta vagoneta (en el sentido de avance del fuego) una troza, de la parte basal del árbol, de aproximadamente $1,5 \text{ m}$ de longitud (Fotografía 1 y Figura 1).

La carga de hojarasca no se consideró como variable, fijándose en $0,850 \text{ kg.m}^{-2}$ para la capa OL y $0,700 \text{ kg.m}^{-2}$ para la capa OF. Este valor se eligió a partir de los datos obtenidos en el inventario de combustible realizado en el lugar de recogida de éste.

Para llevar a cabo el estudio del régimen térmico en los troncos y en sus proximidades, se dispusieron 16 termopares del tipo anteriormente descrito.

En los troncos, los termopares se fijaron en las caras de barlovento y de sotavento, sobre la corteza, a 0, 25 y 50 cm sobre el suelo y, bajo la corteza (en el cambium), a 0 y 25 cm sobre el suelo. Las temperaturas del aire se midieron, asimismo, a 0, 25 y 50 cm del suelo, aproximadamente a 50 cm del tronco, en las zonas situadas delante y detrás de éste, en el sentido de avance del fuego. De esta manera quedan definidas tres “alturas” y seis “posiciones” de medición (antes del tronco; en la cara de barlovento del tronco sobre la corteza y en el cambium; en la cara de sotavento del tronco sobre la corteza y en el cambium; y después del tronco. La Figura 1 esquematiza la disposición de los termopares.

Las variables consideradas para el estudio del comportamiento del fuego y del régimen

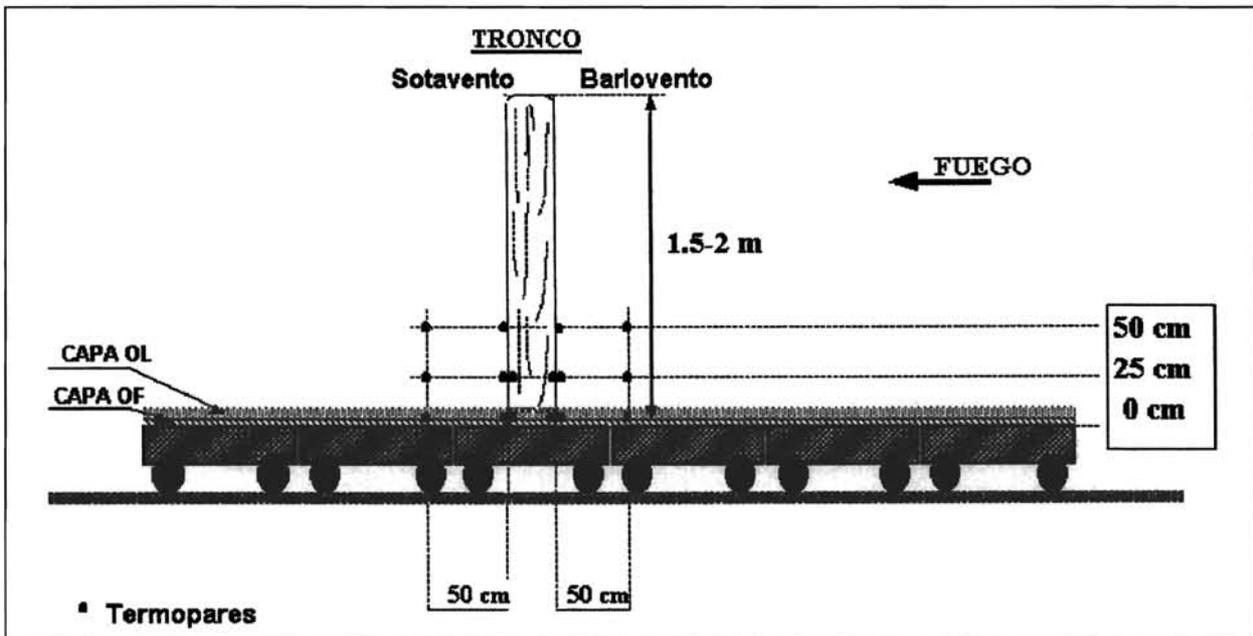


Figura 1. Disposición del combustible, el tronco y los termopares

térmico tuvieron los siguientes rangos previamente seleccionados:

- **Humedad del combustible (capa OL).** Se determinó mediante secado en estufa de 3 muestras, tomadas inmediatamente antes de cada uno de los ensayos. Los rangos preseleccionados se han conseguido por acondicionamiento del combustible en cámara, a diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa.

Humedad baja (H_b): 6 - 14%

Humedad media (H_m): 15 - 22%

Humedad alta (H_a): 23 - 30%

- **Velocidad del viento** (todos los ensayos se han realizado con viento nulo o a favor del viento)

Viento bajo (V_1): 0,0 – 1,0 m.s⁻¹

Viento medio (V_2): 1,1 – 3,5 m.s⁻¹

Viento alto (V_3): 3,6 – 5,0 m.s⁻¹

- **Diámetro del tronco**

Tronco de diámetro 10 cm (T10): 10 - 16 cm

Tronco de diámetro 20 cm (T20): 17 - 23 cm

Tabla 1. Valores medios y errores típicos de las variables iniciales de los ensayos

Variable inicial	Media	Error típico
Carga OL (kg.m ⁻²)	0,851	0,009
Carga OF (kg.m ⁻²)	0,701	0,033
Espesor OL (mm)	4,91	0,16
Espesor OF (mm)	2,40	0,12
Humedad baja OL (%)	13,2	0,3
Humedad media OL (%)	18,3	0,5
Humedad alta OL (%)	29,3	1,5
Humedad OF (%)	92,1	7,8

Las Tablas 1 y 2 recogen los valores medios y los errores típicos de las variables iniciales de los ensayos y de las características de los troncos, respectivamente.

