



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*

5.2.4. Frecuencia y magnitud de los incendios forestales en Sierra Espuña.

El análisis de los Partes de Incendios elaborados en la Región de Murcia, entre los años 1985 y 1997, pone de manifiesto la ocurrencia de treinta y nueve eventos en el ámbito de Sierra Espuña, que suponen una superficie total afectada por el fuego próxima a 272 hectáreas. Entre los incendios catalogados destaca de manera significativa el ocurrido el día 5 de junio de 1996, que afectó a 254,4 hectáreas y se localizó en el extremo más septentrional de la Sierra, extendiéndose al norte de la carretera que conecta los núcleos de población de Casas Nuevas y Pliego, límite superior de la zona de estudio.

Comparando el número de sucesos acaecidos en Espuña con los ocurridos en estos trece años en la Región de Murcia en su conjunto (tabla 31), se observa que aquéllos apenas suponen el 3 por ciento del total, porcentaje que se reduce aún más si se consideran las superficies afectadas por el fuego.

De aquí podría deducirse una escasa significación a nivel regional de los incendios acaecidos en el Parque. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en 1994 tuvo lugar el mayor y más devastador incendio que ha afectado a la Región, al menos en las dos últimas décadas, y que se extendió sobre cerca de 26.000 hectáreas. Prescindiendo de este evento excepcional, la superficie quemada en Sierra Espuña constituye casi el 30 por ciento del total regional para este periodo y el suceso de 1996 supuso, por sí solo, más del 75 por ciento del territorio afectado ese año en toda la Comunidad Autónoma.

La evolución temporal del número de incendios forestales se muestra en la figura 40. En ella se han representado los valores porcentuales respecto al total de la serie en Sierra Espuña y en el conjunto de la Región, excluyendo en este caso los incluidos en la zona de estudio. En 1995 se contabilizaron siete incendios forestales en el Parque Regional, que constituyen el 17,9 por ciento del total de sucesos ocurridos en el

periodo analizado. El segundo lugar lo detenta 1990 con cinco sucesos, el 12,8 por ciento, coincidiendo con el máximo regional.

Tabla 31. Distribución anual del número de incendios forestales y superficie afectada en Sierra Espuña y la Región de Murcia (1985-1997)

año	Sierra Espuña		Región de Murcia	
	número incendios	superficie hectáreas	número incendios	superficie hectáreas
1985	6	0,74	19	31,93
1986	2	0,06	13	6,36
1987	0	0,00	22	13,91
1988	2	0,01	20	7,97
1989	2	0,70	61	186,36
1990	5	5,04	239	1.496,15
1991	2	5,00	148	1.650,29
1992	4	0,29	88	271,80
1993	3	0,18	120	631,34
1994	3	2,00	171	26.834,57
1995	7	3,46	122	74,66
1996	1	254,42	99	329,20
1997	2	0,01	118	81,60
totales	39	271,91	1.240	31.616,14

Entre los años 1987 y 1991 se observa cierto paralelismo entre ambas curvas, que aumentan progresivamente hasta 1990, y descienden al año siguiente.

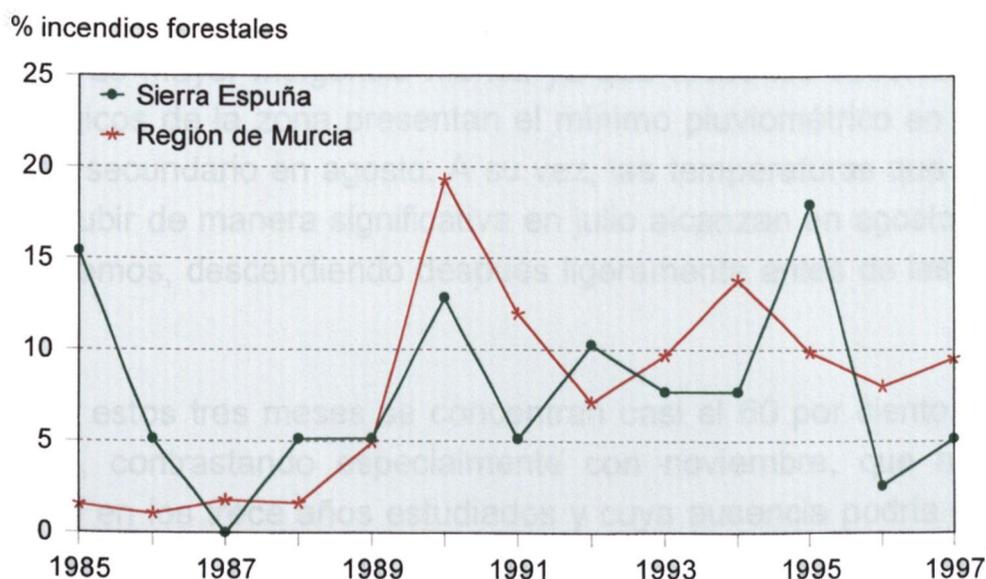


Figura 40. Evolución temporal de los porcentajes anuales de incendios forestales en Sierra Espuña y la Región de Murcia (1985-1997)

A partir de 1991 el comportamiento es más diferenciado entre Espuña y la tendencia regional, para volver a coincidir a través de un incremento gradual del número de incendios iniciado en 1996.

El tipo de superficie afectada por el fuego en estos trece años en Sierra Espuña es mayoritariamente arbolada, con porcentajes incluso superiores a los que presenta el resto del territorio regional (figura 41).

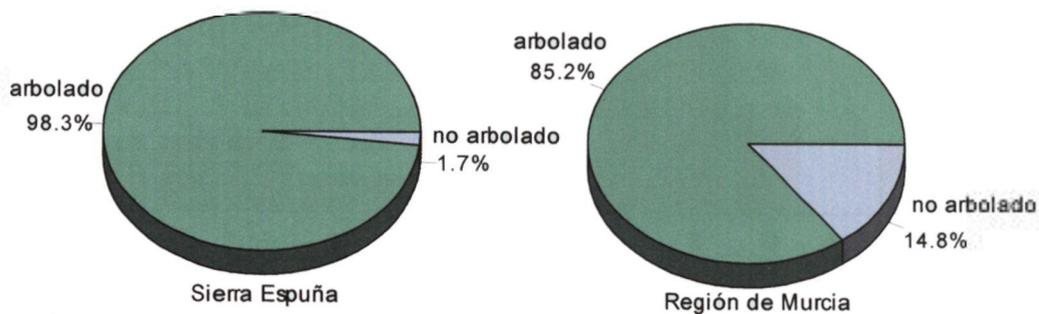


Figura 41. Tipo de superficie afectada por los incendios forestales en Sierra Espuña y la región de Murcia (1985-1997).

La distribución mensual del número de incendios en Sierra Espuña (figura 42) mantiene el comportamiento general descrito a nivel regional, siendo agosto el mes que registra un mayor número de sucesos, seguido de julio y septiembre. Existe por tanto una coincidencia temporal con el periodo de mayor indigencia hídrica ya que todos los observatorios meteorológicos de la zona presentan el mínimo pluviométrico en julio, y un mínimo secundario en agosto. A su vez, las temperaturas que comenzaban a subir de manera significativa en julio alcanzan en agosto sus valores extremos, descendiendo después ligeramente antes de las lluvias de octubre.

En estos tres meses se concentran casi el 60 por ciento de los incendios, contrastando especialmente con noviembre, que no registra ninguno en los trece años estudiados y cuya ausencia podría estar relacionada con las favorables condiciones de humedad de que dispone la vegetación después de registrarse en octubre las máximas de precipita-

ciones. No obstante, habría que disponer de un mayor número de sucesos para poder confirmar adecuadamente esta apreciación.

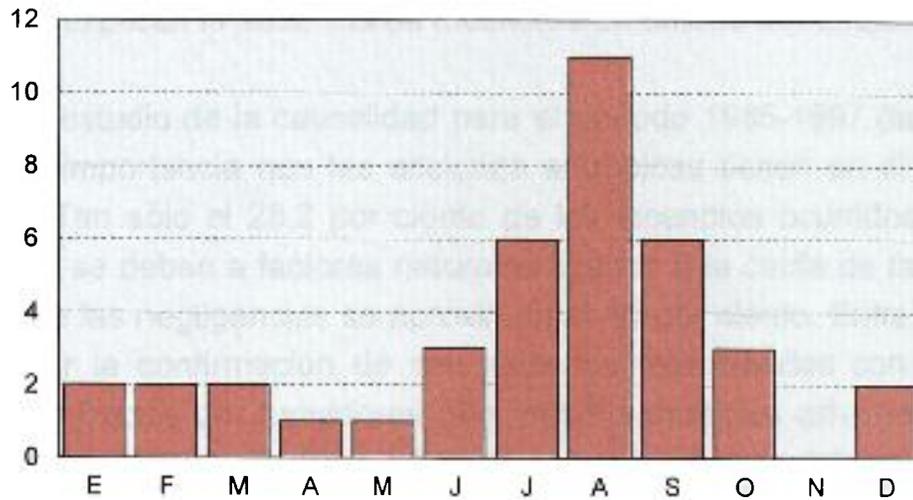


Figura 42. Distribución mensual del número de incendios forestales en Sierra Espuña (1985-1997)

La incidencia del número de incendios por término municipal (figura 43) se encuentra estrechamente relacionado con la superficie representada por cada uno de ellos en el interior de la zona de estudio.

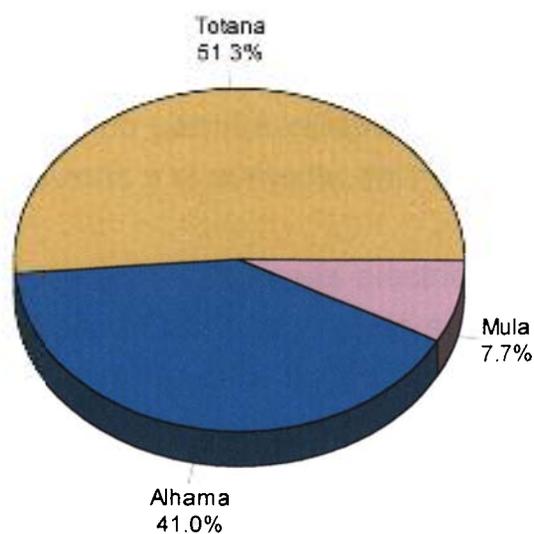


Figura 43. Distribución del número de incendios por términos municipales en Sierra Espuña y su entorno.

En el más extenso, Totana, se registran veinte incendios durante los trece años de análisis, que suponen el 51,3 por ciento, seguido de Alhama de Murcia, con dieciseis, y Mula con tres. La reducida extensión de la superficie perteneciente a los municipios de Lorca y Aledo en el interior del Parque explican la ausencia de incendios en ambos territorios.

El estudio de la causalidad para el periodo 1985-1997 (tabla 32) refleja la importancia que las acciones antrópicas tienen en el origen del fuego. Tan sólo el 28,2 por ciento de los incendios ocurridos en Sierra Espuña se deben a factores naturales ligados a la caída de rayos, mientras que las negligencias se aproximan al 40 por ciento. Entre ellas cabe destacar la confirmación de seis sucesos relacionados con descuidos protagonizados por fumadores que, pese a múltiples advertencias y recomendaciones desde los medios de comunicación social, arrojan por las ventanillas de sus vehículos cigarrillos encendidos sin pensar en las consecuencias que este tipo de acciones puede tener. En todos estos casos el origen del fuego está situado en las proximidades de vías de comunicación. Las carreteras constituyen también el lugar de inicio de los dos únicos incendios intencionados que aparecen en el área de estudio.

En esta línea sería interesante conocer la distribución de los incendios según el día de la semana en que se producen, y la posible vinculación del hombre con el inicio del fuego. Sin embargo, pese a que en los Partes de Incendios se diferencia entre día laborable, festivo y víspera de festivo, la ausencia de consignación de este dato en la mayoría de los Partes de Sierra Espuña, no permite establecer vínculos entre el incremento de visitantes a la zona y el aumento del número de sucesos.

Por otra parte, la presencia de líneas eléctricas que discurren sobre zonas de difícil acceso puede ser la causa de sucesos bastante graves, donde el desencadenante suele estar ligado a las altas temperaturas y a la deficiente limpieza del monte. De hecho, el mayor incendio ocurrido en Sierra Espuña en las últimas décadas y detectado por un agente forestal a las 11:30 horas del 5 de junio de 1996, se atribuye al recalentamiento de una línea eléctrica, demasiado baja, que al entrar en contacto con la

vegetación, bastante seca en esta época, provocó el inicio del fuego. A nivel regional, el origen oficial del ya tristemente célebre incendio de Moratalla, en junio de 1994, está también vinculado a una línea eléctrica.

Tabla 32. Causalidad de los incendios forestales en Sierra Espuña (1985-1997)

CAUSAS	nº de incendios
NATURALES.....	11
Rayo	11
NEGLIGENCIAS	15
quema agrícola	2
quema pastos	2
trabajos forestales	4
hogueras	1
fumadores	6
OTRAS CAUSAS	3
líneas eléctricas	2
Motores y máquinas	1
INTENCIONADO.....	2
DESCONOCIDA	8
total número de incendios.....	39

Como se ha expuesto con anterioridad, aunque la localización del origen del incendio ofrecida en los "Partes" carece de la exactitud necesaria para ubicar los sucesos de forma precisa, supone la única información de los focos más frecuentes de inicio del fuego. Entre los 39 incendios estudiados se observa un predominio de aquéllos que empiezan en las proximidades de una carretera, camino o senda, que en conjunto alcanzan más del 50 por ciento (figura 44), por lo que estas zonas se convierten en áreas especialmente sensibles y así deben considerarse en la zonación del riesgo. Un porcentaje ligeramente inferior presentan aquellos que se incluyen bajo la denominación genérica de "otros lugares en el monte", más difíciles de localizar aunque en ocasiones los datos relativos a ele-

mentos del paisaje, como alusiones a barrancos, hitos topográficos relevantes o nombre del paraje pueden ayudar a situarlos espacialmente.

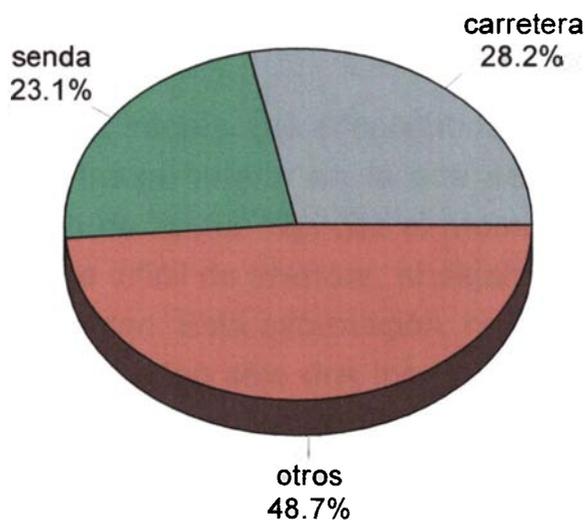


Figura 44. Porcentajes de incendios forestales según la localización del inicio del fuego en Sierra Espuña (1985-1997).

