



# **UNIVERSIDAD DE MURCIA**

## **DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA FÍSICA, HUMANA Y ANÁLISIS REGIONAL**

***"Aplicación de tecnología S.I.G. al estudio del  
riesgo y prevención de incendios forestales en el  
área de Sierra Espuña - Gebas (Región de Murcia)"***

*Memoria presentada por la Licenciada Yolanda Alvarez Rogel  
para optar al grado de Doctor en Geografía.  
Murcia, Año 2000*

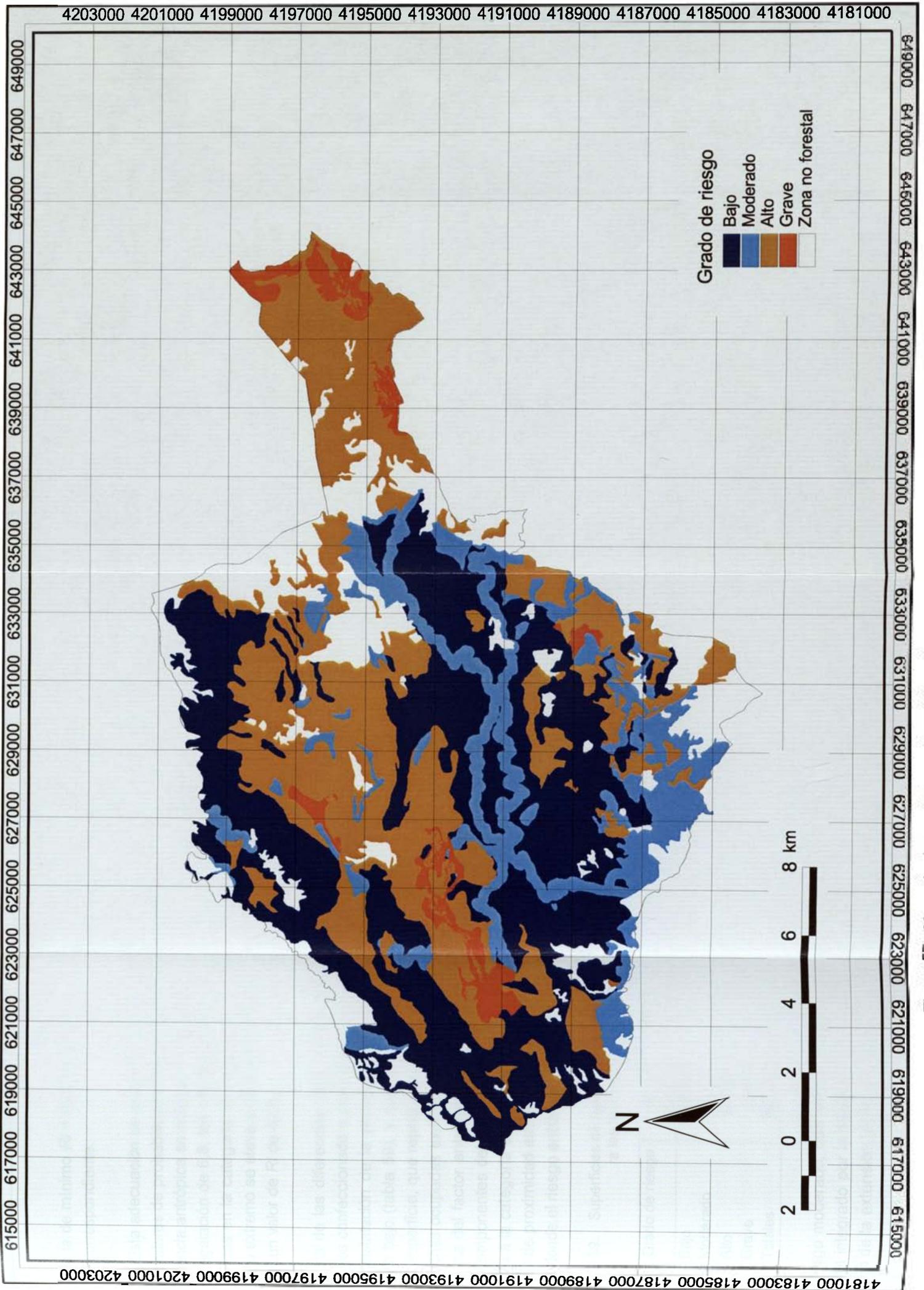


Figura 57. Mapa de riesgo de incendios elaborado a partir de las temperaturas medias de agosto

como la de mínimo  $R/I = ((20/10) \times 1,6) + 1 = 3,6$  están dentro del intervalo correspondiente.

Esta adecuación se mantiene para el riesgo alto y extremo, ambos con valores de probabilidad de ignición del 30 y 40 por ciento, y donde la influencia antrópica se sitúa en 2,5. Para el primero, que posee un factor de vegetación de 6,8, los valores extremos de  $R/I$  son 21,3 y 27,3 ambos incluidos en la categoría de riesgo alto. Por su parte, el mínimo para el riesgo extremo se eleva a 32,5 mientras que la combinación de máximos daría un valor de  $R/I$  de 42,5.

Una de las diferencias más significativas del mapa de riesgo de incendios confeccionado a partir de las temperaturas medias de agosto es la constatación de la presencia de zonas que poseen la categoría de riesgo bajo (tabla 59), y que no aparecían en los supuestos anteriores. Esta superficie, que representa el 41,4 por ciento del total, corresponde a las zonas ocupadas exclusivamente por el modelo combustible 9. La influencia del factor antrópico, anteriormente contrarrestada por los otros dos componentes del índice, queda patente sobre estas formaciones pasando a la categoría de moderado las zonas que se sitúan en los corredores de proximidad establecidos para las vías de comunicación asfaltadas, donde el riesgo antrópico se consideraba máximo.

Tabla 59. Superficies de las categorías de riesgo de incendios estimadas para las temperaturas medias de agosto.

Grado de riesgo	número píxeles	superficie (hectáreas)	superficie %
Bajo	366.909	8.259,9	41,4
Moderado	147.781	3.326,9	16,7
Alto	331.021	7.452,0	37,4
Grave	39.814	896,3	4,5
Totales	885.525	19.935,1	100,0

El riesgo moderado, que abarca el 16,7 por ciento del área de estudio, queda integrado por la totalidad del modelo combustible 8 y el 14,3 por ciento de la extensión global del modelo 9 que corresponde a las zonas

situadas a menos de 150 metros del eje central de las carreteras que discurren por el interior de la sierra. Todos los modelos del grupo de matorrales quedan dentro de la categoría de riesgo alto (tabla 60), cuya superficie se eleva a 7.452 hectáreas. Entre ellos destaca la inclusión del cien por cien del matorral de margas del área de Gebas, que en el ensayo anterior apenas representaba el 25 por ciento quedando la mayor parte incluida en la zona de riesgo grave.

Tabla 60. Distribución porcentual de la superficie de los modelos combustibles de Sierra Espuña en función del grado de riesgo. Valores obtenidos a partir de las temperaturas medias de agosto.

modelo combustible	grado de riesgo			
	bajo	moderado	alto	grave
modelo 1	0,0	0,0	100,0	0,0
modelo 4	0,0	0,0	10,0	90,0
modelo 5	0,0	0,0	100,0	0,0
modelo 6	0,0	0,0	100,0	0,0
modelo 7	0,0	0,0	100,0	0,0
modelo 8	0,0	100,0	0,0	0,0
modelo 9	85,7	14,3	0,0	0,0

Los sectores ocupados por repoblaciones recientes, modelo 4, son los únicos que conservan la categoría de riesgo grave, presentando la misma extensión y distribución espacial que para las temperaturas medias de máximas.

#### - Ensayos para los meses de julio y septiembre

La metodología utilizada en el análisis del riesgo de incendios en Sierra Espuña y su entorno para los meses de julio y septiembre, es la misma que se empleó en el mes de agosto. En este caso, los ensayos se realizan considerando únicamente las temperaturas máximas absolutas, las más favorables para la ocurrencia de estos sucesos.

Para cuantificar la *probabilidad de ignición* en julio se analiza en primer lugar la distribución espacial de temperaturas máximas absolutas

(figura 58), que resulta de la aplicación al área de estudio de la recta  $y = 38,68 - 0,004 \times \text{altitud}$ , con un coeficiente de correlación  $r = - 0,91$ . A partir de estos datos, y teniendo en cuenta que la humedad relativa media estimada para julio es 52 por ciento (anexo 10), se utiliza la tabla de ICONA que relaciona ambas variables (tabla 38), asignando un valor de 7 a la humedad básica del combustible (HBC) en todo el territorio. Sobre este valor se aplica un factor de corrección, vinculado al intervalo de 8:00 a 20:00 hora solar en el cual se producen más del 85 por ciento de los incendios, y que depende del sombreado de las formaciones vegetales y de la pendiente (mayor o menor del 30 por ciento) y orientación del terreno (N, S, E, W) sobre el que se encuentran instaladas. Su obtención requiere la creación de una serie de ficheros intermedios sobre los que se aplican operaciones de álgebra de mapas en IDRISI. El resultado es una imagen *raster* donde el valor de los píxeles oscila entre 0 y 4 y cuya adición al fichero que contiene los datos de humedad básica, permite conocer el contenido total de humedad del combustible para el mes de julio (figura 59).

La similitud entre esta imagen de humedad y la confeccionada para el mes de agosto es manifiesta, correspondiendo los valores más altos, en este caso HC=11, a los modelos combustibles 8 y 9 que ocupan buena parte del territorio, mientras que en el extremo opuesto, HC=7, se sitúan sectores con escaso desarrollo de la cobertura vegetal localizados mayoritariamente en el área de Gebas (tabla 61).

Tabla 61. Distribución espacial de la humedad del combustible (HC) para las temperaturas máximas absolutas de julio.

HC	número píxeles	superficie (hectáreas)	superficie %
7	25.905	583,2	2,9
8	239.134	5.383,4	27,0
9	88.882	2.000,9	10,0
10	16.914	380,8	1,9
11	514.690	11.586,8	58,1
Total	885.525	19.935,1	100,0

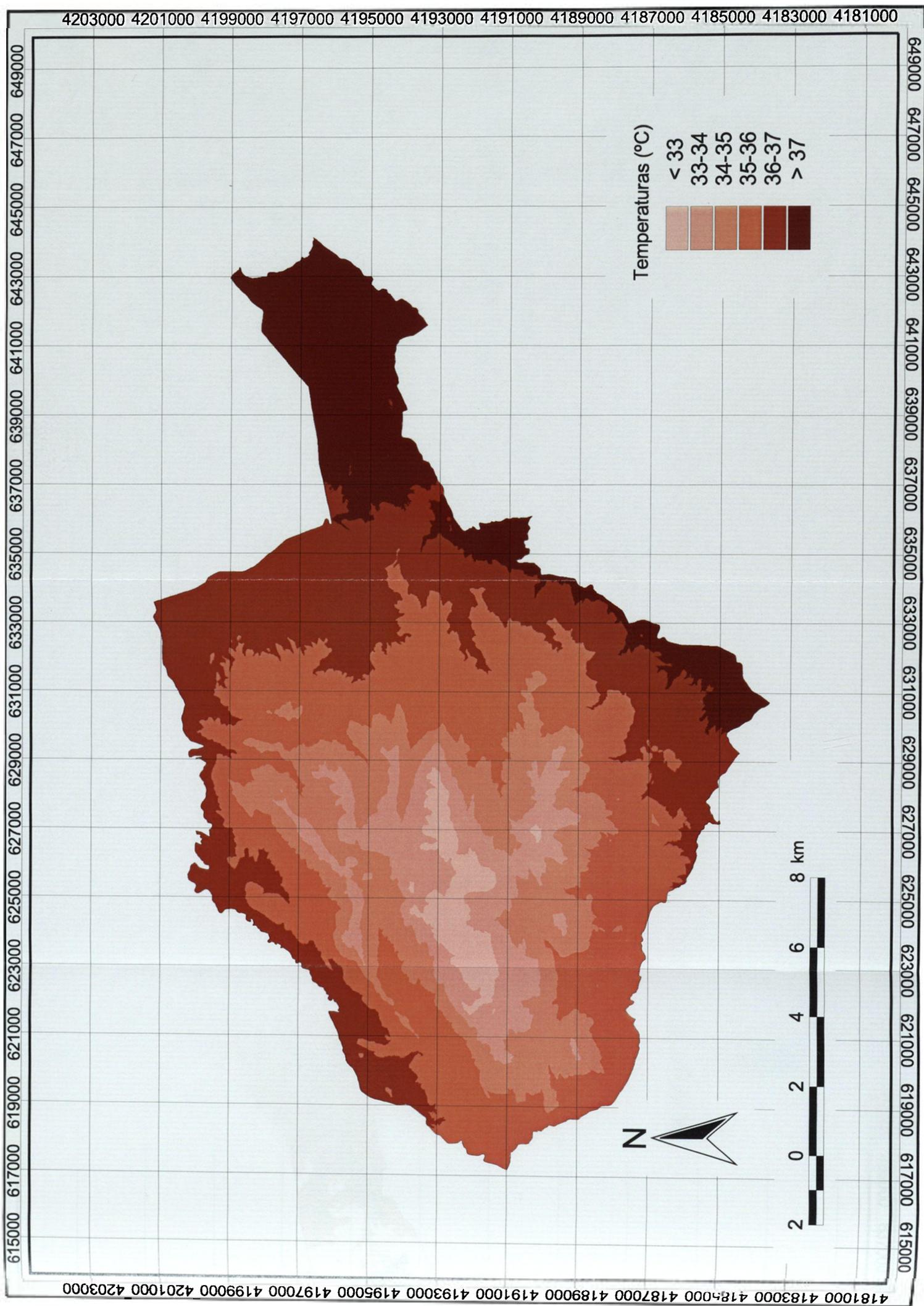


Figura 58. Distribución espacial de temperaturas máximas absolutas de julio

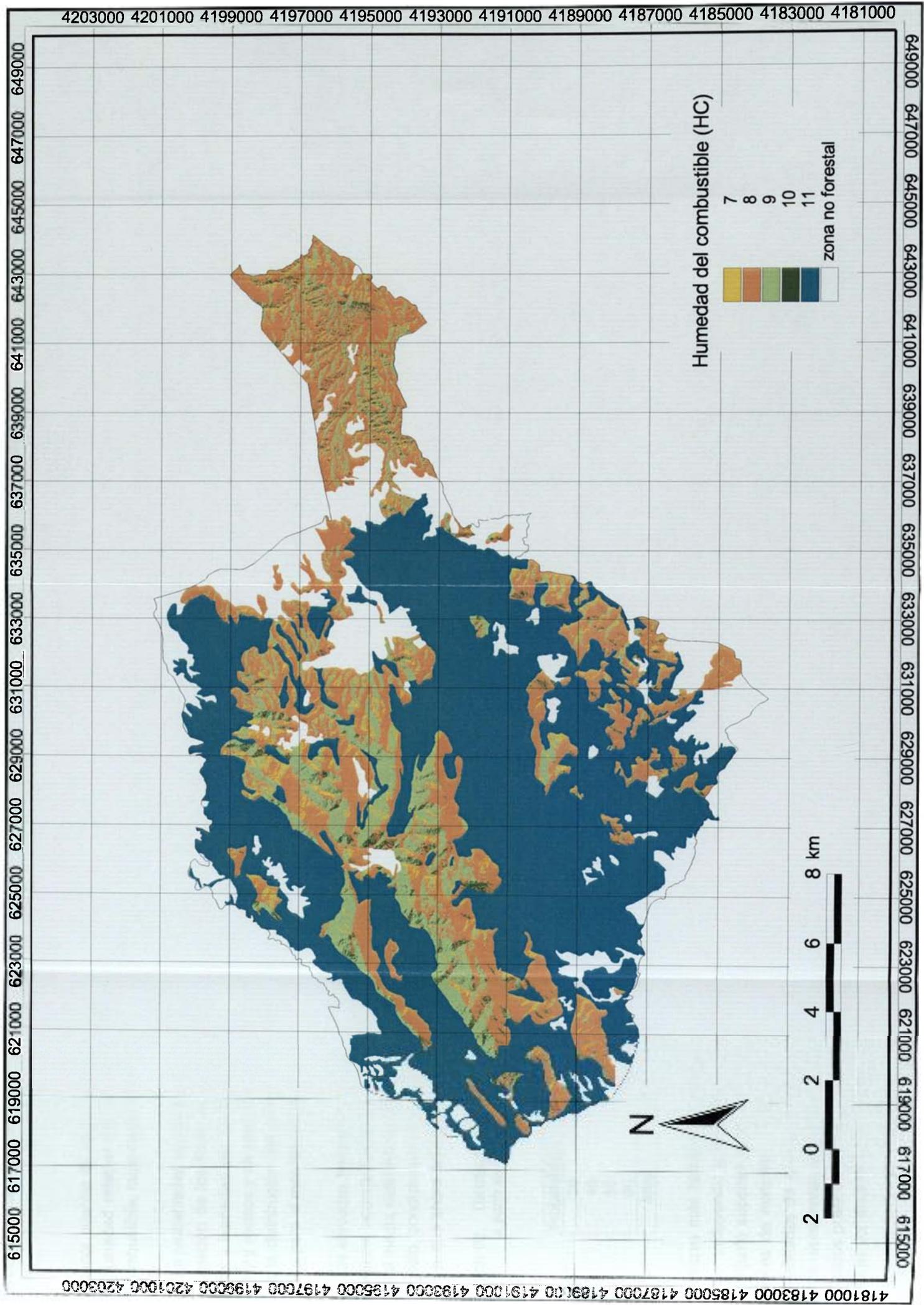


Figura 59. Distribución de la humedad del combustible (HC) para las temperaturas máximas absolutas de julio

La menor cuantía de la humedad básica en julio ( $HBC=7$ ), derivada de una humedad relativa inferior, condiciona un descenso en la humedad del combustible, cuyo rango de variación se sitúa entre 7 y 11.