Comportamiento del fuego

Los parámetros considerados fueron la **velocidad de propagación** (VP, en m.min⁻¹), y la **altura máxima alcanzada por las llamas** (A, en cm).

Tabla 2. Valores medios y errores típicos de las características de los troncos

Características de los troncos	Tronco de diámetro 10 cm		Tronco de diámetro 20 cm	
	Media	Error típico	Media	Error típico
Peso fresco (kg)	17,3	1,0	39,7	1,4
Diámetro testa (cm)	11,4	4,0	18,1	2,4
Diámetro pie (cm)	14,6	3,6	23,3	3,8
Espesor corteza testa (mm)	8,1	0,6	16,5	0,8
Espesor corteza pie (mm)	15,2	1,1	24,3	0,9
Humedad corteza exterior	39,6	4,9	37,3	2,1
Humedad corteza interior	288,5	14,4	284,9	12,4
Humedad madera	132,5	2,9	139,6	2,4

En las condiciones consideradas, el fuego no progresó o se detuvo sin haber recorrido en su totalidad la franja de combustible dispuesta en el túnel, cuando la velocidad del viento era baja y la humedad del combustible elevada.

En los casos en que el fuego progresó a lo largo de toda la longitud de la franja de combustible, la velocidad de propagación estuvo comprendida entre 0,121 m.min⁻¹ (para la humedad del combustible alta y la velocidad del viento baja) y 3,000 m.min⁻¹ (para la humedad del combustible baja y la velocidad del viento alta). En general, fue baja (inferior a 2 m.min⁻¹, según la clasificación de VEGA, 1987), dentro del rango típico de los fuegos prescritos bajo arbolado.

Las llamas alcanzaron una altura máxima comprendida entre 20 y 70 cm. El valor máximo se obtuvo con una humedad del combustible y velocidad del viento bajas.

El **régimen térmico** en los troncos se analizó teniendo en cuenta la **temperatura máxima** (TMAX, en °C) y el **tiempo en que la temperatura superó los 60 °C** (TT60, en s), en los puntos en los que se situaron los termopares, según la Figura 1.

Se analizó mediante ANOVAs el efecto de la "posición" en cada "altura de medición", y el efecto de la "altura de medición" en cada "posición", para el conjunto de los ensayos.

Asimismo, se midió la **altura de chamuscado** en el tronco (ACH, en cm), a barlovento y a sotavento, al ser el chamuscado un efecto del fuego sobre los troncos, apreciable visualmente.

El efecto de las variables "Contenido de humedad del combustible", "Velocidad del viento" y "Diámetro del tronco", sobre el régimen térmico y la altura de chamuscado en el tronco, se estudió mediante un ANOVA de tres factores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperaturas máximas

Las Tablas 3a, 3b y 3c presentan los valores medios de las temperaturas máximas registradas en las distintas alturas y posiciones de medición consideradas, de acuerdo a la Figura 1.

El valor máximo de TMAX (646 °C) se registró a 0 cm de altura, en la posición de después del tronco, con humedad del combustible baja y velocidad del viento alta, y para tronco de diámetro 10 (T10). Bajo las mismas condiciones de humedad del combustible y velocidad del viento, el valor máximo sobre el tronco (551 °C), se obtuvo a 25 cm de altura, en la posición de sotavento, para tronco de diámetro 20 (T20).

Las temperaturas máximas en el cambium superaron, en ocasiones, los 60 °C, tempera-

Tabla 3 a. Valores medios de las temperaturas máximas (°C) registradas en las distintas alturas y posiciones consideradas con respecto al sentido de progresión del fuego (Velocidad del viento alta). (*: no hay termopar; - : falta el dato)

Altura (cm)	Troncos de diámetro 10 cm						Troncos de diámetro 20 cm					
	Antes del tronco	Barlovento		Sotavento		Después del tronco	Antes del tronco	Barlovento		Sotavento		Después del tronco
		corteza	cambium	cambium	corteza			corteza	cambium	cambium	corteza	
Humedad del combustible baja												
50	79	44	*	*	124	190	63	63	*	*	267	311
25	582	84	36	47	223	386	500	128	18	103	551	467
0	543	378	74	65	403	646	535	234	40	77	306	622
Humedad del combustible media												
50	22	38	*	*	98	-	22	51	*	*	157	-
25	223	64	23	50	127	-	256	84	19	30	288	-
0	532	205	57	26	249	377	533	179	23	20	142	439
Humedad del combustible alta												
50	28	33	*	*	95	-	21	21	*	*	68	-
25	128	42	21	68	186	-	66	28	15	33	145	-
0	567	175	80	55	243	515	188	79	17	19	186	417

Tabla 3 b. Valores medios de las temperaturas máximas (°C) registradas en las distintas alturas y posiciones consideradas con respecto al sentido de progresión del fuego (Velocidad del viento media). (*: no hay termopar; - : falta el dato)

Altura (cm)	Troncos de diámetro 10 cm						Troncos de diámetro 20 cm					
	Antes del tronco	Barlovento		Sotavento		Después del tronco	Antes del tronco	Barlovento		Sotavento		Después del tronco
		corteza	cambium	cambium	corteza			corteza	cambium	cambium	corteza	
Humedad del combustible baja												
50	233	106	*	*	187	217	132	94	*	*	237	179
25	416	127	32	50	333	347	398	149	19	80	464	356
0	443	347	55	46	316	463	452	427	28	77	431	493
Humedad del combustible media												
50	119	85	*	*	113	131	21	52	*	*	174	131
25	299	103	26	79	167	196	444	93	19	28	252	152
0	453	256	74	119	340	414	463	227	30	78	261	494
Humedad del combustible alta												
50	93	-	*	*	137	118	32	63	*	*	166	87
25	358	-	44	146	-	-	181	92	14	21	258	129
0	370	283	76	176	412	242	454	201	23	13	185	367

tura considerada letal para los tejidos vegetales (WALKER & al., 1983). A barlovento, a 25 cm de altura, dicha temperatura no se superó en ninguna de las condiciones consideradas y a 0 cm, solamente, en el caso de troncos de diámetro 10 (T10).