Ni uno solo de los eventos considerados tiene su origen catalogado en "lugares de afluencia de excursionistas", apartado incluido en las fichas de incendios y donde, a priori, cabría esperar que se produjeran un mayor número de sucesos ligado a descuidos. La explicación de este hecho podría estar, por un lado, en la tipología de esas zonas de recreo entre las que se encuentran edificios e instalaciones preparadas como son los albergues juveniles y campings, con escasa predisposición a incendiarse, y por otro, las zonas acondicionadas con mesas y bancos para actividades al aire libre. La mayor parte de estas zonas se localizan en las inmediaciones de las casas forestales favoreciendo el cumplimiento de las normas relativas a la utilización del fuego por parte de los visitantes que son advertidos del peligro de incendio mediante carteles instalados para tal fin.

Pese a todo sería necesario disponer de un periodo temporal más amplio con un mayor número de sucesos para confirmar esta idea, al tiempo que sería deseable contar en adelante, con una mayor precisión en los datos relativos a la localización de los focos iniciales. Sería intere-

sante fomentar, al menos, la realización, por parte del personal responsable, del croquis de situación previsto en los Partes de Incendios dejando constancia de los detalles más relevantes que convergen en la zona afectada.

Otro aspecto de interés que proporcionan estos documentos es la aproximación a la franja horaria en la que se producen los incendios. Aunque no señalan de forma explícita el momento exacto del inicio del fuego, por otra parte difícil de precisar, si dejan constancia de la hora local a la que se detectan. Esta información, representada en la figura 45, pone de manifiesto que tan sólo dos incendios se inician durante la noche. Uno de ellos comienza a las 23:00 horas mientras que el otro lo hace de madrugada (5:00 hora local).

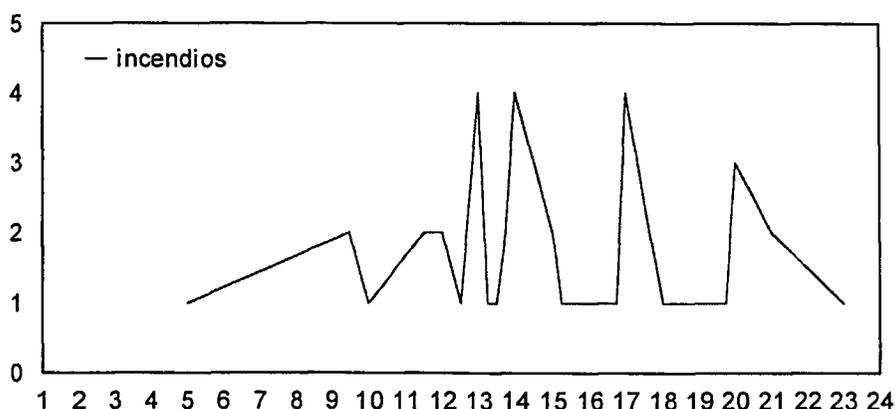


Figura 45. Frecuencia horaria de la detección de incendios forestales en Sierra Espuña (1985-1997)

Este 5 por ciento de incendios nocturnos contrasta con el intervalo de 13:00 a 17:00 horas en el que se contabilizan más de la mitad de los eventos, coincidiendo con el momento de máximas temperaturas. En estas cinco horas se producen 21 incendios que suponen el 53,8 por ciento del total analizado.

cación espacial del origen de los incendios, labor en la que sin duda juegan un papel esencial los responsables de la confección de los partes de incendios, principal fuente de información para el estudio de estos eventos.

La cartografía del riesgo asociado al hombre se centra en las vías de comunicación, diferenciando entre los sucesos iniciados junto a las carreteras principales, y los caminos o sendas que aparecen en el área de estudio. Para cada arteria se considera un corredor de proximidad de 150 metros a partir de su eje central, generando un fichero raster que contempla tres categorías: las dos primeras, en las que se supone un incremento del riesgo, corresponden a las carreteras y caminos con sus respectivas zonas de influencia, mientras que la tercera hace referencia al territorio ajeno a dicha influencia.

Con la finalidad de considerar únicamente los terrenos forestales, se multiplica el fichero que se acaba de obtener por una imagen booleana creada a partir de la cartografía de las formaciones vegetales, en la que se asigna valor 1 a las zonas forestales, que no varían, y valor 0 a los núcleos urbanos y terrenos de cultivo que quedan así excluidos.

La imagen final (figura 46) y la tabla 33, que muestran la superficie correspondiente a cada categoría y su distribución en los términos municipales incluidos en el área de estudio, señalan un predominio de las zonas relacionadas con el riesgo humano en el municipio de Totana, situado en gran medida dentro del Parque y al que pertenecen 8.347 hectáreas, más del 40 por ciento del territorio.

La red de comunicaciones presenta un mayor desarrollo en este término municipal, y ello coincide con el porcentaje más elevado de incendios que tienen aquí su origen. De los veinte sucesos producidos, la mitad comenzaron en las proximidades de una vía de comunicación mientras que los otros diez lo hicieron en "otros lugares en el monte".

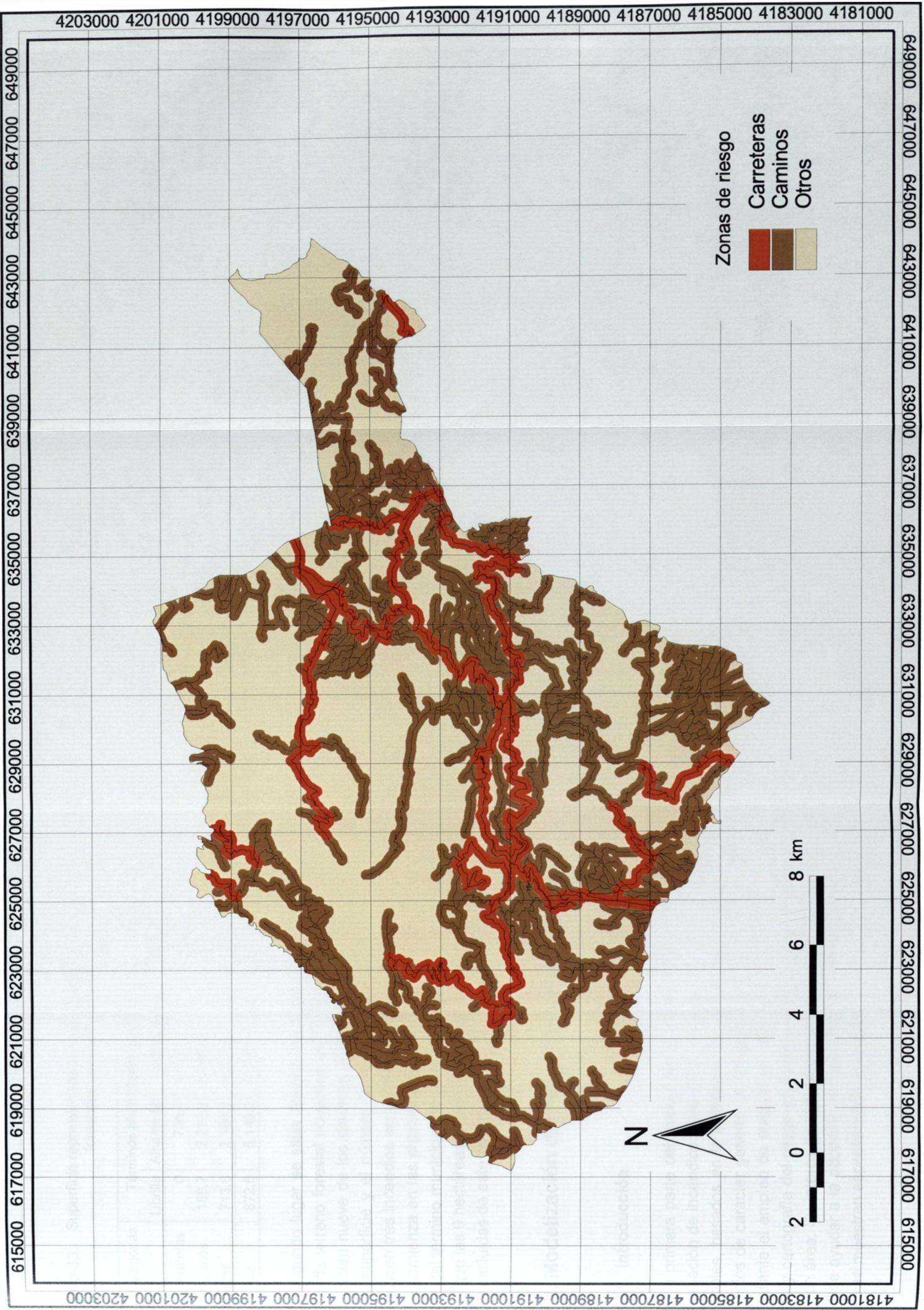


Figura 46. Mapa de localización preferente del factor de riesgo antrónico en Sierra Fnuña y Gebas

Tabla 33. Superficie representada por las categorías de riesgo de incendios forestales asociado al hombre

Categorías	Términos Municipales (superficie en hectáreas)						Totales (has)
	Librilla	Alhama M	Totana	Lorca	Mula	Aledo	
carreteras	0	735,7	1.130,1	0	400,5	0	2.266,3
caminos	158,7	2.217,2	3.195,6	1,6	1.408,1	0	6.981,2
otros	713,8	2.196,3	4.021,2	11,5	3.744,8	0	10.687,6
Total	872,5	5.149,2	8.346,9	13,1	5.553,4	0	19.935,1

En segundo lugar se sitúa Alhama de Murcia con más de 2.950 hectáreas de terreno forestal ocupadas por caminos y carreteras, en las que se inician nueve de los dieciséis incendios ocurridos en este municipio. Esta superficie y el número de sucesos se reduce en Mula, donde se producen tres incendios en los trece años de análisis, de los cuales sólo uno comienza en las proximidades de un camino. En la reducida extensión del término municipal de Lorca no se registra ningún incendio mientras que las 9 hectáreas de Aledo, correspondientes a terrenos de cultivo, son excluidas de este análisis.

5.3. Modelización del riesgo de incendios

5.3.1. Introducción

En la primera parte del trabajo se hizo una revisión de los métodos de evaluación de incendios forestales, constatando la posibilidad de análisis globales, basados en la aplicación de índices de peligro y riesgo de incendios de carácter general, la simulación del comportamiento del fuego mediante el empleo de programas informáticos específicos, y la valoración y cartografía del riesgo en función de las características particulares de un área. Su interés es máximo en el campo de la prevención ya que puede ayudar a la adopción de medidas oportunas en aquellos sectores que se muestren especialmente sensibles.

En relación con estos aspectos se ensayan diferentes propuestas, con el objetivo de elaborar un mapa de riesgo de incendios forestales en Sierra Espuña. Se analiza el Índice de Riesgo Local utilizado por los responsables de Protección Civil para zonificar el territorio, y que se recoge en los Planes de Emergencia para Incendios Forestales en la Región de Murcia, elaborados anualmente (Plan Infomur). Este índice es el único componente actualmente en vigor del Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales de ICONA. También se aplica al área de estudio la propuesta de Salas Rey (1994), que incluye la ponderación del factor de riesgo humano.

Por último se presenta una simulación de la propagación del fuego con el programa FARSITE, comparando los resultados con la información de un incendio real, el más grave ocurrido en Espuña en todo el periodo considerado y en el que ardieron más de 200 hectáreas.

5.3.2. Índice de Riesgo Local de Incendios (RL)

Según se recoge en el Plan INFOMUR de 1997, el riesgo generado por los incendios forestales en la Región de Murcia se calcula en función de la estimación del Índice de Riesgo (RL), referido a cada uno de los municipios que la integran. Tomando como base el mapa topográfico nacional escala 1/200.000 y su división en cuadrículas de 100 km², la misma referencia que se utiliza en los partes de incendio para localizar estos eventos, se efectúa una zonificación del riesgo en el territorio de la Comunidad Autónoma, diferenciando "riesgo grave", "alto", "medio" y "bajo o nulo". Cada término municipal se incorpora a una de estas categorías, considerando además como zonas de "riesgo alto" algunos enclaves especialmente significativos dentro del contexto regional (anexo 14). Por lo tanto, pese a estar referido a cuadrículas de 10 x 10 kilómetros, en la práctica se aplica a sectores concretos que no se ajustan a estas superficies, como son Parques Regionales, Espacios Naturales Protegidos, Reservas de Caza, Zonas de interés natural, cultural o social, etc.

El índice de riesgo local, definido como la probabilidad de que se produzca un incendio en una zona, se estima integrando tres subíndices (frecuencia, causalidad y peligrosidad del combustible), mediante la expresión $RL = Fi \times Ci \times Vi$. Si RL es inferior a 25 se considera que el riesgo es *bajo*, entre 25 y 100 *moderado*, y entre 100 y 300 *alto*. Valores por encima de 300 implican un riesgo *grave*.

El *subíndice de frecuencia* se obtiene de la expresión $Fi = (1/a) \times \sum n_i$ donde n_i el número de incendios de cada año y a el número de años. Según los datos de Sierra Espuña, para el periodo 1985-1997 sintetizados en la tabla 34, Fi es igual a 3, lo que supone una frecuencia de incendios "moderada".

Tabla 34. Incendios anuales en Sierra Espuña (1985-1997)

año	nº incendios
1985	6
1986	2
1987	0
1988	2
1989	2
1990	5
1991	2
1992	4
1993	3
1994	3
1995	7
1996	1
1997	2
total	39

Fuente: Partes de incendio, Región de Murcia (1985-1997)

La *causalidad* $Ci = (1/a) \times (\sum (1/n_i)) \times (\sum (c \times n_{ic}))$ contempla la eficacia de las causas para incendiar, suponiendo el monte en condiciones homogéneas para todas ellas (coeficiente de peligrosidad de cada causa, (c)), el número de incendios motivados por cada una de ellas anualmente (n_{ic}), el número total de incendios en cada año (n_i) y el número de años (a).

Los valores del coeficiente de peligrosidad están tabulados para cinco tipos de causas siendo necesario adaptar la causalidad indicada en Sierra Espuña (capítulo 3, tabla 13) a esta tipología (tabla 35). Para ello se consideran como accidentales los sucesos ocurridos como consecuencia de las líneas eléctricas y el funcionamiento en el monte de motores y máquinas, que en los partes de incendios se incluían en "otras causas". Aunque en cierto modo ambas podrían calificarse de negligencias, por falta de revisión o mantenimiento adecuado, se presupone la no intencionalidad y su carácter fortuito.

