



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*



UNIVERSIDAD
DE MURCIA

DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA FÍSICA,
HUMANA Y ANÁLISIS REGIONAL

Facultad de Letras

*Campus de la Merced
30001 Murcia.*

D. Carmelo Conesa García, Profesor Titular de Universidad del Área de Geografía Física y Director del Departamento de Geografía Física, Humana y Análisis Regional, INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada "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)" ha sido realizada por D^a Yolanda Álvarez Rogel, bajo la inmediata dirección y supervisión de D. Carmelo Conesa García, y que el Departamento ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

Murcia, a 27 de Octubre de 2000

Fdo.: Carmelo Conesa García
Director del Departamento



UNIVERSIDAD
DE MURCIA

DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA FÍSICA,
HUMANA Y ANÁLISIS REGIONAL

Facultad de Letras

*Campus de la Merced
30001 Murcia.*

D. Carmelo Conesa García, Profesor Titular de Universidad del Área de Geografía Física, adscrito al Departamento de Geografía Física, Humana y Análisis Regional, INFORMA:

Que la memoria titulada "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)", que presenta la Licenciada D^a Yolanda Álvarez Rogel, para optar al grado de Doctor en Geografía Física, ha sido realizada bajo mi dirección en el Departamento de Geografía Física, Humana y Análisis Regional de la Universidad de Murcia.

Y AUTORIZA su presentación por considerar que reúne las condiciones necesarias para ser juzgada.

Murcia, a 27 de Octubre de 2000

Fdo.: Carmelo Conesa García
Director de la Tesis Doctoral

A mis padres

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivos	4
1.3. Los incendios forestales: concepto y tipos	7
2. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE RIESGO Y PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES	17
2.1. Introducción	18
2.2. Propuestas metodológicas: Índices de peligro y riesgo	18
2.3. Trabajos relacionados con la predicción del compor- tamiento del fuego	36
2.4. Valoración y cartografía del riesgo: nuevas tenden- cias	42
2.5. Programas y Proyectos de lucha contra incendios forestales en los países de la Europa Mediterránea .	54
3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS INCENDIOS FORES- TALES	65
3.1. Los incendios forestales en España	66
3.1.1. Análisis temporal	66
3.1.2. Causalidad de los incendios forestales	72
3.1.3. Los grandes incendios forestales en España (1970-1995)	75
3.2. Los incendios forestales en la vertiente peninsular mediterránea (1989-1996)	78
3.3. Los incendios forestales en la Región de Murcia (1983-1997)	81
4. METODOLOGÍA	90
4.1. Introducción	91
4.2. Tratamiento de variables medioambientales a través de SIG	91
4.2.1. Variables topográficas	91
- Elaboración del Modelo Digital del Terreno	91

- Cartografía de altitudes	95
- Cartografía de pendientes y orientaciones	96
4.2.2. Variables climáticas	98
- Consideraciones previas	98
- Precipitaciones	100
- Temperaturas	102
- Vientos	103
- Humedad relativa del aire	103
- Indicadores bioclimáticos	104
4.2.3. La cubierta vegetal	105
4.2.4. Factor antrópico	109
4.3. Modelización del riesgo de incendios mediante SIG	112
4.4. Aplicación de programas de simulación	114
4.5. Utilidad de los SIG en la prevención del riesgo de incendios forestales	116
5. APLICACIÓN A UN ÁREA PILOTO: SIERRA ESPUÑA - GEBAS	123
5.1. Selección y localización del área de estudio	124
5.1.1. Justificación de la selección del área	124
5.1.2. Situación y límites del área de estudio	129
5.1.3. Fuentes para el estudio de los incendios fores- tales en Sierra Espuña	132
5.2. Variables utilizadas en el análisis del riesgo de in- cendios forestales	133
5.2.1. El relieve	134
- Consideraciones generales	135
- Análisis topográfico local	139
5.2.2. El clima	147
- Precipitaciones	149
- Temperaturas	155
- Humedad relativa y vientos	162
- Condiciones bioclimáticas.....	164
5.2.3. Cubierta vegetal y cartografía de modelos com- bustibles	170

5.2.4. Frecuencia y magnitud de los incendios forestales en Sierra Espuña	183
5.2.5. El factor antrópico	191
5.3. Modelización del riesgo de incendios	194
5.3.1. Introducción	194
5.3.2. Índice de Riesgo Local de Incendios (<i>RL</i>).....	195
5.3.3. Valoración y cartografía del riesgo de incendios .	200
- Ensayos para el mes de agosto	202
- Ensayos para los meses de julio y septiembre	237
5.3.4. Predicción del comportamiento del fuego	254
- Aplicación del programa FARSITE	255
- Metodología	255
- Resultados de las simulaciones	261
5.4. Aplicación de la teledetección al reconocimiento de áreas afectadas por el fuego	282
5.5. Aplicación de los mapas de riesgo de incendios en la adopción de medidas preventivas	295
- CONCLUSIONES	299
- AGRADECIMIENTOS	304
- BIBLIOGRAFÍA	306
- ANEXOS	329
i. Índice de tablas	I
ii. Índice de figuras	VIII
iii Índice de anexos	XV

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

Debido a su posición geográfica, España es uno de los países europeos más afectados por los incendios forestales. Las causas de esta incidencia son múltiples, aunque están íntimamente ligadas a las características climáticas de su ámbito mediterráneo: altas temperaturas y escasas precipitaciones, que implican un notable estrés hídrico para la vegetación, especialmente durante la época estival.

Además de estos factores "naturales" hay que considerar la gran influencia del hombre sobre el medio. Muchos de los incendios forestales se relacionan con acciones antrópicas, bien directas, cuando son provocados con fines especulativos, disputas o fruto de la actuación incontrolada de pirómanos, o bien indirectas, propagación del fuego producido por la quema de barbechos, restos de podas o aclareos, líneas eléctricas, prácticas recreativas en zonas de ocio, etc., que constituyen en definitiva negligencias o descuidos.

La proximidad temporal de la ocurrencia de dos grandes incendios en nuestro país (1994, en Murcia y Albacete y 1998 en Cataluña), pone de manifiesto las nefastas consecuencias que produce este fenómeno. En agosto del año 2000, las llamas han quemado 6.500 hectáreas en la comarca del Alto Ampurdán (Gerona), 4.500 hectáreas en la isla canaria de La Palma, más de 4.000 hectáreas en el municipio de Pareja en Guadalajara, 3.000 hectáreas en la provincia de Soria y en torno a 2.200 hectáreas en la comunidad autónoma de Aragón. La imagen que ofrecen estos ecosistemas es la de grandes superficies, prácticamente arrasadas y muy vulnerables a la erosión, que necesitarán décadas para recuperar el estado que presentaban antes de ser afectadas por el fuego.

Junto al deterioro medio ambiental y las pérdidas económicas que esto conlleva, hay que lamentar en muchas ocasiones pérdidas humanas, imposibles de cuantificar y nunca valorables en términos crematísticos. Un ejemplo reciente lo constituye la desgracia ocurri-

da en la Comunidad Autónoma de Andalucía donde cuatro profesionales que participaban en labores de extinción perdieron la vida tratando de controlar el incendio que, entre los días 28 y 29 de junio de 1999, arrasó más de 300 hectáreas en una zona de la Sierra de Huelva conocida como el paraje Madroñero, perteneciente al pueblo onubense de Alajar. El 28 de agosto de 2000 dos bomberos de la brigada forestal de Villafranca del Bierzo fallecieron, y otro resultó herido, al quedar atrapados por el fuego cuando trabajaban en la extinción de un incendio forestal declarado entre las localidades de Lusío y Arnado en Oencia (León).

La mejor manera de luchar contra los efectos negativos del fuego es evitar que se produzca, y en el caso de que tengan lugar, tratar de controlarlo y extinguirlo en el menor tiempo posible, reduciendo al mínimo las pérdidas potenciales.

Las graves consecuencias que a todos los niveles (ecológico, económico, social y humano) pueden derivarse de un incendio forestal son razones suficientes para dedicar una atención especial a este fenómeno. El hombre ha desarrollado numerosos instrumentos y puesto en práctica diversos procedimientos para combatirlos. En la actualidad existe personal técnico encargado de dirigir las tareas de control y extinción, una vez que se ha producido un incendio. Sin embargo, conocer el comportamiento más previsible del fuego será de vital importancia para actuar anticipadamente sobre el medio, por lo que la prevención juega un papel fundamental. Para ello las técnicas universalmente aceptadas se centran en el estudio espacial, temporal y causal del origen de estos siniestros (ICONA, 1983, 1985).

En el inicio y posterior desarrollo de un incendio forestal influyen sobremanera los factores climáticos, topográficos, biogeográficos y antrópicos que configuran el paisaje, cuyo conocimiento es imprescindible para desarrollar las medidas de prevención oportunas. En este sentido los Sistemas de Información Geográfica

(S.I.G.) constituyen una herramienta de gran utilidad ya que posibilitan el análisis de variables regionalizadas. La confección de un SIG para un espacio concreto implica tener en cuenta no sólo los datos geográficos en sí, sino también las relaciones espaciales existentes entre ellos (Goodchild, 1993). De ahí su interés en el estudio de este tipo de sucesos que requieren un análisis integrado del paisaje.

La consideración de los incendios forestales como fenómenos geográficos (Salas Rey, 1994) pone de manifiesto las aportaciones que esta ciencia de la tierra puede hacer en el campo de la prevención y lucha contra el fuego, desde la perspectiva de diversos ámbitos de actuación: i) cartografía de la ocurrencia de incendios que permite el establecimiento de zonas sensibles al fuego; ii) análisis de los efectos en el paisaje y adopción de medidas para combatir la erosión y regenerar las zonas afectadas; iii) determinación de "áreas de riesgo", fruto de la interacción de factores medioambientales y sociales y su distribución en el espacio, imprescindibles en las tareas de prevención. Este mismo autor señala también la labor que los geógrafos pueden desarrollar en el estudio de factores socioeconómicos implicados en el incendio forestal, y que determinan en muchos casos su frecuencia y causalidad.

Desde este enfoque geográfico, se analizan más adelante las características y factores que inciden en la ocurrencia de incendios forestales en un espacio concreto de la Región de Murcia, con la finalidad de elaborar una cartografía del riesgo que afecta a esta zona y validar posibles modelos de predicción del mismo.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es demostrar la utilidad de la tecnología SIG en el estudio de predicción y prevención del riesgo de incendios forestales. Con esta finalidad se utilizan las posibilidades que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (SIG) co-

mo herramienta de integración y análisis espacial de las variables que intervienen en el inicio y desarrollo del incendio, se implementan índices y modelos de riesgo sobre la base de módulos operativos dentro del sistema elegido y se realizan simulaciones con fines predictivos.

