



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | **Plasencia**
Cáceres, Extremadura

7CFE01-388

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Evolución estacional de los combustibles forestales en el Sistema Central: el caso del monte La Sierra, la Raya, Las Dehesas y Otros (C.U.P. Nº 13, Miraflores de la Sierra, Madrid)

BLANCO DEL CAMPO, J.A.¹ y LÓPEZ ALMANSA, J.C.²

¹ Consultor.

² Departamento de Desarrollo Sostenible, Universidad Católica de Ávila.

Resumen

En este trabajo se estudia la evolución estacional de los combustibles forestales de superficie en el Sistema Central, utilizando como estudio de caso el monte “La Sierra, la Raya, las Dehesas y otros” (C.U.P. nº 13, Miraflores de la Sierra, Madrid). Para ello, a lo largo de 2012 y 2013 se cartografió su superficie definiendo unidades de vegetación diferenciadas estructuralmente en las que se midieron, sobre una red de puntos de muestreo representativos, los descriptores físicos del complejo de combustible de superficie, siguiendo las prescripciones del sistema FIREMON. La toma de datos se hizo en marzo, mayo y julio de 2013, coincidiendo con los estados de reposo vegetativo, foliación y floración, y agostamiento de las herbáceas. A partir de los datos de combustible obtenidos se simuló el comportamiento del fuego mediante el programa BehavePlus, analizándose los resultados para cada unidad de combustible. Se deduce del estudio que los combustibles forestales han ido cambiando a lo largo del período vegetativo, evolucionando hacia formas estructurales diferentes, y que estos combustibles no siempre son consistentes con los modelos normalizados, por lo que el uso acrítico de estos puede conducir a una interpretación errónea del comportamiento del fuego con los consiguientes inconvenientes en las labores de extinción y el incremento en el riesgo para los combatientes.

Palabras clave

Incendios, inventario, modelos, FIREMON, simulaciones.

1. Introducción

La vegetación sufre a lo largo del año numerosas transformaciones, relacionadas con los cambios estacionales y los procesos meteorológicos, que tienen una repercusión directa sobre la cantidad de combustible forestal disponible a lo largo del año (VÉLEZ MUÑOZ, 2009). La manera usual de describir el complejo de combustible forestal de superficie más utilizada en España y otros países ha sido adaptando los 13 modelos definidos por ROTHERMEL (1972) y ALBINI (1976). Pero el empleo de dichos modelos se encuentra restringido al periodo de mayor riesgo de incendios, coincidente con el periodo estival en la región mediterránea, en que los fuegos resultan más difíciles de controlar (ANDERSON, 1982). Tal clasificación pierde eficacia al tratar de describir el comportamiento del fuego fuera de dicho periodo, especialmente en los grupos de pastos y matorral que presentan unos procesos fisiológicos más acusados a lo largo del año. Para solventar esas carencias mostradas por los modelos de Rothermel-Albini, SCOTT & BURGAN (2005) desarrollaron su propia clasificación, constituida por cuarenta y cinco tipos de combustible y en la que se introduce el concepto de modelo dinámico, de aplicación a los modelos de combustible de superficie con presencia de herbáceas vivas, en que se presupone la transferencia de una parte del combustible vivo herbáceo a combustible de 1 hora (BURGAN, 1979). Más recientemente, RODRÍGUEZ Y SILVA & MOLINA-MARTÍNEZ (2012) desarrollaron sus propios modelos de combustibles forestales de aplicación a Andalucía basándose en los modelos de SCOTT & BURGAN (2005).

Por otra parte, las descripciones de los modelos de combustible que se hacen en las mencionadas clasificaciones son, dentro de su lógica concreción, demasiado generales para modelizar su comportamiento ante el fuego en localidades concretas. Esto supone que, para incrementar la exactitud de estas predicciones, resulta imprescindible su particularización (MOLINA TERRÉN, 2009). Sin embargo, los estudios que tratan de caracterizar los combustibles forestales en una localidad concreta son muy escasos. Además, el uso de los modelos de combustible suele estar ligado a labores de planificación de la defensa frente a incendios en los que se parte de un único mapa de modelos de combustible que no tienen en cuenta los cambios estacionales que estos sufren a lo largo del año. Este trabajo tiene por fin tratar de paliar en parte esta laguna en relación con los combustibles que aparecen en el Sistema Central.

2. Objetivos

El presente estudio tiene por objetivo analizar los cambios que experimenta el complejo de combustibles de superficie en zonas de montañas del Sistema Central a lo largo de un período vegetativo, así como simular su comportamiento ante el fuego frente a diferentes escenarios ambientales, comparándolo con las modelos de combustible de superficie de Rothermel-Albini (ROTHERMEL, 1972; ALBINI, 1976; ANDERSON, 1982), de Scott y Burgan (SCOTT & BURGAN, 2005), y UCO40 (RODRÍGUEZ Y SILVA & MOLINA-MARTÍNEZ, 2012).

3. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo se seleccionó una zona forestal del Sistema Central, coincidente con el monte “La Sierra, la Raya, las Dehesas y otros”, nº 13 del Catálogo de Montes de Utilidad Pública de la Comunidad de Madrid, situada en la vertiente sur de las denominadas sierras de la Cuerda Larga y la Morcuera, en la Sierra del Guadarrama, término municipal de Miraflores de la Sierra. El área de estudio ocupa una posición central en la vertiente sur de la Sierra de Guadarrama, y en sus cotas más altas (Puerto de La Morcuera, 1.776 m) nace el río Guadalix, que la recorre de norte a sur. Con una superficie total de 1.553,58 ha, este monte presenta un rango de altitudes de más de 1.000 metros (de 1.000 a 2.240 m), favoreciendo la presencia de numerosas formaciones vegetales vinculadas a los cambios climáticos debidos al gradiente altitudinal.