El valor máximo de TMAX en el cambium (176 °C) se obtuvo en la cara de sotavento, a 0 cm de altura, con humedad de combustible alta y velocidad del viento media, para un tronco de diámetro 10. Las temperaturas máximas en el cambium

Tabla 3 c. Valores medios de las temperaturas máximas (°C) registradas en las distintas alturas y posiciones consideradas con respecto al sentido de progresión del fuego (Velocidad del viento baja). (*: no hay termopar; - : falta el dato)

Altura (cm)	Troncos de diámetro 10 cm						Troncos de diámetro 20 cm					
	Antes del tronco	Barlovento		Sotavento		Después del tronco	Antes del tronco	Barlovento		Sotavento		Después del tronco
		corteza	cambium	cambium	corteza			corteza	cambium	cambium	corteza	
Humedad del combustible baja												
50	23	55	*	*	145	116	17	53	*	*	18	133
25	200	78	36	95	270	210	154	50	15	16	176	210
0	373	327	95	22	79	415	392	133	17	35	275	404
Humedad del combustible media												
50	96	36	*	*	29	46	79	139	*	*	79	116
25	208	-	16	15	-	81	161	337	24	24	182	110
0	290	100	16	28	108	344	417	198	34	34	255	266
Humedad del combustible alta												
50	51	30	*	*	43	El	No se presentan datos para los ensayos realizados en estas condiciones dado que, con ellas, el fuego no prosperó.					
25	123	73	22	30	65	fuego se						
0	463	189	52	41	284	detuvo						

presentaron un retraso, con respecto a las alcanzadas, a la misma altura, sobre la corteza, comprendido entre 5 y 185 segundos, a barlovento, y entre 15 y 425 segundos, a sotavento.

Efecto de la posición de medición:

El ANOVA para TMAX en cada altura de medición, para el conjunto de los ensayos, pone de manifiesto que existe un efecto significativo de la posición ($p < 0,001$ a 0, 25 y 50 cm). Las pruebas de Newman-Keuls (SNEDECOR & COCHRAN, 1984), de comparación múltiple de las temperaturas máximas, indican que el efecto de la posición fue diferente en las distintas alturas.

Las Figuras 2a, 2b y 2c presentan, para el conjunto de los ensayos, las medias de las TMAX para cada posición, a 0, 25 y 50 cm de altura, respectivamente, y los intervalos de confianza de estas medias, con un nivel de confianza del 95%, calculadas con el método de mínimas diferencias significativas (SNEDECOR & COCHRAN, 1984).

En la Figura 2a se observa que, a 0 cm, en las posiciones “antes del tronco” (A) y

“después del tronco” (D), los intervalos de confianza de las temperaturas se superponen, lo que indica que no son significativamente diferentes. Lo mismo ocurre, por una parte, entre las temperaturas sobre la corteza, a barlovento (BC) y a sotavento (SC) y, por otra, en el cambium a barlovento (BC) y a sotavento (SC). Sin embargo esta “simetría” no se repitió en las alturas superiores. Así, a 25 cm (Figura 2b), TMAX media fue mayor en la posición de “antes del tronco” (A) que en la de “después del tronco” (D), mientras que, sobre la corteza, TMAX media fue mucho mayor a sotavento (SC) que a barlovento (BC). También a 50 cm (Figura 2c) TMAX media fue mayor a sotavento (SC) que a barlovento (BC).

En las Tablas 3a, 3b y 3c se observa que, para todas las alturas de medición, la temperatura máxima sobre la corteza fue, generalmente, mayor a sotavento que a barlovento. Las excepciones de esta tendencia tuvieron lugar, en su mayor parte, en los ensayos realizados con velocidad del viento baja. El hecho de registrarse mayores temperaturas a sotavento que a barlovento se debe al denominado “efecto chimenea”, recogido en diversos trabajos (FAHNESTOCK & HARE,