Tabla 35. Adecuación de las causas de incendios forestales en Sierra Espuña a la tipología del subíndice de causalidad.

Causalidad Sierra Espuña	Subíndice de frecuencia	
	Tipo de causa	valores de c
Intencionado	Intencionado	10
Quema agrícola Quema de pastos Trabajos forestales Hogueras Fumadores	Negligencia	5
Desconocida	Desconocido	5
Líneas eléctricas Motores y máquinas	Accidente	1
Rayo	Rayo	1

Fuente: Partes de incendios Región de Murcia (1985-1997)

El número de incendios por cada causa y año (n_{ic}) se multiplica por el coeficiente de peligrosidad correspondiente a cada causa (c) para obtener, mediante la adición de estos valores, el segundo término de la ecua-

ción. El primero resulta de la relación entre la unidad y el número de años de análisis. En la tabla 36 se detalla el cálculo de estos parámetros:

Tabla 36. Cálculo del índice de causalidad de los incendios forestales en Sierra Espuña (1985-1997).

Año	n_j	n_1	$c_1 * n_{1c}$	n_2	$c_2 * n_{2c}$	n_3	$c_3 * n_{3c}$	n_4	$c_4 * n_{4c}$	n_5	$c_5 * n_{5c}$	$\Sigma(C_i \times n_{ic}) / n_j$
1985	6			1	5			2	2	3	3	1,7
1986	2			2	10							5,0
1987	0											0,0
1988	2			1	5					1	1	3,0
1989	2			1	5					1	1	3,0
1990	5					1	5			4	4	1,8
1991	2			1	5	1	5					5,0
1992	4	1	10	3	15							6,3
1993	3					3	15					5,0
1994	3			2	10	1	5					5,0
1995	7			4	20	2	10			1	1	4,4
1996	1							1	1			1,0
1997	2	1	10							1	1	5,5
total	39											46,6

n_j = número total de incendios en cada año

n_x = número de incendios por cada causa

c_x = coeficiente de peligrosidad de cada causa

siendo: $x = 1$ Intencionado; $x = 2$ Negligencia;

$x = 3$ Desconocido; $x = 4$ Accidente; $x = 5$ Rayo

El resultado, un subíndice de causalidad de 3,6 ($C_i = (1/13) \times 46,6$), implica una valoración moderada que supone una acción muy poco significativa de los pirómanos o incendiarios, sólo dos sucesos son intencionados, mientras que más del 45 por ciento se deben a negligencias o accidentes.

El coeficiente de peligrosidad del combustible forestal constituye el tercer componente del índice de riesgo local. Su expresión matemática es $V_i = (1/S) \sum v \times S_m$, donde S es la superficie total, v la peligrosidad de cada modelo combustible según una escala establecida (capítulo 2, tabla 8) y S_m la superficie ocupada por cada modelo. Su análisis cuantitativo

requiere disponer de la cartografía de modelos combustibles elaborada en fases previas y sintetizada en la figura 36 y tabla 30. A partir de esta información, que permite conocer la superficie ocupada por cada tipo de cubierta, se aplican los coeficientes de peligrosidad correspondientes (v) según se recoge en la tabla 37.

A diferencia de los resultados anteriores, el subíndice de vegetación, ($V_i=7,1$), indica una peligrosidad "extrema" motivada por la ocupación de más del 40 por ciento por pastizales y matorrales, que tienen asignado el mayor coeficiente de peligrosidad ($v=10$), ya que son los que presentan una probabilidad de ignición, combustión y propagación más elevada.

Tabla 37. Aplicación del coeficiente de peligrosidad del combustible a Sierra Espuña.

Modelos combustibles		v	Sm (ha)	$V \times Sm$
Modelo 1	Grupo pastizales	10	1.666,5	16.665
Modelo 4, 5, 6 7	Grupo matorrales	10	6.681,9	66.819
Modelo 8, 9	Grupo arbolado	5	11.586,7	57.934
Totales			19.935,1	141.418

El subíndice de vegetación (V_i) se sitúa en 7,1, que, según la escala de valoración establecida para este parámetro, representa una peligrosidad derivada del combustible extrema.

El índice de Riesgo Local $RL = F_i \times C_i \times V_i$, se define como la integración de la frecuencia de incendios (F_i), la tipología de causas (C_i) y la de los combustibles forestales (V_i) en una zona determinada. En Sierra Espuña, y según el análisis de los datos del periodo 1985-1997, el resultado $RL= 76,7$ supone un grado de riesgo "moderado". Esta valoración difiere de la recogida en el Plan INFOMUR de 1997 donde se atribuye a esta zona un riesgo alto (anexo 14), con valores de RL comprendidos entre 100 y 300. Esta sobrevaloración del riesgo puede deberse al gran interés que desde el punto de vista medioambiental, paisajístico y ecológico tiene el Parque Regional, al que se le concede la máxima prioridad en defensa y una protección especial.

Este índice implica una estimación global del área de estudio, considerada como una sola unidad de actuación, sin que pueda establecerse una zonación interna del riesgo. Además de no ser operativo para estudios de detalle, presenta limitaciones ya que no contempla parámetros decisivos en el inicio del fuego como son las condiciones meteorológicas o el estado de las formaciones vegetales. Tampoco tiene en cuenta las condiciones topográficas, pendientes y orientaciones, que pueden ser determinantes en el desarrollo del incendio.

Por lo tanto, la información que proporciona es tan sólo orientativa y pese a su utilización en los Planes de Protección Civil de Emergencia para Incendios Forestales en la Región de Murcia, este índice resulta insuficiente para realizar un estudio pormenorizado de la zonación del riesgo en Sierra Espuña.

5.3.3. Valoración y cartografía del riesgo de incendios

Frente a modelos de carácter global como el anterior, otras propuestas analizan las condiciones particulares que confluyen sobre un territorio, ponderando la influencia de estas variables para establecer una cartografía detallada de la probabilidad de que se produzca un incendio forestal. En esta línea se enmarca la propuesta de Salas Rey (1994), que desarrolla una metodología para valorar el riesgo de incendios a partir de una serie de modificaciones en el esquema general del Grado Actual de Peligro de Incendios de ICONA. Este autor presenta un índice que contempla la probabilidad de ignición, en función de los factores físicos y humanos (esta variable constituye una innovación respecto a los anteriores planteamientos que no contemplaban el riesgo humano), y la facilidad de propagación derivada de los modelos combustibles. Define tres sub-índices: Probabilidad de Ignición (*PI*), Índice de Riesgo derivado de la vegetación (*V*) y Factor de Riesgo Humano (*RH*), integrando los resultados de forma cuantitativa mediante la expresión $RI = (PI/10) \times V + RH$.

Aprovechando las posibilidades de análisis que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (Gutierrez Puebla 1994), este planteamiento considera las variables desde un punto de vista espacial y la evaluación del riesgo se realiza mediante el establecimiento de áreas donde confluyen una serie de características. Esta metodología se aplica a Sierra Espuña, a partir de la información suministrada por capas temáticas generadas en fases previas, de la que resulta un análisis pormenorizado del riesgo muy útil en el ámbito de la prevención.

Las variables que intervienen en el modelo se representan espacialmente como imágenes en formato digital, georeferenciadas mediante coordenadas UTM, con una resolución espacial de 15 x 15 metros (225 m² por píxel). Se trata de una serie de ficheros *raster*, en formato *.IMG de IDRISI, todos de idéntico tamaño (1.855 filas y 2.591 columnas) cuyas coordenadas extremas son: *x mínima* = 609803,6, *x máxima* = 648678,5; *y mínima* = 4179296, *y máxima* = 4207129.

Por un lado, los ensayos se realizan para tres situaciones hipotéticas promedio de agosto, mes de máximas temperaturas en todos los observatorios, como se precisó al analizar las características climáticas de Sierra Espuña y su entorno (apartado 5.2.2). La metodología es la misma en todos los supuestos, que difieren únicamente en los parámetros térmicos empleados en su formulación: temperaturas máximas absolutas mensuales, medias de máximas mensuales y media de medias mensuales, siempre referidas al mes de agosto. El objetivo es comparar los resultados bajo diferentes condiciones térmicas que permitan conocer la influencia de esta variable en la zonación del riesgo.

Por otro, se contempla la situación más desfavorable para el mes de julio, el más cálido después de agosto y el que presenta las precipitaciones medias mensuales más bajas, y para septiembre, con el que comparte el segundo lugar en número de incendios. Se considera más oportuno analizar el mes de septiembre en lugar de junio ya que, a pesar de que las temperaturas máximas absolutas de este último son superiores en todos los observatorios, sólo se tiene constancia de la ocurrencia de

tres incendios durante el periodo 1985-1997, quizá por el mantenimiento de condiciones de humedad más favorables al prolongarse los efectos de las lluvias de primavera, frente a los seis eventos registrados en septiembre.

- Ensayos para el mes de agosto.

a) *Temperaturas máximas absolutas*

La probabilidad de ignición (*PI*) se extrae de una tabla creada por ICONA (anexo 15), que requiere conocer previamente la humedad básica del combustible (*HBC*), deducida a partir de los datos de temperatura y humedad relativa, sobre la que se aplican una serie de coeficientes correctores en función de la pendiente, orientación y sombreado de las formaciones vegetales.

La distribución espacial de las temperaturas máximas absolutas de agosto sobre el territorio se obtiene mediante una ecuación simple entre los registros térmicos extremos de las estaciones meteorológicas seleccionadas que cuentan con este tipo de información (un total de seis, anexo 8). A partir de estos valores puntuales, y siguiendo el procedimiento utilizado en la cartografía de las temperaturas medias anuales (apartado 5.2.2), se elabora el mapa de temperaturas de máximas absolutas para el mes más cálido.

La regresión, desarrollada con el método *Stepwise*, contempla únicamente la influencia de la altitud, excluyendo del modelo la longitud y latitud debido a su escasa significación. La recta $y = 39,87 - 0,007 \times \text{altitud}$, con un coeficiente de correlación $r = -0,98$, se aplica al modelo digital de terreno generando una nueva imagen donde el valor de los píxeles representa la temperatura máxima absoluta de agosto (figura 47). Este fichero se reclasifica determinando la superficie ocupada por cada uno de los rangos térmicos contemplados en las tablas de doble entrada, temperatura y humedad relativa, elaboradas por ICONA para distinta franja horaria, y que se utilizan para determinar la humedad básica del combusti-

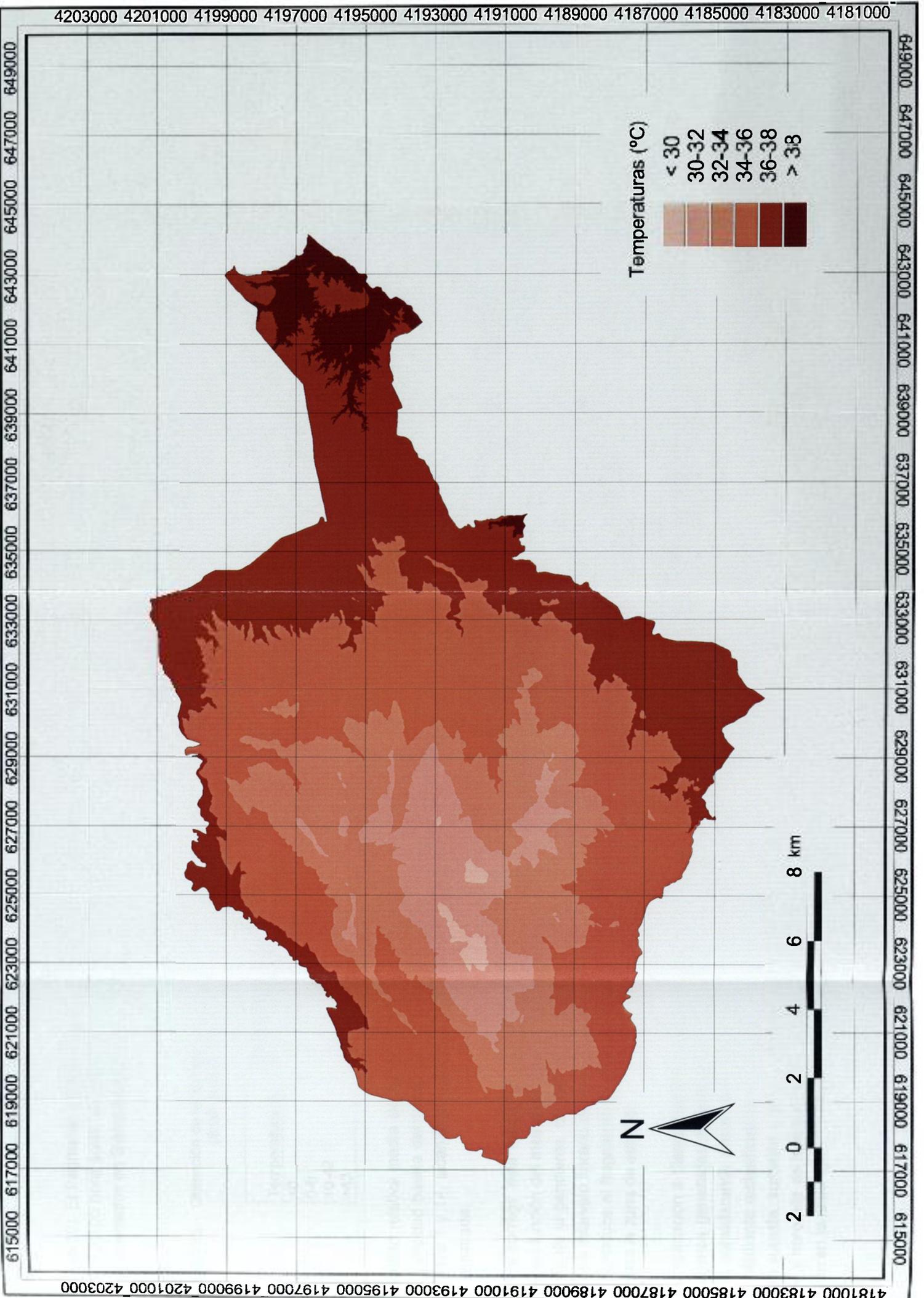


Figura 17 Distribución espacial de temperaturas en la zona de estudio

ble (anexo 16). El fragmento utilizado (tabla 38) corresponde al intervalo de 8:00 a 20:00 hora solar, ya que sólo el 12,8 por ciento de los incendios documentados en Sierra Espuña se producen fuera de este intervalo horario.