La probabilidad de ignición (PI), extraída del anexo 15, contempla la combinación de los ficheros de sombreado, temperaturas máximas absolutas y humedad del combustible, que son procesados en IDRISI con *overlay* y *reclass* y de cuya integración se obtiene una imagen que representa la distribución del primer componente del índice de riesgo de incendios para el mes de julio (figura 60).

Las elevadas temperaturas, que superan de nuevo los  $30^{\circ}\text{C}$  en todo el territorio, acompañadas de un descenso en el porcentaje de humedad relativa media estimada para julio, 52 por ciento frente al 56,3 por ciento de agosto, condicionan un incremento generalizado en la probabilidad de ignición, que ahora se sitúa entre 30 y 60 por ciento (tabla 62).

Tabla 62. Distribución espacial de la probabilidad de ignición estimada a partir de las temperaturas máximas absolutas de julio.

Probabilidad	nº píxeles	hectáreas	% superficie
30	522.926	11.772,2	59,1
40	97.560	2.196,3	11,0
50	248.802	5.601,1	28,1
60	16.237	365,5	1,8
total	885.525	19.935,1	100,0

Los valores más bajos,  $PI=30$ , afectan a más de la mitad de la zona de estudio, incluyendo la totalidad de los modelos combustibles 8 y 9, que en conjunto suponen más del 98 por ciento de esta superficie. Las formaciones de matorral y repoblaciones recientes están dominadas por probabilidades de ignición del 40 y 50 por ciento. Los máximos,  $PI=60$ , apenas representan el 2 por ciento y corresponden a pequeños sectores localizados preferentemente en la vertiente oriental de la sierra, con temperaturas por encima de los  $35^{\circ}\text{C}$ .

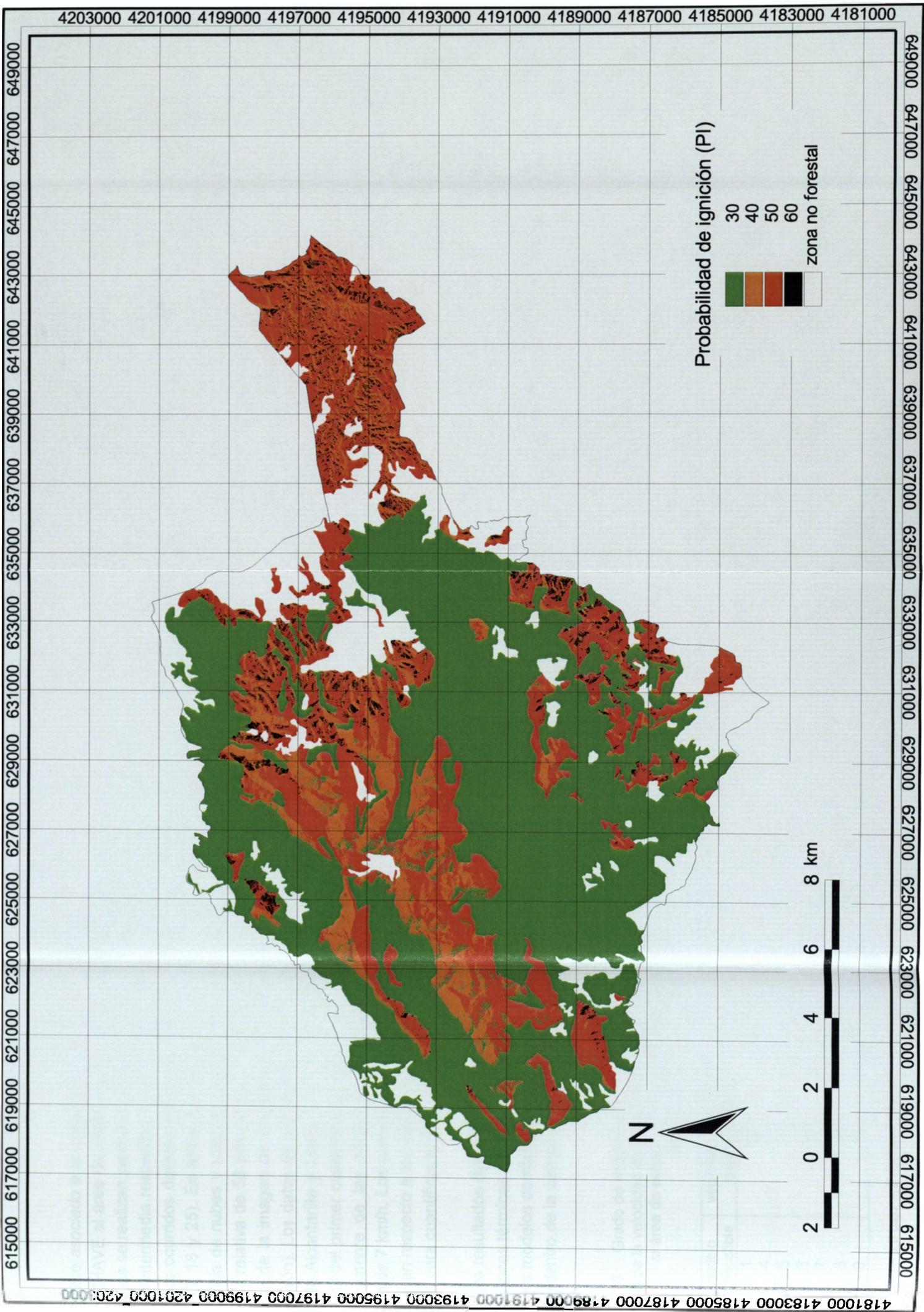


Figura 60. Distribución espacial de la probabilidad de ignición (PI) calculada a partir de las temperaturas máximas absolutas de julio

El riesgo asociado a la vegetación,  $V$ , se extrae de una nueva aplicación de BEHAVE al área de estudio para las condiciones medias de julio. Los ensayos se realizan para el día 15, considerado como día tipo por su posición intermedia respecto a las fechas en que se produjeron los seis incendios ocurridos durante este mes en los últimos trece años (días 10, 14, 15, 18 y 25). En todos los casos se contempla un día soleado, con ausencia de nubes y una situación meteorológica estable, siendo la humedad relativa de 52 por ciento y la temperatura media de 35,1 °C (deducida de la imagen de temperaturas máximas absolutas obtenida por regresión). Los datos de viento, extraídos nuevamente de los observatorios de Alcantarilla y Lorca Ceralicultura muestra un predominio de los vientos del primer cuadrante, que suponen el 80 y el 100 por ciento respectivamente de las situaciones mensuales, situándose su velocidad media de 7 km/h. Los porcentajes de cubierta de copas de la vegetación no varían respecto a los considerados en agosto, manteniendo el mismo criterio para cuantificar el grado de riesgo de cada modelo combustible.

Los resultados (tabla 63) son muy similares a los obtenidos para las condiciones térmicas extremas del mes de agosto, con un riesgo extremo para los modelos combustibles 1 y 4, mientras que los pinares altos continúan dentro de la categoría de riesgo bajo.

Tabla 63. Grado de riesgo de los modelos combustibles de Sierra Espuña, en función de la velocidad de propagación resultante de la aplicación de BEHAVE al área de estudio. Estimación a partir de las temperaturas máximas absolutas de julio.

modelo combustible	velocidad propagación (metros/minuto)	grado de riesgo	valoración del riesgo*
1	23,8	8,7	extremo
4	27,2	10,0	extremo
5	11,3	4,2	alto
6	9,8	3,6	alto
7	11,2	4,1	alto
8	6,5	2,4	moderado
9	3,9	1,4	bajo

\* < 1,5 bajo; 1,5 - 3,5 moderado; 3,5 - 7,5 alto; > 7,5 extremo

El riesgo moderado pasa a estar representado exclusivamente por el modelo combustible 8 debido al incremento en la velocidad de propagación de las llamas a través de los matorrales altos, casi 10 metros/minuto, que determinan su inclusión, junto a las demás formaciones de matorral, dentro del riesgo alto.

El tercer componente del índice es el *factor antrópico*, que permanece constante por lo que la imagen *raster* a utilizar es la misma que en los ensayos anteriores.

La aplicación del índice de riesgo  $RI = ((PI/10) \times V + RH)$  a las imágenes correspondientes a cada uno de los parámetros involucrados ofrece como resultado un nuevo fichero *raster* (figura 61) que se reclasifica en función de los intervalos establecidos en la tabla 48. Al igual que en los casos anteriores se analizan los valores extremos para comprobar la adecuación de los intervalos establecidos:

En primer lugar se constata que la probabilidad de ignición más alta asociada al riesgo moderado es 30, el factor antrópico se sitúa en 1 y el modelo combustible 8 es el que presenta el valor más alto dentro de esta categoría, por lo que  $RL$  sería igual a 8,2 y por tanto incluido en el riesgo moderado. La misma hipótesis se cumpliría para los valores mínimos  $RI = ((30/10) \times 1,4 + 1) = 5,2$ .

Dentro del riesgo alto, los máximos corresponden a  $PI = 60$ ;  $V = 4,2$  y  $RH = 2,5$ , por lo que  $RI = 27,7$ , se sitúa entre 10,25 y 30,75. En el mismo intervalo se incluiría el resultado de la aplicación de los valores mínimos  $RI = ((30/10) \times 3,4 + 2,5) = 12,7$ .

Por último para el riesgo grave, la combinación de máximos  $PI = 60$ ,  $V = 10$  y  $RH = 2,5$ , sitúan el índice en 62,5, superando el umbral inferior para el riesgo grave. Estas condiciones se cumplen también para los valores mínimos:  $RI = ((40/10) \times 7,8 + 2,5) = 33,7$ .

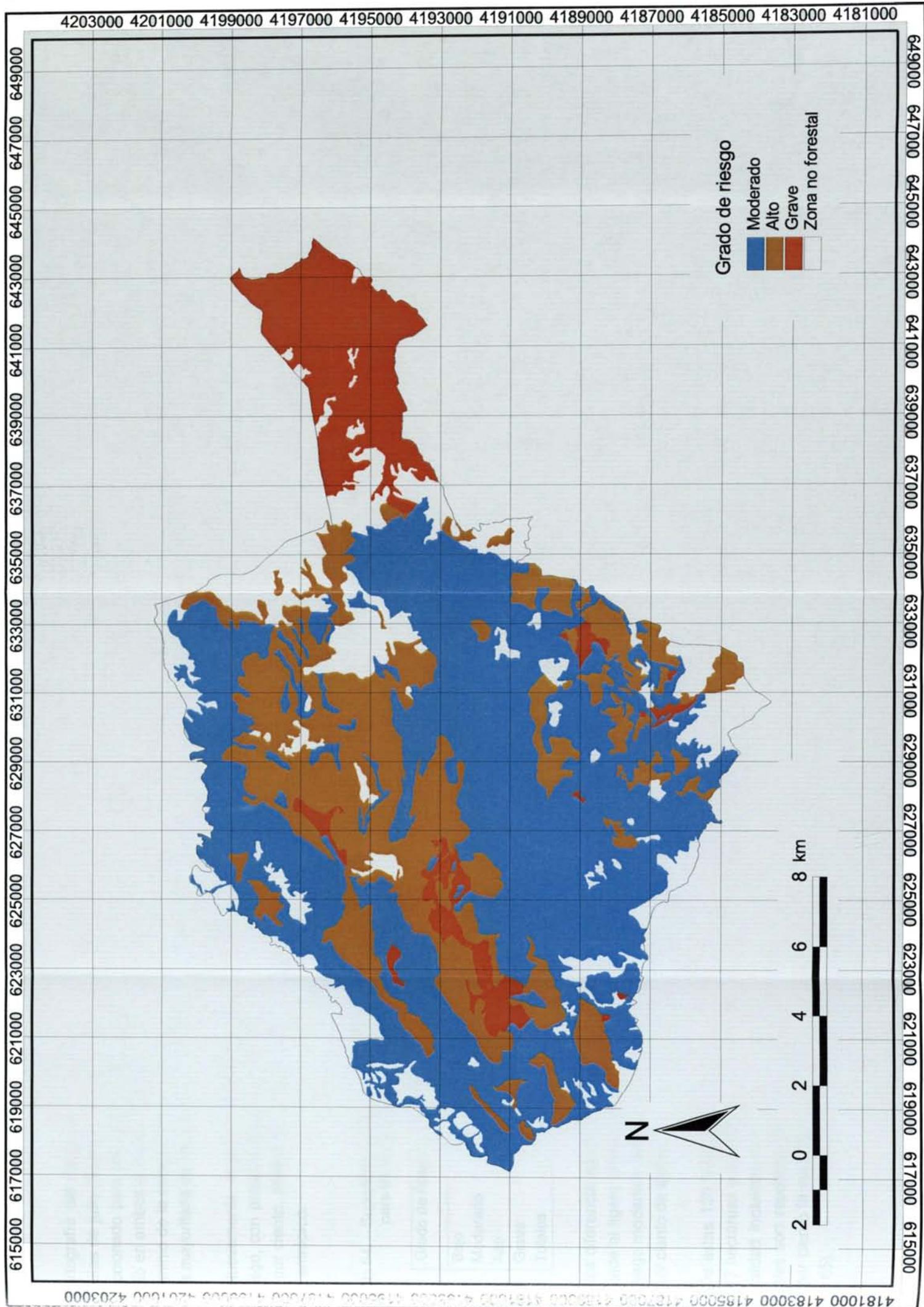


Figura 61. Mapa de riesgo de incendios elaborado a partir de las temperaturas máximas absolutas de julio

La cartografía del riesgo de incendios para las temperaturas máximas absolutas de julio (figura 61 y tabla 64) es muy similar al mapa de riesgo confeccionado para las condiciones extremas del mes de agosto, constatando en ambos la ausencia de zonas consideradas de riesgo bajo y el predominio de la categoría de moderado, que se corresponde con la presencia mayoritaria de los modelos combustibles 8 y 9 sobre el territorio.