Tras una síntesis inicial sobre el concepto y tipos de incendios, se realiza, como primera aproximación al problema, una breve revisión del estado de la investigación metodológica referida a la evaluación del riesgo de incendios forestales. Ésta incluye básicamente propuestas para el cálculo de índices de peligro y riesgo, su representación cartográfica y los modelos de predicción y simulación del comportamiento del fuego. La incidencia de estos sucesos, especialmente en los países de la Europa Mediterránea, ha dado lugar al desarrollo de programas conjuntos de lucha contra los incendios forestales, abordando el problema desde múltiples perspectivas, que abarcan desde la detección precoz del inicio del fuego hasta el seguimiento de los procesos de regeneración de áreas quemadas.

El estudio de la ocurrencia histórica de los incendios forestales en España (número de sucesos, causalidad y superficies afectadas por el fuego) pondrá de manifiesto su importancia en nuestro país. En este contexto se dedicará una atención especial a la vertiente peninsular mediterránea y también a la Región de Murcia en su conjunto, dentro de la cual se seleccionará un área, de reconocido interés medioambiental (Sierra Espuña y su entorno), que constituirá el eje central del trabajo.

Para esta zona se estudiará la evolución de los incendios forestales, distribución espacial y temporal, causa y lugar de origen del fuego, número de eventos y extensión, y se empleará un SIG que permita disponer de una cartografía temática digital de las variables que intervienen en estos sucesos.

A partir de esa información se aplicarán diversas propuestas para la modelización del riesgo, comparando los resultados entre índices de carácter general y aquéllos que permiten obtener una zonación espacial del mismo. Estos últimos constituyen la base para la elaboración de una cartografía específica del riesgo de incendios en el área de estudio, que se llevará a cabo contemplando diversas situaciones, con el fin de analizar los diversos aspectos que inciden en el comienzo y propagación del fuego.

La última fase del trabajo consistirá en la aplicación de un software específico que permite simular, a partir de la localización de uno o varios focos iniciales, el avance del fuego bajo condiciones meteorológicas, topográficas y de vegetación concretas. Para ello se realizará una selección de áreas en el interior de la zona de estudio, basada en la presencia de un determinado modelo combustible, con el fin de analizar el comportamiento de cada tipo de cubierta y su respuesta al fuego.

Por último se plantea la aplicación de técnicas específicas para el tratamiento de imágenes procedentes de sensores remotos y su utilidad para la detección de áreas afectadas por el fuego. Se analiza una imagen Landsat-TM correspondiente al día 4 de julio de 1996, un mes después de que se produjera el incendio más grave de los documentados en el área de estudio durante los últimos quince años.

De acuerdo con estos objetivos se han acometido las siguientes fases de trabajo:

- Definir el concepto de incendio forestal y establecer su tipología.
- Analizar el estado de la investigación sobre la evaluación del riesgo de incendios forestales.

- Estudiar la evolución histórica reciente de los incendios forestales en España, dedicando una atención especial al área mediterránea y a la Región de Murcia.

- Aplicar un Sistema de Información Geográfica a un espacio piloto de la Región de Murcia (Sierra Espuña-Gebas), en el que se analizarán las variables que intervienen en el inicio y propagación.

- Selección y utilización de índices para estimar el grado de riesgo local de incendios en el área de estudio.

- Elaboración de mapas del riesgo de incendios ponderando la importancia de las variables topográficas, climáticas, de vegetación y derivadas de las acciones antrópicas que intervienen en la ocurrencia de estos sucesos.

- Análisis del comportamiento previsible del fuego mediante la aplicación de técnicas específicas de simulación de incendios.

- Empleo de la información procedente de sensores remotos para la detección de superficies afectadas por el fuego. Análisis de un caso concreto ocurrido el día 5 de junio de 1996 en el área de estudio.

- Discusión de los resultados.

1.3. Los incendios forestales: concepto y tipos

El concepto de incendio forestal es definido por ICONA en 1982 como "el fuego que se extiende sin control sobre un terreno forestal afectando a vegetación que no está destinada a arder". De aquí se deducen sus rasgos fundamentales: a) ausencia de control sobre el fuego, por tanto la quema de pastos, matorral, o los trabajos de limpieza de montes no son considerados incendios, salvo que el fuego

se extienda fuera de la zona sobre la que se pretendía actuar; b) afectación de terrenos forestales, entendiéndose por tal "la tierra en la que vegetan especies arbóreas, arbustivas, de matorral o herbáceas, sea espontáneamente o procedan de plantación, siempre que no sean características del cultivo agrícola o fueren objetivo del mismo" (artículo 1º de la Ley de Montes, 1957, BOE nº 151). Se excluye la vegetación agrícola y quema de rastrojos, salvo que el fuego exceda el área de actuación, y c) un incendio forestal afecta a vegetación que no estaba destinada a arder, provocando una transformación, no prevista del medio.

El fuego no es un elemento extraño a la naturaleza, ni incompatible con la existencia de vegetación, es más, ha condicionado la existencia y distribución de los bosques a lo largo de miles de años. Juega un papel esencial en la composición y estructura de las masas forestales, en el mantenimiento de la diversidad de la flora, regeneración de especies forestales, movilidad de nutrientes en el suelo, etc. También puede considerarse con una herramienta que el hombre ha venido utilizando desde antiguo en diversas tareas: quema de rastrojos, pastos, limpieza de montes, etc. (Ainswoth & Doss, 1995).

El fuego es el resultado del proceso físico-químico de la combustión, y se produce cuando existe una coincidencia espacial y temporal de los tres elementos que componen el llamado "triángulo del fuego": combustible, oxígeno y calor (figura 1).

Para que un fuego se inicie es necesaria la existencia de combustible sobre el que actúa, en presencia de oxígeno, una fuente de calor más o menos intensa que hace que se alcance el punto de ignición y empiece a arder. Una vez comenzado, el proceso se mantendrá por sí mismo mientras no se suprima o desaparezca, al menos, uno de los tres elementos del "triángulo". Por este motivo, la mayor parte de las técnicas de extinción están basadas en la reducción del calor a temperaturas inferiores a la de combustión, elimina-

ción o separación del combustible o bien en la reducción o eliminación del oxígeno.

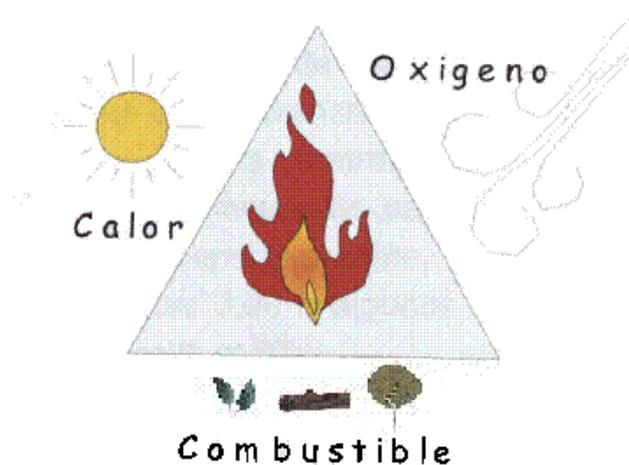


Figura 1. Triángulo del fuego

La propagación del fuego es el mantenimiento en cadena de la reacción de combustión, es decir, la *transmisión del calor*. Este proceso puede producirse de diversas formas:

1.- *Por convección*: Cuando una masa de aire aumenta de temperatura, disminuye su densidad y tiende a elevarse siendo sustituida por otra masa fría que sufrirá el mismo proceso, originándose corrientes ascendentes de aire caliente. Las corrientes cálidas desecan la vegetación que encuentra a su paso, al tiempo que constituyen un aporte de oxígeno, favoreciendo así la propagación de fuego. Este proceso tiene importancia en el avance del fuego ladera arriba y en el paso del fuego de superficie a copas.

2.- *Por radiación*: El calor se transmite a través del espacio, sin necesidad de viento. Se produce en distancias cortas, por lo que afectará únicamente a los combustibles más próximos al foco emisor.

3.- *Por conducción*: La transferencia de calor se debe al contacto entre las moléculas de los cuerpos sólidos y la velocidad de transmisión depende del coeficiente de conductividad térmica del material (λ) definido como la cantidad de calor que pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de extensión infinita y caras plano-paralelas y de espesor unidad, cuando se establece entre sus caras una diferencia de temperatura de un grado. Se expresa en kilocalorías/hora \cdot metros \cdot °C. La madera tiene valores de este coeficiente relativamente bajos, coníferas y frondosas 0,12 y 0,18 kcal/h \cdot m \cdot °C respectivamente, frente a otros materiales como las rocas compactas 3,00 o algunos metales como el cobre donde se eleva a 330 kcal/h \cdot m \cdot °C.

4.- *Transporte en masa*: Resulta de la interacción de los tres procesos anteriores y se produce por una proyección de partículas incandescentes y materiales de mayores dimensiones (brasas) que pueden originar nuevos focos de incendio.

Una vez comenzado el incendio, su velocidad de propagación dependerá de la topografía, características de la cubierta vegetal afectada y sobre todo, de las condiciones meteorológicas de la zona, siendo el viento, la temperatura y la humedad los principales factores que inciden sobre el "triángulo del fuego".

El viento constituye el *aporte de oxígeno* en una dirección concreta determinando el avance del frente del incendio. Al tiempo acelera la desecación del combustible e incrementa la transferencia de calor por radiación y convección, además de originar el desplazamiento de partículas incandescentes a zonas no incendiadas, creando nuevos focos de ignición.

La temperatura incide directamente sobre los combustibles contribuyendo a su desecación y por tanto haciéndolos más vulnerables a la acción del fuego. La velocidad de propagación de las llamas se ve incrementada por la presencia de corrientes ascen-

dentes de aire, fruto de la convección producida por el calentamiento del suelo.

El contenido en vapor de agua del aire incide directamente sobre la humedad de la vegetación. Cuando menor sea la humedad relativa del aire los combustibles estarán mas secos y arderán mas rápidamente y con mayor facilidad.

Los terrenos forestales se localizan generalmente en áreas de compleja orografía, incidiendo sobre la distribución espacial de la cobertura vegetal y las condiciones meteorológicas locales. La influencia de la topografía está determinada por la pendiente, exposición y el relieve. La velocidad de propagación aumenta con la pendiente. Si el fuego avanza ladera arriba, la inclinación del terreno favorece la desecación de la vegetación ya que las llamas están más próximas. La formación de corrientes desecantes y de convección hacen que aumente la velocidad del viento y con ello el avance del fuego. La velocidad se duplica en una pendiente del 10% y se cuadruplica en una del 20% (Mc Arthur, 1967). Ladera abajo el avance es más lento.

La exposición y orientación del terreno incide directamente en el grado de insolación a que está sometida la vegetación y por tanto en la humedad de la misma. Junto a ello, la disposición del relieve puede contribuir también a la propagación del incendio. La presencia de valles estrechos favorece la canalización de los vientos que aumentan su velocidad y poder desecante, al tiempo que facilita la transmisión de elementos incandescentes entre ambas laderas.