Tabla 38. Obtención de la humedad básica del combustible (*HBC*) (8:00 a 20:00 hora solar)

Temperatura °C	humedad relativa %		
	50-54	55-59	60-64
<0	8	8	8
0-9	7	8	9
10-42	7	8	8
>43	7	8	8

La humedad relativa media de agosto es 56,3 por ciento, lo que implica que la humedad básica del combustible, cuyo rango de variación diario oscila entre 1 y 14, alcanza el valor 8 independientemente de la temperatura registrada.

Para corregir esta humedad se emplean otras tablas, también de ICONA, en función del mes analizado (anexo 17), donde se contempla la influencia de la pendiente, orientación, grado de exposición de los combustibles e intervalo horario de mayor incidencia de incendios. En la tabla 39 se reproduce el fragmento correspondiente al mes de agosto, el más crítico para la zona de estudio.

Su aplicación a Sierra Espuña requiere la adecuación de alguna de las imágenes generadas anteriormente: las orientaciones (figura 19) se agrupan considerando únicamente los cuatro puntos cardinales (Salas, 1994). Mediante reclasificación se integran en la categoría sur las orientaciones sureste, suroeste y llano mientras que los píxeles orientados al noreste y noroeste se incluyen en la categoría norte. Los resultados se muestran en la tabla 40.

Tabla 39. Factor de corrección del contenido en humedad del combustible para el mes de agosto.

Expuesto (menos del 50 % de los combustibles en sombra)							
		Hora Solar					
Orient	Pend. %	8:00 10:00	10:00 12:00	12:00 14:00	14:00 16:00	16:00 18:00	18:00 20:00
Norte	0-30	3	1	0	0	1	3
	>30	4	2	1	1	1	4
Sur	0-30	3	1	0	0	1	3
	>30	3	1	1	1	1	3
Este	0-30	2	1	0	0	1	4
	>30	2	0	0	1	3	5
Oeste	0-30	3	1	0	0	1	3
	>30	5	3	1	0	0	2
Sombreado (más del 50 % de los combustibles en sombra o nublado)							
Norte	>0	5	4	3	3	4	5
Sur	>0	4	4	3	3	4	5
Este	>0	4	4	3	4	4	5
Oeste	>0	5	4	3	3	4	4

Tabla 40. Superficie representada por cada tipo de orientación. Sierra Espuña

Orientación	nº píxeles	hectáreas	%
Norte	416.458	9.375,3	40,1
Sur	417.506	9.398,9	40,2
Este	123.566	2.781,7	11,9
Oeste	80.415	1.810,3	7,7
totales	1.037.945	23.366,2	100,0

La corrección de la humedad requiere considerar también el grado de exposición al sol de los combustibles y, a partir de este dato, se establece una valoración según la pendiente de los píxeles que presentan las orientaciones básicas. En el caso de Sierra Espuña, y desestimando la presencia de nubosidad, poco probable en el mes de agosto, la exposición se vincula directamente a las características de las formaciones vegetales.

Se considera el grupo de bosques o arbolado como áreas con más del 50 por ciento del combustible en sombra frente al conjunto de matorrales y pastizal donde el menor porte facilita una acción directa de los rayos del sol (menos del 50 por ciento en sombra). Manteniendo esta dualidad y mediante operaciones de reclasificación y superposición de mapas en IDRISI, se obtiene la superficie de cada intervalo de pendiente (menor y mayor del 30 por ciento) para cada una de las orientaciones básicas: norte, sur, este y oeste.

El factor de corrección de la humedad del combustible se extrae de la tabla 39 y depende del intervalo horario con mayor número de incendios, deducible de los Partes de Incendios. Esta información que permite conocer la franja horaria en la que se produce el mayor número de sucesos, está siempre referida a la hora local del lugar del incendio. En la zona de estudio y para el mes de agosto presenta un desfase de dos horas respecto a la solar (tabla 41).

Tabla 41. Frecuencia horaria de los incendios forestales en Sierra Espuña (1985-1997)

Detección (hora local)	número incendios	Intervalo (hora solar)
5:00	1	
9:30	2	
10:00	1	
11:30	2	
12:00	2	08:00-10:00
12:30	1	
13:00	5	
13:30	1	10:00-12:00
13:45	2	
14:00	4	
15:00	2	
15:15	1	12:00-14:00
16:00	1	
16:45	1	
17:00	4	14:00-16:00
18:00	1	
18:15	1	
19:45	1	16:00-18:00
20:00	3	
21:00	2	18:00-20:00
23:00	1	

Aquellos eventos cuya hora de detección coincide con la frontera entre dos intervalos consecutivos, se consideran incluidos siempre en el primero ya que se asume un margen mínimo de cinco minutos desde que se inicia el fuego hasta que éste es detectado.

Aplicando este criterio se utiliza el intervalo de 10:00 a 12:00 hora solar, para proceder a la corrección de la humedad del combustible. Mediante adición de imágenes, y utilizando la orden "overlay" de IDRISI, se obtiene un fichero *raster* que refleja la distribución espacial de este coeficiente. Los valores oscilan entre 0 y 3 para el conjunto formado por los modelos de pastizal y matorral según su orientación y pendiente, situándose en 4 para el grupo de bosques.

El contenido total de humedad del combustible (*HC*) se estima mediante la adición de la humedad básica (*HBC*), que tiene un valor de 8 para toda la zona deducido a partir de la tabla 38 y el factor de corrección que se acaba de obtener en esta fase previa. Su distribución espacial, figura 48, presenta los valores más altos ($HC=12$) en las laderas arboladas de Espuña, disminuyendo ligeramente hacia las cumbres más elevadas ocupadas por matorrales de alta montaña. Al Este, la presencia de formaciones poco desarrolladas propias del sustrato margoso condiciona el predominio de humedades entre 9 y 10. Los valores más bajos, $HC=8$, corresponden a enclaves aislados y desprovistos de vegetación, distribuidos de manera irregular por todo el territorio, aunque son especialmente significativos en el área de Gebas. La superficie ocupada por cada uno de los intervalos de humedad se muestra en la tabla 42.

Tabla 42. Distribución espacial de la humedad del combustible (HC)

HC	número píxeles	superficie (hectáreas)	superficie %
8	25.905	583,2	2,9
9	239.134	5.383,4	27,0
10	88.882	2.000,9	10,0
11	16.914	380,8	1,9
12	514.690	11.586,8	58,1
Total	885.525	19.935,1	100,0

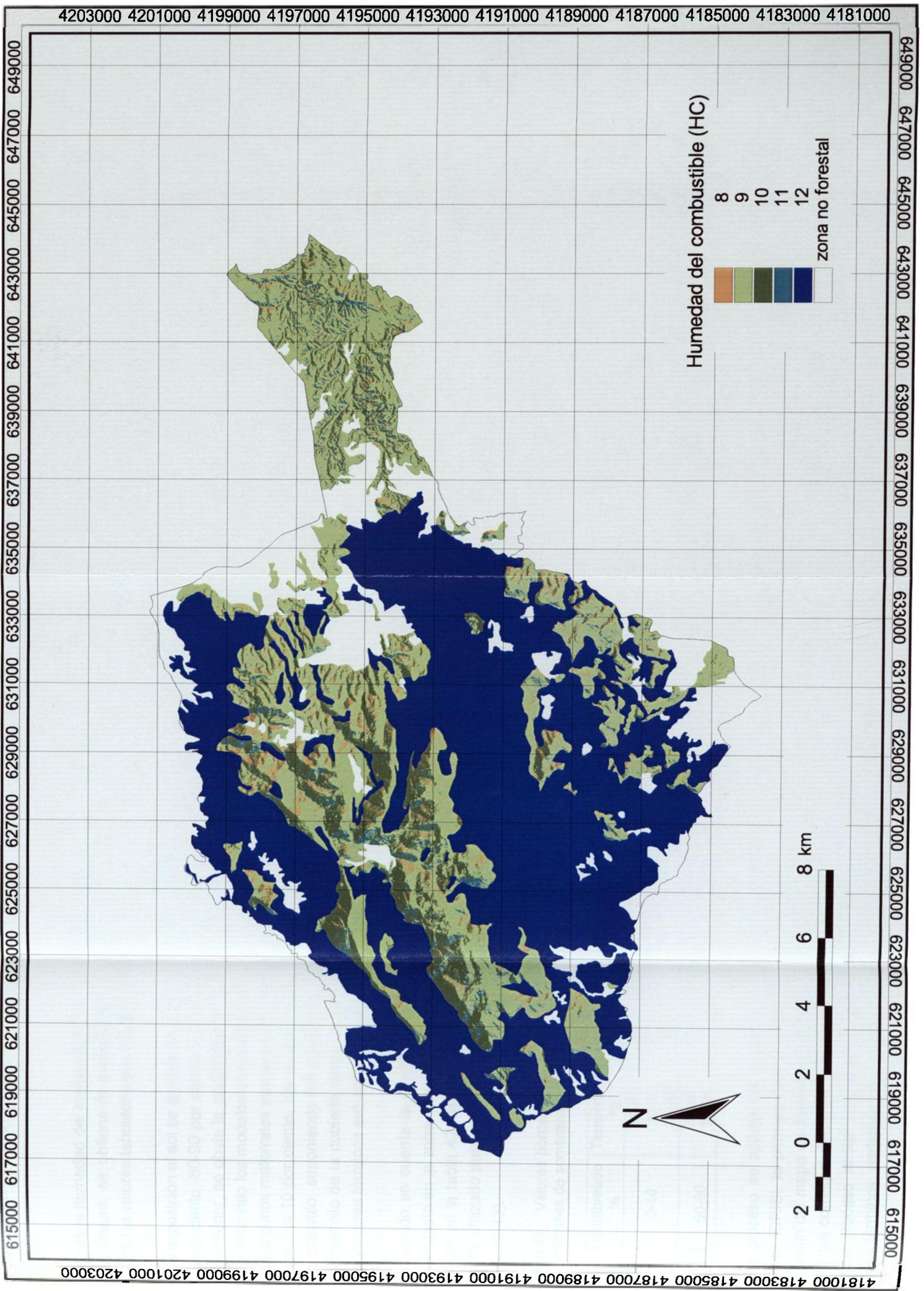


Figura 48. Distribución de la humedad del combustible (HC) para las temperaturas máximas absolutas de agosto

A partir de la humedad del combustible, y dependiendo del sombreado y la temperatura, se obtiene la probabilidad de ignición, en porcentajes, mediante los valores tabulados por ICONA (anexo 15).

La exposición al sol se agrupa en cuatro categorías: 0-10 por ciento, 10-60 por ciento, 60-90 por ciento y 90-100 por ciento. Manteniendo el criterio anterior, se obvia la posibilidad de nubosidad y se consideran en el tercer intervalo los modelos combustibles del grupo de bosques (8 y 9). Aunque algunos matorrales pueden presentar porcentajes de sombreado superiores al 10 por ciento, los modelos 1, 4, 5, 6 y 7 se incluyen en el primer intervalo, suponiendo las condiciones más extremas, con un escaso desarrollo de la cubierta como consecuencia las exiguas precipitaciones y rigores térmicos estivales.

Teniendo en cuenta la distribución de temperaturas absolutas del mes de agosto en la zona de estudio (figura 47) y los datos de humedad señalados en la tabla 42, se reproduce a continuación el fragmento del anexo 15, utilizado para obtener la probabilidad de ignición de Sierra Espuña (tabla 43).

Tabla 43. Valores porcentuales de probabilidad de ignición para diferentes condiciones de sombreado, temperatura y humedad del combustible.

Sombreado %	Temperatura °C	Humedad del combustible				
		8	9	10	11	12
0-10	35-40	50	40	40	30	30
	30-35	50	40	30	30	30
	25-30	40	40	30	30	20
60-90	35-40	50	40	30	30	30
	25-35	40	40	30	30	20

En este proceso se aplican de nuevo las posibilidades del álgebra de mapas de IDRISI: la primera fase consiste en obtener, a partir de la re-clasificación del mapa de modelos combustibles, dos imágenes independientes que corresponden a los rangos de sombreado establecidos. Mediante un proceso similar se generan otros dos ficheros *raster* con los intervalos térmicos, partiendo del mapa de temperaturas máximas abso-

lutas de agosto. Cada imagen de sombreado se multiplica por cada una de las que contienen un intervalo de temperatura y la imagen resultante se vuelve a multiplicar por la imagen de humedad del combustible. El resultado son cuatro ficheros *raster* de cuya integración, mediante adición de imágenes y posterior reclasificación, se obtiene la distribución espacial de la *probabilidad de ignición* en la zona de estudio (figura 49).

La superficie correspondiente a cada uno de los intervalos se recoge en la tabla 44 donde se observa un rango de variación para el primer componente del índice entre 20 y 50 por ciento. El predominio de temperaturas máximas absolutas para el mes de agosto por encima de los 30 °C en buena parte del territorio hace que la superficie ocupada por la probabilidad de ignición entre 20 y 40 por ciento sea similar. Los valores extremos, PI = 50, sólo afectan al 2,9 por ciento del territorio, y aparecen dispersos en el interior de las zonas con probabilidad de ignición inmediatamente inferior (PI = 40).

Tabla 44. Distribución espacial de la probabilidad de ignición estimada a partir de las temperaturas máximas absolutas de agosto.

Probabilidad	nº píxeles	hectáreas	% superficie
20	288.086	6.485,4	32,5
30	303.631	6.835,4	34,3
40	268.055	6.034,5	30,3
50	25.753	579,8	2,9
total	885.525	19.935,1	100,0

Prácticamente la totalidad de los matorrales de margas del área de Gebas y del matorral bajo que integra el modelo combustible 5 presenta una probabilidad de ignición mayor o igual al 40 por ciento, el mismo rango que afecta a más del 80 y 70 por ciento de las repoblaciones y el matorral alto respectivamente. El intervalo del 30 por ciento de ignición es el más extenso, representando el 34,3 por ciento del área de estudio. Afecta a las repoblaciones y matorrales altos y bajos que ocupan las posiciones más elevadas dentro del territorio, así como a los modelos combustibles 8 y 9 que aparecen por debajo de los 750 metros de altitud.