Nuevamente, el peso ejercido por el primer término de la ecuación de riesgo, con probabilidades de ignición que en este caso llegan hasta el 60 por ciento, atenúa de manera significativa la posible influencia del factor antrópico.

Tabla 64. Superficies de las categorías de riesgo de incendios estimadas para las temperaturas máximas absolutas de julio.

Grado de riesgo	número píxeles	superficie (hectáreas)	superficie %
Bajo	0	0,0	0,0
Moderado	514.690	11.586,8	58,1
Alto	253.072	5.697,2	28,6
Grave	117.763	2.651,1	13,3
Totales	885.525	19.935,1	100,0

La única diferencia significativa entre las dos situaciones mensuales corresponde al ligero descenso que experimenta la superficie considerada con riesgo moderado en julio, que representa el 28,6 por ciento frente al 29,3 por ciento de agosto.

De estas 135 hectáreas, que pasan ahora a incrementar el riesgo alto, 77 hectáreas corresponden a matorrales de margas que quedan en su totalidad incluidos en esta categoría mientras que las 58 hectáreas restantes son repoblaciones recientes del interior, que elevan hasta el 98,9 por ciento la superficie con riesgo grave del modelo combustible 4 (tabla 65).

Tabla 65. Distribución porcentual de la superficie de los modelos combustibles de Sierra Espuña en función del grado de riesgo. Valores obtenidos a partir de las temperaturas máximas absolutas de julio.

modelo combustible	grado de riesgo		
	moderado	alto	grave
modelo 1	0,0	0,0	100,0
modelo 4	0,0	1,1	98,9
modelo 5	0,0	100,0	0,0
modelo 6	0,0	100,0	0,0
modelo 7	0,0	100,0	0,0
modelo 8	100,0	0,0	0,0
modelo 9	100,0	0,0	0,0

Los tres modelos del grupo de matorrales, 5, 6 y 7, continúan detentando un riesgo alto, incluyéndose en esta categoría el cien por cien de su extensión, al igual que sucedía para las condiciones térmicas extremas de agosto.

Estos resultados parecen indicar que el mes de julio resulta aún más peligroso que agosto, pese a que en este último se registra una media de nueve incendios frente a los seis del primero. El gran parecido en la zonación del riesgo deriva de la semejanza entre la mayoría de las variables involucradas en el índice de riesgo, como son las temperaturas máximas absolutas, que oscilan entre 33°C y 37°C para los dos meses, o el predominio de vientos del primer cuadrante con una velocidad de 7 km/h. Las escasas diferencias entre ambas situaciones se deben a la menor humedad relativa de julio, que implica un descenso en la humedad de los combustibles favoreciendo el incremento de los porcentajes de ignición y poniendo de manifiesto una vez más, el peso ejercido por el primer componente del índice bajo condiciones de temperatura extremas.

En *septiembre*, la ecuación de ajuste para las temperaturas máximas absolutas  $y = 34,76 - 0,005 \times \text{altitud}$  ( $r = -0,89$ ), muestra un marcado descenso térmico, con valores que oscilan entre los 26,4°C y 33,7°C (figura 62). La humedad relativa media se sitúa en 60,3 por ciento (anexo 10), lo que implica un valor de 8 para la humedad básica del combustible, el

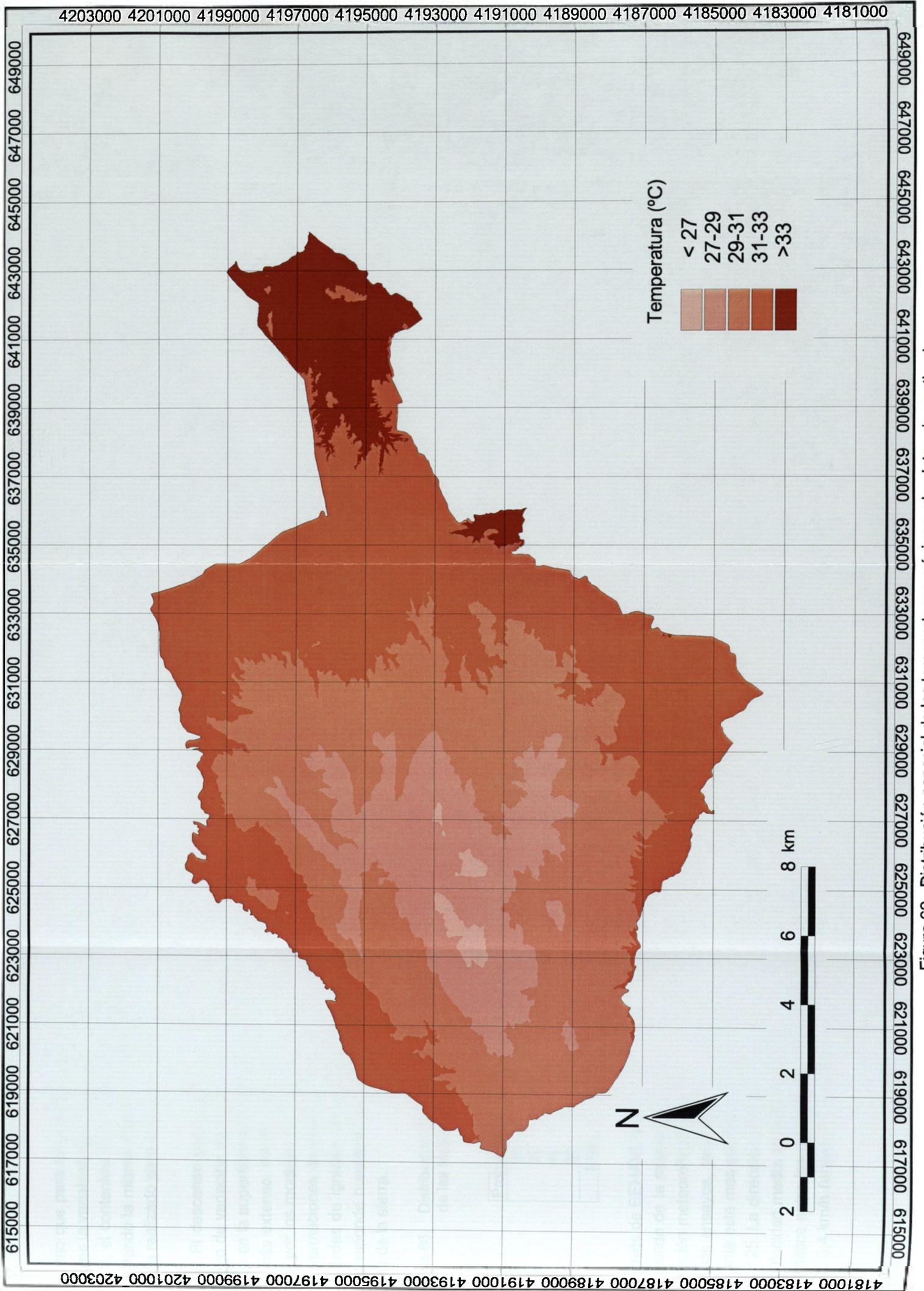


Figura 62. Distribución espacial de las temperaturas máximas absolutas de septiembre

mismo que para las condiciones extremas de agosto. Al mantener constantes las variables que intervienen en la obtención de su factor de corrección, el contenido en humedad total del combustible tampoco varía, presentando la misma distribución e idénticos valores que en el primer ensayo realizado para el mes de agosto.

El descenso generalizado de las temperaturas se manifiesta en el rango de variación de la *probabilidad de ignición*, entre 20 y 50 por ciento, y en la superficie ocupada por cada uno de estos intervalos (tabla 66). El más extenso, PI=20, corresponde exclusivamente a las zonas ocupadas por los modelos combustibles 8 y 9, mientras que la mayor parte de las formaciones de matorral y repoblaciones recientes presentan probabilidades de ignición entre 30 y 40 por ciento. El valor máximo, PI=50, corresponde nuevamente a los sectores más cálidos situados en la periferia de la sierra.

Tabla 66. Distribución espacial de la probabilidad de ignición estimada a partir de las temperaturas máximas absolutas de septiembre.

Probabilidad	nº píxeles	hectáreas	% superficie
20	514.690	11.586,8	58,1
30	105.796	2.381,7	11,9
40	248.541	5.595,2	28,1
50	16.498	371,4	1,9
total	885.525	19.935,1	100,0

A través de BEHAVE se determina el *riesgo asociado a la vegetación*,  $V$ , partiendo de la misma hipótesis de un día soleado, sin nubes y con una situación meteorológica estable. Se opta por utilizar el día 20 para realizar los ensayos, teniendo en cuenta que los seis incendios registrados durante este mes para el periodo 1985-1997 tuvieron lugar entre los días 15 y 25. La dirección predominante del viento continúa siendo noreste y la velocidad media se estima en 6 km/h, ligeramente superior a la media aritmética entre los registros de Alcantarilla, 5,9 km/h y Lorca Cerealicultura, 5,4 km/h (anexo 11). La temperatura media de máximas absolutas

es 30,7°C, deducida, al igual que en los demás casos, de la imagen de temperaturas absolutas obtenida por regresión.

La tabla 67, que muestra el grado de riesgo asignado a cada uno de los modelos combustibles, presenta diferencias significativas respecto a los resultados obtenidos para las mismas condiciones térmicas en los meses precedentes.

Al disminuir la temperatura y el viento y aumentar la humedad relativa, las llamas encuentran mayores dificultades para progresar lo que implica un descenso en las categorías de riesgo asignadas a las distintas formaciones vegetales.

Tabla 67. Grado de riesgo de los modelos combustibles de Sierra Espuña, en función de la velocidad de propagación resultante de la aplicación de BEHAVE al área de estudio. Estimación a partir de las temperaturas máximas absolutas de septiembre.

modelo combustible	velocidad propagación (metros/minuto)	grado de riesgo	valoración del riesgo*
1	11,0	5,5	alto
4	20,0	10,0	extremo
5	5,5	2,8	moderado
6	5,0	2,5	moderado
7	5,5	2,8	moderado
8	1,6	0,8	bajo
9	1,0	0,5	bajo

\* < 1,5 bajo; 1,5 - 3,5 moderado; 3,5 - 7,5 alto; > 7,5 extremo

Todos los matorrales presentan ahora un riesgo moderado. A excepción de los característicos del área de Gebas, dejan de estar incluidos en la categoría más peligrosa para situarse en la inmediatamente inferior. El modelo 4 mantiene el riesgo extremo mientras que los pinares, modelos 8 y 9, detentan un grado de riesgo bajo.

El factor *antrópico* permanece constante y los tres ficheros *raster* correspondientes a las variables que integran la ecuación del índice se procesan mediante operaciones de álgebra de mapas de IDRISI. El resulta-

do permite conocer la distribución del riesgo de incendios para las condiciones térmicas extremas de septiembre (figura 63).

Para comprobar la adecuación de los intervalos se analiza de nuevo el comportamiento de los valores extremos dentro de cada categoría.

En las zonas de riesgo bajo, la probabilidad de ignición es 20 y el factor antrópico 0,7, por lo que la combinación de estos valores con los máximos y mínimos de  $V$  dentro de esta categoría, modelo 8 = 0,8 y modelo 9 = 0,5, ofrece resultados de  $R/I$  igual a 2,3 y 1,7 respectivamente, ambos por debajo de 2,56, umbral superior del riesgo bajo.

El riesgo moderado tiene asociada una probabilidad de ignición máxima de 30, siendo  $RH = 1$  y  $V = 2,8$  por lo que el valor de  $R/I$  será igual a 9,4, que se sitúa dentro de los límites establecidos para este intervalo (2,56 - 10,25). También se cumple esta condición para la combinación de valores mínimos  $R/I = ((20/10) \times 2,5 + 1) = 6$ .

Dentro del riesgo alto y extremo, la probabilidad de ignición máxima oscila entre 30 y 50 compartiendo el mismo factor antrópico de 2,5. Para el primero, donde  $V$  es igual a 5,5, los valores extremos de  $R/I$  son 30 y 19, ambos incluidos en el rango de variación del riesgo alto. Por su parte, el mínimo para el riesgo extremo es 32,5, mientras que la combinación de máximos se eleva a 52,5.

El rasgo más destacado de la cartografía de riesgo de incendios confeccionada para el mes de septiembre es la presencia de zonas de riesgo bajo, que no aparecían en ninguno de los ensayos realizados para las condiciones térmicas extremas de los meses precedentes, y que afectan ahora al 46 por ciento del territorio (tabla 68). Corresponde exclusivamente a sectores ocupados por los modelos combustibles 8 y 9, destacando, dentro de éste último, la influencia del factor antrópico que motiva la inclusión en el riesgo moderado de los corredores de proximidad establecidos en torno a las principales vías de comunicación.

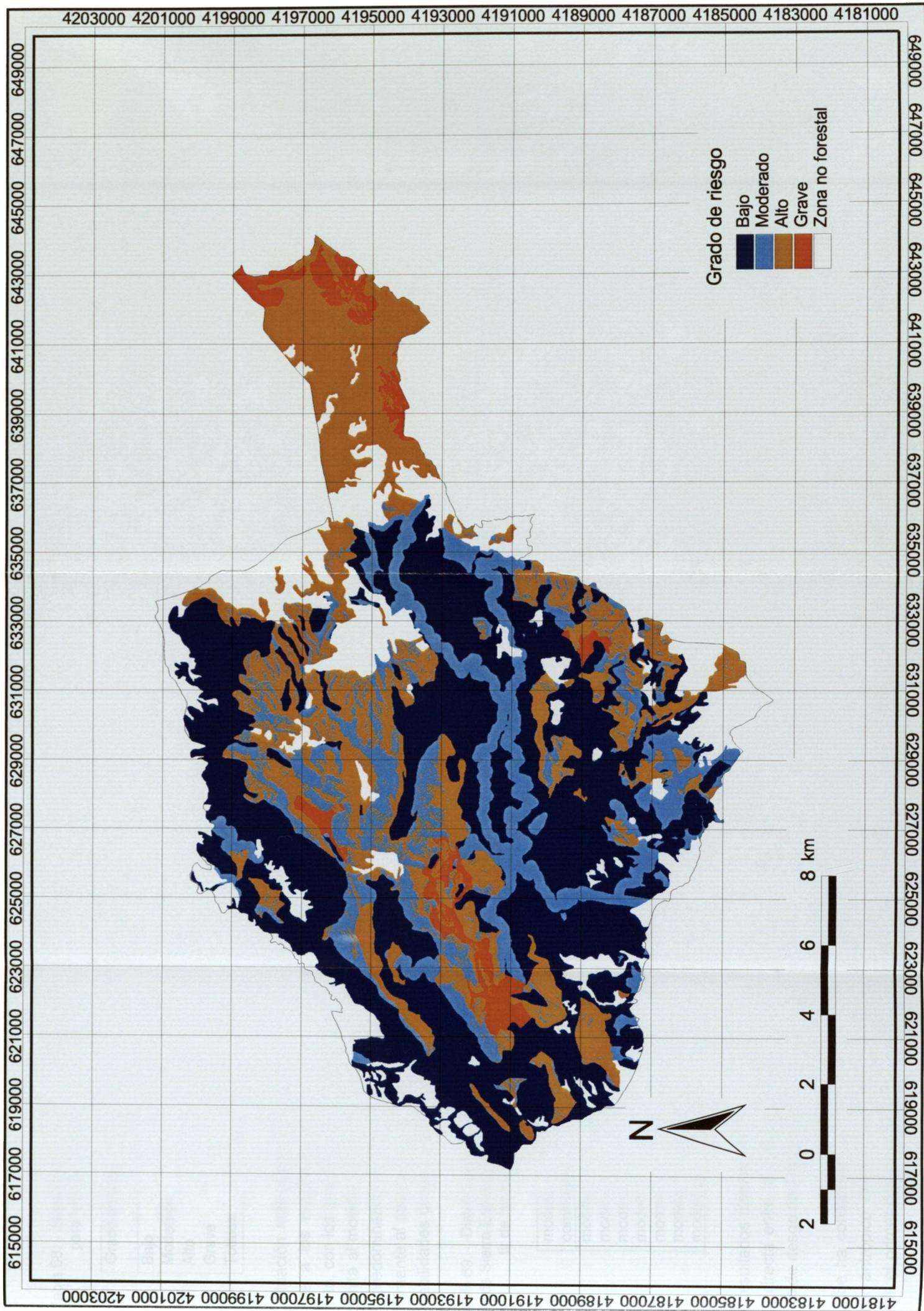


Figura 63. Mapa de riesgo de incendios elaborado a partir de las temperaturas máximas absolutas de septiembre

Tabla 68. Superficies de las categorías de riesgo de incendios estimadas para las temperaturas máximas absolutas de septiembre.