El tercer elemento del "triángulo del fuego" y sobre el cual el hombre centra sus esfuerzos para tratar de controlar o extinguir un incendio es el *combustible*. Las características de la cubierta vegetal que condicionan el comportamiento del fuego son muy variadas. Entre las más importantes cabe señalar: el grado de inflamabilidad y composición química; cantidad, densidad, compactación y distribu-

ción, y humedad de la vegetación. La primera hace referencia a la mayor o menor facilidad de un combustible para arder al ser expuesto a una radiación calórica constante. La inflamabilidad está condicionada por el tipo de material (los combustibles ligeros como hojas, acículas, arbustos, etc., arden con mayor rapidez que los pesados: ramas, raíces, troncos) y por su composición química (presencia de resinas, ceras, alcoholes...) que favorece, en ocasiones, el inicio y propagación del fuego.

La intensidad y velocidad del incendio aumentará cuanto mayor sea la cantidad y densidad del material disponible para arder (Flores y Benavides, 1997). Si el grado de cobertura vegetal es alto, la disponibilidad del combustible será continua mientras que si existen áreas desprovistas del mismo, el fuego encontrará más dificultad para extenderse. La relación superficie/volumen de las partículas afecta directamente a la intensidad de la combustión. Valores altos implican mayor absorción del calor y pérdida mas rápida de humedad haciendo que se alcance antes la ignición. La continuidad en los planos horizontal y vertical de la vegetación influye en el avance del fuego, viéndose favorecido por una distribución continua, que le permite progresar sin interrupción. En el plano vertical, estratos superpuestos hacen que el fuego de superficie pase a copas (Vélez Muñoz, 1987).

La compactación o espaciado entre partículas se refiere al porcentaje de material disponible para arder y el porcentaje de aire presente en dicho material. Cuanto mayor sea el espaciamiento mayor será también la tasa de desecación y la presencia de oxígeno, favoreciendo la ignición. Sin embargo, cuando las partículas están muy separadas, hay poca transferencia de calor entre ellas y el fuego no avanza.

Por último, la humedad de la vegetación es básica para retardar la propagación del incendio ya que el calor debe evaporar primero el exceso de agua antes de alcanzar el punto de ignición. En ge-

neral, los combustibles secos arden con mayor facilidad que aquellos en los que el grado de humedad es elevado.

Generalmente el comienzo del fuego se localiza en un pequeño círculo que se va alargando, dependiendo, en su evolución, de los factores señalados anteriormente. Las *partes* fundamentales que se observan inicialmente en un incendio (figura 2) son: un frente de progresión, dos flancos, un área donde se concentra la actividad y una retaguardia. A medida que aumenta la duración del incendio, el fuego puede dividirse en varios frentes de distinta intensidad y peligrosidad.

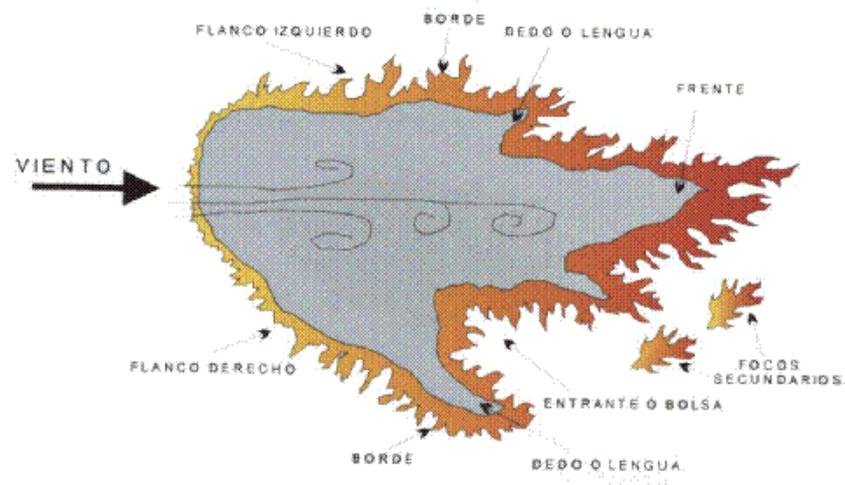


Figura 2. Partes de un incendio con un único frente (fase inicial)

La *forma del incendio* (figura 3) está estrechamente vinculada a las características topográficas, meteorológicas locales y de la cubierta vegetal, diferenciándose tres formas básicas:

- a) Circular: corresponde a terrenos llanos, con poco viento y combustibles homogéneos.

- b) Irregular: se produce sobre terrenos con pendiente, vientos irregulares y presencia de combustibles heterogéneos
- c) Elíptico: presenta características similares al anterior pero con un viento de dirección constante

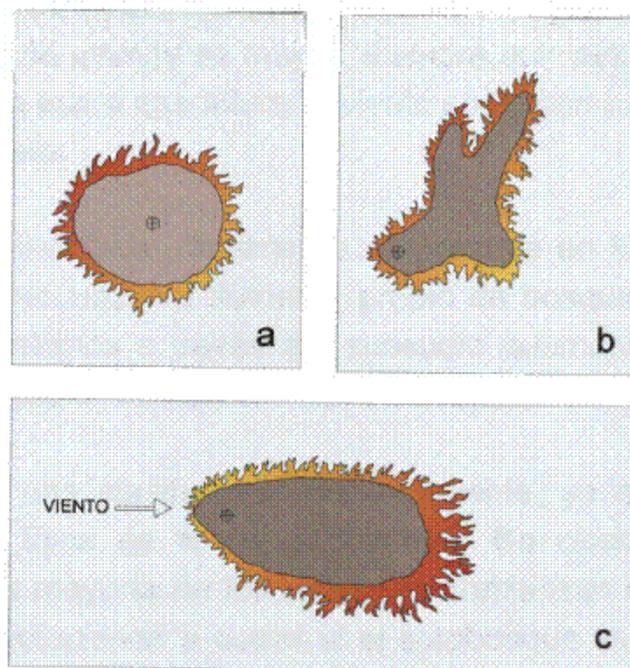


Figura 3. Formas características de los incendios forestales

Las complejas interacciones entre las variables que intervienen en el inicio y propagación del fuego determinan su importancia y tipología. Su conocimiento será básico tanto para prevenir la ocurrencia de estos sucesos como para actuar con celeridad una vez que se han producido.

En este sentido la clasificación de los incendios se establece a partir de dos tipologías: La primera, recogida por ICONA (1983), considera tres tipos diferentes según el piso o estrato vegetal a través del cual se propaga el fuego:

1.- *Incendio de superficie*: Es el más frecuente de todos y suele ser el origen de los demás tipos. El fuego avanza por la superficie del suelo, afectando a combustibles fácilmente inflamables como son los restos vegetales muertos, hojarasca, matorrales, etc., que están en la superficie.

2.- *Incendio de copas*. La transmisión se produce a través de las copas de los árboles. Suelen tener su origen en fuegos de superficie pero la velocidad de avance es mayor, siempre que exista combustible disponible, ya que a esa altura el viento sopla con mayor fuerza que a nivel del suelo.

3.- *Incendios de subsuelo*: Raramente se produce en España este tipo de fuego semiculto, sin llamas y propio de bosques caducifolios. El incendio avanza a través del subsuelo quemando raíces y materia orgánica secas, siendo difíciles de detectar.

Se trata de una clasificación no excluyente, ya que pueden darse diferentes tipos de forma simultánea. No obstante se ha constatado que la mayoría de los incendios comienzan como fuego de superficie y evolucionan a copas si el sotobosque es lo suficientemente denso como para ayudar a las llamas a alcanzar las copas de los árboles.

La segunda clasificación vigente (Vélez Muñoz, 1987) centra su atención en la superficie afectada y, según su extensión diferencia:

- *conatos*: superficie menor de 1 hectárea
- *incendios de pequeña extensión*: entre 1 y 5 hectáreas
- *incendios de mayor extensión*: entre 5 y 500 hectáreas
- *incendios de gran magnitud*: entre 500 y 1000 hectáreas
- *grandes incendios*: la superficie recorrida por el fuego es superior a 1000 hectáreas

Los dos primeros, de pequeñas dimensiones, suelen corresponder a fuegos de superficie, mientras que en un incendio de mayores proporciones el fuego de copas dificulta enormemente su control y extinción.

2. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE RIESGO Y PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

2.1. Introducción

En el inicio y propagación de los incendios forestales convergen una serie de factores atmosféricos, topográficos, biológicos y humanos, cuyas interacciones condicionan la complejidad que entraña su prevención. Las investigaciones desarrolladas en este sentido abordan su estudio desde una triple perspectiva:

- Obtención de índices de peligro y riesgo de incendios
- Trabajos relacionados con la predicción del comportamiento del fuego
- Valoración y cartografía del riesgo

Se trata de tres enfoques muy relacionados entre sí, y cuyo objetivo es prevenir un grave problema ambiental como es la pérdida de masa forestal como consecuencia de la acción destructiva de las llamas.

2.2. Propuestas metodológicas: Índices de peligro y riesgo

La diferencia entre los conceptos de riesgo y peligro de incendio que tan nítidamente se establece en la bibliografía norteamericana, apenas tiene incidencia en la europea. Salas Rey (1994) deja constancia de este hecho y define riesgo (*risk*) como la posibilidad de que se produzca un incendio forestal en un lugar y momento determinado, en función de unos agentes causantes. De ahí que le conceda especial importancia a las variables relacionadas con la incidencia histórica del fuego en un espacio concreto. Por su parte, el concepto de peligro (*hazard*) estaría determinado por las variables físicas que condicionan el inicio y posterior comportamiento del fuego siendo

indicativo de la facilidad de comenzar un fuego en una zona concreta y las dificultades para su extinción.

La predicción de peligro constituiría un enfoque dinámico basado fundamentalmente en información meteorológica que varía día a día, mientras que el riesgo lleva implícito un carácter más permanente con la presencia de condiciones particulares a lo largo de un periodo de tiempo más o menos extenso.

En cualquier caso, existe una tendencia a integrar ambos tipos de datos para obtener índices globales derivados de la consideración conjunta de factores meteorológicos, estado y propensión a arder de los combustibles forestales, frecuencia y causalidad de los incendios.

Entre la literatura norteamericana el índice de peligro de incendios más conocido es el denominado *National Fire-Danger Rating System (NFDRS)*, utilizado en EEUU desde 1972. Se compone de cuatro subíndices:

- a) *Man-Caused Fire Occurrence Index (MCOI)*: considera las condiciones meteorológicas, biológicas y la acción antrópica sobre un espacio concreto
- b) *Lightning-caused Occurrence Index (LOI)*: analiza los incendios debidos a causas naturales, en particular los producidos por rayos durante las tormentas
- c) *Burning index (BI)*: mediante el estudio de la cubierta vegetal, la topografía y las condiciones climáticas, básicamente el viento, proporciona una estimación sobre las características de las llamas y su propagación. Centra su atención en las labores de extinción.