La primera fase de este estudio consistió en la delimitación, revisión de campo y cartografiado de las unidades estructurales de vegetación. Para ello se partió de la cartografía digital del Mapa de Terrenos Forestales de la Comunidad de Madrid (2009), que se revisó con las ortofotografías del PNOA del año 2011. Tras realizar una serie de correcciones se procedió al volcado de datos de las fuentes de información manejadas: parcelas pertenecientes al III Inventario Forestal Nacional (IFN3), Mapa Forestal de Madrid a escala 1:50.000, y Mapa Forestal Nacional a escala 1:200.000. Dicha información facilitó su posterior división en estratos homogéneos, obteniéndose como resultado un total de 17 tipos diferentes de unidades estructurales de vegetación (tabla 1), de las que se muestrearon las 14 que presentaban una representación superficial superior al 1%. Para su designación se empleó una clave numérica, de uno o tres dígitos, en la que el primer dígito hace referencia a la formación vegetal principal, el segundo dígito diferencia la formación por su grado de cobertura del suelo, y el tercer dígito establece una distinción en base a otras características diferenciales de cada unidad, como la altura media del complejo de combustibles, la presencia de herbáceas, hojarasca, etc. En cada unidad estructural de vegetación se seleccionó un punto de muestreo (figura 1), que se muestreó mediante el Sistema de Monitorización de los Efectos del Fuego FIREMON (LUTES *et al*, 2006). Para ello se optó por un planteamiento descriptivo que con un menor número de puntos de muestreo permitiese abarcar mayor extensión y variedad (Nivel I de la Estrategia Integral de Muestreo, ISS, de FIREMON). Las tres campañas de toma de datos se hicieron coincidir respectivamente con el estado de reposo vegetativo de la mayoría de las plantas (marzo de 2013), el inicio de la foliación y floración de numerosas especies (mayo de 2013), y la culminación del desarrollo vegetal anual y agostamiento de las herbáceas (julio de 2013).

El muestreo de campo se ajustó al protocolo de medición de los combustibles forestales de superficie del sistema FIREMON. En cada punto de muestreo se midieron hasta 12 parámetros, en transectos de 25 metros de longitud, aplicando el método de intersecciones planares (BROWN, 1974): pendiente, material leñoso caído muerto (FWD, clasificado en 1-hr, 10-hr y 100-hr), material leñoso caído de 1000-hr (CWD, mayor de 8,0 cm de diámetro), espesor de la capa de mantillo y hojarasca en el perfil del suelo, cobertura de la hojarasca, cobertura de especies leñosas vivas y muertas, altura media de especies leñosas vivas y muertas, cobertura de especies no leñosas vivas y muertas, altura media de especies no leñosas vivas y muertas. Las mediciones se realizaron a lo largo de cada transecto siguiendo la siguiente operativa: los primeros cinco metros se preservaron del pisoteo, como representativos de la parcela; entre los 5 m y 7 m, y hasta 1,70 m de altura, se contaron los elementos leñosos muertos de 1 hr y 10 hr que intersectaban con el plano vertical definido por el transecto, entre los 5 m y 10 m se contaron los elementos leñosos muertos de 100 hr, y entre los 5 m y 25 m se midió el diámetro de los elementos leñosos muertos de 1000 hr. Para la medición del resto de parámetros se levantaron dos parcelas circulares de 1 m de radio (3,14 m²), situadas respectivamente a 15 m y 25 m del inicio de cada transecto, midiéndose en cada punto el mantillo y la hojarasca, así como la cobertura de vegetación viva y muerta se estimó en un cilindro imaginario de 2 m de diámetro y 1,70 m de alto. El número de transectos por punto de muestreo varió entre 3 y 7 ((tabla 1), quedando dicho número determinado por el conteo de elementos leñosos caídos (LUTES & KEANE, 2006).

Tabla 1. Síntesis descriptiva de las unidades estructurales de vegetación y de las parcelas realizadas. *: unidades que no fueron objeto de muestreo.

Formación vegetal		Unidad estructural de vegetación	Sup. (ha)	Nº de transec.	Coord. X	Coord. Y	Altitud (m)
Sin vegetación		U-0*	83,42	-	-	-	-
Pasto de puerto alt.<0,3 m; abierto		U-1	17,39	3	431964	4522353	1764
Enebral rastrero Fcc<50%; alt.<0,5m		U-2	26,32	4	432284	4522373	1799
Matorral retamoide	Fcc>50%; alt.>1m	U-311	44,78	3	431629	4519838	1474
	Fcc<50%; 0,5>alt.>1m	U-321	126,67	4	430903	4520402	1622
	Fcc<50%; alt.<0,5m	U-322	72,70	7	431794	4522189	1778
Pinar de pino silvestre	Fcc>70%	U-411	117,20	4	430953	4519675	1638
	Fcc>70%; con restos	U-412	160,57	4	431504	4519589	1552
	Fcc<70%	U-421	33,38	4	430998	4519519	1672
Melojar	Fcc>70%; hojarasca	U-511	337,51	7	433220	4517990	1327
	Fcc>70%; mat. y herb.	U-512	163,29	7	434047	4516528	1094
	40>Fcc>50%; mat. y herb.	U-521	53,20	7	432297	4530030	1365
	Fcc<40%; herbáceas	U-531*	7,47	-	-	-	-
	Fcc<40%; mat. y herb.	U-532	25,77	5	431977	452996	1553
Matorral de rosáceas		U-6*	1,48	-	-	-	-
Pastizal y erial alt.<0,3 m		U-7	105,17	3	432754	4518580	1414
Vegetación de ribera		U-8*	2,31	-	-	-	-
Prado alt.<0,3 m con matorral disperso		U-9	65,71	3	433860	4516374	1092