Grado de riesgo	número píxeles	superficie (hectáreas)	superficie %
Bajo	406.694	9.155,5	45,9
Moderado	180.771	4.069,5	20,4
Alto	258.246	5.813,7	29,2
Grave	39.814	896,3	4,5
Totales	885.525	19.935,1	100,0

La situación más parecida respecto a la distribución del riesgo corresponde a los resultados obtenidos para las temperaturas medias de agosto, con los que comparte la cuantía y extensión del riesgo grave que se limita al modelo combustible 4. Dentro del grupo de matorrales continúa predominando el riesgo alto, aunque su cuantía disminuye considerablemente al pasar a la categoría de moderado las zonas afectadas por probabilidades de ignición inferiores al 30 por ciento (tabla 69).

Tabla 69. Distribución porcentual de la superficie de los modelos combustibles de Sierra Espuña en función del grado de riesgo. Valores obtenidos a partir de las temperaturas máximas absolutas de septiembre.

modelo combustible	grado de riesgo			
	bajo	moderado	alto	grave
modelo 1	0,0	0,0	100,0	0,0
modelo 4	0,0	0,0	10,0	90,0
modelo 5	0,0	10,1	89,9	0,0
modelo 6	0,0	34,5	65,5	0,0
modelo 7	0,0	43,6	56,4	0,0
modelo 8	46,0	54,0	0,0	0,0
modelo 9	85,7	14,3	0,0	0,0

Los resultados obtenidos para los diferentes ensayos muestran una relación directa entre el aumento de las temperaturas y el incremento del grado de riesgo de incendios forestales en Sierra Espuña y su entorno.

Se ha constatado que el carácter aditivo con que se introduce el factor antrópico resta protagonismo a este parámetro en situaciones donde el primer componente del índice es determinante en la zonación

del riesgo. Al multiplicar la probabilidad de ignición y el factor derivado de la vegetación se está primando las condiciones medioambientales dominantes en el territorio en el momento de realizar la estimación del riesgo, ya que en definitiva, el factor humano deriva del análisis de la incidencia histórica del fuego sobre el área de estudio. Por otra parte, la disponibilidad de medidas directas sobre el terreno especialmente en relación a la humedad de los combustibles o un ajuste más detallado de las tablas de ICONA utilizadas para su estimación y corrección a partir de la humedad relativa, permitiría mejorar la cartografía de la probabilidad de ignición, y con ello también los resultados obtenidos.

No obstante, el interés de este índice radica en la posibilidad de conocer la distribución espacial del riesgo sobre el territorio, frente a la propuesta de ICONA de realizar una estimación global. Pese a ser catalogada la zona como de riesgo moderado en función del índice de riesgo local ( $RL = 76,6$ , capítulo 6.2), la aplicación del método de Salas Rey (1994) pone de manifiesto la conveniencia de considerar este paraje de la geografía murciana como de riesgo alto, al menos para los meses de julio y agosto, tal y como se recoge en el Plan Infomur de 1997.

Por otra parte disponer de una cartografía que contemple la zonación del riesgo de incendio resulta de gran interés para planificar adecuadamente las tareas de prevención, cuyo análisis espacial puede verse facilitado en gran medida al integrar en un SIG las variables que intervienen en la ocurrencia de estos sucesos.

#### **5.3.4. Predicción del comportamiento del fuego**

Los modelos de simulación del comportamiento del fuego constituyen una herramienta de gran valor en la lucha contra los incendios forestales, desde una doble perspectiva: por un lado, y de forma simultánea a la detección de un incendio, permiten conocer casi de inmediato su evolución más previsible, posibilitando la adopción de métodos de control eficaces. Por otro, la realización de ensayos en escenarios alternativos

considerando sus características específicas, puede ayudar a la optimización de los sistemas de vigilancia y control en la lucha contra el fuego, extremando las precauciones en aquellas zonas que se muestren especialmente sensibles.

#### - Aplicación del programa FARSITE

Entre las propuestas disponibles, cuyas características principales se han expuesto en el capítulo 2, se opta por utilizar el software FARSITE (*Fire Area Simulator*), V. 3.0, ya que constituye uno de los programas más completos en la predicción del comportamiento del fuego, dispone de módulos específicos para la aplicación por parte del usuario de técnicas de control y extinción, y sus resultados se pueden integrar en un Sistema de Información Geográfica mediante las posibilidades de exportación de datos en diversos formatos, entre los que destacan ARC/INFO y ARC/VIEW.

#### · Metodología

El paso inicial para llevar a cabo cada una de las simulaciones es la creación de un fichero, denominado internamente "*landscape*", que recoge la distribución espacial de los factores topográficos y de vegetación que van a determinar el comportamiento del fuego. Para generar este "*landscape*" es necesario disponer previamente de cinco ficheros raster, almacenados en formato *GRASS ASCII* o *ARC/GRID ASCII*, que contengan las cinco variables que requiere FARSITE: i) *altitud*, imprescindible para el cálculo del factor adiabático de temperatura y humedad, ii) *pendiente*, condiciona la velocidad de avance del fuego, iii) *orientación*, contempla la influencia de la radiación solar, iv) *modelos combustibles*, reflejan las características del material disponible para arder v) *fracción de cabida cubierta*, (relación entre la suma de las proyecciones horizontales de las copas de los árboles y la superficie horizontal sobre la que se asienta la masa arbórea), que se utiliza para determinar el promedio de sombra proyectada por los combustibles sobre la superficie.

Además de estos cinco aspectos, pueden introducirse otros tres ficheros raster, que contribuyen a precisar las características de los combustibles: i) *altura de copas*, influye en la influencia del viento sobre el fuego, ii) *altura del sotobosque*, determina la transición del fuego de superficie a copas, iii) *densidad de copas*, influye en la velocidad de propagación del fuego de copas.

Estos tres últimos ficheros son opcionales, y FARSITE puede funcionar sin ellos, a diferencia de lo que sucede con los cinco primeros que deben incluirse obligatoriamente, aunque es conveniente su introducción para que el programa proporcione resultados más precisos. En cualquier caso, todos deben tener el mismo formato, idénticas coordenadas, resolución y extensión.

Junto a estas variables de estructura raster el programa requiere otros dos ficheros, en formato ascii, que pueden crearse mediante cualquier editor o utilizando los menús del programa, relativos a las características de los modelos combustibles, y siempre que se utilicen los trece modelos standard considerados en BEHAVE, como es el caso de Sierra Espuña. De no ser así el programa demandaría información adicional para la conversión y asimilación de los combustibles a los modelos preestablecidos.

El primero de estos ficheros, que debe tener extensión \*.fms, contiene información sobre la humedad de la vegetación. Siguiendo el criterio utilizado anteriormente se asignan los valores medios tipificados en BEHAVE para cada uno de los modelos del área de estudio. El otro fichero, \*.adj, constituye un factor de ajuste que permite considerar variaciones locales en el avance del fuego, basado en la experiencia del observador y en datos de incendios precedentes ocurridos en la misma zona. En el caso de Sierra Espuña se considera un factor de 1 para los modelos combustibles del grupo de matorrales y de 2 para el grupo de arbolado (Finney, 1998).

---

Pese a que considera los principales factores que inciden sobre el comportamiento del fuego, hay que tener en cuenta que el diseño del programa no permite contemplar la presencia en el territorio de barreras como cortafuegos, carreteras o pistas forestales que pueden retardar el avance del incendio en una dirección determinada. La inclusión de este aspecto resultaría de gran interés en las tareas de planificación y gestión.

Además de estos datos que constituyen la base cartográfica digital, es imprescindible disponer de otros dos ficheros que contengan, por un lado los datos de vientos (wind stream inputs) y por otro los datos de tiempo (weather stream inputs). El primero contempla el mes, día, hora, porcentaje de cubierta de nubes, velocidad y dirección del viento, mientras que el segundo considera las características térmicas, pluviométricas y de humedad en el momento de la simulación. En ambos casos es imprescindible disponer de información no sólo para el día concreto para el que se pretende realizar el ensayo, sino también, como mínimo, para los días anterior y posterior al mismo. La creación de estos ficheros puede realizarse de forma sencilla mediante cualquier editor respetando el formato de entrada de datos que presenta el programa o utilizando los submenús desplegados que éste ofrece.

A continuación se introduce la localización del foco o focos iniciales del fuego, en forma de datos puntuales, lineales o espaciales, la duración del incendio, indicando día y hora inicial y final, y una serie de parámetros espaciales y temporales entre los que destacan el periodo máximo de tiempo en el que se asumen constantes las condiciones en un punto determinado para la propagación del fuego y el intervalo temporal según el cual será dibujado el frente del incendio.

Entre la información suministrada por el programa, una vez completada la simulación, destaca la representación del avance del fuego según el intervalo especificado, así como la cuantificación numérica y gráfica del perímetro y superficie total afectada. Para ello FARSITE rectifica la geometría del crecimiento del incendio en función de la pendiente del terreno mediante una proyección horizontal del desnivel

topográfico que condiciona formas aplanadas en la dirección ascendente del fuego.

En la propagación del incendio el frente es representado por el borde de una onda elíptica en expansión según el *principio de Huygens* (French, 1992). Este borde está definido por una serie de vértices en los que se realizan los cálculos del comportamiento del fuego en función de los combustibles, topografía, parámetros meteorológicos, intensidad, porcentaje y dirección de propagación. El programa contempla también la posibilidad de unión de fuegos y generación de bucles, que determinan la aparición de zonas sin quemar después del paso del incendio y a las que denomina "enclaves".

Una aplicación de FARSITE especialmente útil consiste en practicar la simulación en una zona afectada por un incendio real, lo que permitiría establecer comparaciones y comprobar la fiabilidad del modelo. No obstante, se considera adecuado efectuar una serie de ensayos previos, bajo unas condiciones térmicas, pluviométricas, higrométricas y de régimen de vientos concretas, como aproximación al comportamiento del programa frente a los distintos tipos de modelos combustibles que aparecen en el territorio.

La selección de áreas se realiza en función de la cobertura vegetal, de forma que se obtenga una respuesta diferenciada para cada modelo, en la que influirá también su ubicación espacial y las características físicas del territorio sobre el que se encuentra instalado. Como única excepción destaca el matorral de alta montaña, localizado en los niveles más altos del interior e integrado por las leguminosas de porte almohadillado dispersas sobre importantes afloramientos del sustrato rocoso. Estas particularidades hacen que la aplicación del software a este sector no resulte adecuada, ya que está diseñado para cubiertas forestales que presentan continuidad horizontal, de forma que cuando el fuego entra en contacto con zonas desprovistas de vegetación, la progresión del incendio se detiene.

---

En todas las simulaciones se consideran las mismas condiciones para la creación de los ficheros de tiempo y vientos, la misma fecha y duración del incendio y un único foco inicial de carácter puntual. A continuación se detalla el proceso de generación de los ficheros que se utilizan.

El mapa de altitudes se obtiene de la imagen original del modelo digital del terreno. Mediante el comando *window* de IDRISI se extraen, de forma independiente, una serie de ficheros cuyos límites corresponden a los de los sectores seleccionados. El mismo proceso se utiliza para generar la cartografía de pendientes, orientaciones, y los modelos combustibles, que corresponden a los trece modelos utilizados por BEHAVE (Green *et al.*, 1983). La fracción de cabida cubierta se extrae de este último por reclasificación, al asignar los intervalos que la documentación técnica de FARSITE (Finney, 1997) señala para cada uno de ellos, a partir de los porcentajes de sombreado considerados en el índice de riesgo de incendio (apartado 5.3.3.).

Se incluyen también las tres variables opcionales, altura de copas, altura del sotobosque y densidad de copas, que derivan de la reclasificación de la imagen de los modelos combustibles. Las dos primeras se extraen de diversas fuentes bibliográficas sobre la vegetación de Sierra Espuña mientras que la densidad de copas se estima a partir de fotografía aérea y trabajos de campo realizados con el apoyo de dos ingenieros forestales.

Para cada uno de los sectores seleccionados se dispone de ocho imágenes, con la misma resolución, extensión y tipo de datos que deben ser procesados para adaptarlos a la estructura interna que utiliza FARSITE. En IDRISI se convierten en ficheros *ascii* (orden *convert*) y se exportan (*export*) como imágenes de ERDAS con extensión *\*.dat*, cuyas cabeceras son sustituidas por las propias del simulador donde se recoge el número de filas y columnas, las coordenadas *x* e *y* mínimas, la resolución y el valor numérico correspondiente a los píxeles que se

---

excluyen del área de análisis. Una vez completado el proceso se genera el "*landscape*" necesario para la simulación.

Por otra parte, la creación de los ficheros de tiempo y viento requiere datos meteorológicos diarios de la zona sobre la que se está trabajando. Se ha seleccionado el día 5 de junio de 1996, ya que fue entonces cuando se produjo el incendio más importante de los documentados en Sierra Espuña.

Al carecer de una red de observatorios lo suficientemente densa y completa que proporcione medidas diarias extrapolables a las superficies consideradas, se opta por realizar los ensayos utilizando los datos de la estación meteorológica de Lorca Ceralicultura, ya que es la más cercana al área de estudio que cuenta con la información demandada por el programa. En todos los casos se considera un día despejado, con ausencia total de nubosidad, y sin que se hayan producido precipitaciones. En el anexo 18 se muestra la estructura y contenido de estos ficheros.

Con el fin de obtener una visión global del comportamiento del fuego, se considera que el incendio comienza a las 10:00 horas del día 5 de junio y se prolonga, sin que se lleve a cabo ninguna medida de control, hasta las 22:00 horas de este mismo día. Este planteamiento se aplica a todas las simulaciones.

Se contempla también una pequeña modificación consistente en asimilar al modelo combustible 1 los pequeños retazos ocupados por cultivos cuando se trata de pequeños enclaves dispersos en el interior de una zona dominada por alguno de los combustibles tipo. Este hecho se justifica porque de lo contrario el software, diseñado específicamente para incendios forestales, consideraría estas zonas como espacios totalmente desprovistos de vegetación, introduciendo modificaciones en la continuidad de avance del fuego.

## · Resultados de las simulaciones

a) *El primer ensayo* corresponde al sector de Gebas, ocupado mayoritariamente por el modelo combustible 1, sobre el que se localiza el foco de ignición.

Los resultados de la simulación 1 muestran una superficie total afectada por el fuego de 1.072,8 hectáreas para las doce horas analizadas, desplazándose hacia el sur hasta superar los límites del área de estudio (figura 64). La forma del incendio está condicionada por la abundancia de combustibles finos, que apenas ofrece resistencia al fuego, la ausencia de fuertes desniveles, y el predominio de vientos suaves que permiten un desplazamiento uniforme del fuego, sin que aparezcan zonas sin quemar, enclaves, ni se detecte la aparición de focos secundarios.