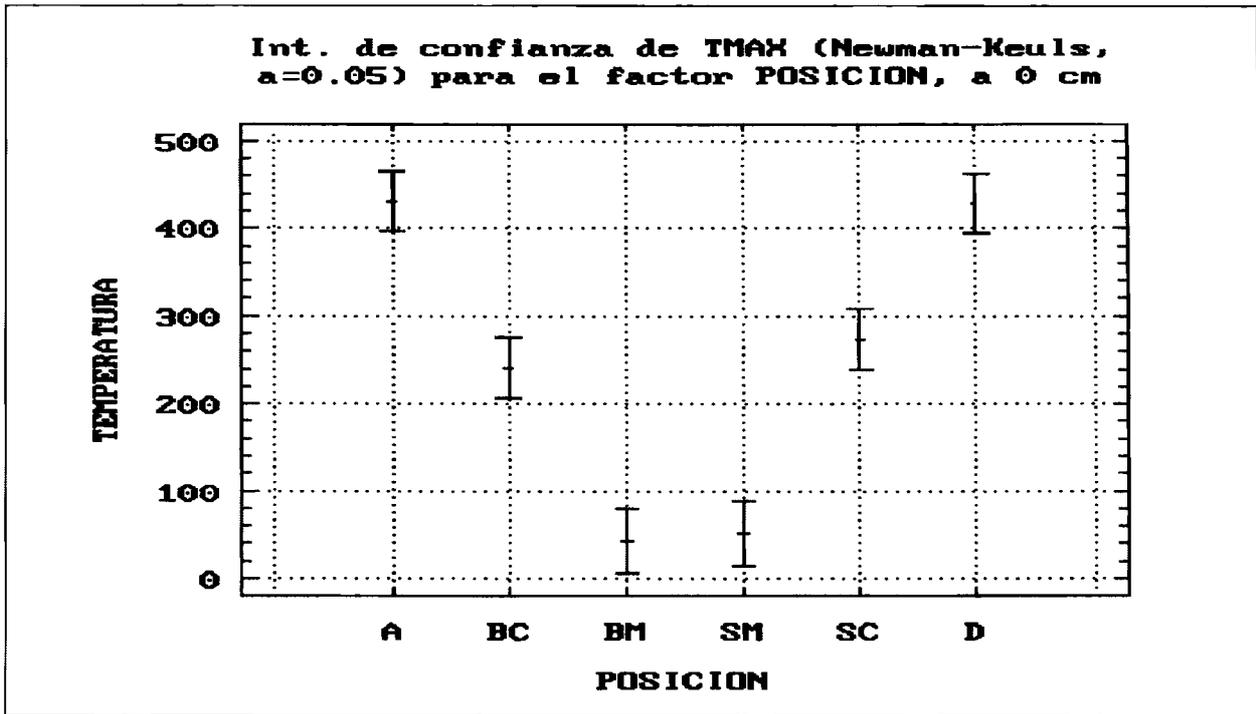


Figura 2 a

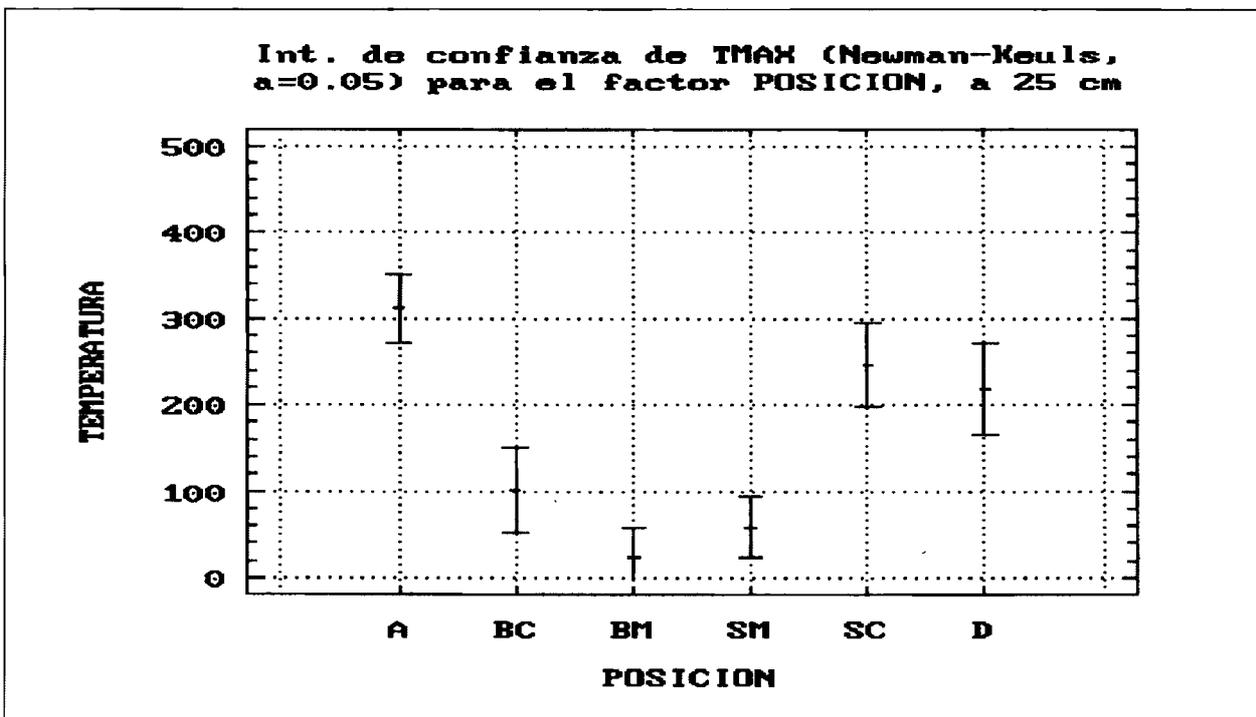


Figura 2 b

1964; GILL, 1974; TUNSTALL & al., 1976, etc) que muestran la incidencia que el propio árbol tiene sobre la geometría de la llama; la interacción árbol-fuego se traduce, de modo

general, en un calentamiento distinto en las caras de barlovento y de sotavento, resultando más intenso en esta última y aumentando la diferencia con la distancia al suelo. De