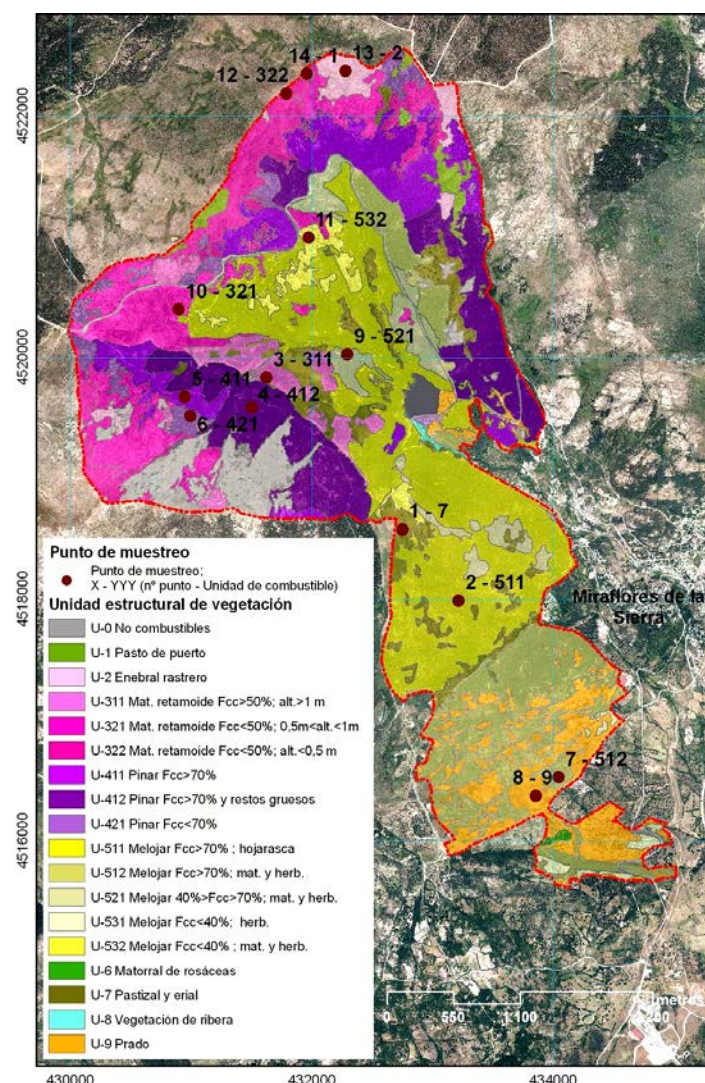


Figura 1. Unidades de estructura de vegetación del monte nº 13 del CUP y localización de los puntos de muestreo.
Fuente: base: PNOA © IGN, Comunidad Autónoma de Madrid; capa temática: elaboración propia

Con el fin de parametrizar las unidades de combustible, los resultados obtenidos para cada unidad estructural de vegetación y cada campaña de muestreo se introdujeron en la base de datos que suministra FIREMON, obteniéndose los valores estructurales medios y la carga de combustible de superficie que caracterizan a cada unidad estructural de vegetación. Tras su parametrización, las *unidades estructurales de vegetación* pasaron a ser denominadas *unidades de combustible* (UC), distinguiéndose con un subíndice (1, 2, 3) cada una de las unidades resultantes en cada una de las campañas de muestreo.

Finalmente se procedió a modelizar el comportamiento del fuego mediante BehavePlus (versión 5.0.5) tras establecer una serie de equivalencias entre los parámetros extraídos del inventario de combustibles y los requeridos por BehavePlus en base a su tamaño y al estado de la vegetación (viva o muerta). Para la modelización del comportamiento del fuego se establecieron unas condiciones de simulación coincidentes con las definidas por SCOTT & BURGAN (2005) en su clasificación, con un escenario de humedad D2L2, pendiente del 30% y velocidad del viento a media llama de 0, 10, 20 km/h. Para aquellas variables necesarias para la modelización que no se habían estimado (relación superficie/volumen, humedad de extinción del combustible muerto y contenido calórico) se emplearon los valores de los modelos de combustible equivalentes de Rothermel-Albini (ALBINI, 1976; ANDERSON, 1982) y de SCOTT & BURGAN (2005).

4. Resultados

En la tabla 2 se muestran los parámetros estructurales (cobertura y altura de herbáceas y matorral, profundidad de mantillo y hojarasca), en cada uno de los tres inventarios, de las catorce unidades de combustible estudiadas, así como el tipo de combustible, de los definidos por SCOTT & BURGAN (2005) y RODRÍGUEZ Y SILVA & MOLINA-MARTÍNEZ (2012), al que se asimilan.

En el inventario de invierno las unidades UC1, UC2 y UC322 se encontraban en mayor o menor medida cubiertas por la nieve, por lo que la vegetación no era combustible y no se inventarió. En los demás casos los cambios entre los distintos inventarios (invierno, primavera y verano) fueron por lo general pequeños, e incluso nulos, en lo que respecta a coberturas, altura de matorral, profundidad de mantillo y hojarasca y carga de combustible de restos leñosos, mantillo y hojarasca, pero fueron más importantes, al menos en algunas unidades, en lo que respecta a carga de combustible herbáceo y leñoso.

En el caso de las herbáceas, el incremento en su porcentaje de cobertura total a lo largo del año fue por lo general muy leve, aunque en algunas unidades este incremento fue bastante notable en términos relativos (UC411, UC412, UC511). No obstante, en términos de carga de combustible el incremento sí que fue por lo general muy notable (figura 2), debido sobre todo al incremento en altura del estrato herbáceo. Se observa también un cambio muy notable en el estado vegetativo de estas herbáceas a lo largo del periodo de estudio, que resulta especialmente llamativo en el caso de los pastizales de zonas medias (UC7 y UC9), en las cuales las herbáceas, que presentaban un porcentaje de cobertura y una carga de combustible muy elevados, pasaron de estar vivas prácticamente en su totalidad en los inventarios de invierno y de primavera a estar completamente muertas en el de verano; en la unidad formada por pasto de puerto (UC1), aunque se observa esa misma tendencia al agostamiento de las herbáceas, fue mucho menos marcada, manteniéndose una cantidad elevada de herbáceas vivas en el momento del inventario de verano. Las unidades de matorral y de pasto y matorral presentaron una tendencia similar en el agostamiento estival de las herbáceas (UC2, UC311, UC321) salvo en el caso de pasto con piorno de zonas altas (UC322) en el que no se produjo dicho agostamiento e incluso se incrementó la carga de combustible herbáceo vivo. Finalmente, en las unidades de bosque, que poseen una parte del combustible constituida significativamente por hojarasca, se observa cómo la vegetación herbácea se mantuvo en el inventario de verano en gran parte viva, en ocasiones incluso con una carga de combustible herbáceo vivo mayor que en los inventarios de invierno y de primavera, en las comunidades dominadas por un estrato arbóreo formado por pino albar (UC411, UC412, UC421); en el caso del melojar ocurre lo mismo en las comunidades en las que el melojo presentaba una fracción de cabida cubierta superior al 70 % (UC511 y UC512), mientras que en aquellas en las que el melojo presentaba una fracción de cabida cubierta menor sí tuvo lugar el agostamiento de las herbáceas (UC521 y UC532).