- d) *Fire Load Index (FLI)*: es el resultado de la integración de los tres subíndices precedentes, y en una escala de 0 a 100 valora la dificultad de las labores de control y extinción del incendio. Los resultados son demasiado generales, ya que un valor próximo a 100 de FLI puede significar tanto una alta probabilidad de incendios como una dificultad importante para su control.

En Canadá, y desde los años setenta, se viene aplicando el *Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS)*: compuesto también por varios subíndices, cada uno de los cuales hace referencia a diversos aspectos que intervienen en el inicio y propagación del fuego. El primero, *Fire Weather Index System (FWI)*, como su propio nombre indica, considera los aspectos meteorológicos. El *Fire Behaviour Prediction System (FBO)* estudia el comportamiento previsible del fuego según la cubierta vegetal, topografía y condiciones meteorológicas. El tercer subíndice, que presta su atención a la ocurrencia histórica de incendios, es el *Fire Occurrence Prediction System (FOP)*, mientras que el *Accessory Fuel Moisture System (AFMS)* complementaría a los anteriores considerando datos puntuales como la estación del año en que se produce el incendio, la hora del día, latitud etc.

Desde finales de los años ochenta se utiliza en Francia un índice elaborado por Drouet y Sol (Sol, 1993), que contempla variables como la temperatura del aire, nubosidad, humedad relativa, velocidad del viento y reserva de agua en el suelo. Es un índice de cálculo diario. En la misma línea se sitúa el Índice de Reducción de la Evapotranspiración para el Peligro de Incendio (IREPI) italiano, también de marcado carácter meteorológico y que se obtiene a partir de una formulación basada en la evapotranspiración potencial y real diaria.

En Portugal, estudios recientes de Lourenço *et al.* (1997, 1998) presentan un índice de riesgo de incendio producto de la combinación de otros dos: por un lado, el Índice de Máximo Riesgo Diario de

inicio del incendio (resultado de la relación entre la temperatura máxima diaria del aire y su humedad relativa mínima) y por otro el Índice de Riesgo de Propagación del Incendio (donde hacen intervenir también la velocidad del viento). En función de los resultados se establece una gradación del riesgo de incendio para un lugar y momento concreto. Cabe señalar que este autor, pese a utilizar variables meteorológicas dinámicas propias de los índices de peligro, emplea el término "risco" (riesgo), poniendo de manifiesto una vez más la no diferenciación de ambos conceptos.

En España esta ambigüedad y la utilización indistinta de los términos de peligro y riesgo es manifiesta. Un ejemplo significativo es la definición de "peligro de incendio forestal" recogida por ICONA (1983), que lo describe como "la contingencia o posibilidad de que se produzca un incendio forestal en un lugar y momento determinados", añadiendo que "la predicción del peligro y de su intensidad se basará en el conocimiento del riesgo, de la situación meteorológica y de su evolución previsible".

En nuestro país, a partir de la consulta técnica *FAO/UNESCO* sobre incendios forestales en la Región Mediterránea, celebrada en 1977, se recomienda la unificación de los diversos sistemas nacionales en relación con la previsión del peligro, por lo que el organismo encargado, ICONA (1981, 1983), propuso la aplicación del denominado *Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales* (figura 4). Este índice quedaría integrado por dos componentes: 1) el "Grado Meteorológico de Peligro", deducible a partir de los factores meteorológicos que influyen en el estado de los combustibles, en su propensión a arder y en la propagación del fuego una vez comenzado el incendio, y 2) un "Índice de Riesgo Local", en cuya elaboración intervienen las variables espaciales, temporales, de frecuencia o causalidad y de inflamabilidad de los combustibles.

Para la obtención del primer componente, "*Grado Meteorológico de Peligro*", se establecen dos sistemas de evaluación, como re-

sultado de los estudios llevados a cabo a finales de los años setenta y principios de los ochenta por la sección de Incendios Forestales de ICONA y la Sección de Meteorología Agrícola del Instituto Nacional de Meteorología (1983): el "Índice sintético" y el "Índice analítico".

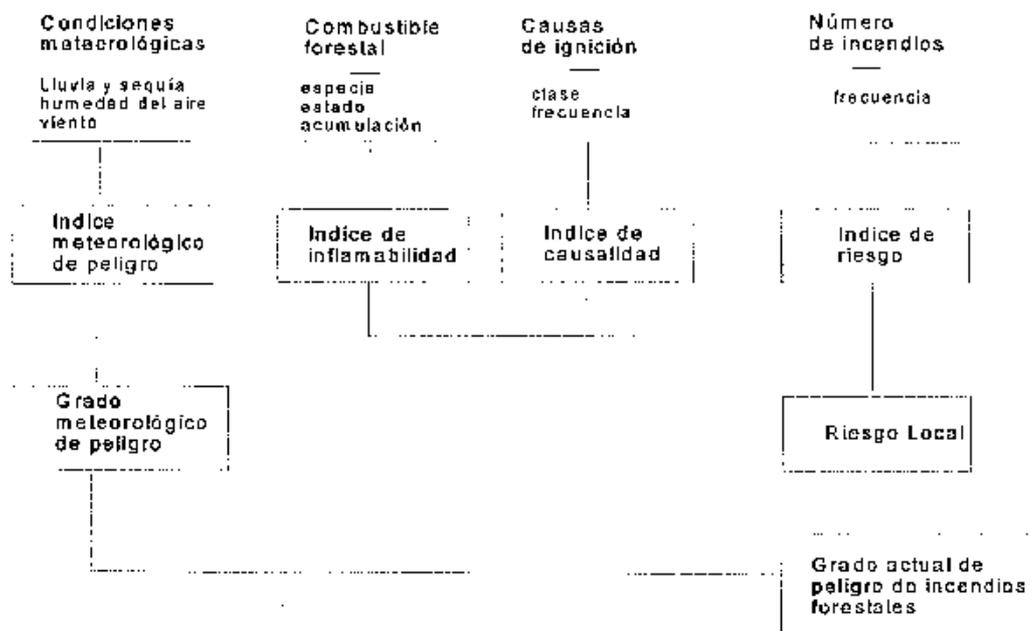


Figura 4. Esquema del Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales (ICONA, 1983)

El "Índice sintético de peligro" utilizado desde 1956 como una aproximación al modelo canadiense, incorpora a partir de 1968 dos nuevas variables potenciadoras del peligro: el efecto de las sequías prolongadas y de los vientos fuertes secos. Entre los parámetros de partida empleados en su cálculo figuran: la lluvia caída en las últimas veinticuatro horas, la duración de la sequía (número de días consecutivos anteriores en los cuales la lluvia ha sido inferior a 1,3 mm), la humedad relativa del aire y la velocidad y dirección del viento en el momento de la observación. Tiene validez teórica de 1 día.

Mediante una serie de tablas (anexo 1) se obtiene un valor único que corresponde a un grado de peligro determinado (tabla 1) siendo indicativo de la posibilidad de ignición y de las características de propagación.

Tabla 1. Grado de peligro de incendios forestales definidos por el Índice Sintético de Peligro.

Índice	Grado de peligro
0	Nulo
1-4	Bajo
5-8	Moderado
9-12	Alto
>13	Extremo

Fuente: ICONA, 1983

El segundo sistema de evaluación del "Grado Meteorológico de Peligro" es el "Índice Analítico". Se basa en un método australiano y considera, la posibilidad de que ardan los combustibles forestales, *subíndice de ignición*, e informa de las condiciones de avance del fuego una vez iniciado el incendio, *subíndice de propagación*. El primer subíndice relaciona el contenido de humedad del suelo y del combustible ligero que está en contacto con él, deduciendo la facilidad con que puede iniciarse el fuego. Utiliza los datos de las últimas veinticuatro horas registrados a las doce horas de cada día (hora solar), relativos a la temperatura máxima (en grados centígrados) y la lluvia caída (en milímetros). El procedimiento es el siguiente: registrar la temperatura máxima del aire y la lluvia caída. Restar a la lluvia caída la cantidad perdida por interceptación y evaporación para obtener la lluvia neta. Si el resultado es negativo se considera igual a cero. El paso siguiente es obtener el *índice de ignición reducido (IR)* restando la lluvia neta del índice de ignición del día anterior (*índice de ignición de ayer*). Extraer de una tabla diseñada a tal efecto (tabla 2) el *incremento de la sequía (ΔS)* a partir de la temperatura máxima y el índice de ignición reducido en la lluvia neta (*IR*).

Por último, integrar el incremento de la sequía (ΔS) y el valor (IR), para conocer el índice actual de ignición ($I = IR + S$).

Tabla 2. Cálculo del Incremento de la sequía (ΔS).

T ^a máxima °C	Índice de ignición de ayer reducido (IR = II - lluvia neta)															
	0 a 12	13 a 25	26 a 38	39 a 51	52 a 64	65 a 77	78 a 90	91 a 103	104 a 116	117 a 129	130 a 142	143 a 150	151 a 163	164 a 175	176 a 188	189 a 200
	Incremento de sequía (ΔS)															
42.....	8	8	7	7	6	6	5	5	5	5	3	2	1	1	0	0
40-41....	6	6	6	5	5	5	4	4	3	3	2	2	1	0	0	0
38-39....	6	5	5	4	4	4	3	3	3	2	2	2	1	0	0	0
36-37....	5	5	4	4	4	3	3	3	2	2	2	1	1	0	0	0
34-35....	4	4	4	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	0	0	0
32-33....	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	0	0	0	0
31.....	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0
30.....	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0
29.....	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
27-28....	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
25-26....	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
23-24....	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
21-22....	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19-20....	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19.....	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19.....	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: ICONA, 1983

Los resultados llevan asociado un grado de ignición determinado: *bajo* (0-25), ignición muy difícil; *moderado* (25-50), sólo arderá el combustible muerto y ligero; *alto* (50-100), las herbáceas anuales se secan completamente y pueden arder también; *muy alto* (100-125), la vegetación arbustiva se hace muy inflamable al descender rápidamente su contenido en humedad; y *extremo* (> 125) se produce un desarrollo de los fuegos de copas.

Por su parte, el *subíndice de propagación* informa sobre las condiciones de avance del fuego, una vez que ha comenzado. Contempla, para las últimas 24 horas los datos registrados a las 12:00 horas de cada día (hora solar) relativos a la lluvia caída, temperatura del aire y su humedad relativa y velocidad del viento. Utili-

zando una serie de ábacos circulares que conforman el denominado "Medidor de Propagación" (anexo 2) se obtienen los valores para la velocidad de avance del fuego, altura de las llamas y distancia a focos secundarios. Los datos se interpretan de acuerdo con la tabla 3, teniendo en cuenta que la escala de 0 a 100 significa que las dificultades del fuego crecen en la misma proporción que el índice de propagación.