Durante las cuatro primeras horas de simulación se han quemado 86,6 hectáreas, superficie que casi se duplica una hora más tarde. Este incremento en la velocidad de propagación está condicionado por la llegada del incendio, en torno a las 14:30 horas, a las inmediaciones de una pequeña elevación situada al sureste y ocupada por repoblados jóvenes, con escaso desarrollo debido a las fuertes restricciones impuestas por el sustrato margoso, y que no obstante favorecen el ascenso del fuego ladera arriba.

La mayor actividad del incendio corresponde a las horas centrales del día (tabla 70), coincidiendo con los registros térmicos extremos. Además, la velocidad máxima de viento para el día del ensayo, 15 km/h, se produce en torno a las 13:00 horas, provocando un aumento de la distancia entre dos isocronas consecutivas.

Entre las 14:00 y las 18:00 horas el fuego se extiende sobre 785 hectáreas, lo que supone una media de 196 hectáreas afectada cada hora. El 30 por ciento de esta superficie corresponde al intervalo entre las 15:00 y 16:00 horas, en el que arden cerca de 235 hectáreas.

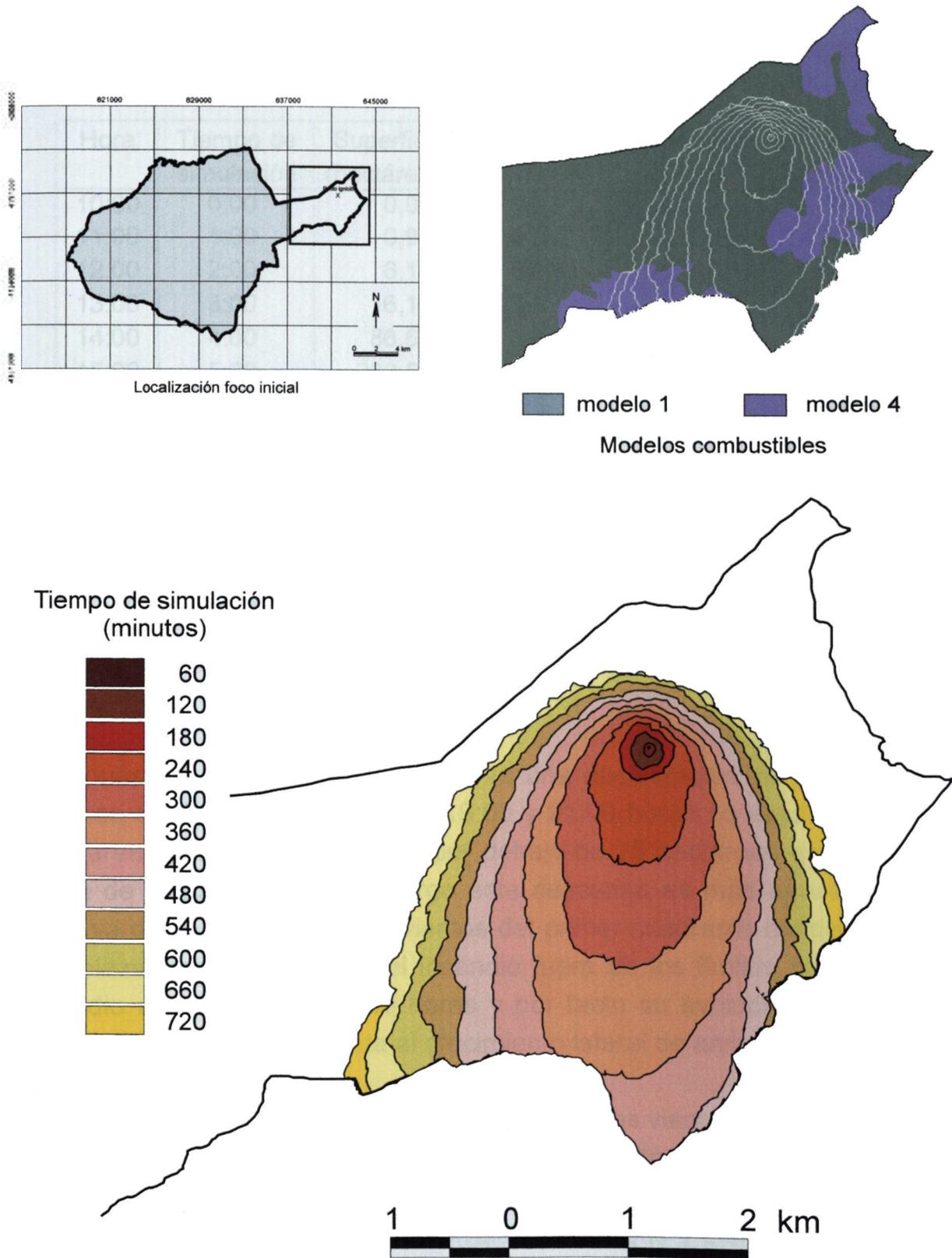


Figura 64. Resultados de la simulación 1

Tabla 70. Resumen estadístico de la evolución del avance del fuego en la simulación 1.

Hora	Tiempo de simulación	Superficie (hectáreas)	Perímetro (kilómetros)	Número de fuegos	Número de enclaves*
10:00	0:00	0,0	0,0	1	0
11:00	1:00	0,9	0,3	1	0
12:00	2:00	6,1	0,9	1	0
13:00	3:00	16,1	1,5	1	0
14:00	4:00	86,6	3,9	1	0
15:00	5:00	238,5	6,5	1	0
16:00	6:00	473,1	9,5	1	0
17:00	7:00	668,3	12,1	1	0
18:00	8:00	785,5	13,4	1	0
19:00	9:00	879,6	13,9	1	0
20:00	10:00	973,0	14,6	1	0
21:00	11:00	1.048,0	15,6	1	0
22:00	12:00	1.072,8	16,7	1	0

\* enclaves: zonas sin quemar después del paso del frente del incendio

Después de este máximo se observa una deceleración en el ritmo de avance del fuego, que entre las 19:00 y 21:00 horas no llega a las 100 hectáreas por hora, situándose por debajo de 25 hectáreas en el última hora de simulación. Sin embargo este descenso es más aparente que real ya que el predominio de vientos del primer cuadrante condiciona un desplazamiento del frente del incendio fuera de los límites del área de estudio a partir de las 17:00 horas y por tanto su evolución dentro del sector seleccionado se limita al crecimiento lateral de ambos flancos.

No obstante, y a pesar de la suavidad de los vientos involucrados en el ensayo, la superficie total afectada es muy alta. Este hecho se debe sobre todo a la facilidad del fuego para desplazarse sobre espacios ocupados mayoritariamente por matorrales de margas y cultivos abandonados, que implican el predominio de combustibles finos, que arden fácilmente y a penas suponen obstáculos a la progresión del fuego.

b) *La segunda simulación* se realiza localizando el foco de ignición en el interior de una zona ocupada por el modelo combustible 4. Se han seleccionado las repoblaciones recientes ubicadas en el centro-norte de Sierra Espuña, ya que es aquí donde estas formaciones presentan su mejor desarrollo.

Frente a la homogeneidad observada en el ensayo anterior, en este caso el incendio muestra un perímetro más irregular, adaptándose a los desniveles del terreno y a la diversidad de los modelos combustibles afectados (figura 65). Las repoblaciones, que ocupan los sectores más elevados se encuentran flanqueadas hacia el este y oeste por pinares altos, modelo 9, a través del cual el fuego encuentra dificultades para progresar debido a la reducida velocidad del viento, que dificulta la transición de las llamas desde la superficie a las copas de los árboles.

La superficie total afectada por el incendio es de 473,7 hectáreas (tabla 71), ocupadas en su mayor parte por los modelos combustibles 4 y 5. Éste último, compuesto por materiales finos, facilita la progresión del fuego en superficie. Además, su ubicación al sur del foco inicial sitúa estas zonas en la línea de acción del frente, que se desplaza acompañado de los vientos dominantes del primer cuadrante, lo que favorece el avance de las llamas en esta dirección.

La mayor actividad del incendio corresponde de nuevo al intervalo horario entre las 14:00 y las 18:00 horas, durante el cual arden 263,2 hectáreas, de las que casi un centenar se queman entre las 15:00 y las 16:00 horas. Durante las seis primeras horas de simulación el incendio mantiene el comportamiento clásico con un solo frente que se desplaza en el sentido de la dirección del viento. A partir de las 16:30 horas se constata una primera división en dos frentes cuya proximidad hace que tan sólo media hora más tarde vuelvan a confluir. El mismo comportamiento se observa entre las 17:30 y las 19:30, llegando a mantener el incendio hasta un máximo de cuatro focos activos que a las 20:00 horas se han unificado.

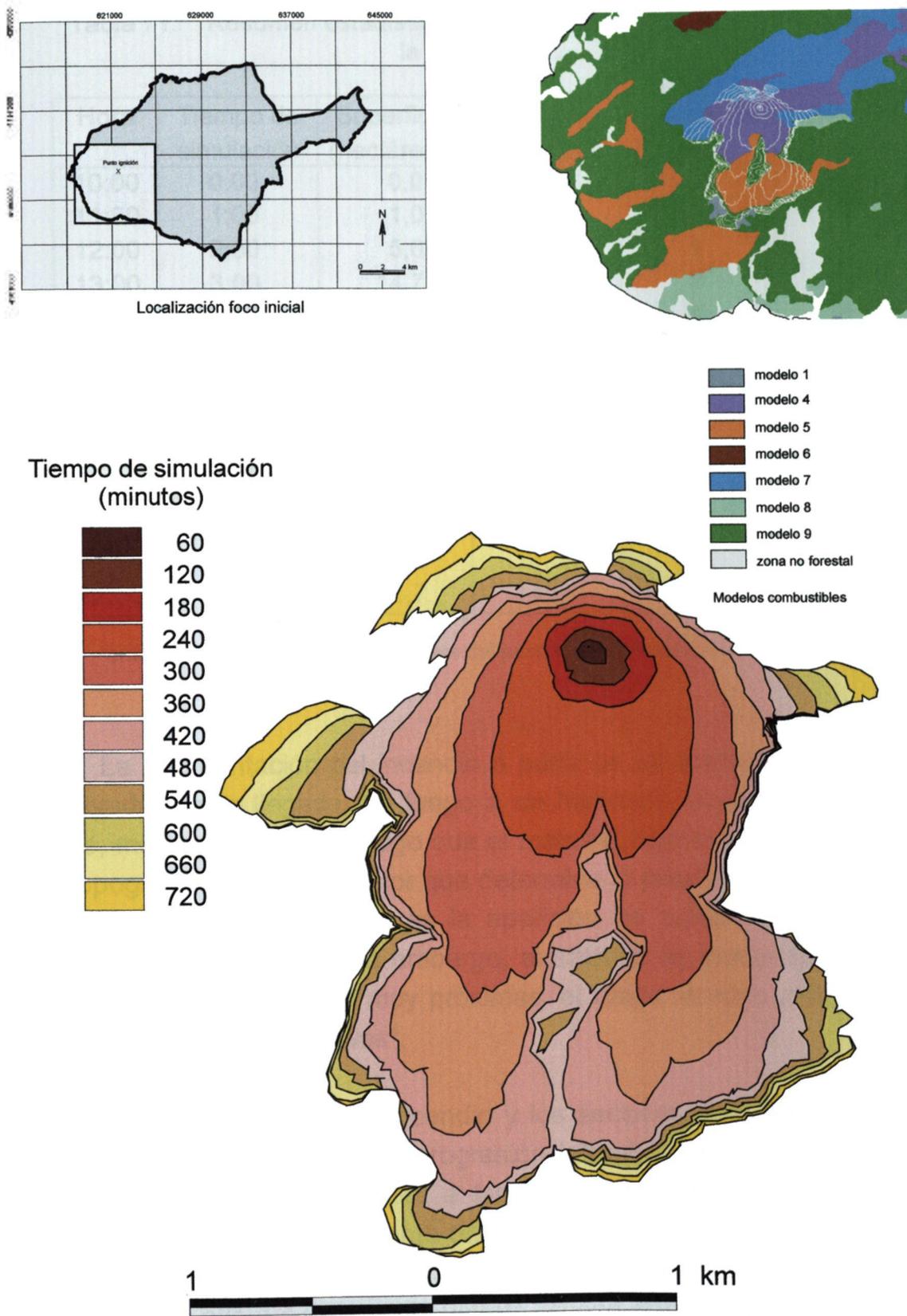


Figura 65. Resultados de la simulación 2

Tabla 71. Resumen estadístico de la evolución del avance del fuego en la simulación 2.

Hora	Tiempo de simulación	Superficie (hectáreas)	Perímetro (kilómetros)	Número de fuegos	Número de enclaves*
10:00	0:00	0,0	0,0	1	0
11:00	1:00	1,0	0,3	1	0
12:00	2:00	5,6	0,8	1	0
13:00	3:00	14,7	1,4	1	0
14:00	4:00	74,0	3,5	1	0
15:00	5:00	162,2	6,7	1	0
16:00	6:00	256,5	10,0	1	0
17:00	7:00	337,2	11,2	1	0
18:00	8:00	381,5	11,9	4	3
19:00	9:00	412,8	11,6	3	2
20:00	10:00	436,6	12,5	1	0
21:00	11:00	456,6	13,6	1	0
22:00	12:00	473,7	14,6	1	0

\*enclaves: zonas sin quemar después del paso del frente del incendio

La fragmentación del incendio a partir de un entrante o bolsa, está motivada por la llegada del fuego a un barranco, ocupado por pinares altos, más resistentes al fuego que el matorral bajo circundante, y donde la topografía va a ser el factor que determine la progresión de las llamas. La consecuencia inmediata es la aparición de zonas sin quemar que constituyen "enclaves". Sin embargo, al tratarse de una pequeña depresión cuyas laderas están muy próximas, el fuego termina afectando a la totalidad de estos "enclaves".

La parte posterior del incendio y los sectores más meridionales de ambos flancos muestran un progresión lateral, al desplazarse el fuego sobre el modelo 7 que rodea a las repoblaciones. Sin embargo, este avance no sería tan importante en una situación real ya que la discontinuidad horizontal de los matorrales de alta montaña dejan al descubierto importantes afloramientos del sustrato rocoso que constituyen un obstáculo para mantener activa la combustión.

c) *La tercera simulación* se realiza en este mismo sector, pero situando el foco de ignición inicial sobre el modelo combustible 5. La mayor parte de la superficie quemada (295,7 hectáreas) está ocupada por el modelo 5, que adopta una forma elongada hacia el suroeste, y llega a alcanzar parte de los matorrales bajos situados en el extremo suroccidental (figura 66). El comportamiento diferenciado de los pinares altos que rodean el matorral retarda el avance de los flancos del incendio, favoreciendo la aparición de bolsas o entrantes. Por otro lado, la parte posterior o retaguardia del incendio llega a alcanzar las repoblaciones recientes ubicadas al norte, hacia las que se desplaza ascendiendo ladera arriba. Sin embargo esto no facilita el avance del fuego, ya que se trata de un sector con pendientes bastante moderadas, inferiores al veinte por ciento, por lo que prima la dirección del viento y el tipo de combustible en el sentido de avance del fuego.

Durante las cuatro primeras horas el fuego progresa a gran velocidad, quemando una media de 20,6 hectáreas/hora, de forma que a las 14:00 horas han ardido 82,5 hectáreas (tabla 72), casi diez hectáreas más que las que se vieron afectadas para el mismo periodo en el ensayo anterior. En ambos casos, el fuego progresa a expensas del modelo combustible sobre el que se localiza la ignición, 4 y 5 respectivamente, lo que confirma una vez más la mayor facilidad de los matorrales bajos en la propagación del incendio bajo la influencia de vientos inferiores a los 15 km/h.