La carga de combustible de matorral presentó por lo general, en aquellas unidades con presencia de matorral, un leve incremento a lo largo del periodo vegetativo (figura 3), pero en algunos casos ese incremento fue muy notable en términos relativos, en concreto en las formaciones de melojar con presencia de matorral (UC511, en que la carga de matorral se triplicó entre marzo y julio, y UC521, en que ese incremento fue del 41%). Esos incrementos se debieron casi en su totalidad a incrementos en la carga de combustible de matorral vivo, siendo el aporte de la carga de matorral muerto prácticamente nulo salvo en las unidades UC321 y UC532, en las que el incremento de la carga de combustible de matorral muerto tuvo una cierta importancia en términos relativos.

Tabla 2. Resumen de los parámetros estructurales medios de las unidades de combustible estudiadas, en cada uno de los inventarios, y grupo de combustible al que pertenecen. P: pasto; M: matorral; H: hojarasca; PM: pasto y matorral; HPM: hojarasca, pasto y matorral.

Unid. comb.	Tip.	Cobertura herbáceas (%)			Altura herb. (m)	Cobertura matorral (%)			Altura mat. (m)	Prof. mant. (m)	Prof. hojar. (m)
		Tot	Vivas	Muert.		Total	Vivo	Muert.			
UC1 ₂	P	52,50	48,33	4,17	0,10	0,00	0	0	0	0,000	0,000
UC1 ₃	P	60,00	26,67	33,33	0,23	0,00	0	0	0	0,000	0,000
UC2 ₂	M	13,06	8,62	4,44	0,06	49,65	46,25	3	0,4	0,001	0,006
UC2 ₃	M	15,44	1,69	13,75	0,17	56,78	52,5	3,88	0,4	0,001	0,006
UC311 ₁	M	34,66	28,83	5,83	0,06	63,10	51,67	10	1,43	0,000	0,000
UC311 ₂	M	37,92	31,67	6,25	0,13	73,12	61,67	10	1,45	0,000	0,000
UC311 ₃	M	37,67	2,67	35,00	0,29	73,20	61,67	10	1,53	0,000	0,000
UC321 ₁	PM	37,25	4,75	32,50	0,10	30,53	24,12	5,62	0,79	0,000	0,000
UC321 ₂	PM	47,50	32,50	15,00	0,12	31,79	25,38	5,62	0,79	0,000	0,000
UC321 ₃	PM	50,00	0,00	50,00	0,18	32,65	24,12	7,69	0,84	0,000	0,000
UC322 ₂	PM	40,86	30,00	10,86	0,05	15,47	11,71	3,39	0,37	0,000	0,000
UC322 ₃	PM	40,86	30,00	10,86	0,11	17,43	13,64	3,39	0,4	0,000	0,000
UC411 ₁	H	5,25	4,75	0,50	0,07	0,75	0,44	0,12	0,19	0,033	0,038
UC411 ₂	H	21,44	18,75	2,69	0,12	0,75	0,44	0,12	0,19	0,036	0,034
UC411 ₃	H	23,94	21,25	2,69	0,14	0,76	0,44	0,12	0,2	0,036	0,035
UC412 ₁	H	0,76	0,38	0,38	0,08	0,00	0,00	0	0	0,025	0,044
UC412 ₂	H	4,50	4,12	0,38	0,10	0,00	0,00	0	0	0,027	0,042
UC412 ₃	H	4,82	3,38	1,44	0,32	0,00	0,00	0	0	0,025	0,044
UC421 ₁	HPM	46,50	40,38	6,12	0,11	2,74	2	0,38	0,36	0,037	0,018
UC421 ₂	HPM	48,38	42,50	5,88	0,13	2,74	2	0,38	0,36	0,022	0,037
UC421 ₃	HPM	50,37	39,12	11,25	0,17	2,76	2	0,38	0,38	0,039	0,014
UC511 ₁	H	1,18	0,68	0,50	0,06	4,24	3,18	0,61	0,45	0,021	0,039
UC511 ₂	H	6,07	4,71	1,36	0,13	8,02	6,21	1,32	0,49	0,022	0,037
UC511 ₃	HPM	9,07	7,71	1,36	0,26	16,03	14,29	1,32	0,42	0,012	0,035
UC512 ₁	HPM	72,28	70,71	1,57	0,13	15,98	13,5	1,86	0,62	0,003	0,024
UC512 ₂	HPM	73,89	72,14	1,75	0,12	16,87	14,21	2,04	0,62	0,013	0,042
UC512 ₃	HPM	81,43	42,86	38,57	0,30	21,93	19,29	2,04	0,6	0,006	0,015
UC521 ₁	HPM	15,71	15,21	0,50	0,05	26,89	25,71	0,04	1,14	0,014	0,046
UC521 ₂	HPM	16,96	15,21	1,75	0,12	34,04	32,86	0,04	1,14	0,013	0,042
UC521 ₃	HPM	16,25	1,75	14,50	0,17	35,14	33,57	0,36	1,21	0,014	0,033
UC532 ₁	HPM	33,65	26,00	7,65	0,12	10,79	8,00	2,2	0,59	0,007	0,018
UC532 ₂	HPM	43,60	35,00	8,60	0,20	10,79	8	2,2	0,59	0,008	0,014
UC532 ₃	HPM	43,80	0,80	43,00	0,30	10,82	7	3,2	0,62	0,008	0,012
UC7 ₁	P	93,00	92,67	0,33	0,02	0,00	0	0	0	0,000	0,000
UC7 ₂	P	99,67	98,00	1,67	0,07	0,00	0	0	0	0,000	0,000
UC7 ₃	P	98,58	0,58	98,00	0,05	0,00	0	0	0	0,000	0,000
UC9 ₁	P	91,83	91,33	0,50	0,07	1,25	1,08	0	0,17	0,000	0,000
UC9 ₂	P	91,83	91,33	0,50	0,07	1,25	1,08	0	0,17	0,000	0,000
UC9 ₃	P	95,33	0,00	95,33	0,20	4,00	3,83	0	0,17	0,000	0,000