La utilización simultánea de ambos sistemas durante las primeras décadas de los años ochenta puso de manifiesto que el método Analítico ofrece una información más detallada y práctica que el Sintético, además de haber sido adaptado mejor a las circunstancias españolas.

Tabla 3. Interpretación del subíndice de propagación

Cant. Combustible (t/ha)	Comportamiento del fuego	Índice de propagación													
		5	10	15	20	15	30	40	50	60	70	80	90	100	
5	V.a. (km/h).....	0,03	0,06	0,09	0,12	0,14	0,17	0,23	0,28	0,34	0,39	0,45	0,50	0,56	
	A.ll. (m).....	0,3	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	
	D (km).....	---	---	---	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	1,9	
10	V.a. (km/h).....	0,06	0,12	0,18	0,23	0,29	0,34	0,45	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00	1,11	
	A.ll. (m).....	1,0	2,0	3,0	4,0	5,5	5,5	7,0	8,5	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	
	D (km).....	---	---	0,2	0,4	0,8	0,8	1,2	1,7	2,1	2,5	3,0	3,4	3,8	
15	V.a. (km/h).....	0,09	0,18	0,26	0,35	0,43	0,51	0,68	0,85	1,02	1,08	1,35	1,52	1,68	
	A.ll. (m).....	2,5	3,5	5,0	7,0	8,0	9,5	12,0	14,0	----- FUEGO DE COPAS -----					
	D (km).....	0,1	0,2	0,6	0,9	1,2	1,5	2,2	2,8	3,4	4,1	4,8	5,4	6,0	
20	V.a. (km/h).....	0,12	0,24	0,36	0,48	0,60	0,72	0,96	1,20	1,44	1,68	1,82	2,16	2,39	
	A.ll. (m).....	2,5	5,0	7,0	9,0	11,0	13,0	----- FUEGO DE COPAS -----							
	D (km).....	0,1	0,5	0,9	1,3	1,7	2,2	3,0	3,8	4,7	5,6	6,4	7,2	8,1	
25	V.a. (km/h).....	0,14	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	
	A.ll. (m).....	3,0	7,0	10,0	12,0	14,0	----- FUEGO DE COPAS -----								
	D (km).....	0,1	0,6	1,1	1,6	2,1	2,6	3,6	4,6	5,6	6,6	7,6	8,6	9,6	

V.a.: Velocidad de avance del fuego

A.ll.: Altura de las llamas

D.: Distancia a la que se producen focos secundarios (sólo en fuegos de copas)

Fuente: ICONA, 1983

Mediante la combinación de la probabilidad de ignición (expresada en porcentajes) y la velocidad y carácter desecante del viento, y uti-

lizando una serie de tablas confeccionadas para tal fin, se determina el grado de alerta que presenta una masa forestal (tabla 4), diferenciando tres categorías según el tipo de peligro y las medidas a adoptar en cada caso.

Tabla 4. Situaciones de alerta para las masas forestales.

Categoría	Peligro	Medidas a adoptar
Prealerta	Bajo o moderado	Ninguna precaución especial
Alerta	Alto	Disponibilidad de todos los servicios
Alarma	Extremo	Intensificación de la vigilancia, medios de extinción dotados con el máximo potencial, podrá prohibirse el paso al monte

Fuente: ICONA, 1983

En general este índice de peligro, al igual que todos aquéllos basados en factores meteorológicos, tiene teóricamente validez de un día, por lo que su capacidad para estimar el peligro futuro dependerá en gran medida del rigor y ajuste de las previsiones meteorológicas.

El segundo componente del "Grado Actual de Peligro de Incendios" es el *Índice de Riesgo Local*. Aunque ha sufrido algunas modificaciones desde su formulación inicial, su esencia apenas ha variado y se deduce de las estadísticas de los incendios referidas a un lugar concreto, fruto de unas causas determinadas, y de unas condiciones previas de los combustibles forestales. Resulta de la combinación del riesgo espacial (*subíndice de frecuencia (Fi)*), la tipología de causas (*subíndice de causalidad (Ci)*) y las características del combustible (*subíndice de peligrosidad (Vi)*), y se calcula mediante la expresión $RL = Fi \times Ci \times Vi$. Se obtiene así un determinado grado de riesgo, proporcional a sus tres componentes, de forma que cada

uno de ellos tiene la misma implicación directa sobre el resto e idéntico peso relativo en la evaluación del riesgo local (ICONA, 1983).

- Subíndice de Frecuencia (F_i)

Constituye el componente espacial y temporal del índice, y se calcula utilizando los promedios del número de incendios en una zona determinada, siendo su expresión matemática: $F_i = (1/a) \sum n_i$ donde n_i es el número de incendios de cada año y a el número de años. Los resultados oscilan entre 1, frecuencia muy baja, y 10, extrema (tabla 5)

Tabla 5. Valores del subíndice de Frecuencia (F_i).

Valores de F_i	Categoría
< 1	Muy Bajo
1-2	Bajo
3-4	Moderado
5-6	Alto
7-10	Grave
> 10	Extremo

Fuente: ICONA, 1983

- Subíndice de Causalidad (C_i)

Señala la tipología más frecuente de causas de incendios forestales. Se calcula mediante la expresión: $C_i = (1/a) \times (\sum (1/n_i) \times (\sum \{c \times n_{ic}\}))$ donde: c es el coeficiente de peligrosidad de cada causa; n_{ic} el número de incendios por cada causa en cada año; n_i número de total de incendios en cada año y a el número de años.

El coeficiente de peligrosidad de las causas (c) considera la eficacia de una causa en la producción de incendios, suponiendo el monte en condiciones iguales para todas ellas. Los valores de este coeficiente están tabulados según el tipo de causa que motiva el incendio (tabla 6).

Tabla 6. Índice de peligrosidad asignado a diferentes causas de incendios forestales (c).

Tipo de Causa	Valores de c
Intencionado	10
Negligencia	5
Desconocida	5
Accidente	1
Rayo	1

Fuente ICONA, 1983

Los resultados de C_i , pueden situarse entre 7 y 10, tabla 7, lo que implica una peligrosidad grave, síntoma de que la mayor parte de los incendios son intencionados; entre 5 y 6 se considera alto y significa negligencias muy frecuentes combinadas con actividad incendiaria no muy intensa.

Tabla 7. Valores del subíndice de causalidad (C_i).

C_i	Valoración
7-10	Grave
5-6	Alto
3-4	Moderado
0-2	Bajo

Fuente ICONA, 1983

Por último, los valores moderados o bajos (< 5) indican que sólo se producen incendios por causas naturales, de forma accidental o por negligencias poco probables.

- Subíndice de peligrosidad derivada del combustible forestal (V_i)

En los primeros años de utilización de este parámetro se denominaba índice de inflamabilidad del combustible y consistía en la aplicación de un coeficiente de inflamabilidad preestablecido para cada formación vegetal en función de la especie predominante obtenida a partir de la información del Inventario Forestal Nacional o bien del

Mapa de Cultivos, E:1/50.000, de la Dirección General de Producción Agraria, donde la superficie forestal se clasificaba por especies.

Actualmente este subíndice se estima según la superficie ocupada por cada modelo combustible, en función de la clasificación utilizada por el *U.S. Forest Service* para catalogar el comportamiento de los incendios de superficie, según una serie de combustibles-tipo definidos por Rothermel (1972, 1983, 1991, 1994). Con ellos dota al programa BEHAVE (Andrews, 1986; Rothermel *et al.*, 1986) para reproducir el avance del fuego sobre formaciones vegetales cambiantes. Esta tipología es adaptada a España por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza (antiguo ICONA-INIA) y se incorpora al programa CARDIN (Martínez-Millán, 1990; Saura *et al.*, 1999) sucesor español del BEHAVE, para el estudio de los incendios de superficie.

La clasificación de Rothermel (1983) se basa en la predicción del comportamiento según las formaciones vegetales afectadas y en una serie de características "tipo" que condicionan el inicio y posterior desarrollo del incendio. Se compone de trece modelos distribuidos en cuatro grupos:

Grupo de Pastizales, en el que se diferencian tres modelos de comportamiento del incendio:

Modelo 1: Los combustibles herbáceos finos secos o casi secos cubren completamente el suelo y son los que gobiernan la propagación del fuego. Es característico de las praderas naturales y zonas ocupadas por herbáceas anuales y rastrojos. También pueden aparecer algunas plantas leñosas dispersas ocupando menos de un tercio de la superficie. La cantidad de combustible (materia seca) se sitúa entre 1 y 2 t/ha.

Modelo 2: Son fuegos de superficie que afectan a material herbáceo fino y seco junto a la hojarasca, ramas muertas y otros restos

procedentes tanto de un matorral disperso como de un arbolado de pino u otras especies que cubren entre uno y dos tercios de la superficie. La cantidad de combustible oscila entre 5 y 10 t/ha.

Modelo 3: Son los fuegos de mayor intensidad y que más rápido se propagan dentro del primer grupo. La altura media del pasto se sitúa en torno a 1 metro. Un ejemplo representativo lo constituyen los campos de cereales. Es el modelo típico de las sabanas y de las zonas pantanosas con clima templado-cálido. La materia seca disponible es de 4 a 6 t/ha.

Grupo de matorrales, se incluyen aquí los modelos 4, 5, 6 y 7.

Modelo 4: Afecta a zonas con formaciones casi continuas de matorral maduro de unos 2 metros de altura, o bien repoblados jóvenes densos, donde el fuego se propaga por las copas muy próximas unas a otras consumiendo rápidamente el material leñoso vivo y muerto. La cantidad de combustible es de 25 a 35 t/ha.

Modelo 5: Las cargas de combustible son ligeras y están constituidas por hojarasca esparcida por el matorral, que pese a no ser alto (inferior a 1 metro) cubre prácticamente la totalidad del área, pasto y otras herbáceas que constituyen el sotobosque (entre 5 y 8 t/ha). Son fuegos poco intensos debido a que hay poco material muerto disponible.

Modelo 6: Abarca un amplio rango de condiciones de matorral, cuyas edades son superiores a las del modelo 4, aunque no tan alto como aquél, e incluye también los restos de poda de frondosas que se hayan secado. El combustible, de 10 a 15 t/ha, es más inflamable que en el modelo 5 y el fuego se propaga a media llama siempre que los vientos sean moderados, con velocidades por encima de los 13 km/h.

Modelo 7: La altura media del matorral se sitúa entre 0,5 y 2 metros, apareciendo éste combinado con áreas de coníferas y sotobosque de palmáceas y/o especies inflamables. El fuego se propaga a través de la superficie del suelo y del estrato del matorral con igual facilidad, avanzando rápidamente tanto a consta de materiales muertos, con mayor contenido en humedad que en los modelos anteriores, como de materiales vivos, que son de naturaleza inflamable. La cantidad de combustible se sitúa entre 10 y 15 t/ha.