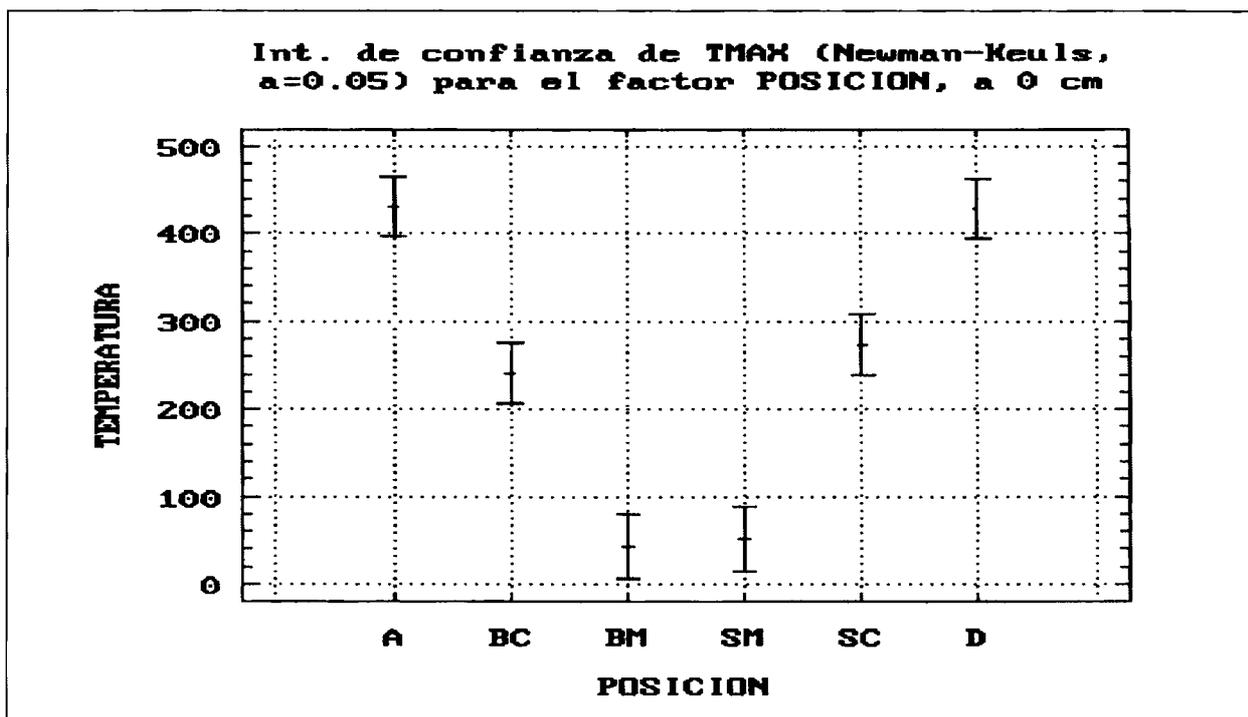


Figura 2 c

acuerdo con los trabajos mencionados, el efecto chimenea se ve potenciado por la velocidad del viento, el tamaño del tronco y la pendiente del terreno.

En el cambium, TMAX también fue, en general, superior a sotavento que a barlovento, aunque, bajo algunas condiciones de ensayo, sobre todo en troncos de diámetro 10, a 0 cm de altura, esta relación se invierte, siendo mayor a barlovento (Tablas 3a, 3b y 3c).

Efecto de la altura de medición:

El ANOVA para TMAX en cada posición de medición, para el conjunto de los ensayos, pone de manifiesto que existe un efecto significativo de la altura en todas estas posiciones ($p < 0,001$), salvo en el cambium, a sotavento ($p = 0,6090$). El efecto se traduce en que, en general, las temperaturas máximas disminuyeron al aumentar la altura de medición, alcanzándose el valor máximo a 0 cm.

Sin embargo, hay que destacar que en la corteza de la cara de sotavento, TMAX a 0 cm y TMAX a 25 cm no presentaron diferencias significativas, observándose (Tablas

3a, 3b y 3c) que, bajo algunas condiciones de quema, la temperatura máxima fue mayor a 25 que a 0 cm. Este hecho tiene, también, su explicación en la forma que adopta la llama cuando rodea al tronco. En efecto, tanto experiencias de laboratorio (GILL, 1974) como observaciones en campo (VEGA, 1981) indican que queda, en la base del tronco, una porción “en sombra” cuando la llama asciende por el tronco en la cara de sotavento, haciendo que el calentamiento sea menor que en alturas superiores.

La relación entre las temperaturas máximas a sotavento y a barlovento sobre la corteza, calculada a partir de las medias de los valores obtenidos en todos los ensayos, fue la siguiente:

- a) a 0 cm, TMAX (sotavento) = 1,1 TMAX (barlovento)
- b) a 25 cm, TMAX (sotavento) = 2,4 TMAX (barlovento)
- c) a 50 cm, TMAX (sotavento) = 2,2 TMAX (barlovento)

FAHNESTOCK & HARE, 1964 obtuvieron resultados similares en quemas realizadas en

Tabla 4. Tabla-resumen del ANOVA con los valores de F y la significación para los efectos del diámetro del tronco, de la humedad del combustible y de la velocidad del viento sobre las temperaturas máximas (***: $p = 0.01$; **: $p = 0.05$)

POSICIÓN - ALTURA			Diámetro del tronco	Humedad del combustible	Velocidad del viento
Barlovento	Corteza	0 cm	0,372	4,098**	2,956
		25 cm	0,629	0,947	0,855
		50 cm	0,759	1,842	1,877
	Cambium	0 cm	18,088***	0,040	1,446
		25 cm	10,788***	0,347	0,473
Sotavento	Cambium	0 cm	5,180**	0,138	2,182
		25 cm	3,342	0,868	1,883
	Corteza	0 cm	0,000	1,030	2,514
		25 cm	4,277	6,698	2,544
		50 cm	2,387	1,661	2,048

una masa de *Pinus palustris*:

- a) a 0 cm, TMAX (sotavento) = 1,2
TMAX (barlovento)
- b) a 30 cm, TMAX (sotavento) = 2,1
TMAX (barlovento)
- c) a 60 cm, TMAX (sotavento) = 1,9
TMAX (barlovento)

Efecto de las variables iniciales:

El efecto de las variables iniciales sobre las temperaturas máximas en las distintas alturas de medición, sobre la corteza y en el cambium de las caras de barlovento y de sotavento, se puede observar en la Tabla 4 que presenta los resultados de los correspondientes análisis de la varianza.