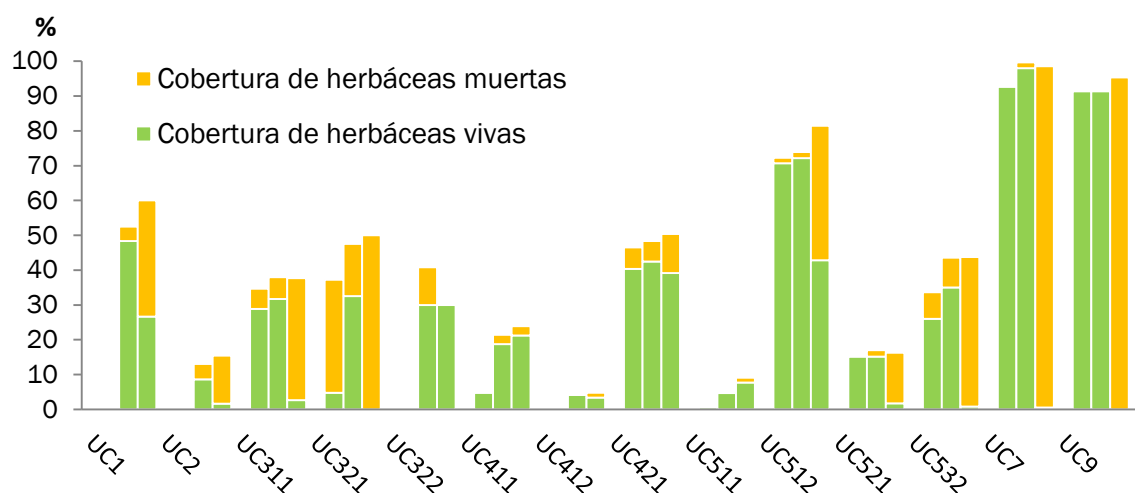


Figura 2. Evolución temporal de la cobertura de herbáceas en las unidades de combustible estudiadas. Para cada una de las unidades de combustible, la columna de la izquierda representa los valores correspondientes al inventario de invierno, la del centro al inventario de primavera y la de la derecha al inventario de verano.

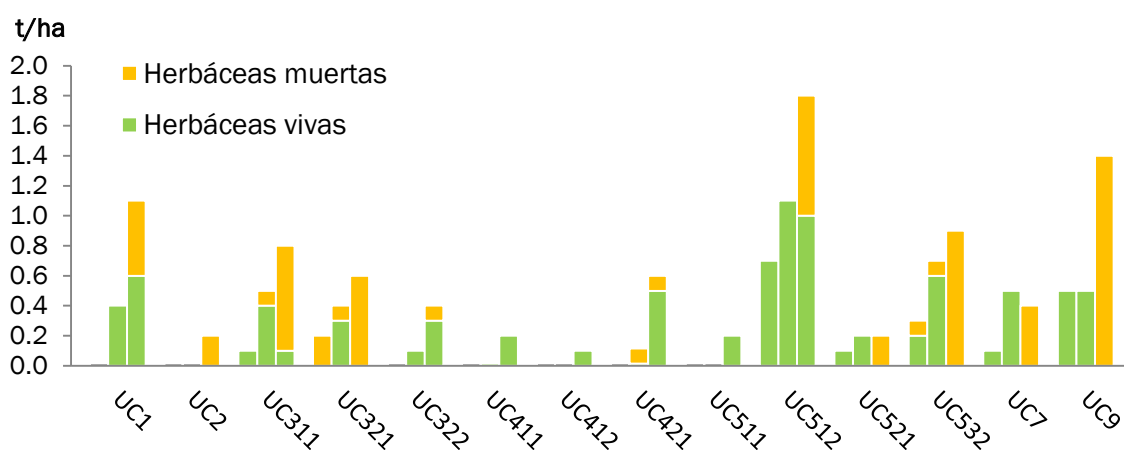


Figura 3. Evolución temporal de la carga de combustible de herbáceas en las unidades de combustible estudiadas. Para cada una de las unidades de combustible, la columna de la izquierda representa los valores correspondientes al inventario de invierno, la del centro al inventario de primavera y la de la derecha al inventario de verano.