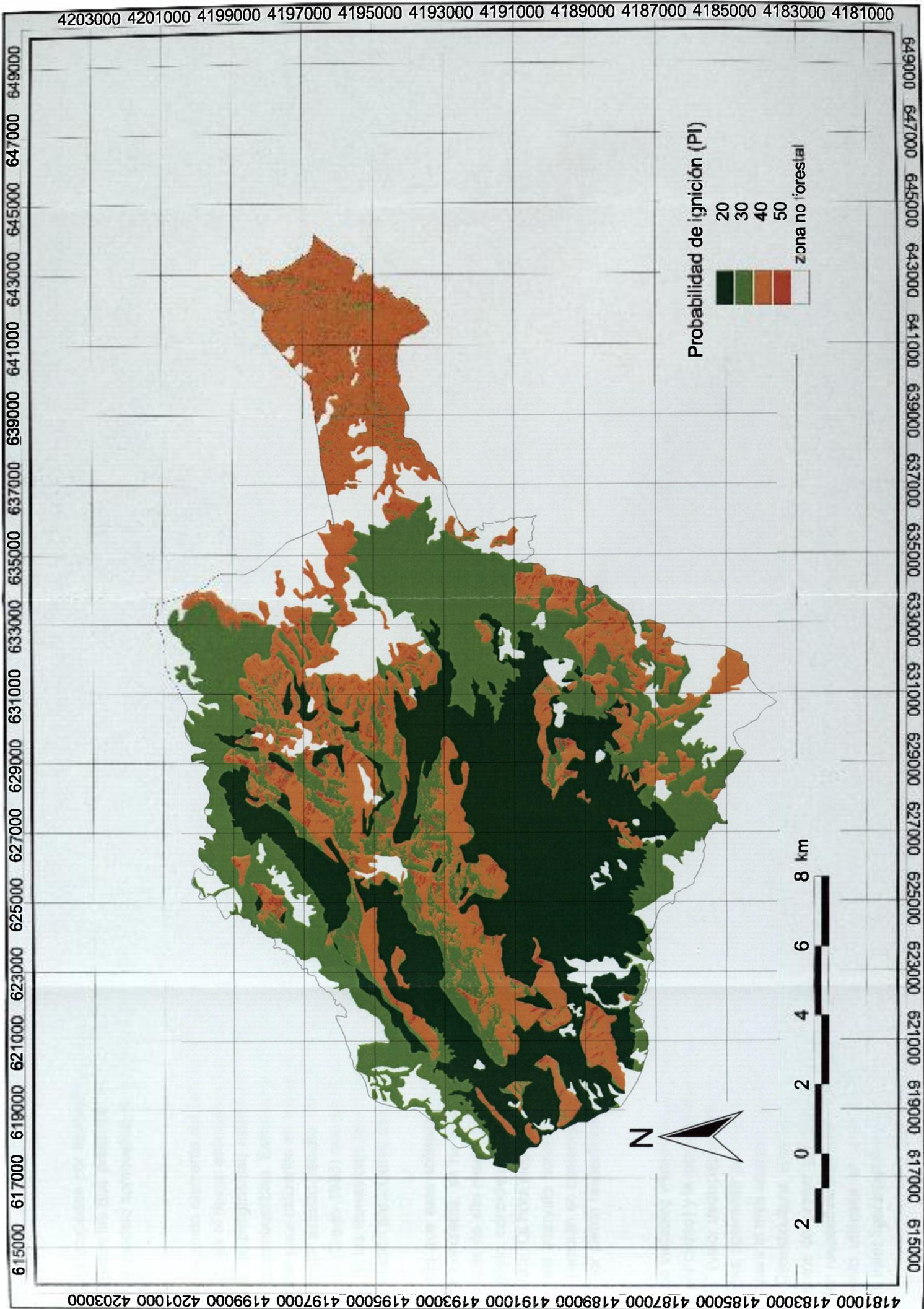


Figura 49. Distribución espacial de la probabilidad de ignición (PI) calculada a partir de las temperaturas máximas absolutas de agosto

La zonas ocupadas por formaciones vegetales incluidas en el grupo de bosques son las que presentan la menor probabilidad de ignición, dominando el modelo combustible 9, que abarca el 95 por ciento de esta superficie.

El segundo elemento del índice de riesgo de incendios, $RI = (PI/10) \times V + RH$, es el *riesgo asociado a la vegetación*, V , deducible de los coeficientes de peligrosidad establecidos por ICONA para cada uno de los modelos combustibles. Estos valores (capítulo 2, tabla 8) son demasiado generales para utilizarlos en estudios de detalle (Salas Rey, 1994). Para el área de estudio resulta más adecuado manejar programas como BEHAVE (Green 1983) que permiten determinar la velocidad de propagación de las llamas bajo las condiciones meteorológicas, topográficas y de vegetación particulares de este espacio.

Dado que este software ha sido diseñado para situaciones y momentos concretos, se ha estimado conveniente aplicarlo a condiciones específicas de alto riesgo. Con dicha finalidad se ha seleccionado el día 5 de agosto, considerado el día con mayor número de incendios del mes más crítico. La hora elegida son las 11:00 (hora solar) coincidiendo con el centro del intervalo horario de máximo riesgo diario (10:00-12:00 hora solar). También se contempla la altitud y pendiente media, 749,3 metros y 36,6 por ciento respectivamente, extraídas del modelo digital del terreno.

Las variables meteorológicas consideradas son la humedad relativa (56,3 por ciento) y la temperatura media de máximas absolutas de agosto 34,8 °C (valor deducido a partir de la imagen de temperaturas máximas absolutas obtenidas por regresión, figura 48). La velocidad media del viento para el mes analizado es de 6,7 km/h en Alcantarilla y 6,3 km/h en Lorca Cerealicultura, observando en ambas estaciones un predominio de los vientos del primer cuadrante que suponen el 83,3 por ciento y el 100 por cien respectivamente del total de situaciones mensuales. La dirección del viento utilizada en el ensayo es la noreste y la velocidad media 7km/h, valor ligeramente superior al de Alcantarilla aunque sin duda, por

debajo de los datos reales debido, entre otros factores, al efecto ejercido por los valles que se convierten en auténticos "túneles" que canalizan las corrientes. Como premisa inicial se admite un día soleado, con ausencia de nubes y una situación meteorológica estable sin cambios previsibles de tiempo.

El programa requiere también el porcentaje de cubierta de copas de la vegetación, suponiendo la presencia de un follaje maduro. Manteniendo el criterio anterior, se establece una cobertura del 60 y 70 por ciento para los modelos 8 y 9 respectivamente; 10 por ciento para la repoblaciones llevadas a cabo en los últimos veinte años y coberturas del 6 por ciento y 4 por ciento para matorrales altos y matorrales bajos. El modelo 1 y el matorral de alta montaña se consideran totalmente desprotegidos.

Los resultados de propagación se utilizan para ponderar la importancia de cada uno de los modelos combustibles analizados, asignando un valor de 10 al que presenta una mayor velocidad y determinando, mediante una regla de tres, el grado de riesgo de los demás (tabla 45). La valoración del riesgo para cada modelo combustible se realiza a partir de la adaptación de los umbrales establecidos por Correia, 1996, que clasifica los incendios según la velocidad de progresión del fuego.

Tabla 45. 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 agosto.

modelo combustible	velocidad propagación (metros/minuto)	grado de riesgo	valoración del riesgo*
1	22,1	8,5	extremo
4	26,0	10,0	extremo
5	10,2	3,9	alto
6	8,4	3,2	moderado
7	10,2	3,9	alto
8	5,5	2,1	moderado
9	3,2	1,2	bajo

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

El mayor riesgo corresponde al modelo 4, coincidiendo con aplicaciones del programa realizadas para otros escenarios por Anderson (1982, 1983, 1989), AMA y Tragsatec (1993) y Salas Rey (1994). El mismo paralelismo se observa en el modelo 9, confirmándose como el de menor riesgo. Las diferencias entre los demás modelos pueden atribuirse a las particulares condiciones topográficas y sobre todo meteorológicas que interviene en cada uno de los ensayos.

La distribución espacial del riesgo asociado a la vegetación, *V*, se obtiene a partir de la imagen de los modelos combustibles asignando a cada uno de ellos el grado de riesgo según los valores que se acaban de obtener. El proceso requiere la creación de un fichero de valores, orden *edit*, en el que se establece la correspondencia entre cada modelo y su grado de riesgo, para generar una nueva imagen, aplicando el comando *assing* de IDRISI a partir de los modelos combustibles, en la que los píxeles toman el valor calculado para el riesgo.

El último parámetro de índice introducido por su autor con carácter aditivo es el *riesgo humano*.

A partir de la cartografía del riesgo asociado al hombre (apartado 5.2.5, tabla 33, figura 46) y utilizando la información sobre la localización preferente del inicio del fuego, se establece un test de significación estadística (ji cuadrado, $\chi^2 = ((O_i - E_i)^2 / E_i)$), que permite conocer el número de incendios esperados en cada categoría (E_i), dependiendo del porcentaje de superficie representado por cada una de ellas, y su relación con los incendios observados (O_i) (tabla 46)

Tabla 46. Localización preferente del inicio del fuego en Sierra Espuña (1985-1997)

	categorías (<i>i</i>)			
	carreteras	caminos	otros	total
nº incendios observados (O)	11	9	19	39
% superficie ocupada	11,4	35,0	53,6	100,0
nº incendios esperados (E)	4,4	13,7	20,9	39,0
χ^2	9,9	1,6	0,2	

En la proximidad de las carreteras se producen más incendios de los que cabría esperar en función de la superficie que representan en el territorio, mientras que junto a las vías de comunicación no asfaltadas, donde el tráfico rodado está restringido, sucede lo contrario.

Partiendo de estos resultados (tabla 46), se utiliza la categoría "otros", asignándole valor 1, para obtener un coeficiente que pondere la importancia de las demás. Éste se obtiene de dividir el número de incendios esperados (20,9) y el número de incendios registrados (19,0), es decir 1,1. El riesgo para cada categoría, excepto la base "otros", viene determinado por el cociente entre el número de incendios registrados y el número de incendios esperados, corregidos por el factor que se acaba de obtener. Los cálculos se detallan en la tabla 47.

Tabla 47. Cálculo del índice de riesgo asociado al hombre

categorias	N_{ir}	N_{ie}	$(N_{ir} / N_{ie}) \times a$	grado de riesgo
carreteras	11	4,4	2,5	2,5
caminos	9	13,7	0,7	0,7
otros	19	20,9	---	1

N_{ir} = número de incendios registrados
 N_{ie} = número de incendios esperados
 a = coeficiente de ponderación del riesgo

Con esta categorización se realiza la asignación de valores al fichero anterior (figura 42) para generar una nueva imagen que recoge la clasificación del riesgo ligado a las acciones antrópicas y que constituye el tercer parámetro del índice analizado (figura 50).

Finalmente el índice de riesgo de incendios $RI = ((PI/10) \times V + RH)$, se obtiene mediante operaciones de álgebra de mapas en IDRISI. En primer lugar se utiliza la orden "scalar" para dividir la imagen correspondiente a la probabilidad de ignición (figura 49) entre la constante 10, que aparece en la formulación. El fichero que se obtiene se relaciona con la imagen del riesgo asociado a la vegetación mediante la opción de *multiplicar* imágenes incluida en la orden "overlay" y por último se suma el

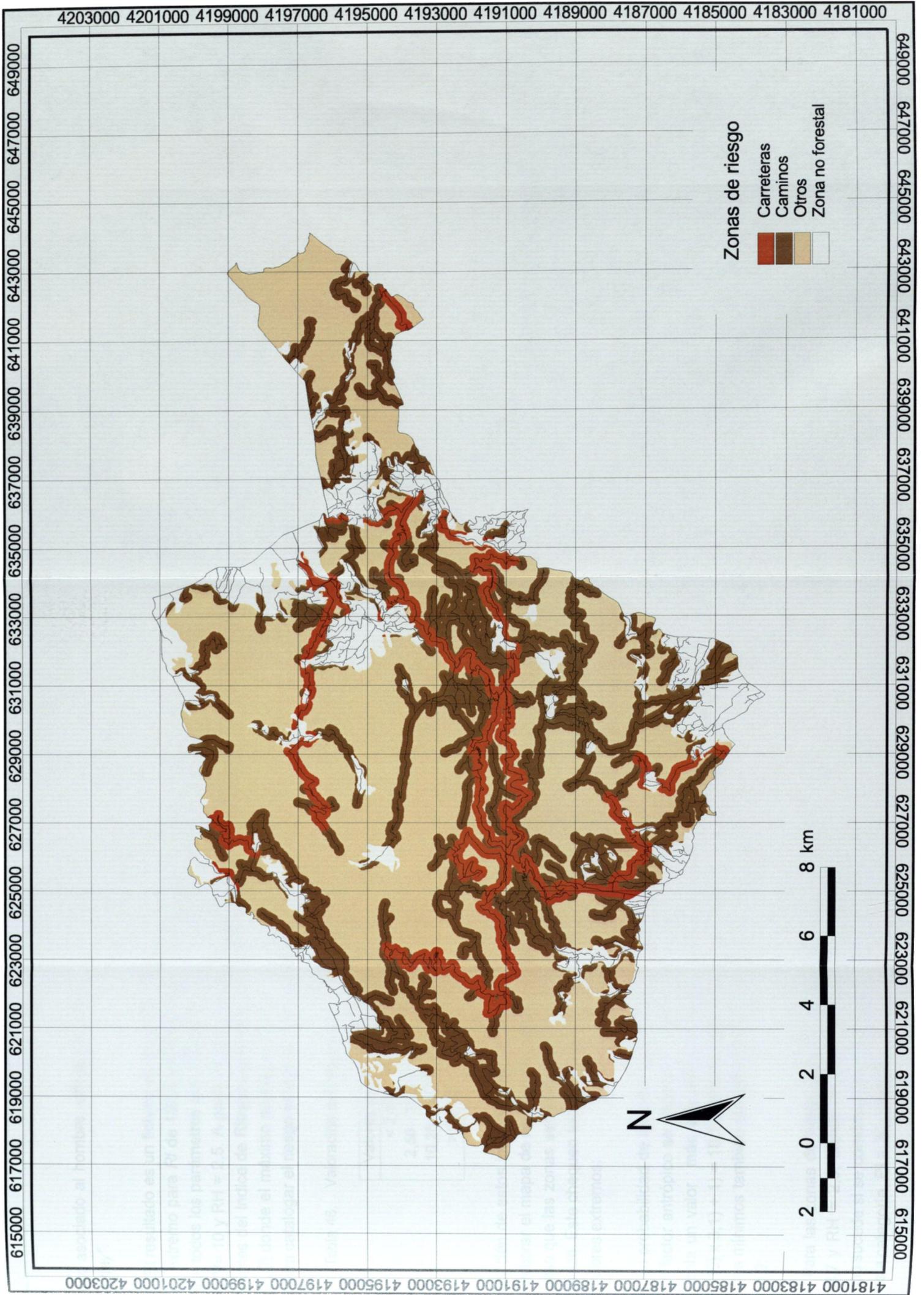


Figura 50. Distribución espacial del factor de riesgo de incendios asociado al hombre

riesgo asociado al hombre, utilizando la opción adición de imágenes de "overlay".

El resultado es un fichero en el que los píxeles pueden presentar un valor extremo para RI de 102,5 y que correspondería a una situación en la que todos los parámetros que intervienen alcanzarían su máximo: $PI = 100$, $V = 10$ y $RH = 2,5$. A partir de estos valores, y manteniendo las proporciones del Índice de Riesgo Local de Incendios de ICONA (capítulo 2, tabla 9) donde el máximo posible es 1000, se establecen cuatro intervalos para catalogar el riesgo en Sierra Espuña (tabla 48).