De la Tabla 4 se desprende que el diámetro del tronco tuvo un efecto significativo sobre la temperatura máxima registrada en el cambium, a 0 y 25 cm a barlovento, y a 0 cm a sotavento. Estas temperaturas fueron, en general, mayores en los troncos de diámetro bajo (T10) (Tablas 3a, 3b y 3c). Este hecho se debe al aumento del espesor de la corteza al incrementarse el diámetro (en los troncos utilizados en este estudio, el coeficiente de correlación entre el diámetro del tronco y el espesor de la corteza fue 0,838 en el pie, y

de 0,815 en la testa). En este sentido, el espesor de la corteza, directamente relacionado con el diámetro, ha sido la característica morfológica más utilizada para justificar la resistencia de los árboles a las heridas producidas por el fuego (MARTIN, 1963; REIFSNYDER & al., 1967; RYAN & REINHARDT, 1988; UHL & KAUFFMAN, 1990; etc.).

Por lo que respecta a la humedad del combustible, ésta afectó significativamente (Tabla 4) a las temperaturas máximas alcanzadas sobre la corteza, a barlovento, a 0 cm de altura, y a sotavento, a 25 cm, siendo estas temperaturas, como media, mayores con menor humedad del combustible. En las Tablas 3a, 3b y 3c se observa que sobre la corteza, las temperaturas máximas mostraron tendencia a aumentar al disminuir la humedad del combustible. Esta tendencia no se apreció claramente en las temperaturas máximas alcanzadas en el cambium.

Finalmente, como se aprecia en la Tabla 4, la velocidad del viento no tuvo un efecto significativo sobre las temperaturas máximas alcanzadas en el tronco.

Tiempo con temperatura superior a 60 °C

Las Tablas 5a, 5b y 5c presentan los valores medios de los tiempos en que la tempera-

Tabla 5 a. Valores medios de las temperatura superior a 60°C (s) registradas en las distintas alturas y posiciones consideradas con respecto al sentido de progresión del fuego (Velocidad del viento alta). (*: no hay termopar; - : falta el dato)

Altura (cm)	Troncos de diámetro 10 cm				Troncos de diámetro 20 cm			
	Barlovento		Sotavento		Barlovento		Sotavento	
	corteza	cambium	cambium	corteza	corteza	cambium	cambium	corteza
Humedad del combustible baja								
50	0	*	*	152	10	*	*	182
25	75	0	0	200	130	0	175	300
0	205	100	40	310	175	0	135	295
Humedad del combustible media								
50	0	*	*	120	0	*	*	130
25	30	0	0	170	65	0	0	190
0	140	0	0	180	155	0	0	250
Humedad del combustible alta								
50	0	*	*	130	0	*	*	15
25	0	0	110	175	0	0	0	110
0	135	100	0	245	30	0	0	130

Tabla 5 b. Valores medios de las temperatura superior a 60°C (s) registradas en las distintas alturas y posiciones consideradas con respecto al sentido de progresión del fuego (Velocidad del viento media). (*: no hay termopar; - : falta el dato)

Altura (cm)	Troncos de diámetro 10 cm				Troncos de diámetro 20 cm			
	Barlovento		Sotavento		Barlovento		Sotavento	
	corteza	cambium	cambium	corteza	corteza	cambium	cambium	corteza
Humedad del combustible baja								
50	95	*	*	235	82	*	*	247
25	135	0	0	300	155	0	85	320
0	180	0	0	325	227	0	180	472
Humedad del combustible media								
50	90	*	*	192	0	*	*	202
25	110	0	65	235	102	0	0	270
0	248	55	233	388	185	0	195	300
Humedad del combustible alta								
50	-	*	*	220	20	*	*	230
25	-	0	205	-	130	0	0	290
0	295	165	305	410	207	0	0	245

tura superó los 60 °C en las distintas alturas y posiciones de medición sobre y bajo la corteza de los troncos.

El tiempo mayor (472 segundos) se obtuvo, sobre la corteza, a sotavento a 0 cm de

altura, con humedad del combustible baja y velocidad del viento media, en tronco de diámetro 20. En el cambium, el tiempo mayor (305 segundos) se alcanzó a sotavento, a 0 cm de altura, en la misma posición, con humedad del combustible alta y veloci-

Tabla 5 c. Valores medios de las temperatura superior a 60°C (s) registradas en las distintas alturas y posiciones consideradas con respecto al sentido de progresión del fuego (Velocidad del viento baja). (*: no hay termopar; -: falta el dato)

Altura (cm)	Troncos de diámetro 10 cm				Troncos de diámetro 20 cm			
	Barlovento		Sotavento		Barlovento		Sotavento	
	corteza	cambium	cambium	corteza	corteza	cambium	cambium	corteza
Humedad del combustible baja								
50	0	*	*	265	0	*	*	0
25	120	0	100	335	0	0	0	225
0	220	180	0	335	215	0	0	275
Humedad del combustible media								
50	0	*	*	0	175	*	*	180
25	-	0	0	-	240	0	0	380
0	75	0	0	212	275	0	0	425
Humedad del combustible alta								
50	0	*	*	0	No se presentan datos para los ensayos realizados en estas condiciones dado que, con ellas, el fuego no prosperó.			
25	120	0	0	45				
0	235	0	0	305				

dad del viento media, en tronco de diámetro 10.