Grupo de bosques, denominado por algunos autores "grupo de arbolado u hojarasca bajo arbolado."

Modelo 8: Generalmente se trata de fuegos de superficie donde la altura de las llamas es pequeña, aunque por acumulaciones locales de materiales pueden producirse llamaradas. Suelen corresponder a bosques cerrados de coníferas que presentan una capa compacta de hojarasca, formada principalmente por hojas y algunas ramillas, a través de la cual se propaga el incendio. El bosque denso de pino silvestre o hayas con disponibilidades entre 10 y 12 t/ha de combustible son ejemplos representativos.

Modelo 9: Parecido al modelo 8 pero con hojarasca menos compacta formada por acículas largas y rígidas o follaje de frondosas de hojas grandes (materia seca: 7-9 t/ha). El fuego avanza por la hojarasca superficial a mayor velocidad que en el modelo anterior y con una longitud de las llamas superior a aquél. Son ejemplos típicos las formaciones de pinos pinaster, castaños o roble melojo.

Modelo 10: Los combustibles muertos caídos incluyen más cantidad de ramas, con diámetros por encima de los 7,5 cm, resultantes de acciones naturales (vientos, rayos, etc.), de afecciones de enfermedades o restos de tareas de limpieza del monte que no han sido aún retirados. El resultado es un incremento en el volumen de combustible disponible para arder, entre 30 y 35 t/ha. Son incendios de mayor intensidad que los anteriores, donde el fuego se transmite

a copas, aparecen focos secundarios y se produce la inflamación esporádica de árboles individuales (coronamiento) que ocasiona dificultades para su control.

Grupo de desechos o restos: Incluye tres modelos

Modelo 11: Contempla combustibles herbáceos en fase de rebrote, mezclados con materiales procedentes de talas o aclareos del monte en bosques de coníferas (carga de material entre 25 y 30 t/ha). El incendio es bastante activo aunque el espaciado del combustible, su edad y la sombra de las copas puede contribuir a limitar su intensidad.

Modelo 12: Los restos de podas o aclareos cubren prácticamente todo el suelo y dominan sobre el arbolado. La cantidad de materia seca oscila entre 50 y 80 t/ha, constituyendo los desechos el combustible dominante. El fuego se propaga con rapidez y de forma continua hasta que se produzca un cambio en el combustible o encuentre un cortafuego que retarde o detenga su avance.

Modelo 13: La práctica de talas rasas y cortas parciales intensas en masas forestales maduras cuando la carga de desechos está dominada por material de diámetro superior a 7,5 cm, constituyen la fuente de alimentación de este modelo. Grandes acumulaciones de restos gruesos y pesados, entre 100 y 150 t/ha, cubren todo el suelo. El incendio se propaga rápidamente a través de los combustibles finos, disminuyendo su velocidad al comenzar a arder los gruesos. No obstante, la velocidad de avance del frente es importante, pudiendo generarse con facilidad focos secundarios siempre que las condiciones meteorológicas sean desfavorables.

A partir de estos modelos se asigna a cada tipo de combustible un coeficiente de peligrosidad que corresponde al parámetro "V", (tabla 8). Tiene un rango de variación entre 1, peligrosidad baja, y 10 extrema, y se calcula mediante la fórmula $V_i = (1/S) \sum V \times S_m$,

donde S es la superficie total, V la peligrosidad de cada modelo combustible y S_m la superficie ocupada por cada modelo de combustible.

Tabla 8. Coeficiente de peligrosidad (V) de los modelos combustibles

Modelo de combustible	Peligrosidad (V)
Grupo pastizales (1, 2, 3)	10
Grupo matorrales (4, 5, 6, 7)	10
Grupo arbolado (8, 9, 10)	5
Grupo restos (11, 12, 13)	1

Fuente: ICONA, 1983

La unidad de referencia empleada para obtener estos tres subíndices, y por tanto el *Índice de Riesgo Local (RL)*, es una cuadrícula de 10 x 10 kilómetros procedente del Mapa Topográfico Nacional escala 1:200.000. El *Grado de Riesgo* (tabla 9) es determinante a la hora de establecer las prioridades de defensa y la dotación de infraestructuras de vigilancia, detección y combate de los incendios forestales.

Tabla 9. Clasificación del Índice de Riesgo Local de Incendios (RL).

Índice de Riesgo	Grado de riesgo
> 300	Grave
100 – 300	Alto
25 – 100	Moderado
< 25	Bajo

Fuente: ICONA, 1983

El "*Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales*", viene dado por la combinación del Grado Meteorológico de Peligro y el Índice de Riesgo Local. No obstante la forma de integrar estos dos elementos no ha llegado a concretarse definitivamente.

Actualmente, y para el espacio concreto de la Región de Murcia, el Grado Meteorológico de Peligro no está operativo, y sólo se aplica el Índice de Riesgo Local. Los Planes de Protección y Lucha contra Incendios Forestales elaborados anualmente, (Plan INFO, 1988, 1989 y 1990 y Plan INFOMUR, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997) utilizan este parámetro (*RL*) para la zonificación del riesgo en el territorio. A partir de las cuadrículas de 100 kilómetros cuadrados se establece el riesgo por términos municipales incluyendo de forma específica los espacios naturales y algunas sierras de especial interés en el contexto regional.

Pese a todo, el índice de Riesgo Local de Incendios presenta una serie de limitaciones como son la escala de trabajo (el tamaño de las cuadrículas hace que sean poco operativas para estudios de detalle), la no integración de variables meteorológicas, que juegan un papel determinante, así como el hecho de no contemplar la topografía (altitudes, pendientes, orientaciones,...) en la ocurrencia de estos sucesos. Para llevar a cabo un estudio riguroso del riesgo en un espacio concreto es necesario tener en cuenta estas variables, y así obtener una mejor aproximación a las condiciones particulares del área.

Para luchar contra los incendios forestales, la Región de Murcia cuenta también con información acerca del peligro potencial que afecta al territorio, en función de los resultados del llamado *Índice Meteorológico de Peligrosidad de los Incendios Forestales*.

Este índice fue desarrollado en 1994 por el Grupo de Previsión del Centro Meteorológico Territorial de Valencia en colaboración con la Conselleria de Medio Ambiente y el Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (C.E.A.M.) Su objetivo era convertirse en una herramienta de apoyo al Plan de Prevención y Extinción de Incendios Forestales en la Comunidad Valenciana (PREVIFOC) (Medialvilla *et al.*, 1994). Actualmente se aplica, con las oportunas correcciones, tanto a esta comunidad como a la murciana, que recibe dia-

riamente las previsiones en el Centro Meteorológico Territorial de Guadalupe (Murcia).

Al estudiar los incendios valencianos se observó la enorme influencia ejercida por el predominio de vientos del NW o SW (situación terral) frente a los días con predominio de circulación marítima (SE) o de brisas. Bajo una circulación terral, los vientos persistentes y de intensidad apreciable desecan la vegetación dando lugar a situaciones potencialmente peligrosas. Partiendo de la división en zonas del territorio, establecidas en función de un criterio de homogeneidad meteorológica (principalmente régimen de vientos e influencia marítima) se estima el valor del índice de forma diferenciada según el tipo de circulación dominante.

Para situaciones terrales:

$$I = (3 + (0,1 \times T) - (0,1 \times H) + (0,15 \times G) + W) / 0,15$$

mientras que en situaciones no terrales la peligrosidad vendría dada por los resultados de la expresión

$$I = (3,9 + (0,1 \times T) - (0,1 \times H) + (0,07 \times G) + W) / 0,15$$

donde T es la temperatura máxima en °C, H la humedad relativa mínima (%), G las rachas máximas de viento (km/h) y W una variable que depende del día y del mes para el que se esté realizando la previsión.

Por último los resultados se ajustan en función de la reserva de agua que tiene el suelo y de un coeficiente de corrección, dependiente de la orografía dominante, según la zona para la que se realiza la estimación.

Desde 1994, año en que se utilizó por primera vez, este índice de peligrosidad ha ido sufriendo adaptaciones con el fin de aproxi-

mar, en la medida de lo posible, sus resultados a las situaciones reales. Su objetivo es que sirva de ayuda a la toma de decisiones, por parte de los organismos implicados, para una adecuada gestión de los medios de prevención y lucha contra el fuego, posibilitando una rápida actuación allí donde la situación lo requiera. La propuesta está fundamentada en variables meteorológicas que deben ser previstas con antelación y dentro de unos límites temporales aceptables, quedando la bondad del índice ligada al grado de acierto de aquéllas.

La necesidad de contar con un número representativo de estaciones meteorológicas con registros de vientos hace que sea inviable su aplicación a la zona objeto de este trabajo. Además, la continua actualización y ajustes que se están llevando a cabo en la formulación del índice aconsejan demorar unos años su aplicación a espacios concretos del territorio.

2.3. Trabajos relacionados con la predicción del comportamiento del fuego

La predicción del comportamiento del fuego resulta de gran interés en el ámbito de la planificación, ya que permite la zonación del territorio en función del riesgo, evaluando distintas estrategias de combate, al tiempo que ofrece la oportunidad de decidir, en el mismo momento en que se está produciendo el incendio, la distribución óptima de los efectivos de control.

El modelo más conocido y también el más utilizado en los últimos años es el paquete informático creado en los años ochenta por la Unidad de Investigación sobre el Comportamiento del Fuego del *Intermountain Fire Sciences Laboratory*, Missoula, (Montana, USA). Este software denominado BEHAVE, ha servido de base para otras propuestas más complejas, entre las que destacan el programa CARDIN (Martínez-Millán *et al*, 1991, 1997, 1998) desarrollado en la

Escuela Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, por encargo del Area de Defensa contra Incendios del ICONA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España).

Las últimas tendencias en la predicción del comportamiento del fuego se centran en el desarrollo y aplicación de software específicos para la simulación de incendios tratando de establecer las líneas de combate más eficaces. Una característica común a todos ellos es la utilización de los Sistemas de Información Geográfica y los datos procedentes de sensores remotos. El auge experimentado en los últimos años en las técnicas de obtención y procesamiento de imágenes de satélite ha dado lugar al nacimiento de empresas dedicadas exclusivamente a la comercialización de estos productos, cuya adquisición resulta aún muy costosa para pequeñas organizaciones o grupos de trabajo.

Entre la variada oferta que existe actualmente en el mercado Terracarta, empresa privada de Portugal, desarrolla un proyecto para una superficie de 40.000 hectáreas, ubicada en la Sierra de Lousã e integrada por los municipios de Pedrogão Grande, Figueiródos-Vinhos y Castanheira de Pena. Dispone de una metodología propia de construcción de modelos de riesgo de incendio, basada en métodos numéricos específicos para SIG, contruidos desde una triple perspectiva: ignición, propagación y combate. Los datos empleados proceden de levantamientos aerofotogramétricos, imágenes de satélite, restitución de carreteras, caminos forestales, puntos de agua útiles, elaboración de los modelos combustibles de la zona y cálculo de sus respectivas combustibilidades, análisis topográfico y de las condiciones meteorológicas dominantes, e inventario de los medios disponibles para el combate del fuego.