Tabla 48. Valoración del riesgo local de incendios en Sierra Espuña

Valores de RI	Grado de riesgo
< 2,56	Bajo
2,56 - 10,25	Moderado
10,25 - 30,75	Alto
> 30,75	Grave

En función de estos intervalos se reclasifica la imagen anterior con el fin de elaborar el mapa de riesgos del área (figura 51), comprobando en cada caso que las zonas señaladas quedan dentro del grado de riesgo establecido. Este chequeo se lleva a cabo analizando el comportamiento de los valores extremos:

La probabilidad de ignición máxima asociada al riesgo moderado es 30, el factor antrópico se sitúa en 1 y el modelo combustible 6 es el que presenta un valor más alto dentro de esta categoría, por lo que $RI = ((30/10) \times 3,1) + 1 = 10,1$ quedaría incluido en el intervalo apuntado. Los valores mínimos también cumplirían esta hipótesis $RI = ((20/10) \times 1,9) + 1 = 3,9$.

Para las zonas de riesgo alto los máximos corresponden a $PI = 50$, $V = 3,7$ y $RH = 2,5$, siendo $RI = 18,2$, por tanto entre 10,25 y 30,75. Lo mismo sucede si se considera la probabilidad de ignición más baja dentro de esta categoría, $PI = 30$, resultado $RI = 12,2$.

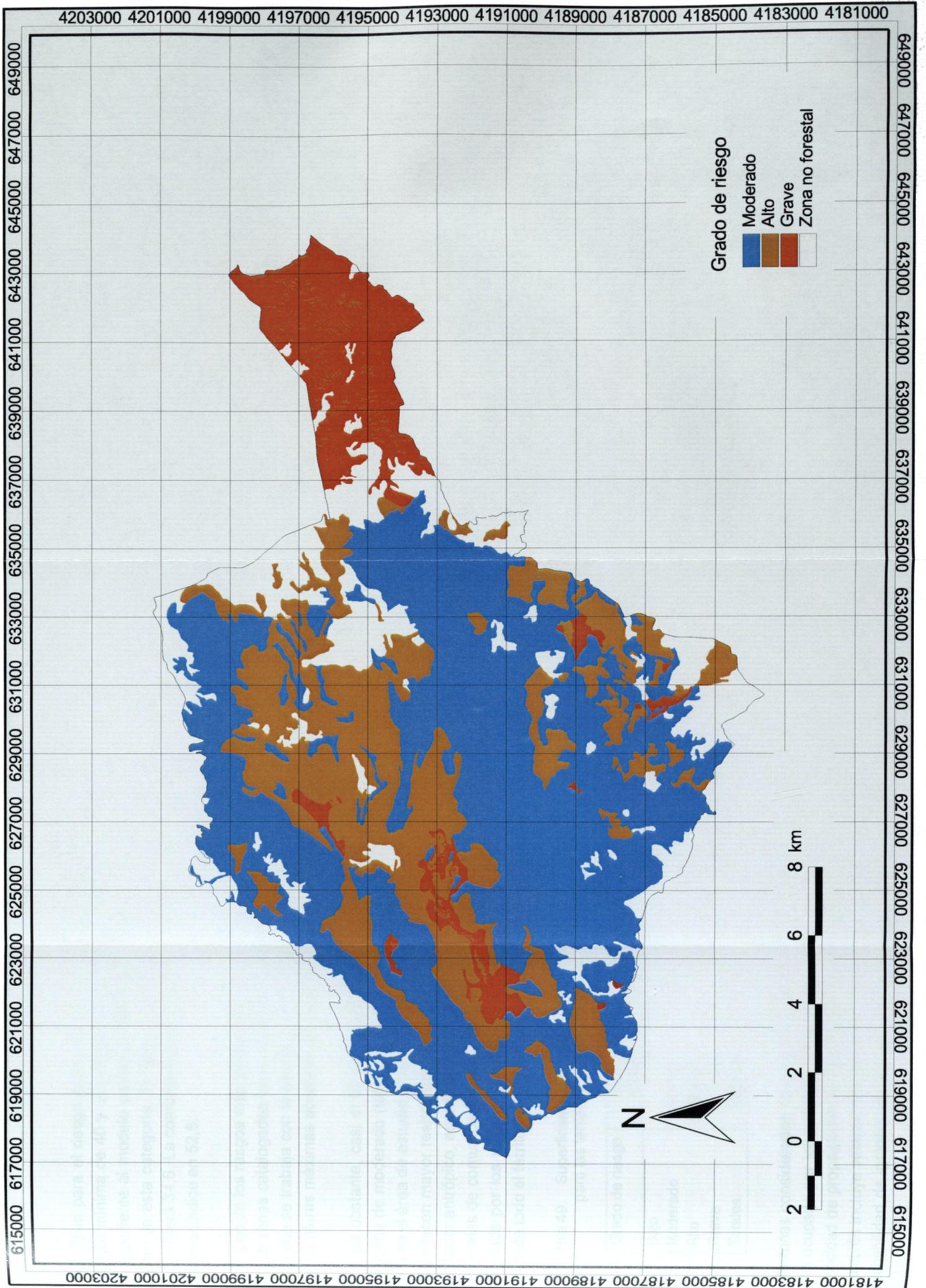


Figura 51. Mapa de riesgo de incendios elaborado a partir de las temperaturas máximas absolutas de agosto

Por último para el riesgo grave, $R/I > 30,75$, existe una probabilidad de ignición mínima de 40 y un riesgo derivado de la vegetación de 8,1, correspondiente al modelo combustibles 1 que presenta el valor más bajo dentro de esta categoría. El factor antrópico continúa siendo 2,5 por lo que R/I será 34,6. La combinación de máximos $PI = 50$, $V = 10$ y $RH = 2,5$ sitúan el índice en 52,5.

Uno de los rasgos más destacados del mapa de riesgo es la ausencia de zonas catalogadas como de riesgo bajo, hecho que puede deberse a que se trabaja con la situación más desfavorable, considerando las temperaturas máximas absolutas del mes más cálido.

No obstante, casi el 60 por ciento del territorio queda dentro de la categoría de moderado (tabla 49), coincidiendo con la presencia mayoritaria en el área de estudio de los modelos combustibles 8 y 9 que son los que ofrecen mayor resistencia a ser atacados por el fuego. La influencia del factor antrópico, especialmente en la vertiente meridional donde aparecen vías de comunicación catalogadas como de máximo riesgo, queda atenuada por los valores de probabilidad de ignición que son los más bajos de todo el territorio.

Tabla 49. Superficies de las categorías de riesgo de incendios estimadas para las temperaturas máximas absolutas de agosto.

Grado de riesgo	número píxeles	superficie (hectáreas)	superficie %
Bajo	0	0	0
Moderado	514.690	11.586,8	58,1
Alto	259.069	5.832,2	29,3
Grave	111.766	2.516,1	12,6
Totales	885.525	19.935,1	100,0

Las zonas consideradas con riesgo alto abarcan la totalidad de la superficie ocupada por los modelos combustibles 5, 6 y 7 (tabla 50), donde la velocidad de propagación de las llamas se sitúa en torno a los 0,6 km/h. También incluye retazos dispersos de matorral de margas con la menor probabilidad de ignición del área de Gebas y algunas repoblaciones que

corresponden en su mayor parte al interior de la sierra, donde, pese al descenso térmico que acompaña a la altitud, prevalece la influencia de la máxima velocidad de avance de las llamas para el modelo combustible 4.

Tampoco se observa en este caso, una especial incidencia del factor antrópico frente a los otros dos componentes del índice que resultan determinantes en la zonación del riesgo. Al considerar los registros térmicos extremos se acentúa la importancia de la probabilidad de ignición y con ello el peso ejercido por el primer término de la ecuación, que contrasta el carácter aditivo del riesgo antrópico.

Tabla 50. Distribución porcentual de la superficie de los modelos combustibles de Sierra Espuña en función del grado de riesgo. Estimación a partir de las temperaturas máximas absolutas de agosto.

modelo combustible	grado de riesgo		
	moderado	alto	grave
modelo 1	0,0	4,6	95,4
modelo 4	0,0	6,9	93,1
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

El riesgo grave se limita a los modelos combustibles 1 y 4, afectando por tanto a matorrales de margas, cultivos abandonados y repoblaciones recientes. El 80 por ciento de estas formaciones se localizan en el área de los barrancos de Gebas, donde se registran temperaturas máximas absolutas para el mes de agosto por encima de los 35 °C. También se incluye aquí más del 90 por ciento de las repoblaciones que aparecen en el interior de la sierra. Pese a encontrarse por encima de los 1.100 metros, donde las temperaturas descienden hasta los 27 °C, las llamas se desplazan a través del modelo 4 a una velocidad de 1,6 km/h, que maximiza la influencia del segundo elemento del índice de riesgo y condiciona el riesgo grave de este sector.

b) *Temperaturas medias de máximas de agosto.*

Para calcular el primer componente del índice, la probabilidad de ignición (*PI*), es preciso conocer la distribución espacial de las temperaturas medias máximas de agosto en el territorio. El procedimiento es el mismo que para los registros térmicos extremos, siendo en este caso la recta de ajuste $y = 34,18 - 0,005 \times \text{altitud}$, y el coeficiente de correlación $r = -0,86$. El mapa de temperaturas medias de máximas de agosto, figura 52, se obtiene resolviendo la ecuación aplicando la orden "scalar" de IDRISI al modelo digital del terreno.

El intervalo horario para determinar la humedad básica del combustible (*HBC*) no varía, ya que la serie de incendios es la misma, al igual que tampoco lo hace la humedad relativa media de agosto, estimada en 56,3 por ciento. Por tanto, el fragmento a utilizar de la tabla de ICONA es el mismo que para las temperaturas máximas absolutas y también el valor de *HBC*, que se sitúa en 8 (tabla 38). Esto implica que la humedad del combustible y su distribución espacial es la misma que para el ensayo anterior (figura 48 y tabla 42), siendo necesario calcular los porcentajes de probabilidad de ignición en función de los nuevos rangos térmicos empleados.

El proceso es el mismo que en el caso anterior, lo que supone la creación de una serie de ficheros intermedios, en función de los intervalos de la tabla 51, de cuya integración se obtiene la cuantía y distribución espacial de la probabilidad de ignición.

Tabla 51. Valores porcentuales de probabilidad de ignición para diferentes condiciones de sombreado, temperatura y humedad del combustible.

Sombreado %	Temperatura °C	Humedad del combustible				
		8	9	10	11	12
0-10	30-35	50	40	30	30	30
	25-30	40	40	30	30	20
60-90	25-35	40	40	30	30	20

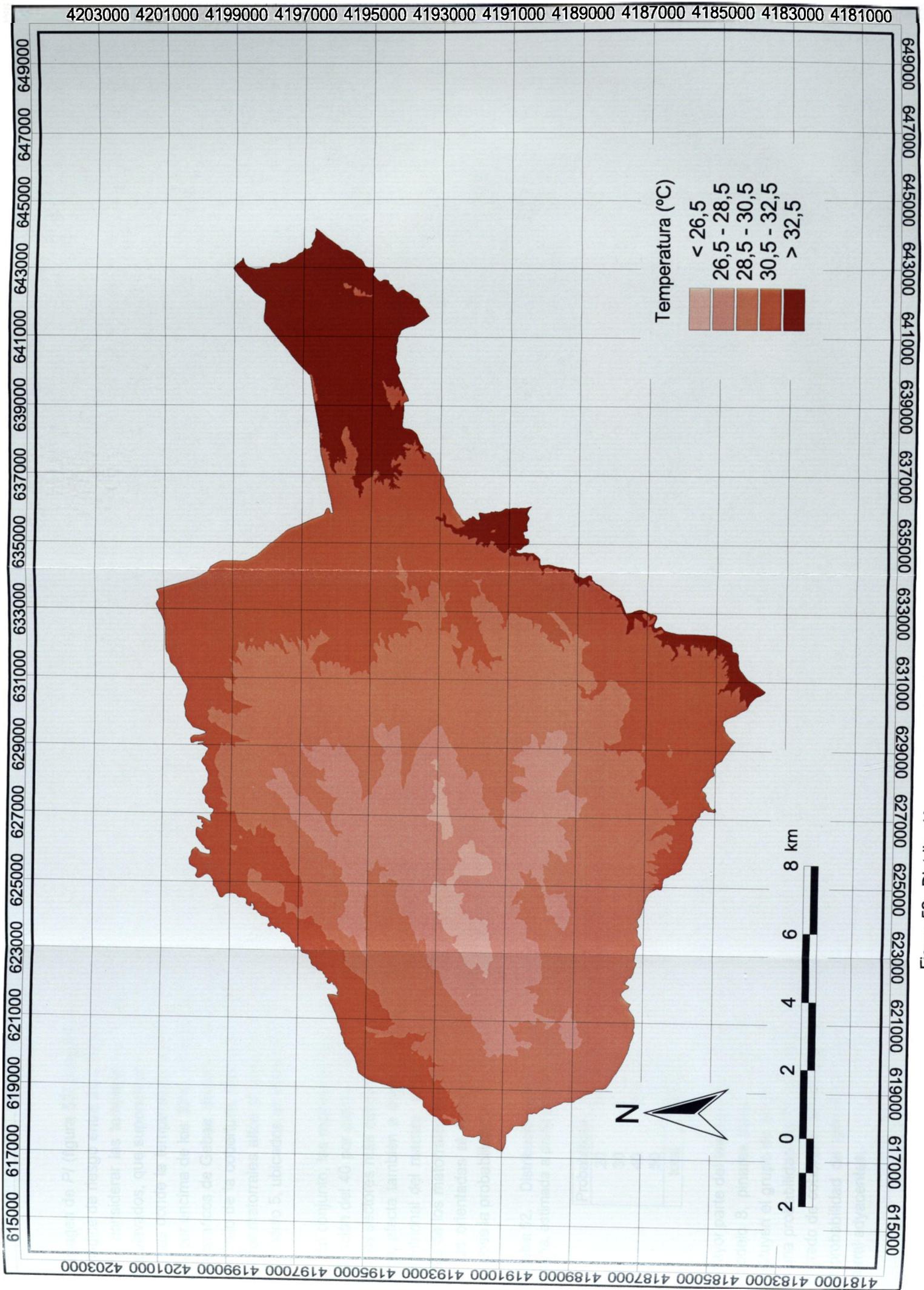


Figura 52. Distribución espacial de las temperaturas medias de máximas de agosto

La imagen de *PI* (figura 53) presenta valores para el primer componente del índice de riesgo entre 20 y 50 por ciento, el mismo rango que aparecía al considerar las temperaturas máximas absolutas. Los porcentajes más elevados, que suponen el 1,5 por ciento del territorio, corresponden a zonas donde la temperatura media de máximas del mes de agosto se sitúa por encima de los 30°C, localizadas en su mayoría en el entorno de los barrancos de Gebas, donde el sustrato margoso condiciona el escaso desarrollo de la cobertura. Destacan también pequeños sectores ocupados por matorrales altos al noreste y algunos retazos de matorrales bajos, modelo 5, ubicados en el extremo sureste.