Efecto de la posición de medición:

El ANOVA para TT60 en cada altura de medición, para el conjunto de los ensayos, pone de manifiesto que existe un efecto significativo de la posición ($p < 0,001$ a 0, 25 y 50 cm). En cada altura, TT60 sobre la corteza y en el cambium fue, en general, mayor o igual a sotavento que a barlovento. No obstante, en algunos ocasiones, en los troncos de diámetro pequeño (T10), el tiempo fue, en el cambium, mayor a barlovento que a sotavento.

Efecto de la altura de medición:

El ANOVA para TT60 en cada posición de medición indica que existe un efecto significativo de la altura en todas estas posiciones ($p < 0,05$), salvo en el cambium en la cara de sotavento ($p = 0,5259$). En general, este parámetro disminuyó al aumentar la altura de medición, alcanzando su valor máximo a 0 cm aunque, en algunos casos, en la cara de

sotavento, TT60 fue mayor a 25 que a 0 cm, al igual que en las TMAX.

La relación entre los TT60 sobre la corteza a barlovento y a sotavento, calculada a partir de las medias de los valores obtenidos en todos los ensayos, fue la siguiente:

- a 0 cm, TT60 (sotavento) = 1,6 TT60 (barlovento)
- a 25 cm, TT60 (sotavento) = 2,5 TT60 (barlovento)
- a 50 cm, TT60 (sotavento) = 6,1 TT60 (barlovento)

Efecto de las variables iniciales:

El efecto de las variables iniciales sobre los tiempos en que la temperatura superó los 60 °C en las distintas posiciones y alturas de medición, sobre y bajo la corteza, se observa en la Tabla 6 que presenta los resultados de los correspondientes ANOVAs.

De dicha Tabla se desprende que solamente el diámetro del tronco tuvo un efecto significativo sobre TT60 en el cambium, a barlovento, a 0 cm de altura, siendo este

Tabla 6. Tabla-resumen del ANOVA con los valores de F y la significación para los efectos del diámetro del tronco, de la humedad del combustible y de la velocidad del viento sobre las temperaturas superior a 60°C (**: $p = 0.05$; -: $p = 0.05$)

POSICIÓN - ALTURA			Diámetro del tronco	Humedad del combustible	Velocidad del viento
Barlovento	Corteza	0 cm	0,138	0,630	2,906
		25 cm	0,082	0,321	1,792
		50 cm	0,150	0,616	1,063
	Cambium	0 cm	7,801	0,393	0,089
		25 cm	--	--	--
Sotavento	Cambium	0 cm	2,221	0,505	2,869
		25 cm	1,305	0,488	0,740
	Corteza	0 cm	0,469	1,299	2,170
		25 cm	1,310	2,900	1,301
		50 cm	0,326	1,953	2,252

Tabla 7. Valores medios de las temperaturas máximas de chamuscado (cm). a barlovento y a sotavento de los troncos

Troncos de diámetro 10 cm						Troncos de diámetro 20 cm					
Humedad baja		Humedad media		Humedad alta		Humedad baja		Humedad media		Humedad alta	
Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento
Velocidad del viento alta											
12	34	9	35	7	46	14	76	8	43	3	26
Velocidad del viento media											
24	31	12	37	20	45	12	64	8	33	8	24
Velocidad del viento baja											
10	45	7	6	10	15	3	29	29	26	0	0

tiempo, como media, mayor en los troncos de diámetro 10 que en los troncos de diámetro 20, en los que no se superó nunca la temperatura crítica en aquella posición. Este hecho pone, de nuevo, de manifiesto el papel protector del espesor de la corteza que ya se resaltó anteriormente.

Por lo que respecta al efecto de la humedad del combustible, se observa (Tablas 5a, 5b y 5c) que, sobre la corteza, para las velocidades del viento alta y media, TT60 tendió a aumentar al disminuir el valor de esta variable. Esta tendencia no se apreció claramente en los tiempos registrados en el cambium.

Finalmente, no se apreció un efecto claro de la velocidad del viento sobre los tiempos en que la temperatura superó los 60 °C.

Altura de chamuscado

En la Tabla 7 se presentan los valores medios de las alturas máximas de chamuscado, a barlovento y a sotavento de los troncos.

Se observa que, salvo para los ensayos realizados con la velocidad del viento baja y la humedad del combustible media, siempre se alcanzaron mayores alturas de chamuscado en la cara de sotavento del tronco que en

la de barlovento, obteniéndose el valor máximo (76 cm), en tronco de diámetro 20, humedad del combustible baja y velocidad del viento alta. La altura máxima de chamuscado a sotavento alcanzó, como media, un valor tres veces superior al alcanzado a barlovento.

Efecto de las variables iniciales:

Aunque el ANOVA para las alturas de chamuscado no pone de manifiesto la existencia de un efecto significativo del diámetro del tronco, la humedad del combustible o la velocidad del viento ($p > 0,05$), la Tabla 7 muestra que en los troncos de diámetro 20, la altura de chamuscado aumentó al disminuir la humedad del combustible (salvo para la velocidad del viento baja), incrementándose, a sotavento, al hacerlo la velocidad del viento. Estos hechos no se observaron para los troncos de diámetro menor.

La relación que liga la altura de chamuscado a sotavento con la altura de las llamas, expresadas en cm, en esta posición viene dada por la ecuación:

$$\text{ACH Sotavento} = 1,276 A - 10,132 \quad r^2 = 0,803$$

CONCLUSIONES

En primer lugar, cabe destacar la distribución espacial de las temperaturas debido al “efecto chimenea” producido en la cara de sotavento. Este efecto da lugar a temperaturas máximas y tiempos con temperatura superior a 60 °C mayores a sotavento que a barlovento. La diferencia entre los tiempos registrados en ambas caras aumenta con la distancia al suelo, mientras que en el caso de las temperaturas la diferencia se hace máxima a 25 cm de altura.