La separación que presentan las isolíneas sobre el modelo combustible 5 muestran la facilidad con la que las llamas avanzan a expensas de estos combustibles. Sin embargo, el desplazamiento del fuego ladera abajo, donde buena parte del territorio presenta entre un 60 y un 80 por ciento de pendiente, llegando al 100 por cien en algunos puntos, retarda la progresión general del incendio.

Una diferencia significativa respecto a los dos ensayos anteriores es el intervalo horario con mayor actividad, que en este caso se produce entre las 13:00 y 14:00 horas, durante las cuales arden 39,4 hectáreas.

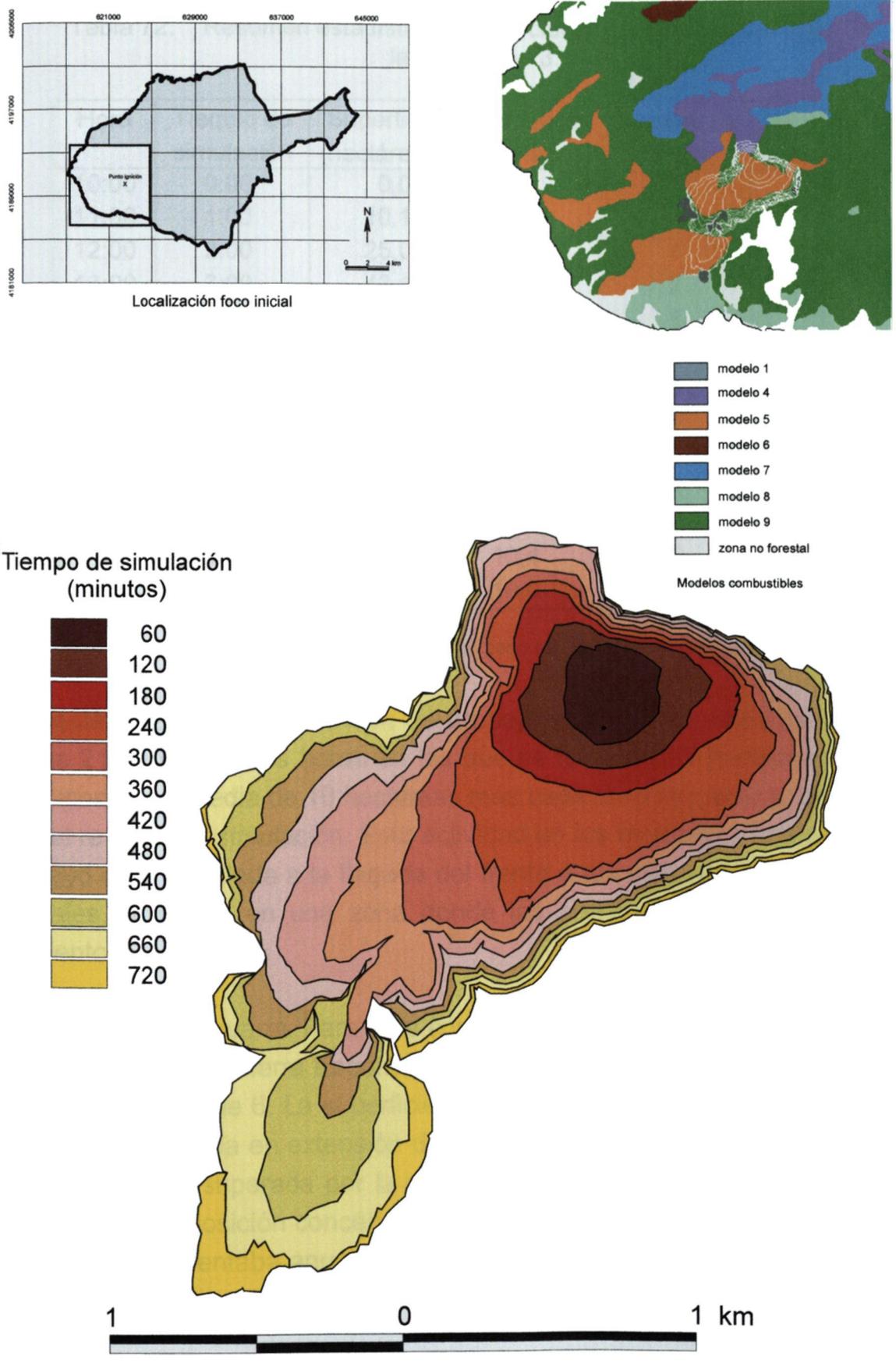


Figura 66. Resultados de la simulación 3

Tabla 72. Resumen estadístico de la evolución del avance del fuego en la simulación 3.

Hora	Tiempo de simulación	Superficie (hectáreas)	Perímetro (kilómetros)	Número de fuegos	Número de enclaves*
10:00	0:00	0,0	0,0	1	0
11:00	1:00	10,1	1,2	1	0
12:00	2:00	25,0	1,9	1	0
13:00	3:00	43,1	2,7	2	1
14:00	4:00	82,5	4,1	1	0
15:00	5:00	109,1	4,6	1	0
16:00	6:00	137,8	6,3	1	0
17:00	7:00	165,7	6,9	1	0
18:00	8:00	190,1	7,5	1	0
19:00	9:00	213,5	8,3	1	0
20:00	10:00	246,0	9,8	1	0
21:00	11:00	278,4	10,4	2	1
22:00	12:00	295,7	10,9	2	1

\*enclaves: zonas sin quemar después del paso del frente del incendio

Destaca también la aparición de un segundo máximo entre las 19:00 y las 21:00 horas, dos horas en las que se queman 65 hectáreas, lo que supone una media de 10 hectáreas más cada hora respecto a los valores del resto de la simulación. Esta actividad en los momentos finales del ensayo está vinculada a la llegada del frente a los matorrales más meridionales, ubicados en una zona donde las pendientes rondan el 40 por ciento.

d) *Simulación cuarta.* Para este ensayo se ha seleccionado una zona del centro-norte de Sierra Espuña, situando el foco de ignición sobre el modelo combustible 6. La superficie afectada por el fuego es de 795 hectáreas, la segunda en extensión de las simulaciones llevadas a cabo hasta ahora y sólo superada por la realizada para el área de Gebas. Sin embargo, la disposición concéntrica de las isocronas con un único fuego activo que presentaba aquélla, se reduce en este caso a las cuatro primeras horas (figura 67). Durante este tiempo se han quemado 136,8 hectá -

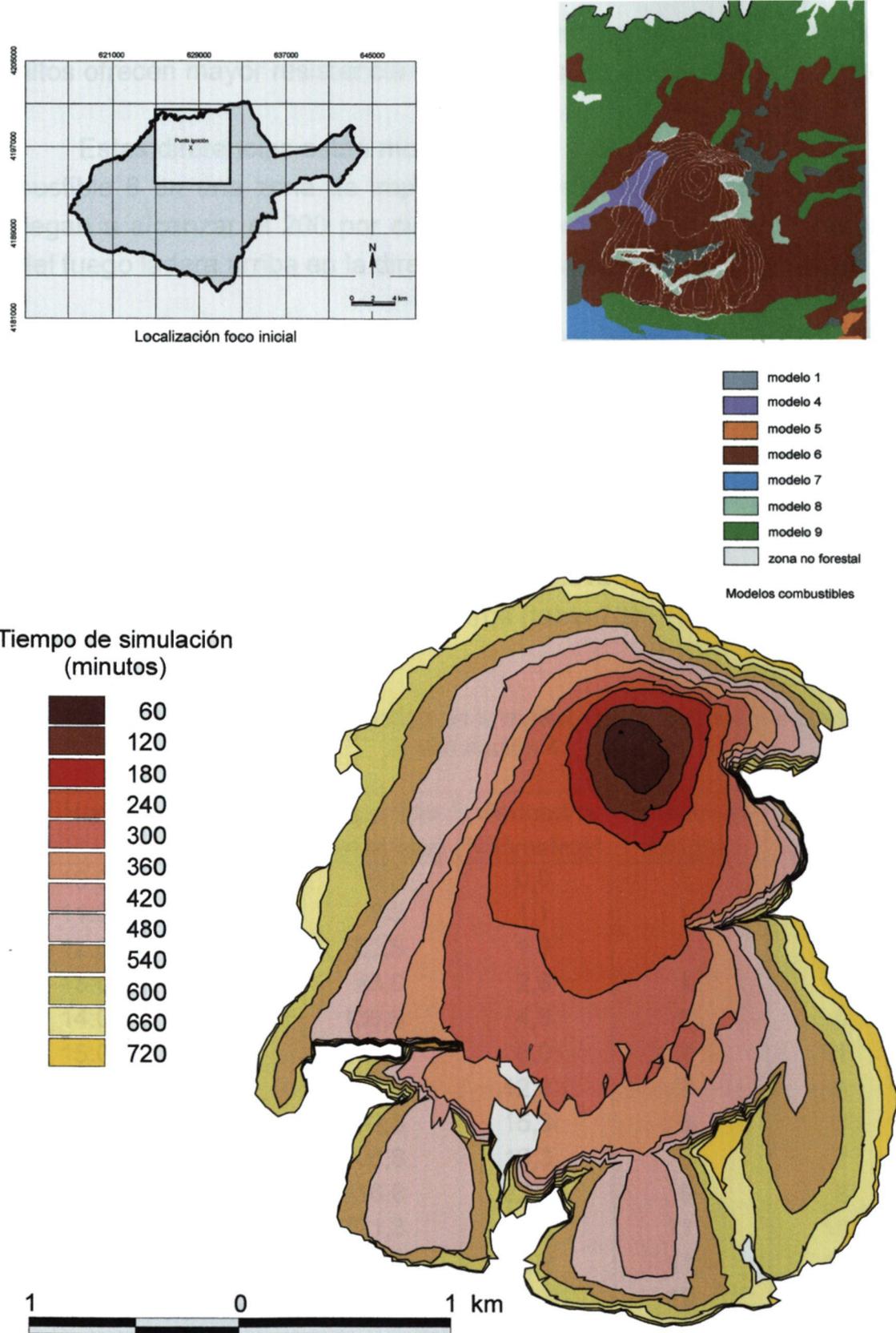


Figura 67. Resultados de la simulación 4

reas, frente a las 86,6 hectáreas de la primera, pese a que los matorrales altos ofrecen mayor resistencia al fuego que los matorrales de margas.

Estas diferencias están motivadas por la ubicación del modelo combustible 6 en una zona de importantes desniveles, con pendientes que llegan a alcanzar el 200 por cien, y que condicionan el rápido ascenso del fuego ladera arriba en la dirección del viento

La topografía y la diversidad de modelos combustibles van a condicionar la presencia de bolsas tanto en los flancos como en el frente del incendio, que pueden constituir un grave peligro para los efectivos humanos destinados a controlar el incendio. A las 15:00 horas ya se detecta la presencia de dos fuegos activos, que aumentan a medida que transcurren las horas, llegando a elevarse a doce al final de la simulación. Como consecuencia, el perímetro quemado se eleva respecto a ensayos precedentes situándose en 23,3 kilómetros (tabla 73).

Tabla 73. Resumen estadístico de la evolución del avance del fuego en la simulación 4.

Hora	Tiempo de simulación	Superficie (hectáreas)	Perímetro (kilómetros)	Número de fuegos	Número de enclaves*
10:00	0:00	0,0	0,0	1	0
11:00	1:00	8,3	1,1	1	0
12:00	2:00	22,8	1,9	1	0
13:00	3:00	43,0	2,6	1	0
14:00	4:00	136,8	4,8	1	0
15:00	5:00	237,4	8,0	2	1
16:00	6:00	318,6	12,2	7	6
17:00	7:00	393,5	15,3	8	7
18:00	8:00	506,8	19,3	8	7
19:00	9:00	616,8	22,3	9	8
20:00	10:00	721,3	24,3	11	10
21:00	11:00	775,1	23,9	11	10
22:00	12:00	794,9	23,3	12	11

\*enclaves: zonas sin quemar después del paso del frente del incendio

---

Durante las horas centrales del día, la mayor actividad del incendio corresponde al intervalo entre las 14:00 y las 15:00 horas, y coincide con la afectación del sector más deprimido ocupado por el modelo combustible 1 que favorece la extensión del fuego hacia el sur. Sin embargo el momento más crítico se produce entre las 17:30 y las 20:00 horas, dos horas y media en las que arden el 35 por ciento de la superficie total, a un ritmo de más de 100 hectáreas cada hora.

Las fuertes pendientes favorecen la progresión del incendio, pese a la llegada del fuego a una estrecha franja de pinares bajos ubicados al sur del foco de ignición inicial y que retardan su avance, como se refleja en la proximidad que presentan las isocronas en este sector. Su disposición, perpendicular al sentido de avance del incendio, provoca la fragmentación del frente en cuatro sectores diferenciados que progresan de forma independiente según la amplitud del modelo 8 que se ven forzados a atravesar.

Las horas finales del ensayo están marcadas por amplitud de las isocronas al extenderse de nuevo sobre el modelo 6, donde vuelven a unirse, ayudados por la pendiente ascendente, algunos de los frentes individualizados horas antes, que se desplazan hacia el sur hasta llegar a los pinares altos que ocupan los sectores más meridionales. La suavidad del viento considerada en todos los ensayos y la posición de resguardo frente a su dirección predominante de las zonas ocupadas por el modelo combustible 8 hacen que el incendio encuentre dificultades para progresar ladera abajo. Las llamas se ven forzadas a extenderse en sentido meridiano propiciando la unión de diversos frentes. Para corroborar esta hipótesis se ha prolongado la simulación unas horas más, comprobando que este hecho se produciría en torno a las 8:30 horas del día 6 de julio.

Los dos últimos ensayos (simulaciones 5 y 6) corresponden a incendios cuyos focos de ignición se sitúan en zonas ocupadas por los modelos combustibles del grupo de arbolado.

e) La *simulación 5* se lleva a cabo en el extremo más meridional de Sierra Espuña, donde el modelo 8 cubre una mayor superficie. Su evolución temporal (figura 68) muestra el mantenimiento de un solo frente activo, a partir del cual el fuego se extiende muy lentamente a los sectores adyacentes durante el periodo de simulación.

La superficie total afectada es bastante reducida, sin llegar a alcanzar las 13 hectáreas, ampliamente superadas en todos los ensayos anteriores. La proximidad de las isocronas revela un comportamiento uniforme en el desplazamiento del fuego, que progresa muy despacio, especialmente durante las cinco primeras horas, caracterizadas por un ritmo de avance inferior a una hectárea por hora. Esta velocidad se duplica entre las 18:00 y 20:00 horas (tabla 74), coincidiendo con el intervalo de mayor actividad, para volver a descender al final del día.

Este comportamiento difiere en gran medida de lo que cabría esperar, pues a pesar de que los pinares bajos no presentan un sotobosque bien estructurado que favorezca la continuidad horizontal y vertical de la vegetación, la cantidad de material disponible es suficiente para mantener activa la combustión y permitir su transmisión a copas y a los sectores adyacentes. Sin embargo, los resultados anteriores hacen suponer la ausencia de dificultades para el control y extinción de un incendio originado sobre el modelo combustible 8.

Esta contradicción, sólo aparente, es consecuencia directa de los parámetros empleados en la simulación, sobre todo en relación a la dirección y velocidad del viento. Los máximos en torno a los 15 km/h corresponden a vientos del primer cuadrante (6-8 grados respecto al norte). Esto hace que el conjunto de la sierra actúe a modo de barrera, dificultando la llegada de su influencia a la zona meridional, y que las llamas se desplacen únicamente en superficie, quedando su avance ligado a la topografía.