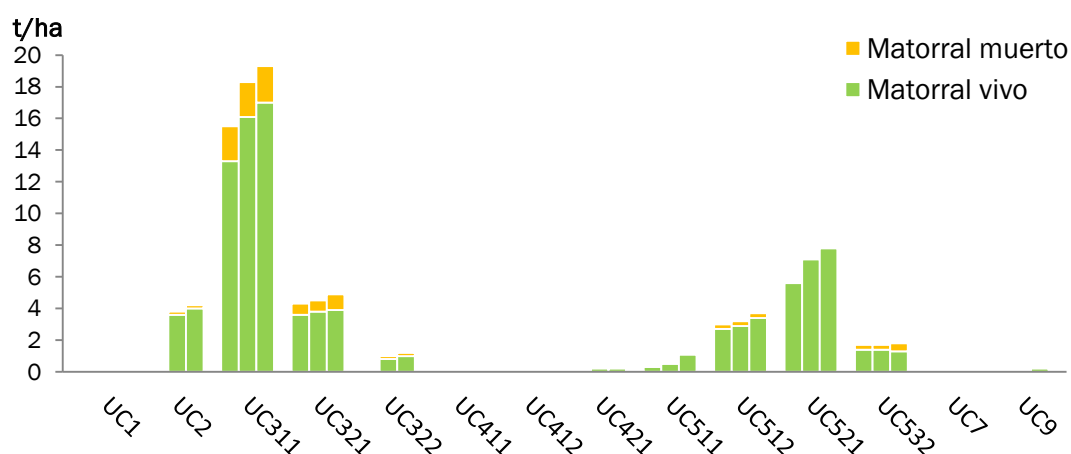


Figura 4. Evolución temporal de la carga de combustible de matorral de las unidades de combustible estudiadas. Para cada una de las unidades de combustible, la columna de la izquierda representa los valores correspondientes al inventario de invierno, la del centro al inventario de primavera y la de la derecha al inventario de verano.

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos con las modelizaciones del comportamiento del fuego realizadas con BehavePlus de acuerdo con las cargas de combustibles correspondientes a los inventarios de primavera y verano. Se observa cómo en la mayoría de las unidades de combustible tiene lugar un leve incremento en la intensidad del fuego en el verano frente a la primavera, si bien este incremento es mucho más notable en las unidades UC1, UC322, UC511, UC9 y, en mucha menor medida, UC311. La única unidad de combustible en la cual las modelizaciones prevén una menor intensidad del fuego en verano que en primavera (en todo caso, siempre poco intenso) es en los pastos bajos y finos que constituyen la unidad UC7.

Tabla 3. Resultados obtenidos con las modelizaciones del comportamiento del fuego realizadas con BehavePlus con los datos correspondientes a los inventarios de primavera y de verano.

Unidad de comb.	Velocidad de propagación (m/min)			Longitud de llama (m)			Intensidad del frente (kW/m)			Calor por unidad de área (kJ/m²)
	Velocidad del viento (km/h)									
	0	10	20	0	10	20	0	10	20	
UC1 ₂	0,7	0,8	0,8	0,1	0,2	0,2	4	5	5	351
UC1 ₃	2,1	11,6	11,6	0,4	0,9	0,9	34	193	193	1000
UC2 ₂	0,8	5,9	14,2	0,6	1,6	2,4	93	706	1694	7161
UC2 ₃	0,7	5,5	13,1	0,6	1,6	2,4	100	742	1773	8094
UC311 ₂	0,4	3,7	8,5	0,4	1,0	1,4	29	239	553	3921
UC311 ₃	0,6	4,7	10,8	0,5	1,2	1,8	49	401	923	5113
UC321 ₂	2,4	20,3	49,7	1,0	2,8	4,2	285	2448	5990	7238
UC321 ₃	2,8	23,2	58,6	1,2	3,2	4,9	383	3218	8061	8251
UC322 ₂	0,8	3,5	3,5	0,2	0,5	0,5	12	51	51	870
UC322 ₃	1,1	9,6	9,6	0,4	1,0	1,0	27	238	238	1492
UC411 ₂	0,2	1,4	3,5	0,2	0,5	0,8	11	61	151	2854
UC411 ₃	0,2	1,3	3,3	0,2	0,5	0,5	11	61	153	2752
UC412 ₂	0,1	0,5	0,5	0,1	0,2	0,2	2	9	9	1141
UC412 ₃	0,1	0,5	0,4	0,1	0,2	0,2	2	8	8	1090
UC421 ₂	0,6	4,2	10,1	0,5	1,2	1,7	54	359	861	5122
UC421 ₃	0,7	5,0	12,1	0,5	1,2	1,8	57	398	950	4723
UC511 ₂	0,3	1,4	3,6	0,3	0,6	1,0	14	80	203	3386
UC511 ₃	0,7	4,1	9,8	0,2	0,5	0,8	115	695	1164	10202
UC512 ₂	0,5	3,7	8,5	0,6	1,4	2,0	77	533	1226	8632
UC512 ₃	0,8	5,9	13,5	0,7	1,8	2,6	125	916	2118	9387
UC521 ₂	2,2	17,9	41,9	1,3	3,5	5,2	492	4041	9456	13527
UC521 ₃	2,1	16,9	39,2	1,3	3,5	5,1	496	3853	8966	13712
UC532 ₂	0,6	3,8	9,5	0,5	1,2	1,8	57	387	956	6038
UC532 ₃	1,1	7,9	19,9	0,7	1,8	2,7	128	926	2326	7030
UC7 ₂	0,5	1,0	1,0	0,2	0,2	0,2	4	8	8	514
UC7 ₃	0,6	0,8	0,8	0,1	0,2	0,2	4	5	5	368
UC9 ₂	0,4	1,0	1,0	0,1	0,2	0,2	4	10	10	620
UC9 ₃	2,0	16,4	22,1	0,5	1,3	1,5	52	438	590	1601

5. Discusión

Por lo general, todos los tipos de combustible presentaron, como cabía esperar, una evolución positiva de la carga total a lo largo del periodo de estudio. Sin embargo, hemos observado que el pastoreo extensivo ha condicionado notablemente el desarrollo del combustible forestal de superficie a lo largo del estudio, teniendo su máxima incidencia sobre el grupo de pastos, lo que puede explicar la disminución estival de la carga de combustibles herbáceos en las unidades UC7 y, en menor medida, UC521.