En la misma línea de la lucha contra el fuego destaca el Sistema KITAL de Prognosis y Gestión en Control de incendios forestales, desarrollado entre 1993 y 1996 por el Proyecto FONDEF FI-13

(Consortio Interinstitucional formado por el Departamento de Manejo de Recursos Forestales de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad de Chile, el Centro de Estudios Espaciales, el Instituto de Investigaciones Tecnológicas y el Instituto Forestal de Chile) con la financiación del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico de este país.

El software maneja una base de datos que contiene información referida a la topografía, hidrografía, vegetación, clima, vías de comunicación, entidades de población y un historial sobre incendios forestales que permiten el apoyo a programas de gestión del territorio. Está compuesto por diversos módulos interconectados: i) *módulo de cálculo del índice de riesgo*, que permite obtener para cualquier hora del día una estimación del grado de peligro para la zona de operaciones; ii) *simulador de expansión de incendios*, que hace posible disponer, al instante, del modelo de propagación que adoptará el incendio en el período de tiempo indicado por el operador, además de cuantificar las pérdidas potenciales del incendio; iii) *módulo de comando operacional*, utilizado, entre otros motivos, para distribuir unidades de combate sobre el territorio e informar permanentemente sobre el estado y ubicación de los recursos de lucha contra el fuego; iv) *módulo estadístico*, que dispone de una amplia base de datos con salidas gráficas y cartográficas; v) *módulo de planificación estratégica*, diseñado para servir de apoyo a la toma de decisiones mediante la simulación de soluciones alternativas. .

El Servicio Forestal Canadiense (www.nrcan.gc.ca), organismo a la vanguardia mundial en el desarrollo de sistemas de información para el combate de incendios, ha puesto en funcionamiento después de más de veinticinco años de investigación, el Sistema Espacial de Manejo de Incendios (SEMI), instrumento de análisis multidimensional diseñado para ayudar a la toma de decisiones tácticas, servir de apoyo al ataque inicial, a la planificación logística y táctica de las operaciones de acción sostenida cuando sea necesario, gestionar los ecosistemas incluyendo el papel ecológico del fuego, planificar el

uso de la tierra, prever la posible evolución de un suceso y, en definitiva, contribuir a las tareas ejecutivas, estratégicas, de gestión y operativas de la lucha contra los incendios forestales.

El SEMI incluye una implementación completa del Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendio Forestal (SCEPIF), del que utiliza dos subsistemas: por un lado, el Índice Meteorológico de Peligro (IMP), para evaluar el potencial relativo de incendio, basado en observaciones meteorológicas, y conocer los efectos del combustible húmedo y del viento en la probabilidad de ignición y el desarrollo del fuego. Por otro, el Sistema de Previsión del Comportamiento de los Incendios Forestales (PCI), que permite predecir medidas cuantitativas del desarrollo posible del incendio, incluyendo el índice de propagación, consumo de combustibles e intensidad del incendio

El sistema, cuyos fundamentos provienen de setenta y cinco años de estudio del fuego por el Servicio Forestal Canadiense, hace uso del historial de incendios, características meteorológicas y datos relativos al aparato eléctrico de las tormentas en tiempo real para predecir la frecuencia de incendios, naturales o provocados por el hombre, además de contar con herramientas para describir y predecir la dispersión de humo y otras emanaciones a la atmósfera.

El modelo desarrollado por investigadores españoles, CARDIN, cuenta con un módulo de digitalización propio, aunque presenta la ventaja de poder integrar los datos espaciales almacenados en los formatos SIG más extendidos (Idrisi, Arc/Info o Erdas). Por otra parte, aunque hereda los trece modelos combustibles del sistema BEHAVE, en la actualidad se trabaja en la posibilidad de incluir otros, definidos por el propio usuario, que puedan sustituir o completar a los anteriores (Saura y Martínez-Millán, 1999).

Entre las posibilidades de CARDIN destaca la simulación, no sólo de la propagación del fuego sino también de las acciones desti-

nadas a combatirlo. A partir de una base de datos implementada con los elementos de combate e infraestructuras disponibles, se pueden simular las medidas de control que afectarán al desarrollo del incendio, en tiempo real, es decir, de forma simultánea a la propagación del fuego, o bien, de forma "instantánea", sin considerar el tiempo invertido en llevarlas a cabo.

Tanto CARDIN como BEHAVE son programas de simulación para incendios de superficie, cuyo comportamiento es sensiblemente distinto a los de copas, por lo que en ocasiones se ha puesto en duda la validez de su aplicación a grandes incendios. No obstante, la Comunidad Autónoma de Andalucía ha incorporado el programa español a sus campañas de lucha contra incendios. Según los responsables de su desarrollo, los resultados obtenidos en 1997 y 1998 son muy prometedores, al tiempo que la difusión entre un mayor número de usuarios permite realizar continuas mejoras en el sistema.

La Comunidad Autónoma de Murcia dispone de ambos programas, BEHAVE y CARDIN, aunque su utilización es prácticamente nula.

La tendencia más reciente de los organismos oficiales españoles dedicados al estudio y combate de los incendios forestales se orienta hacia la utilización de otro software americano, FARSITE, como prueba el hecho de incentivar al personal técnico de las comunidades autónomas para realizar cursos de aprendizaje. El último de ellos tuvo lugar en 1998 en Cataluña, donde se dio a conocer su manejo y fundamentos básicos.

FARSITE (*Fire Area Simulation*), es un simulador gráfico de la propagación y avance del fuego, desarrollado por el Dr. Mark A. Finney (1994, 1997, 1998) y utilizado, desde 1996, por el *USDI National Park Service, USDA Forest Service*, para analizar el comportamiento de los incendios (Finney & Ryan, 1995). Se planteó inicial-

mente para el análisis de fuegos naturales, incluyendo las fases de gestión y planeamiento de las tierras quemadas. Desde sus comienzos, a principios de los años 70, hasta 1990 no fue utilizado de forma práctica debido a problemas técnicos, limitaciones derivadas de la potencia de los ordenadores y ausencia de bases de datos sobre las que trabajar. En 1994 se completa la primera versión Beta del programa distribuyéndose el FARSITE V-1.0 en 1995. La investigación y mejora continua dio sus frutos con la Versión 2.0 distribuida en 1996. Actualmente se trabaja con FARSITE V-3.0 puesta a punto en 1997.

Fire Area Simulation V-3.0 es un modelo para simular espacial y temporalmente, bajo condiciones meteorológicas, topográficas y de vegetación heterogéneas, el avance y desarrollo de los incendios. Estas variables se organizan mediante un Sistema de Información Geográfica en formato *raster* (GRASS ASCII o ARC/GRID ASCII) de forma que todos los ficheros estén referidos al mismo territorio y posean idéntico tamaño y resolución. A partir de esta información, FARSITE es capaz de simular el comportamiento más previsible del fuego y su propagación, permitiendo realizar ensayos de riesgo tanto para fuegos reales como sobre incendios potenciales.

Otras propuestas predictivas destacan la importancia de conocer anticipadamente el riesgo de incendio futuro, ya que constituye la forma más eficaz para minimizar sus posibles efectos, adoptando las medidas oportunas. Lourenço (1994a, 1994b, 1997) formula para los concejos, división administrativa, de Portugal, la *Tendencia del índice de riesgo de incendios forestales para el día siguiente*, haciendo intervenir en su formulación variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) para un día concreto y la predicción para el día o días siguientes, incluyendo un factor de corrección R, obtenido a partir de la incidencia histórica del fuego en cada concejo. Según los resultados del índice propone una gradación del riesgo, reducido, moderado, elevado, muy elevado y máximo, y los medios de control necesarios en cada caso.

En predicción del comportamiento del fuego se combina el análisis de casos reales y simulaciones en escenarios alternativos, ensayos de laboratorio y formulaciones matemáticas. En esta línea se sitúa el trabajo de Dimopoulou y Giannikos (1998) para el área de Parnitha, cerca de Atenas, basado en la combinación de tres elementos: implementación de un SIG que contempla la información geográfica de la zona, un módulo de programación matemática, que determina el despliegue y ruta óptima de los medios de ataque del fuego dentro de un periodo de tiempo prefijado desde del comienzo del incendio, y un módulo de simulación, diseñado para experimentar con escenarios alternativos.

2.4. Valoración y cartografía del riesgo: nuevas tendencias.

Un gran número de publicaciones relacionadas con los incendios forestales se centran en analizar las consecuencias de estos sucesos, una vez que se han producido, cartografiando las zonas afectadas y realizando una valoración de los daños. Algunos ejemplos son los trabajos de Viedma *et al.*, (1994) sobre la superficie quemada en Hoya de Buñol (Valencia) en 1991, el suceso ocurrido ese mismo año en el Valle de Tiétar en Ávila o el interesante análisis y valoración de los graves efectos ambientales ocasionados por los grandes incendios que afectaron a diversas zonas del territorio peninsular durante el verano de 1994, realizado por Martínez Ruiz (1991, 1996). Este estudio a posteriori es importante, y en ocasiones constituye la única documentación válida que tienen los afectados para solicitar indemnizaciones, como sucede en el caso de las avenidas e inundaciones provocadas por el desbordamiento de cauces fluviales.

Sin embargo, la prevención del riesgo debe orientarse a conocer de forma anticipada estas posibles consecuencias y poner en práctica las medidas oportunas para evitar que se produzcan estos

sucesos, y en caso de que tengan lugar, minimizar sus efectos negativos.

En esta línea, los parámetros considerados en el desarrollo de modelos de riesgo han ido evolucionando a lo largo del tiempo. En principio se consideraban únicamente factores físicos (cubierta vegetal y condiciones meteorológicas, básicamente) como determinantes de la ocurrencia de un incendio. A partir de los años sesenta (Chandler, 1961) comienzan a tenerse en cuenta también otros aspectos como la incidencia histórica del fuego o el desarrollo de actividades que incrementan la posibilidad de producirse un incendio.

Las últimas tendencias en la valoración y cartografía del riesgo utilizan las posibilidades que ofrecen la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica. La primera constituye una herramienta esencial en el estudio de la cubierta vegetal mientras que los SIG, ofrecen la posibilidad de integrar espacialmente la morfología del territorio (altitudes, pendientes, orientaciones) y su cobertura vegetal (Pons Fernández, 1993), al tiempo que permiten contemplar otras variables asociadas al riesgo, como son las características meteorológicas de la zona (García Díez *et al.*, 1991, 1993, 1996; Rivas *et al.*, 1996) y la actividad humana.