En cuanto a las diferentes alturas de medición consideradas, las temperaturas máximas y los tiempos con temperatura superior a 60 °C son mayores a 0 cm y disminuyen con la altura de medición. Una excepción a este hecho se produce en la cara de sotavento, tanto en la superficie de la corteza como en

el cambium donde, a menudo, las temperaturas máximas registradas son mayores a 25 que a 0 cm. Esta circunstancia se debe al “efecto sombra” que se produce en el calentamiento de la cara de sotavento.

El papel protector de la corteza se pone de manifiesto a través del incremento de su espesor, directamente relacionado con el diámetro del tronco, que conlleva temperaturas máximas y tiempos con temperatura superior a 60 °C menores en el cambium, especialmente a sotavento, en los troncos de diámetro mayor a pesar de alcanzar temperaturas máximas superiores en la superficie. En los troncos con diámetro 20 (T20), las temperaturas máximas nunca han superado los 60 °C para el contenido de humedad alto, y sólo puntualmente para el medio. En los troncos pequeños (T10), con en esas mismas condiciones de humedad, se superaron los 60 °C cuando la velocidad del viento fue superior a 1 m.s⁻¹.

En la superficie de la corteza, se obtienen las mayores temperaturas máximas con los contenidos de humedad del combustible más bajos. Sin embargo, esta tendencia no se observa en el cambium, donde incluso en algunos casos, para las velocidades de viento alta y media, se invierte la relación entre las temperaturas máximas alcanzadas y la humedad del combustible.

Las temperaturas máximas y los tiempos con temperatura superior a 60 °C resultan independientes de la velocidad del viento.

Paralelamente a las mencionadas diferencias que se producen, en las temperaturas y los tiempos, entre ambas caras del tronco, se registran mayores alturas de chamuscado a sotavento que a barlovento. Este parámetro, íntimamente ligado a los efectos del fuego en el arbolado, puede predecirse con bastante seguridad a partir de la altura máxima alcanzada por las llamas en la cara de sotavento.

Los resultados obtenidos muestran que en lo que respecta al calentamiento de los troncos, las quemas prescritas llevadas a cabo con un contenido de humedad de la hojarasca mayor a 15%, y dentro del rango de velocidad del viento considerado (0-5 m.s⁻¹), no

deben producir riesgos en la supervivencia de los árboles con diámetro superior a 16 cm.

Consecuentemente, debe considerarse que las quemas prescritas, realizadas bajo determinadas condiciones, constituyen una herramienta segura y eficaz para el control del combustible peligroso, y por lo tanto en la prevención de los Incendios Forestales.

AGRADECIMIENTOS

A la DGXII de la UE que, a través del programa Environment financió el proyecto "Forest fire prevention through prescribed burning: prediction of the effects on trees" (Contrato EV5V-CT94-0473) en el cual se enmarca este trabajo.

Al equipo del Departamento de Incendios Forestales y Protección Ambiental del CIF de Lourizán, que ha facilitado el material forestal necesario para la realización de los ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

DGCONA; 1996. Los incendios forestales en España durante 1995.

FAHNESTOCK, G.R. & R.C. HARE; 1964. Heating of tree trunks in surface fires. *Journal of Forestry*. 62(11): 799-805.

GILL, A.M.; 1974. Toward an understanding of fire-scar formation: field observation and laboratory simulation. *Forest Science*. 20: 198-205.

HERNANDO, C., M. GUIJARRO & J.A. DE LOS SANTOS; 1995. Determinación de la relación superficie/volumen de las acículas muertas. *Revista de Investigación Agraria. Sistema y Recursos Forestales*. 4(1): 73-85.

MARTIN, R.E.; 1963. Thermal properties of bark. *Forest Products Journal*. 13(10): 419-426.

MADRIGAL, A.; 1998. Problemática de la ordenación de masas artificiales en España. *Cuadernos de la S.E.C.F* nº 6: 13-20.

MMA; 1996. II Inventario Forestal de España.

REIFSNYDER, W.E., L.P. HERRINGTON & K.W. SPALT; 1967. *Thermophysical properties of bark of shotleaf, longleaf, and red pine*. Yale Univ. Sch. For. Bull. nº 70, 40 pp.

RUÍZ DE LA TORRE, J.; 1971. *Árboles y arbustos de la España peninsular*. IFIE-E.T.S.I. de Montes. Madrid, 512 pp.

RYAN, K.C. & E.D. REINHARDT; 1988. Predicting postfire mortality of seven western conifers. *Canadian Journal of Forest Research*. 18: 1291-1297.

TUNSTALL, B.R., J. WALKER & A.M. GILL; 1976. Temperature distribution around synthetic trees during grass fires. *Forest Science*. 22(3): 269-276.

UHL C. & J.B. KAUFFMAN; 1990. Deforestation, fire susceptibility and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. *Ecology*. 71(2): 437-449.

VEGA, J.A.; 1981. *Influencia de la dinámica del fuego en los daños sobre el tronco*. CIF Lourizán (Pontevedra). 14 páginas mecanografiadas.

VEGA, J.A.; 1987. *Combustibles*. In: Textos del II Curso Superior sobre Defensa contra Incendios Forestales. ICONA, MAPA. Madrid. 13 pp.

WALKER, J., R.J. RAISON & P.K. KHANNA; 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.