La mayor intensidad del fuego en verano que en primavera, de acuerdo con las modelizaciones realizadas, responde probablemente al hecho de que en los inventarios estivales la carga de herbáceas ha sufrido por lo general un notable incremento relativo respecto a la de los inventarios primaverales, como se deduce del hecho de que ha sido precisamente en las unidades de combustible UC1, UC322, UC511 y UC9, que son las que mayor incremento relativo en la intensidad del fuego han presentado, en las que el incremento en la carga de combustible herbáceo ha sido mayor. En la misma línea, la única unidad en que se ha producido un descenso significativo, en términos relativos, en la intensidad del fuego en el verano respecto de la primavera ha sido la UC7, que ha sido también la única en que la carga de herbáceas ha sido menor en verano que en primavera. Además, debemos tener en cuenta que, independientemente del momento del inventario, el escenario de humedad empleado en las modelizaciones ha sido siempre el mismo, es decir, se ha presupuesto el mismo contenido de humedad en las distintas categorías (1 hora, 10 horas, 100 horas, herbáceo vivo y leñoso vivo); podemos deducir de ello que, si hubiéramos supuesto un estado de menor contenido de humedad en verano que en primavera, como suele ser lo habitual salvo circunstancias particulares, el incremento en los parámetros relacionados con la intensidad del fuego en verano frente a la primavera habría sido mucho mayor. La única excepción notable a esta norma ha ocurrido en la unidad UC512, que ha presentado un incremento en la intensidad del fuego relativamente escaso pese a que la carga de herbáceas casi se dobló en verano, pero esto puede ser debido a que el fuego en este caso es portado en gran parte por el matorral y la hojarasca, además de por las herbáceas, por lo que el incremento en estas supone solamente un leve incremento en la intensidad del fuego, en las condiciones y con el escenario de humedad empleados.

En general, el estado vegetativo de las herbáceas parece haber sido menos importante que su carga total, como muestra el hecho de que en la unidad UC532, que presentó un escaso incremento en la carga global de herbáceas, la intensidad del fuego no se ha incrementado notablemente entre la primavera y el verano pese a que las herbáceas estaban completamente secas en verano y en su mayoría vivas en primavera. Este hecho puede deberse a que en las modelizaciones se ha supuesto un comportamiento dinámico de los combustibles herbáceos, de acuerdo con los modelos de SCOTT & BURGAN (2005), lo que explica la transferencia de carga de combustible vivo herbáceo a combustible de 1 hora.

De la comparación de las unidades de combustible definidas en este estudio con los modelos de combustible tipo más usuales se puede concluir que el uso de clasificaciones estilizadas de modelos de combustible no permitió representar de manera ajustada la variedad de condiciones encontradas en el complejo de combustible de superficie, ni siquiera en el caso de asignar distintos modelos para diferentes épocas del año. Así, por ejemplo, en la tabla 4 se muestran los valores de altura y carga de combustible de la unidad UC321, en los tres inventarios, comparados con la de modelos más o menos similares de acuerdo con las clasificaciones de Rothermel-Albini (ALBINI, 1976; ANDERSON, 1982), de SCOTT & BURGAN (2005) y UCO40 (RODRÍGUEZ Y SILVA & MOLINA MARTINEZ, 2012). De todos ellos, el que más se asemeja globalmente, en cuanto a la altura y a las cargas de combustible, a la unidad combustible UC321 ha sido el modelo 5 de la clasificación de Rothermel-Albini, que sin embargo presenta una menor altura y una mayor carga de combustible leñoso vivo, seguido por el modelo SH4 de la clasificación de Scott y Burgan. Sin embargo, ninguno de los modelos UCO40, definidos para Andalucía, se ha asemejado a la unidad UC321, ya que aunque el

modelo PM1 se parece bastante en cuanto a la carga de combustible presenta una altura de combustible muy inferior. Igual problema aparece a la hora de asignar un modelo de combustible tipo equivalente con la unidad UC511 (tabla 5) y con otras muchas unidades de combustible de las encontradas en el monte estudiado.

Por ello, se deduce de este estudio que resulta indispensable considerar las particularidades locales de los complejos de combustible, y no limitarse a asignar los valores correspondientes a modelos normalizados, con el fin de conseguir una mejor estimación en las simulaciones del comportamiento del fuego, al igual que han señalado recientemente, en un estudio mucho más detallado, SALIS *et al.* (2016). Cabe resaltar que en tres de las unidades de combustible estudiadas (UC321, UC521, UC532) las diferencias en las modelizaciones con respecto a los modelos de combustible normalizados supondría un potencial riesgo para los combatientes en un ataque directo al fuego, ya que en ellas la intensidad del fuego y la velocidad de propagación resultó, según estas modelizaciones, netamente superior a la proporcionada por los modelos de combustible normalizados más similares.

Para finalizar, resulta necesario precisar ciertas limitaciones del trabajo que contribuyan a su adecuada interpretación: el método de muestreo elegido, mediante puntos relevantes representativos, impidió conocer la variabilidad existente en cada tesela y en cada una de las unidades estructurales de combustible, lo que dificulta su generalización a toda la superficie del área de estudio, si bien este problema se vio minimizado gracias a la estratificación en unidades estructuralmente homogéneas. También se debe subrayar el valor local de los datos presentados, que se encuentran influenciados de forma indiscutible por la historia del monte, los agentes modeladores del territorio, los suelos, la geomorfología, y la características meteorológicas del periodo en que se recopilaban.

Tabla 4. Carga, por componentes, y altura de los tipos de combustible asociados a la UC321. El subíndice de la unidad de combustible indica el periodo de muestreo: 1: 1^{er} muestreo; 2: 2^o muestreo; 3: 3^{er} muestreo

Modelo de combustible		Carga de combustible (t/ha)					Altura (m)	Carga total (t/ha)
		1 hr	10 hr	100 hr	Herb. vivas	Leños. vivas		
Monte nº 13 CUP de Madrid	UC321 ₁	2,40	1,40	0,00	0,00	3,60	0,79	7,40
	UC321 ₂	2,20	1,20	0,00	0,30	3,80	0,79	7,50
	UC321 ₃	3,10	1,20	0,50	0,00	3,90	0,84	8,70
Rothermel y Albini	Modelo 5	2,25	1,12	0,00	0,00	4,49	0,61	7,86
Scott y Burgan	GS2	1,12	1,12	0,00	1,35	2,24	0,46	5,83
	SH4	1,91	2,58	0,45	0,00	5,72	0,91	10,66
UC040	PM1	4,44	2,05	0,00	0,00	2,15	0,30	8,64
	PM2	10,06	5,03	2,49	0,00	4,83	0,61	22,41
	M6	6,25	4,29	0,00	1,12	5,96	1,22	17,62