La ausencia del factor viento queda patente en la forma redondeada que adopta el incendio. Las isocronas muestran el desplazamiento del

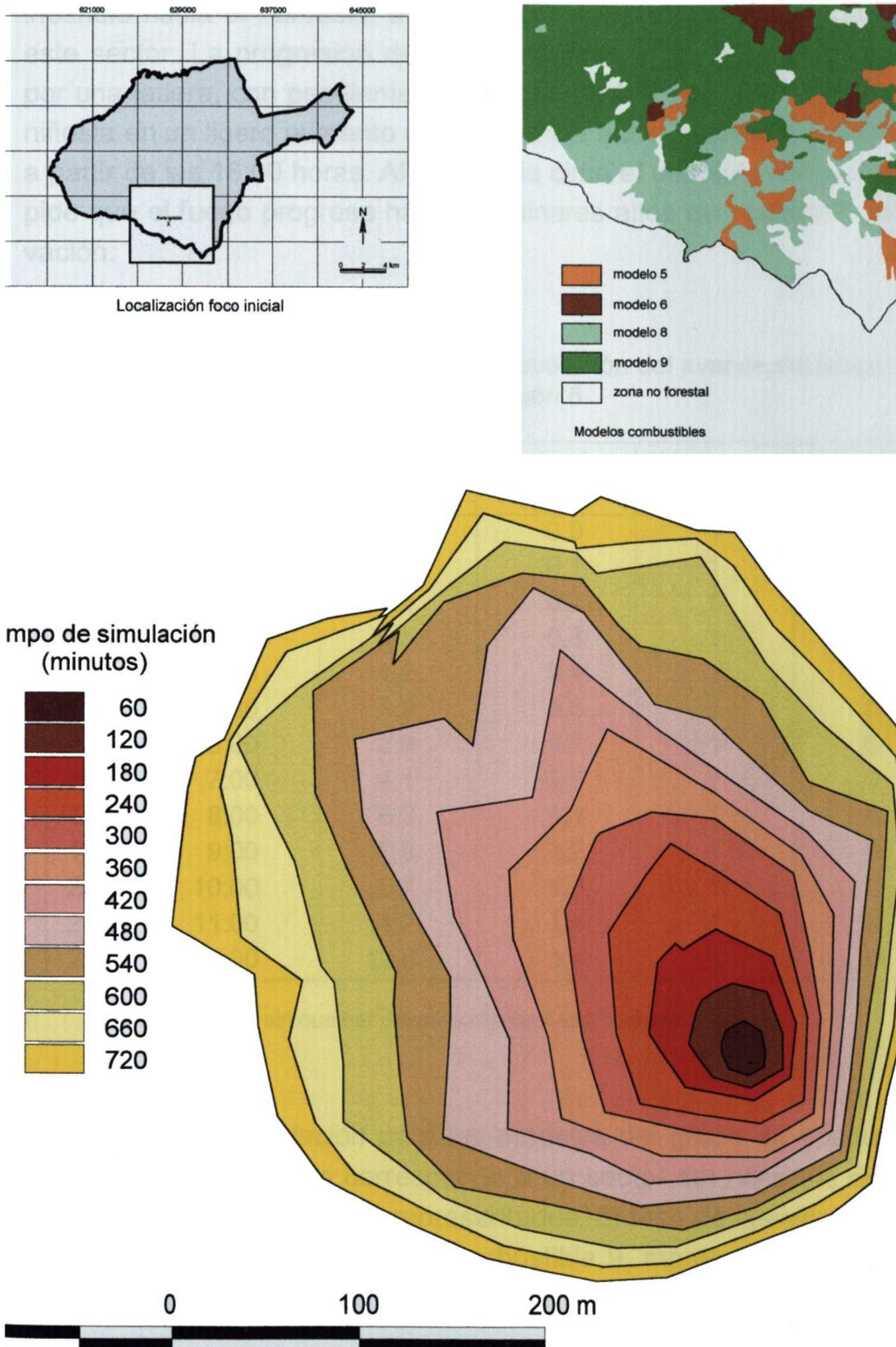


Figura 68. Resultados de la simulación 5

incendio hacia el noroeste, adaptándose al incremento de pendiente en este sector. La progresión del fuego se acelera al ascender las llamas por una ladera, con pendientes superiores al 100 por cien, lo que se manifiesta en un ligero aumento de la distancia entre isocronas consecutivas a partir de las 18:00 horas. Al llegar a la cima el desnivel disminuye e impide que el fuego progrese hacia los pinares altos que coronan esta elevación.

Tabla 74 Resumen estadístico de la evolución del avance del fuego en la simulación 5.

Hora	Tiempo de simulación	Superficie (has)	Perímetro (km)	Número de fuegos	Número de enclaves*
10:00	0:00	0,0	0,0	1	0
11:00	1:00	0,1	0,1	1	0
12:00	2:00	0,2	0,2	1	0
13:00	3:00	0,5	0,3	1	0
14:00	4:00	1,2	0,4	1	0
15:00	5:00	1,9	0,5	1	0
16:00	6:00	2,9	0,7	1	0
17:00	7:00	4,1	0,9	1	0
18:00	8:00	6,0	1,1	1	0
19:00	9:00	7,9	1,2	1	0
20:00	10:00	9,7	1,3	1	0
21:00	11:00	11,2	1,4	1	0
22:00	12:00	12,6	1,4	1	0

\*enclaves: zonas sin quemar después del paso del frente del incendio

e) La segunda *simulación* para los modelos del grupo de bosques, y la sexta de Sierra Espuña corresponde a un sector del noroeste donde los pinares altos aparecen bien representados. El foco de ignición se localiza ahora en el interior del modelo combustible 9, manteniendo sin cambios los demás parámetros que intervienen en el ensayo.

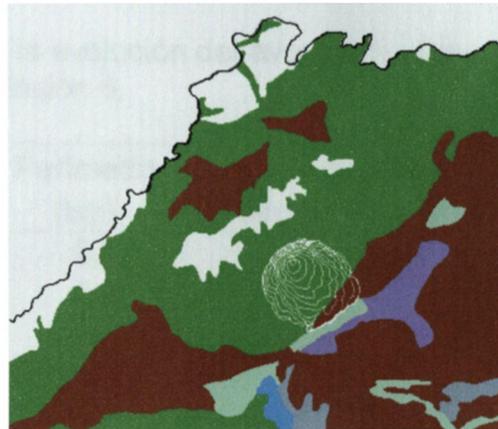
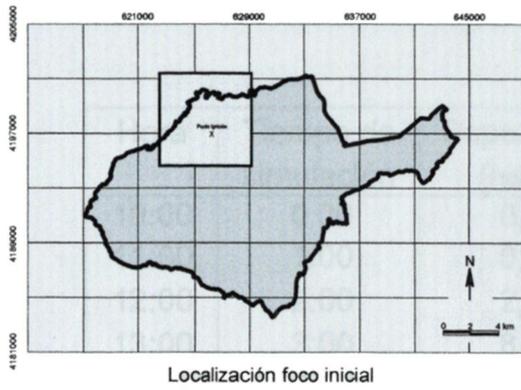
---

La evolución temporal del perímetro quemado (figura 69) muestra el desplazamiento del fuego hacia el sureste, perpendicular a lo que cabría esperar en función de la dirección predominante del viento. No obstante la ubicación del foco inicial en la vertiente septentrional de Sierra Espuña permite la acción directa de los vientos del NE, aunque su velocidad no es suficiente para contrarrestar el efecto de la topografía que favorece el avance de las llamas ladera arriba y determina la forma del incendio al final de la simulación. Además la exposición norte que presentan los pinares altos favorece la retención de humedad por parte de la vegetación, lo que dificulta aún más la transición de la llamas hacia las copas de los árboles e impide la progresión del incendio.

La superficie total afectada por el fuego es de 120,8 hectáreas (tabla 75), superior a obtenida para la simulación 5, pero muy por debajo de la resultante en los ensayos previos realizados para los modelos combustibles del grupo de matorrales.

Durante las primeras horas el incendio se desplaza con lentitud sobre los pinares altos, aumentando su velocidad progresivamente a medida que se incrementa la pendiente del terreno. Entre las 17:00 y las 17:30 las llamas entran en contacto con el modelo combustible 6, que ocupa los sectores más altos y escarpados (pendientes en torno al 200 por cien), produciéndose un rápido avance del frente. En esta media hora arden más de 10 hectáreas, elevando a 76,3 hectáreas la superficie quemada en las ocho primeras horas de simulación.

A lo largo de la simulación sólo se detecta un enclave al quedar una pequeña zona sin quemar al paso del frente, pero su extensión es muy reducida. Las dos últimas horas están marcadas por la disminución del ritmo de avance de las llamas, que carecen de energía para desplazarse ladera abajo a través del modelo combustible 8, que actúa a modo de barrera e impide la progresión del incendio hacia el interior. Una vez más se pone de manifiesto la ausencia de fuego de copas, debido a la escasa influencia del viento en la propagación de las llamas, y se constata la importancia de la topografía en el desarrollo del incendio.



Tiempo de simulación (minutos)

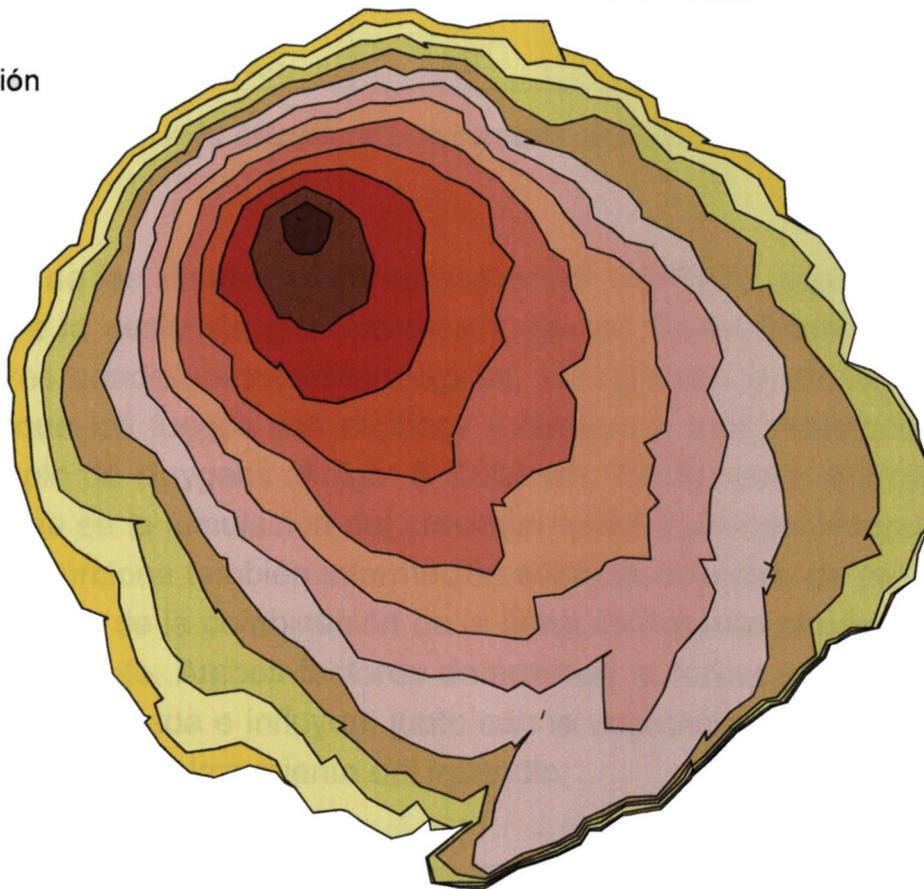


Figura 69. Resultados de la simulación 6

Tabla 75. Resumen estadístico de la evolución del avance del fuego en la simulación 6.

Hora	Tiempo de simulación	Superficie (has)	Perímetro (km)	Número de fuegos	Número de enclaves*
10:00	0:00	0,0	0,0	1	0
11:00	1:00	0,4	0,2	1	0
12:00	2:00	2,7	0,6	1	0
13:00	3:00	8,0	1,1	1	0
14:00	4:00	16,6	1,6	1	0
15:00	5:00	28,0	2,2	1	0
16:00	6:00	41,7	2,6	1	0
17:00	7:00	56,5	3,2	1	0
18:00	8:00	76,3	3,9	2	1
19:00	9:00	92,0	4,1	1	0
20:00	10:00	105,6	4,3	1	0
21:00	11:00	115,2	4,4	1	0
22:00	12:00	120,8	4,6	1	0

\*enclaves: zonas sin quemar después del paso del frente del incendio

Los resultados de las simulaciones realizadas con FARSITE aportan datos útiles sobre la evolución previsible del fuego en Sierra Espuña bajo sus particulares condiciones meteorológicas, topográficas y de vegetación. Asume que los fuegos son elípticos y desarrolla una implementación del principio de Huygens (Knight & Coleman, 1993) sobre la propagación de ondas en la simulación del crecimiento del frente del incendio. El software proporciona también información sobre la dirección de propagación, que resulta de la combinación de la línea de máxima pendiente y la dirección del viento. Ambos factores determinan la forma y extensión de la superficie quemada e influyen, junto con la vegetación, en la dirección y velocidad de desplazamiento del incendio.

Cuando los vientos son moderados, como sucede en los ensayos realizados para Sierra Espuña, los modelos combustibles y sobre todo la topografía se convierten en factores esenciales que influyen sobre manera en la dirección y velocidad de propagación. El fuego progresa rápida-

---

mente en las zonas donde predominan combustibles del grupo de pastizales o matorral, correspondiendo los valores máximos al conjunto de matorrales de margas y cultivos abandonados que integran el modelo 1. Además de ocupar los sectores más deprimidos del área de Gebas, presentan grandes cantidades de materiales finos, que apenas retienen la humedad, lo que les hace muy vulnerables a la acción del fuego.

Todas las simulaciones se han desarrollado bajo las mismas condiciones térmicas, pluviométricas, higrométricas y régimen de vientos. Se han prolongado por un espacio de doce horas, resultando afectados, la mayoría de las veces, diversos tipos de cubierta. No obstante, la ubicación de los focos iniciales en el interior de cada modelo combustible permite obtener una respuesta diferente para cada uno de ellos, al menos durante las primeras horas de las simulaciones. El más rápido es el modelo 1, frente al grupo de bosques, modelos 8 y 9, donde los porcentajes de sombreado superiores al 60 por ciento favorecen la retención de humedad del sotobosque y provocan un aumento del diámetro de los combustibles presentes en estas zonas.

La representación cartográfica de la evolución temporal del incendio y la posibilidad de su integración en un SIG proporcionan una información precisa sobre las características y localización espacial de las zonas afectadas por el fuego. Además de aportar información sobre sus consecuencias en el conjunto del territorio, permite establecer las medidas oportunas en la lucha contra el fuego, la ubicación idónea de los efectivos de control en caso de producirse un incendio, así como los métodos más adecuados para minimizar sus efectos en función del tipo de fuego y su evolución más probable.

FARSITE también dispone de módulos para la aplicación de medidas de control del fuego, previa introducción del tipo y número de efectivos disponibles, aportando información acerca de las operaciones de extinción más adecuadas en cada caso. El programa permite simular la respuesta del incendio frente a diversos tipos de ataques: directo, indi-

---

recto o aéreo, siendo posible identificar la cuadrilla apropiada para la extinción y el método a emplear en cada caso.

Entre la información proporcionada por el software destaca la posibilidad de conocer de forma anticipada la duración que debe tener el ataque, las rutas de acceso más adecuadas para las cuadrillas, y el lugar exacto donde debe iniciarse un cortafuegos y su longitud más apropiada. También permite realizar una selección de medios aéreos a emplear dependiendo del nivel de cobertura del modelo combustible sobre el que se quiere actuar, localizar la línea a lo largo de la cual caerá el retardante y el tiempo durante el cual es efectivo, así como llevar a cabo un análisis económico de los costes de extinción.