En conjunto, las repoblaciones recientes presentan una probabilidad de ignición del 40 por ciento, valor ampliamente representado en Gebas, y en los sectores más cálidos de la vertiente oriental de Espuña. Sin embargo, afecta también a áreas de matorral alto localizadas en la ladera septentrional del macizo, desde donde se extiende hacia el noroeste a través de los matorrales de alta montaña que coronan las cimas. En las laderas orientadas al norte estos registros disminuyen ligeramente, situándose la probabilidad en un 30 por ciento (tabla 52).

Tabla 52. Distribución espacial de la probabilidad de ignición en Sierra Espuña, estimada a partir de las temperaturas medias de máximas de agosto.

Probabilidad	nº píxeles	hectáreas	% superficie
20	514.690	11.586,8	58,1
30	105.796	2.381,7	11,9
40	251.894	5.670,7	28,4
50	13.145	295,9	1,5
total	885.525	19.935,1	100,0

La mayor parte del territorio aparece ocupada por pinares altos, que junto al modelo 8, pinares bajos y carrascales con sotobosque de matorral, constituyen el grupo de arbolado que detenta el menor índice de ignición con una probabilidad del 20 por ciento. La altitud a la que se encuentran y el grado de cobertura favorecen la retención de humedad y determinan una probabilidad de ignición inferior a la que presentan las zonas de matorral adyacentes.

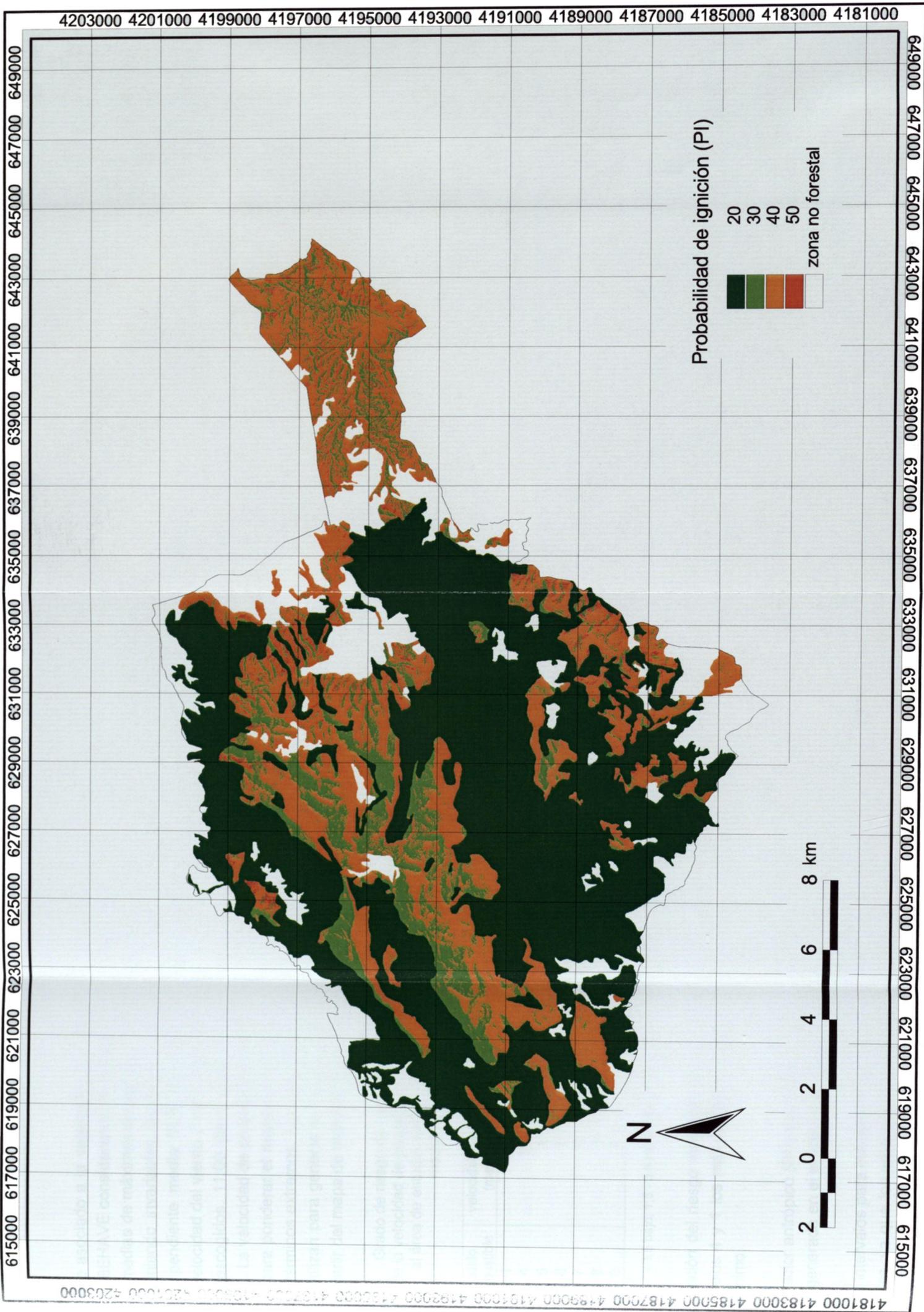


Figura 53. Distribución espacial de la probabilidad de ignición (PI) calculada a partir de las temperaturas medias de máximas de agosto

El riesgo asociado a la vegetación (V) se deduce de una nueva aplicación de BEHAVE considerando en este caso el valor medio de las temperaturas medias de máximas de agosto, 30,1 °C, (extraído de la figura 52) y manteniendo invariables los demás parámetros: altitud media 749,3 metros, pendiente media 36,6 por ciento, humedad relativa 56,3 por ciento, velocidad del viento 7 km/h y dirección del viento noreste. El día y la hora escogidos, 11:00 (hora solar) del 5 de agosto, permanecen sin cambios. La velocidad de propagación del fuego resultante del ensayo se utilizan para ponderar el riesgo aplicando el mismo criterio que para los valores térmicos extremos. Los resultados, que se presentan en la tabla 53, se utilizan para generar la imagen del riesgo derivado de la vegetación, a partir del mapa de modelos combustibles.

Tabla 53. 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 medias de máximas de agosto.

modelo combustible	velocidad propagación (metros/minuto)	grado de riesgo	valoración del riesgo*
1	13	8,1	extremo
4	16	10,0	extremo
5	6	3,7	alto
6	5	3,1	moderado
7	6	3,7	alto
8	3	1,9	moderado
9	1	1,0	bajo

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

La gradación del riesgo mantiene el comportamiento anterior resultando los modelos 4 y 1 los más peligrosos frente al modelo 9 que detenta el valor mínimo.

El factor antrópico (RH) permanece constante por lo que se utiliza la imagen generada en el ensayo anterior (figura 50).

Los intervalos para establecer la clasificación del riesgo permanecen constantes, ya que los valores extremos que pueden alcanzar los com-

ponentes del índice son los mismos. Después de realizar las correspondientes operaciones matemáticas entre imágenes para resolver la ecuación, se reclasifica el fichero *raster* final que recoge la zonación del riesgo. De nuevo es conveniente realizar las comprobaciones oportunas que determinen la inclusión correcta de cada una de las zonas en el intervalo correspondiente.

El riesgo moderado, valores de R/I entre 2,56 y 10,25, afecta a zonas con probabilidad de ignición del 20 y 30 por ciento. Considerando los valores mínimos para el factor de vegetación, 1, modelo combustible 9, y el riesgo antrópico moderado, 1, el resultado $R/I = ((20/10) \times 1) + 1 = 3,7$ está incluido en esta categoría. Lo mismo sucede con los valores máximos: $R/I = ((30/10) \times 1,9) + 1 = 4,9$.

Dentro del riesgo alto, R/I entre 10,25 y 30,75, la probabilidad de ignición más baja obtenida es el 30 por ciento; el riesgo de la vegetación es 3,7, correspondiente a los modelos 5 y 7; y el riesgo vinculado al hombre se eleva a 2,5. La resolución de la ecuación del índice muestra que tanto los máximos como los mínimos quedan dentro de esta categoría ($R/I = ((30/10) \times 3,7) + 2,5 = 12,2$; $R/I = ((40/10) \times 3,7) + 2,5 = 15,2$).

Por último el riesgo grave que corresponde a valores del índice superiores a 30,75 afecta a los modelos combustibles 1 y 4, la probabilidad de ignición varía entre 40 y 50 por ciento y la influencia humana es máxima. La combinación de valores mínimos, $R/I = ((40/10) \times 8,1) + 2,5 = 34,6$, y máximos $R/I = ((50/10) \times 10) + 2,5 = 52,5$, estaría dentro de este intervalo.

La distribución espacial del riesgo considerando las temperaturas medias de máximas de agosto (figura 54) muestra de nuevo la ausencia de zonas consideradas como de riesgo bajo (tabla 54). Ésta se atribuye al empleo de temperaturas medias de máximas relativamente altas, cuyo mínimo (25,5 °C) es tan sólo cuatro grados inferior al de las máximas absolutas, donde tampoco aparece esta categoría.

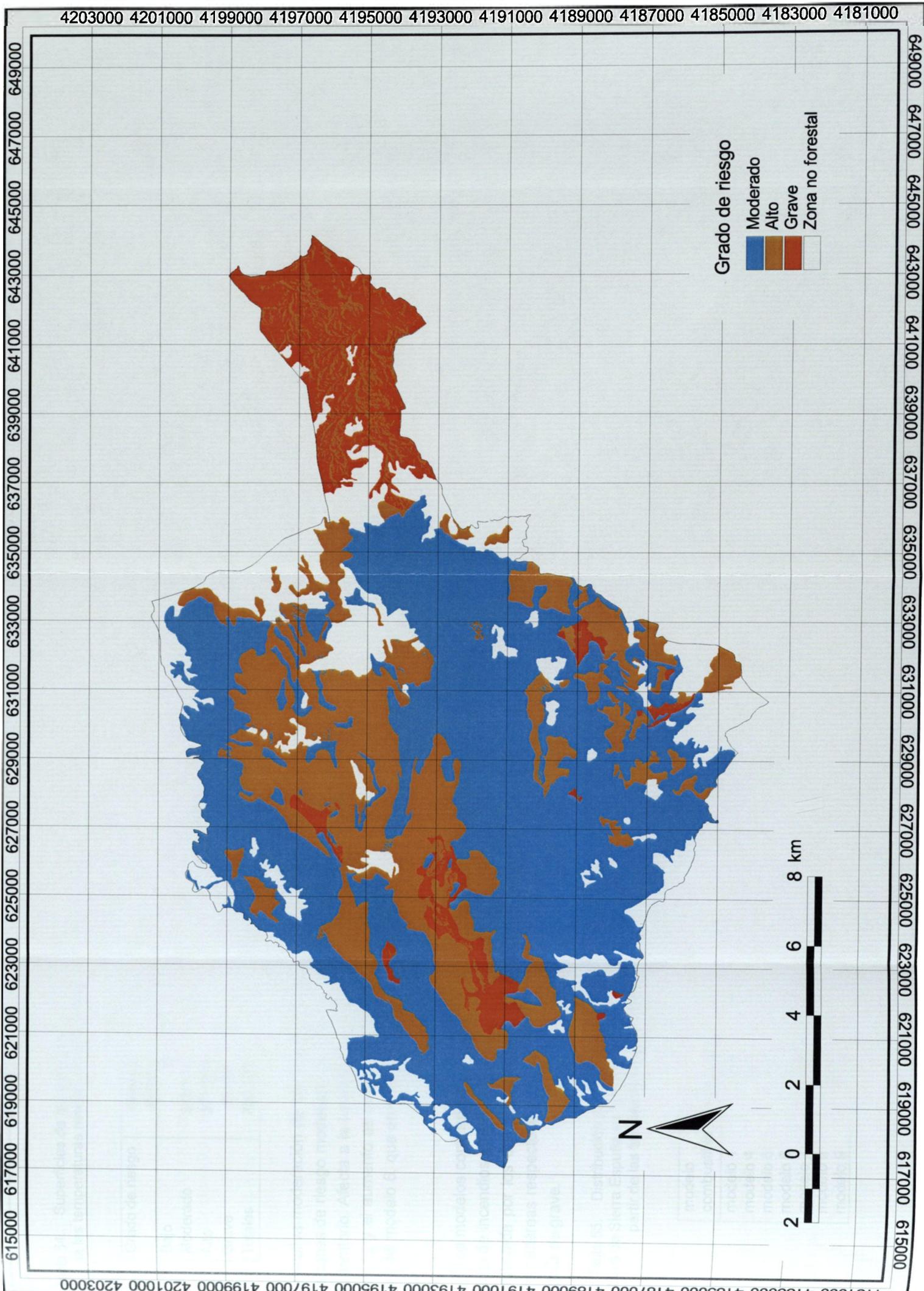


Figura 54. Mapa de riesgo de incendios elaborado a partir de las temperaturas medias de máximas de agosto

Tabla 54. Superficies de las categorías de riesgo de incendios estimadas para las temperaturas medias de máximas de agosto en Sierra Espuña.

Grado de riesgo	número píxeles	superficie (hectáreas)	superficie %
Bajo	0	0,0	0,0
Moderado	518.564	11.674,0	58,6
Alto	271.274	6.107,0	30,6
Grave	95.687	2.154,1	10,8
Totales	885.525	19.935,1	100,0

La relativa moderación de las temperaturas condiciona el incremento de las zonas de riesgo moderado, que ahora representan el 58,6 por ciento del territorio. Afecta a la totalidad de los modelos combustibles 8 y 9 (tabla 55), y el aumento se produce al pasar a esta categoría 87,2 hectáreas del modelo 6, que en el ensayo anterior se consideraban con riesgo alto.

Los modelos combustibles 1, 4, 5, 6 y 7 continúan afectados por un riesgo de incendios alto, aunque en este caso aumenta la superficie representada por los dos primeros, que supone un incremento global de 275 hectáreas respecto al primer ensayo, que antes se incluían en la categoría de grave.