Tabla 5. Carga, por componentes, y altura de los tipos de combustible asociados a la UC511. El subíndice de la unidad de combustible indica el periodo de muestreo: 1: 1^{er} muestreo; 2: 2^o muestreo; 3: 3^{er} muestreo

Modelo de combustible		Carga de combustible (t/ha)					Altura (m)	Carga total (t/ha)
		1 hr	10 hr	100 hr	Herb. vivas	Leños. vivas		
Monte nº 13 CUP de Madrid	UC511 ₁	6,88	0,80	1,1	0,00	0,30	0,04	9,08
	UC511 ₂	6,04	0,40	1,1	0,00	0,50	0,04	8,04
	UC511 ₃	6,04	0,50	1,4	0,20	1,10	0,10	9,24
Rothermel y Albini	Modelo 8	3,37	2,25	5,61	0,00	0,00	0,06	9,24
Scott y Burgan	TU2	2,13	4,04	2,8	0,00	0,45	0,45	9,42
	TU3	2,47	0,34	0,56	1,46	2,47	2,13	7,30
	TL6	5,38	2,69	2,69	0,00	0,00	0,09	14,57
UCO40	HPM1	4,44	2,93	0,00	0,00	2,98	0,30	10,35
	HR6	7,03	3,32	0,34	0,00	0,00	0,18	10,69

6. Conclusiones

Los modelos de combustible tipo suponen una primera aproximación al análisis del comportamiento del fuego, pero para estudios más detallados es preciso contar con la descripción de las unidades de combustible reales que aparecen en el territorio, y repetir los inventarios en distintas épocas para tener en consideración los cambios que se producen en el complejo de combustibles como consecuencia de la progresión de la vegetación y de la estacionalidad climática. Este estudio realizado en el Sistema Central madrileño muestra que el protocolo para el inventario del combustible forestal de superficie descrito en el Sistema de Monitorización de los Efectos del Fuego (FIREMON), resulta un método de trabajo flexible y relativamente rápido en su aplicación para lograr esta descripción detallada; además, la posibilidad de introducir modificaciones en el cálculo de resultados y aplicar variantes más precisas para medir el complejo de combustible lo habilitan como un instrumento a considerar en la mejora del conocimiento del combustible forestal de superficie. No obstante, debe tenerse en cuenta que la repetición de inventarios en ausencia de elementos perturbadores debe ser planificada para eliminar sesgos ocasionados por la aplicación del propio método, sobre todo en la medición de elementos leñosos caídos de pequeñas dimensiones y del espesor del estrato hojarasca-mantillo.

7. Agradecimientos

Desearíamos expresar nuestro agradecimiento a las personas que por sus diversas y valiosas aportaciones han enriquecido este trabajo: a Antonio Martínez Cabañas, Jefe de Servicio de Normativa de la Jefatura del Cuerpo de Agentes Forestales de la Comunidad de Madrid; a Pablo Cristóbal Mayoral, Jefe del Servicio de Incendios Forestales de la Comunidad de Madrid; a Miguel Ángel Martínez Macías, Técnico del Área de Desarrollo del Plan Forestal de la Comunidad de Madrid; a José Luis Monleón Jiménez, Técnico de la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía; y a Francisco Senra Rivero, Técnico de Operaciones, Analista de Incendios Forestales de la Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.

8. Bibliografía

ALBINI, F.A.; 1976. Estimating wildfire behavior and effects. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 92 pp. Ogden, Utah.

ANDERSON, H.E.; 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Gen. Tech. Rep. INT-122. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 22 pp. Ogden, Utah.

BROWN, J.K.; 1974. Handbook for inventorying downed woody material. Gen. Tech. Rep. INT-16. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 24 pp. Ogden, Utah.

BURGAN, R.E.; 1979. Estimating live fuel moisture for the 1978 National Fire-Danger Rating System. Gen. Tech. Rep. INT-226. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 17 pp. Ogden, Utah.

LUTES, D.C.; KEANE, R.E.; CARATTI, J.F.; KEY, C.H.; BENSON, N.C.; SUTHERLAND, S.; GANGI, L.J.; 2006. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 400 pp. Fort Collins, Colorado.

LUTES, D.C.; KEANE, R.E.; 2006. Fuel Load (FL) sampling method. En: LUTES, D.C.; KEANE, R.E., CARATTI, J.F.; KEY, C.H., BENSON, N.C.; SUTHERLAND, S.; GANGI, L.J.; 2006. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. FL-1-FL-20. Fort Collins.

MOLINA TERRÉN, D.; 2009. Asignación modelo de combustible para la planificación. En: VELEZ MUÑOZ, R. (coord.): La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias (2ª edición). 265-270. McGraw-Hill, Madrid.

RODRIGUEZ Y SILVA, F.; MOLINA MARTINEZ, J.R.; 2012. Modeling Mediterranean forest fuels by integrating field data and mapping tools. *Eur J For Res* 131: 571-582

ROTHERMEL, R.C.; 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 pp. Ogden, Utah.

SALIS, M.; ARCA, B.; ALCASENA, F.; ARIANOUTSOU, M.; BACCIU, V.; DUCE, P.; DUGUY, B; KOUTSIAS, N.; MALLINIS, G.; MITSOPOULOS, I.; MORENO, J.M.; PÉREZ, J.R.; URBIETA, I.R.; XYSTRAKIS, F; ZAVALA, G.; SPANO, D.; 2016. Predicting wildfire spread and behaviour in Mediterranean landscapes. *Int J Wild Fire* 25(10): 1015-1032.

SCOTT, J. H.; BURGAN, R. E.; 2005. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model. Ed. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 72 pp. Ford Collins, Colorado.

VÉLEZ MUÑOZ, R.; 2009. Combustibles forestales: Combustibilidad. En: VELEZ MUÑOZ, R. (coord.): La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias (2ª edición). 131-143. McGraw-Hill. Madrid.