FARSITE combina algunas de las posibilidades básicas de análisis espacial de los SIG y las características propias del simulador de incendios, lo que convierte a este software en una herramienta de trabajo muy útil para ayudar en las tareas de prevención y extinción (Rodríguez Ortega, 1999). Puede servir de apoyo a la toma de decisiones, pero nunca sustituir la experiencia de los técnicos encargados de la lucha contra el fuego que son los que deben establecer las medidas de actuación oportunas.

Al principio de este capítulo se planteaba la posibilidad de aplicar FARSITE al análisis del suceso más importante ocurrido en Sierra Espuña en los últimos años, incendio del día 5 de junio de 1996, en el que ardió 254,4 hectáreas, según se recoge en el Parte del Incendio. El evento fue de tal magnitud que sus efectos son claramente visibles en figura 70 correspondiente a una imagen del satélite *Landsat TM* obtenida el día 4 de julio de 1996, un mes después del suceso.

No obstante, hay una serie de limitaciones importantes que impiden llevar a cabo esta propuesta.

En primer lugar es necesario conocer las condiciones meteorológicas exactas en el momento del incendio, para elaborar los ficheros de

tiempo y vientos que controlarían la simulación. Sin embargo no se dispone de esta información, pese a que en la Ficha del incendio debía constar al menos los datos relativos al día del suceso y los días transcurridos desde la última lluvia. La realización del ensayo con los registros de la estación meteorológica de Lorca resulta inadecuada ya que los resultados pueden variar sustancialmente, y ello hace inviable su comparación.

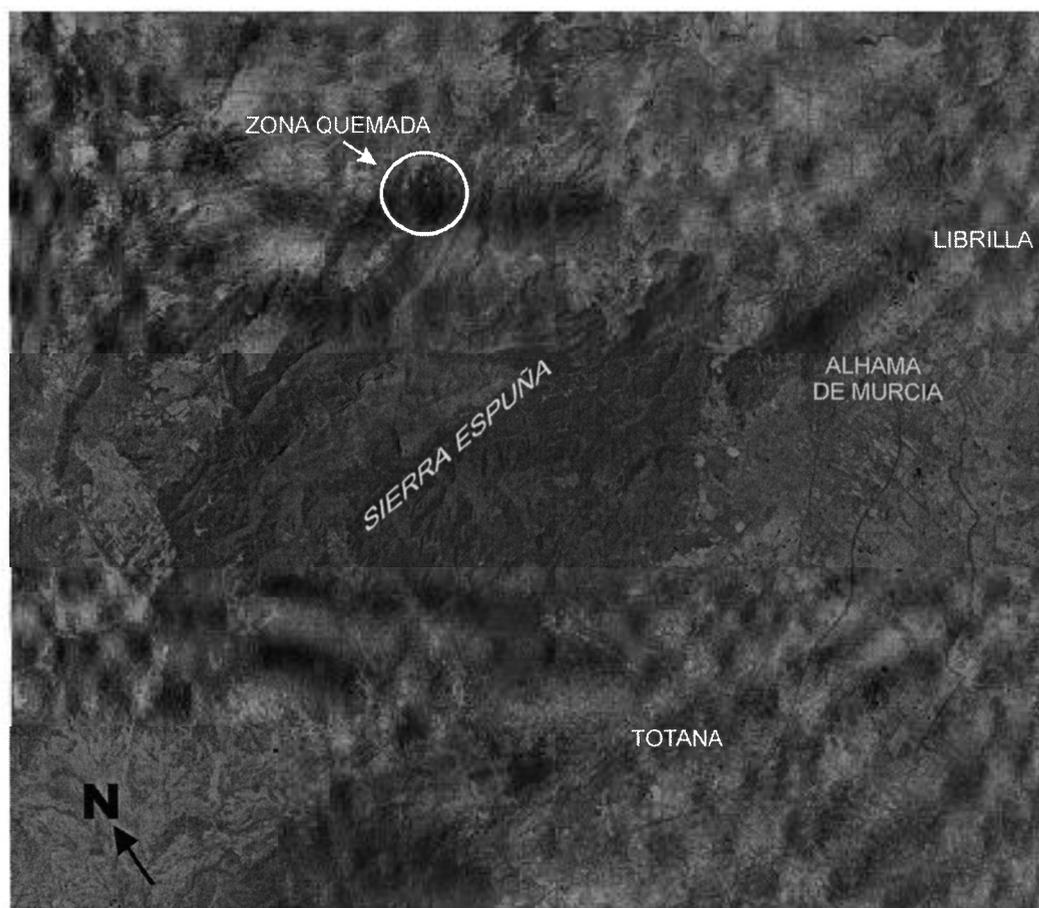


Figura 70. Localización de la zona afectada por el fuego en el incendio del día 5 de junio de 1996. Imagen Landsat-TM banda 4, día 4 de julio de 1996.

Tampoco se conoce con exactitud la localización del foco inicial del fuego, ya que el parte del incendio dice textualmente: "el incendio empieza por la línea eléctrica del pozo de la finca particular del Barbol que estaba demasiado baja y la vegetación del barranco demasiado alta. Bajo el sol de la mañana y el fuerte sol se recalienta y hace que arda la vegetación".

No hay alusión alguna al nombre del barranco ni existe ningún gráfico que permita ubicar exactamente el comienzo del fuego. Además, según se desprende del Parte, se podría pensar que el foco de ignición tiene carácter lineal o al menos que se producen de forma simultánea varios focos puntuales. Sin embargo, después realizar diversas consultas con personas que trabajaron directamente en este suceso, se ha tenido conocimiento de que algunos informes oficiales señalan que el incendio comenzó como consecuencia de la quema voluntaria e intencionada de uno de los postes que conducían la línea eléctrica del pozo, y en tal caso debería considerarse un solo foco inicial y con carácter puntual.

Estas contradicciones y la imposibilidad de disponer de información básica de los parámetros que controlan la simulación, hace que los resultados que puedan derivarse del ensayo no resulten adecuados para ser comparados con los datos reales del suceso. Por estos motivos se ha considerado conveniente prescindir de la comparación, ya que el ensayo no puede realizarse con las garantías suficientes como para extraer conclusiones definitivas sobre la bondad de FARSITE y su nivel de adecuación a una situación real.

No obstante, este suceso es el más grave de los ocurridos en Sierra Espuña en los últimos años, por lo que se ha creído conveniente dedicarle una atención especial mediante la aplicación conjunta de técnicas de teledetección y SIG.

#### **5.4. Aplicación de la teledetección al reconocimiento de áreas afectadas por el fuego**

La caracterización espectral de las zonas afectadas por incendio constituye el punto de partida para su estudio mediante sistemas de teledetección (Martín y Chuvieco, 1995a, 1995b, 1998). El comportamiento espectral de una cubierta vegetal en los días inmediatamente posteriores al incendio ofrece una respuesta característica, ya que las plantas experimentan alteraciones en su estructura y composición. La hoja quemada

pierde parte de sus pigmentos fotosintéticos con lo que la reflectividad del visible tiende a ser mayor, mientras que el deterioro de la estructura celular causa una reducción de la señal en el infrarrojo cercano (Viné *et al.*, 1996).

La pérdida de humedad aumenta la reflectividad en el infrarrojo medio, al tiempo que se incrementa la temperatura del área quemada (Martín *et al.*, 1995). En general, la vegetación sana se caracteriza por una reflectividad reducida en el visible y elevada en el infrarrojo cercano, que disminuye hacia el infrarrojo medio (figura 71). La vegetación quemada tiende a presentar una curva más plana.

La teledetección permite también estimar el contenido en humedad de la vegetación mediante la aplicación de índices de vegetación normalizada (NDVI) siendo posible identificar las formaciones que han sido afectadas por el fuego. El NDVI se relaciona directamente con la cantidad de biomasa verde de forma independiente a las especies vegetales que forman la comunidad (Rouse *et al.*, 1974; Gamon *et al.*, 1995; Aguado *et al.*, 1998a, 1998b), por lo que la comparación de estos valores para imágenes de un mismo territorio en fechas sucesivas puede contribuir a evaluar la variabilidad de la respuesta de las comunidades vegetales al fuego, permitiendo realizar un seguimiento de los procesos de regeneración.

Sin embargo, algunos autores han cuestionado la validez del NDVI, al constatar la influencia ejercida por el tipo suelo que subyace a la vegetación e introducen un parámetro corrector en la fórmula original, dando lugar a denominado índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) (Gilabert, 1991).

En la actualidad existe una amplia gama de productos relacionados con la teledetección, aunque en la elección de uno u otro satélite debe primar la adecuación de la resolución espacial y espectral a la escala de trabajo, y la frecuencia horaria que éstas presentan. Sin embargo, en muchas ocasiones el elevado coste económico que supone la adquisi-

ción de determinadas imágenes resulta decisivo a la hora de realizar esta selección.

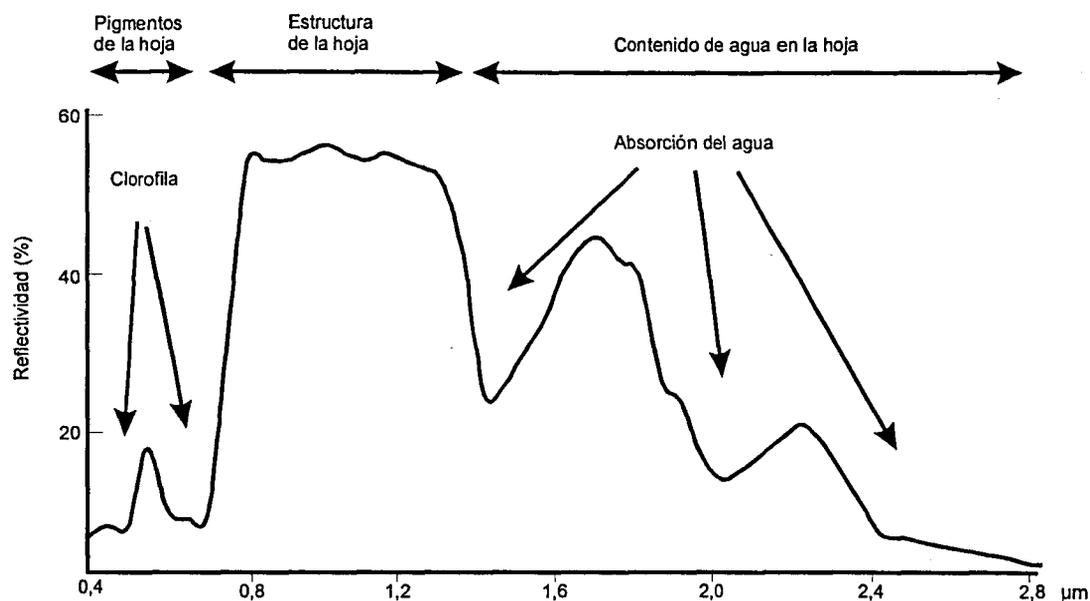


Figura 71. Signatura espectral de la vegetación sana (Chuvieco, 1995).

En los últimos años la aplicación de imágenes NOAA a la cartografía y evaluación de los incendios forestales se ha incrementado notablemente (Casanova *et al.*, 1993; Pereira, 1998; Pérez Caballero y De la Riva, 1998; Valor y Casselles, 1996; Vidal *et al.*, 1994). El sensor AVHRR proporciona un recubrimiento completo del planeta cada doce horas con una resolución espacial de 1,1x 1,1 kilómetros, lo que, unido a la existencia de una completa serie de datos históricos, hace que su empleo resulte muy adecuado para el estudio de fenómenos dinámicos a pequeña escala (González Alonso *et al.*, 1996).

Para determinar la magnitud del incendio ocurrido en Sierra Espuña el día 5 de junio de 1996 se analiza la imagen Landsat, correspondiente al día 4 de julio de ese mismo año. Con ello se pretende establecer los límites del área quemada y conocer, en combinación con otras fuentes cartográficas, las formaciones vegetales afectadas.

Se ha optado por trabajar con el sensor TM (*Thematic Mapper*), ya que proporciona un barrido multi-espectral, con 7 bandas, y una resolución espacial de 30 x 30 metros, acorde con la escala para la que se ha confeccionado el SIG. Además, dispone de dos bandas del infrarrojo medio (IRM), más directamente relacionadas con el contenido en humedad que la banda 3 del NOAA-AVHRR (3,55-3,93  $\mu\text{m}$ ), ya que las bandas 5 (1,55-1,75  $\mu\text{m}$ ) y 7 (2,08-2,35  $\mu\text{m}$ ) del TM se sitúan en torno a las longitudes de onda donde se originan los picos de reflectividad (1,6-2,2  $\mu\text{m}$ ) (Desbois y Vidal, 1996; Cocero *et al.*, 1996, 1998; Díaz Delgado *et al.*, 1998).

Las imágenes procedentes de sensores remotos presentan una serie de alteraciones radiométricas y geométricas (Pattillo, 1992) que es preciso corregir antes de su utilización. Las deformaciones más frecuentes se agrupan en cuatro categorías (Chuvienco, 1987, 1999): i) distorsiones originadas por la plataforma debidas a pequeñas variaciones en la altitud de la órbita del satélite, velocidad u orientación de alguno de sus ejes, ii) distorsiones provocadas por la rotación terrestre, iii) fallos de calibración de los sensores que provocan la pérdida de una serie de líneas o píxeles en la imagen final iv) alteraciones motivadas por la presencia de gases, aerosoles y vapor de agua en la atmósfera.

El proceso de corrección radiométrica resulta bastante complejo, existiendo una serie de equipos especializados que realizan esta labor. Además en los últimos años los suministradores de las imágenes de satélite tiende a solventar estos problemas, ofreciendo las imágenes ya corregidas radiométricamente. Sin embargo, la corrección geométrica, más sencilla de realizar aunque no carente de complicaciones, suele llevarla a cabo el usuario final.

La imagen del día 4 de julio de 1996 utilizada en Sierra Espuña, precisó ser corregida geométricamente, de manera que sus coordenadas se ajustasen a las coordenadas reales del territorio.

Uno de los mejores métodos para realizar esta transformación es la aplicación del módulo de tratamiento de imágenes de GRASS, que permite introducir sin dificultad un elevado número de puntos de control, aumentando así la exactitud del ajuste. Este tipo de corrección resulta vital cuando se realizan estudios multi-temporales o en caso de utilizar información adicional, ya que una significativa imprecisión en esta fase puede invalidar las conclusiones posteriores del trabajo (Gordon, 1980).

Sin embargo en el caso de Sierra Espuña se trabaja sólo con una imagen, y el objetivo es la detección visual de la zona afectada por un incendio concreto. De ahí que se opte por utilizar el módulo de tratamiento de imágenes de IDRISI, aún siendo conscientes de que los resultados obtenidos no será tan precisos. Además la resolución de la imagen original, donde los píxeles representan una superficie de 30 x 30 metros, y la ausencia de elementos suficientemente representativos en el territorio, como carreteras, canales o líneas férreas, dificulta aún más el establecimiento de puntos de control exactos.

El procedimiento se basa en la creación de un fichero de valores que contiene un total de diez puntos de control, identificados en la imagen y sobre la cartografía de la zona, para los que se extraen los pares de coordenadas correspondientes. Mediante la orden *resample*, y utilizando un ajuste lineal, el programa establece internamente una regresión que relaciona las coordenadas de la imagen con las del mapa. La bondad de su ajuste puede conocerse ya que el software devuelve el error medio residual (RMS) permitiendo al operador incluir más puntos u omitir aquéllos que considere oportunos. Se recomienda que este valor no exceda la mitad de la resolución de la imagen de salida (Ronald, 1996).

La translación del valor de los píxeles a su nueva posición espacial se lleva a cabo mediante el método del vecino más próximo, el más habitual en los trabajos de corrección (Chuvienco, 1995), de manera que el valor de cada celdilla de la imagen corregida corresponderá al del píxel más cercano de la imagen original.