Tabla 55. 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 máximas de agosto.

modelo combustible	grado de riesgo		
	moderado	alto	grave
modelo 1	0,0	24,5	75,5
modelo 4	0,0	10,0	90,0
modelo 5	0,0	100,0	0,0
modelo 6	3,1	96,9	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

Se localiza en el centro y centro norte del área de estudio donde predominan temperaturas entre 26,5 y 30,5 °C con probabilidades de ignición del 20 y 30 por ciento. Incluye la totalidad del matorral de alta montaña y de los matorrales bajos, así como el 97 por ciento de los matorrales altos localizados en la vertiente septentrional de Sierra Espuña, desde donde se extiende hacia el este afectando a una tercera parte de la superficie ocupada por el modelo combustible 1.

Las zonas más sensibles, que abarcan el 10,8 por ciento del territorio se localizan en el área de Gebas y los repoblados jóvenes del interior. La velocidad de propagación de las llamas en los modelos 1 y 4 y el predominio de valores para la probabilidad de ignición entre el 40 y 50 por ciento otorgan a estos sectores un grado de riesgo grave.

Se constata de nuevo un descenso en la superficie total de esta categoría respecto a la que ofrecía el ensayo realizado para las temperaturas máximas absolutas. En este caso hay una diferencia de 362 hectáreas, el 99 por ciento de la cuales corresponden al área de Gebas que han pasado a incrementar el riesgo alto.

c) Situación estival promedio: temperaturas medias de medias mensuales de agosto.

El tercer ensayo se plantea para una situación hipotética promedio del mes de agosto, por lo que los registros térmicos utilizados corresponden a los valores medios mensuales.

El proceso para la obtención de la probabilidad de ignición es el mismo que se ha venido utilizando, aunque en éste caso es posible incluir la estación de Alhama Ceña Guerrero por lo que el número de enclaves considerados se eleva a siete. La ecuación de ajuste cuya expresión es $y = 26,782 + 0,0034 \times \text{altitud}$, excluye longitud y latitud, presentando un coeficiente de correlación de -0,79. El mapa de temperaturas

medias de agosto que presenta valores entre 21,3 y 26,1 °C (figura 55), se obtiene resolviendo el sistema con ayuda de las ordenes "scalar" y "overlay" de IDRISI.

La cuantía y distribución espacial de la humedad del combustible (HC) es la misma que en los ensayos anteriores ya que también lo son los factores que intervienen en su determinación. Por un lado, la humedad básica del combustible (HBC) se eleva a 8, independientemente de la temperatura, ya que la humedad relativa estimada es 56,3 por ciento (tabla 38), y por otro, al utilizar la misma serie de incendios, el factor de corrección dependiente del intervalo horario con mayor número de sucesos permanece constante.

Los valores de ignición se obtienen a partir la tabla de doble entrada (tabla 56) donde se contemplan los nuevos intervalos térmicos correspondientes a cada grupo de sombreado.

Tabla 56. Valores porcentuales de probabilidad de ignición para diferentes condiciones de sombreado, temperatura y humedad del combustible.

Sombreado %	Temperatura °C	Humedad del combustible				
		8	9	10	11	12
0-10	20-30	40	40	30	30	20
	25-30	40	40	30	30	20
60-90	20-25	40	30	30	30	20

La distribución espacial de la probabilidad de ignición (figura 56) mantiene el comportamiento de ensayos anteriores, correspondiendo los valores más bajos, 20 por ciento, a las zonas ocupadas por los modelos combustibles 8 y 9. El descenso térmico derivado de la utilización de valores medios mensuales implica una ignición máxima del 40 por ciento, frente al 50 por ciento que presentaban las temperaturas extremas.

La superficie ocupada por cada rango de ignición (tabla 57) presenta gran similitud con los resultados del segundo ensayo en el que se emplearon las temperaturas medias de máximas.

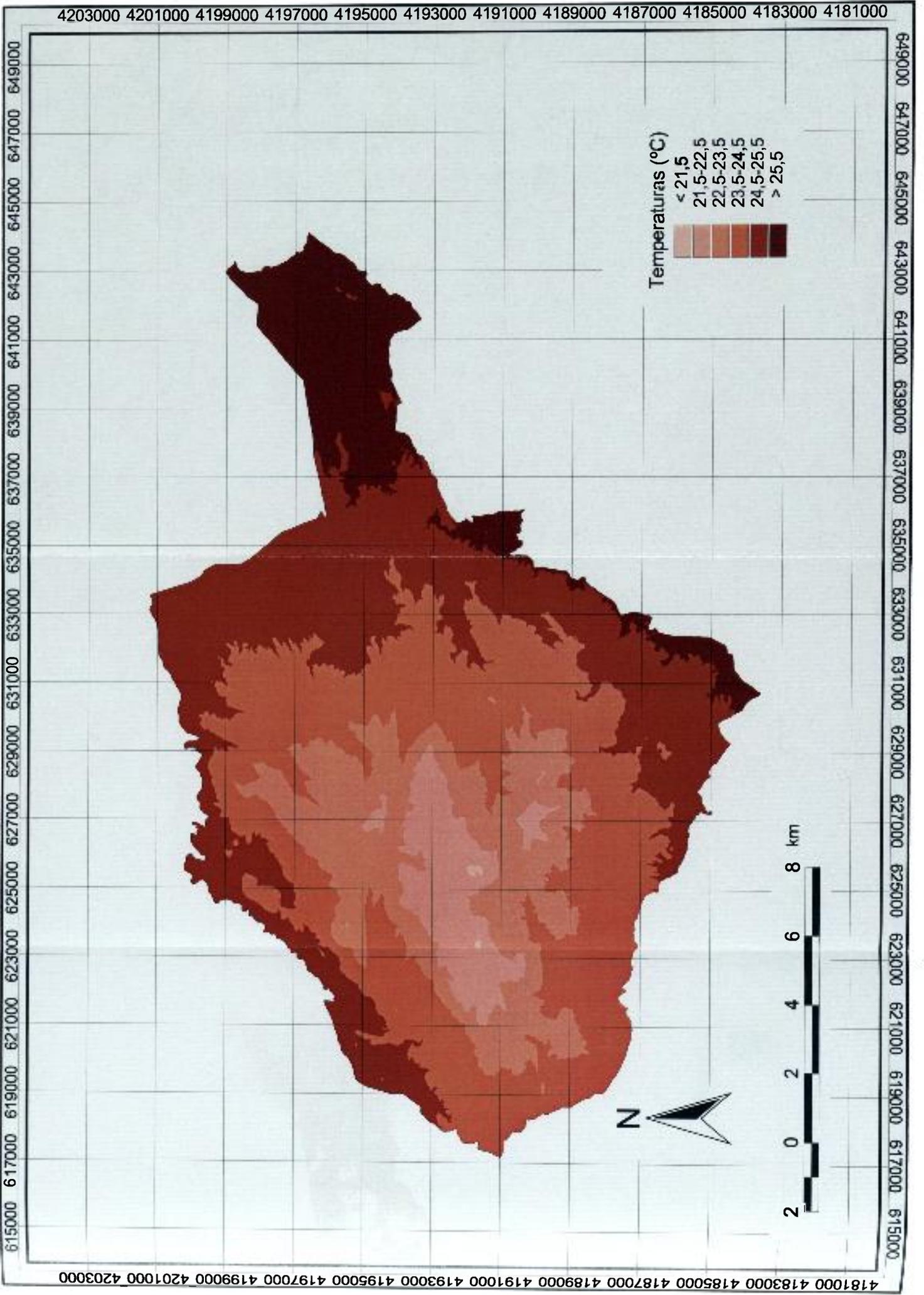


Figura 55. Distribución espacial de temperaturas medias mensuales de agosto

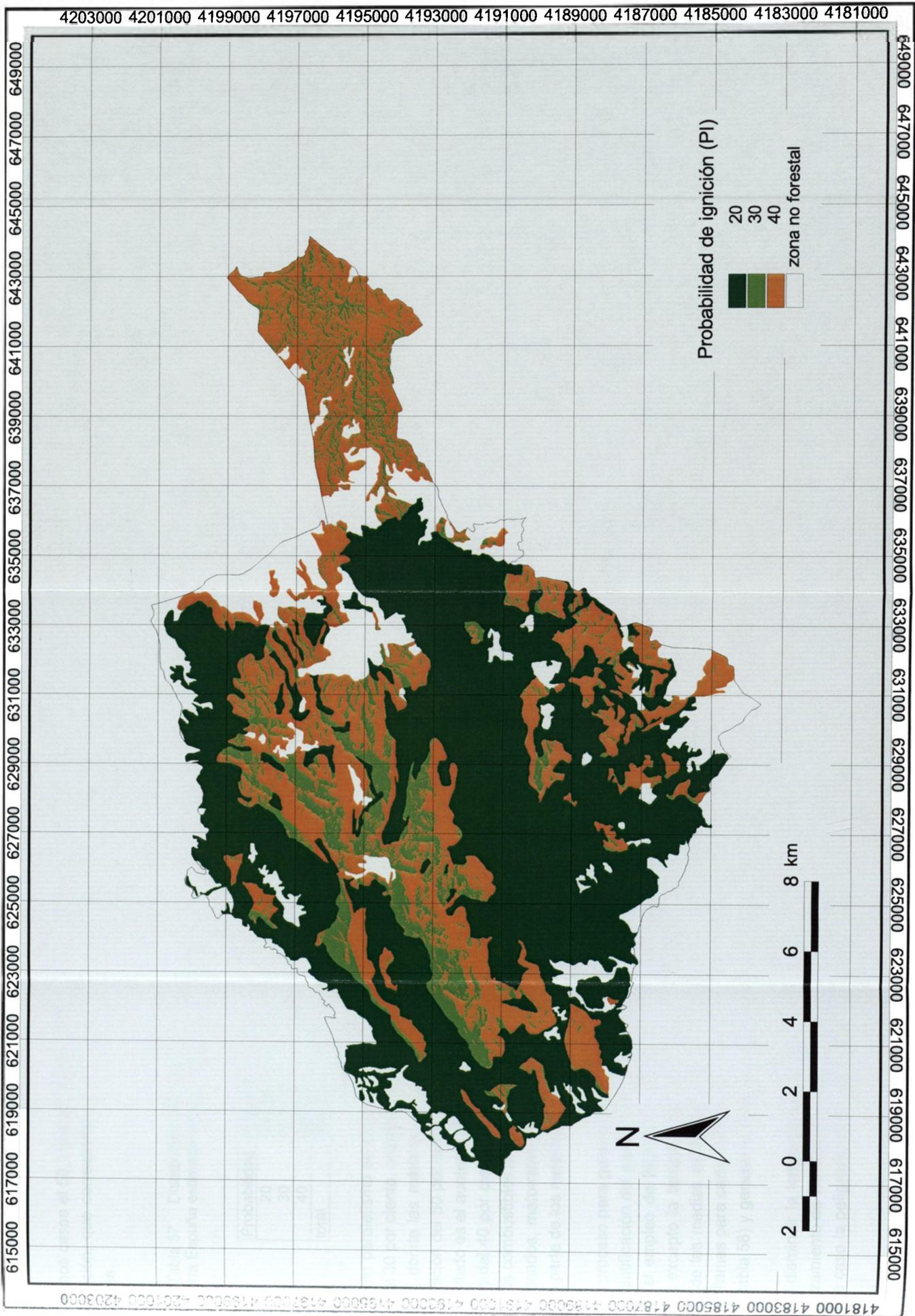


Figura 56. Distribución espacial de la probabilidad de ignición (PI) calculada a partir de las temperaturas medias de agosto

En ambos casos el 58,1 por ciento del territorio tiene el menor porcentaje de ignición, que corresponde a los modelos combustibles del grupo de bosques.

Tabla 57. Distribución espacial de la probabilidad de ignición en Sierra Espuña estimada a partir de las temperaturas medias de agosto.

Probabilidad	nº píxeles	hectáreas	% superficie
20	514.690	11.586,8	58,1
30	105.796	2.381,7	11,9
40	265.039	5.966,6	29,9
total	885.525	19.935,1	100,0

El mismo paralelismo se observa en las zonas con probabilidad de ignición del 30 por ciento, mientras que los matorrales de margas del área de Gebas, donde las máximas de agosto superaban los 30 °C implicando una ignición del 50 por ciento, pasan al intervalo inmediatamente inferior. El resultado es el aumento de las zonas que presentan probabilidades de ignición del 40 por ciento, en el que se integran más de la mitad de los modelos combustibles 6 y 7, y casi las dos terceras partes de los cultivos abandonados, matorrales de margas y matorrales altos y bajos que se forman parte de los modelos 1, 4 y 5.

El proceso para generar el mapa de riesgo asociado a la vegetación y la cuantificación del parámetro V de la ecuación del índice, requiere de nuevo el empleo de BEHAVE, manteniendo invariables todos los parámetros excepto la temperatura que en este caso corresponde al valor medio de las medias de agosto (24,2 °C). La velocidad de propagación de las llamas para cada modelo combustible se utiliza para cuantificar su riesgo (tabla 58) y generar el fichero *raster* correspondiente.

Al disminuir la temperatura se produce una ralentización general el desplazamiento de las llamas a través de los combustibles, haciendo que en éste caso la peligrosidad del modelo 1 disminuya ligeramente pasan-

do a clasificarse como de riesgo alto. Lo mismo sucede con los modelos 5 y 7 que entrar a formar parte del grupo considerado como moderado.

Tabla 58. 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 medias mensuales.

modelo combustible	velocidad propagación (metros/minuto)	grado de riesgo	valoración del riesgo*
1	10,2	6,8	alto
4	15,0	10,0	extremo
5	5,3	3,5	moderado
6	4,8	3,2	moderado
7	5,3	3,5	moderado
8	2,5	1,6	moderado
9	0,5	0,3	bajo

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

Por último, hay que considerar el factor antrópico (RH) que no varía, por lo que se utiliza la misma imagen que en los dos supuestos anteriores.

Los tres ficheros *raster* contienen la distribución espacial de los tres componentes del índice que se someten a las operaciones de álgebra de mapas, dando como resultado la zonación del riesgo de incendios en Sierra Espuña para las condiciones térmicas medias del mes de agosto (figura 57).

El chequeo realizado para constatar la adecuación de los intervalos muestra como la probabilidad de ignición asociada a las zonas de riesgo bajo es del 20 por ciento, siendo el modelo 9 el único incluido en esta categoría. Teniendo en cuenta que el factor antrópico mínimo es 0,7, el índice resultará $RI = ((20/10) \times 0,3) + 0,7 = 1,3$, inferior al umbral 2,56.

El riesgo moderado, donde la ignición es del 20 por ciento, tiene asociado un valor de 1 para el factor antrópico, y un máximo y mínimo de 3,5 y 1,6 respectivamente para los modelos combustibles. En consecuencia, tanto la combinación de máximos $RI = ((20/10 \times 3,5 + 1) = 7,5$,