En 1989 Chuvieco y Congalton llevan a cabo un estudio pionero en este campo. Mediante la conexión de la teledetección y los SIG desarrollan un modelo de riesgo de incendio sobre una zona del litoral castellonense español. Basándose en éste modelo, aunque introduciendo algunas modificaciones para adaptarlo a las condiciones del área de estudio, Almeida (1994) aplica técnicas de cartografía digital para definir áreas de riesgo de incendios en Vila Nova de Poiares, una región del centro de Portugal, y establece, a partir de los resultados obtenidos, una serie de medidas preventivas para optimizar las infraestructuras disponibles en la lucha contra el fuego. En la misma línea se sitúa los trabajos de Castro Ríos (1994), que propone para un sector de Valparaíso, Chile, un índice de probabili-

dad de ocurrencia de incendios forestales basado en la información espacial y estadística contenida en un SIG y los datos de los sensores Thematic Mapper y Hute Resolution Visible, de los satélites Landsat y Spot respectivamente, y Larraz (1996), que integra en un SIG, confeccionado para la sierra de Gorbea, entre Alava y Vizcaya, las variables que intervienen en el inicio y propagación de los incendios forestales, representando gráficamente un índice de riesgo de incendios a partir de la información digital y de imágenes de satélite.

Destacan también trabajos como los de Chuvieco y Martín (1994) o Alonso Mantrana *et al.* (1995, 1996), que analizan las posibilidades de la teledetección espacial en apoyo a los sistemas de predicción del peligro de incendios. Su interés radica en la posibilidad que ofrece la información proporcionada por los satélites para obtener, mediante diversos métodos de clasificación, mapas de modelos combustibles del territorio, que ayuden a prevenir el riesgo (Burgan, 1996; Ceccato *et al.*, 1995; Chuvieco, 1994, 1997, 1999; Salas y Chuvieco 1992, 1994a, 1994b, 1995).

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica y el impulso de las nuevas técnicas de captación de imágenes de satélite ha significado también el nacimiento y desarrollo de grupos de trabajo internacionales dedicados a la investigación de los problemas medioambientales, entre los que se encuentran los incendios forestales. Muchos de ellos están financiados con subvenciones de carácter regional, estatal o internacional, así como por los ingresos derivados de la celebración de cursos y seminarios y de la venta de los productos que elaboran. Entre los numerosos Grupos, Centros y Programas que abordan esta problemática en el mundo destacan:

- *Space Applications Institute, SAI*

Situado en Ispra, Italia, forma parte de la Dirección General del *Join Research Centre of the European Commission* y está integrado por un equipo multidisciplinar de más de 230 investigadores pertene-

cientes a la Unión Europea. Su misión principal es el estudio y promoción de políticas adecuadas para la gestión de recursos que permita un desarrollo sostenible.

Se organiza en unidades, cada una de las cuales centra su atención en una línea de investigación, entre las que destaca *ARIS, Agriculture and Regional Information Systems*, dedicada específicamente a temas relacionados con la agricultura, medio ambiente, información espacial y riesgos naturales. En relación con estos últimos, ocupa un lugar destacado el estudio de los incendios forestales.

- *Forest Fire Special Interest Group, FF-SIG*

Forma parte del *European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSEL)*, integrado por diversos centros de investigación europeos entre los que figura el Laboratorio de Teledetección ubicado en la Universidad de Alcalá de Henares (España), que han sido pioneros en la utilización de sensores remotos para el estudio de los incendios forestales, y que en la actualidad disponen de un servicio de venta de imágenes de satélite.

- *Major Hazards Agreement, EUR-OPA*

Dedicado al desarrollo de técnicas de observación espacial para la detección y gestión de riesgos a escala global, participan investigadores de numerosos países entre los que destacan España, Francia, Italia, Austria, Alemania, Suiza, Rusia, Argelia y Marruecos.

- *Cemagref: Agricultural and environmental engineering research*

Cemagref es un Instituto público de investigación para el desarrollo de la agricultura y medio ambiente francés que trabaja en coordinación con numerosos países europeos, entre ellos España, en el desarrollo de estudios destinados a mejorar la gestión de los recursos

naturales. Cuenta con un laboratorio de Teledetección, ubicado en Montpellier, donde se analiza la información procedente de sensores remotos y sus aplicaciones en la lucha contra los incendios forestales.

- *Integrated Global Observing Strategy, IGOS*

Creado por iniciativa del *Committee on Earth Observation Satellites (CEOS)* y el *International Group of Funding Agencies (IGFA)* para el estudio del cambio climático, tiene como una de sus líneas de investigación la revisión de la documentación existente sobre incendios forestales y prácticas para la gestión y análisis de las zonas afectadas por el fuego.

- *International Geosphere-Biosphere Program (Data and Information System Office), IGBP-DIS*

Aborda el estudio de los incendios forestales mediante la utilización de imágenes de satélite. Entre sus más recientes trabajos destaca la publicación de un CD-ROM titulado "Regional Satellite Fire Data Complitation" que incluye información global sobre Africa, America del Norte y del Sur, Europa y Australia.

- *Forest Monitoring in Europe with Remote Sensing, FMERS*

Fundado en octubre de 1998, su objetivo es contribuir con el programa del Instituto Forestal Europeo (EFI) en la introducción de nuevas tecnologías para analizar el estado de los bosques en países como Finlandia, Suecia y Portugal.

- *Center of Spatial Technologies and Remote Sensing, CSTARS*

Dependiente de los Estados Unidos está implicado en el desarrollo de tres proyectos: El primero *Mapping the distribution of wildfire Fuels Using AVIRIS in the Santa Monica Mountains*, estudia los

efectos destructivos del fuego sobre el territorio. El avance en la monitorización del fuego mediante imágenes de satélite se analiza en el proyecto *SCAR-B Fires in the Tropics: Properties and their Remote Sensing from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, mientras que la detección de áreas quemadas y la localización de fuentes de carbón en los bosques boreales son el objetivo del tercero, denominado *Estimating Fire-related Carbon Flux in Alaska Boreal Forest Using Multi-sensor Remote Sensing Data*.

- *Canada Centre for Remote Sensing, CCRS*

Involucrado en un programa nacional canadiense sobre sensores remotos, se centra en la aplicación de estas técnicas en la detección de incendios forestales, al tiempo que elabora un SIG con una completa base de datos sobre las zonas afectadas.

- *Pyrogeography Research Laboratory, PPL*

Perteneciente a la Universidad de Arizona (USA), se dedica a la cartografía y modelización de combustibles forestales y riesgo de incendios en las zonas de Arizona y Nuevo Mexico, utilizando sistemas de información geográfica y sensores remotos.

- *Global Fire Monitoring Centre, GFMC*

Dependiente de la NASA, proporciona información e imágenes de satélite relacionadas con incendios forestales, analizando sus efectos y consecuencias sobre el conjunto del planeta

- *European Space Agency, ESA*

La agencia espacial europea tiene en marcha el denominado *Ionia Fire Monitoring Project* para la detección de incendios y superficies quemadas mediante la aplicación de imágenes de satélite.

- *Fire and Environmental Research Applications Team, FERA*

Forma parte del *Managing Natural Disturbance to Sustain Forest Health (MND) Program of the Pacific Northwest Research Station*, gestionado por el *USDA Forest Service*. Su objetivo fundamental es profundizar en el conocimiento de las transformaciones del paisaje como consecuencia de los incendios forestales, dedicando especial atención a la Amazonia brasileña.

- *Centre for Remote Imaging, Sensing and Procesing, CRISP*

Auspiciado por el Ministerio de Medio Ambiente de Singapur, y vinculado a la *National University of Singapore* desde 1995, incrementa su actividad a partir de la importante oleada de incendios ocurridos en el Sureste asiático entre 1997 y 1998. Los incendios, que comenzaron en las islas de Sumatra y Borneo, se vieron agravados por la sequía producida por el fenómeno del Niño, que supuso importantes pérdidas económicas. Desde entonces se dedica al estudio de estos eventos, localización de áreas afectadas, seguimiento de los cambios en la vegetación y adopción de medidas preventivas mediante el empleo de imágenes de satélite.

- *Remote Sensing Applications Center, RSAC*

Localizado en Salt Lake City, Utah (USA), constituye un enclave de captación de imágenes de satélite para el Servicio Forestal de los Estados Unidos, además de trabajar en cooperación con la NASA. Ofrece, entre otros servicios, el procesamiento de imágenes, cartografía y desarrollo de aplicaciones para la detección y control de incendios forestales.

- *California Department of Forestry and Fire Protection, CDF*

Se dedica a la protección y lucha contra el fuego en California. Entre sus principales líneas de trabajo destacan, además de la imple-

mentación de una base de datos sobre la incidencia histórica del fuego, el estudio de combustibles afectados y zonación del peligro y el análisis de las condiciones y efectos del fuego, para lo que emplea el modelo de simulación de incendios FARSITE, y realiza tareas de asesoramiento y policía, desarrollando planes de gestión y emergencia de lucha contra el fuego.

- *National Applied Resource Sciences Center, NARSC*

En el marco del proyecto *Bureau of Land Management wildland fire management program* el NARSC analiza mediante SIG e imágenes de satélite la evolución sufrida por las áreas afectadas por incendios pasados, al tiempo que propone planes de control y lucha contra el fuego, y programas destinados a mejorar la seguridad en caso de incendio.

- *Malaysian Centre for Remote Sensing, MACRES*

Tiene como objetivo fundamental el combate de incendios forestales en Asia mediante la geocodificación y análisis de imágenes de satélite, a partir de las cuales localiza y cartografía las superficies afectadas, además de aportar información a los organismos encargados del planeamiento y combate de los incendios.

- *Wildland Fire Assessment System, WFAS-MAPS*

Se encarga de la elaboración y actualización diaria de mapas de riesgo de incendio para Estados Unidos y Alaska, procesando los datos de 1.500 estaciones meteorológicas distribuidas por todo el territorio

- *Centro de Estudios Espaciales de Chile, CEE*

Dentro del área de Programas Nacionales el Centro de Estudios Espaciales de Chile ofrece el Sistema de Prognosis y Gestión para el

Control de Incendios Forestales conocido como Kitral (fuego, en lengua mapuche), desarrollado conjuntamente con el Instituto de Investigaciones Tecnológicas, el Instituto Forestal y la Universidad de Chile.

- *The International Fire Information Network, FireNet*

Se trata de un sistema de comunicación e intercambio de información sobre el problema de los incendios forestales vía Internet, cuyo acceso es <http://www.csu.edu.au/firenet>. Fue desarrollado en 1993 por Trevitt (1994) y Green en la Universidad Nacional Australiana, y constituye un foro de debate e intercambio de conocimientos sobre el comportamiento, prevención, supresión de incendios, formas de mitigar sus consecuencias y diversos aspectos relacionados con sus efectos (Trevitt *et al.*, 1994).

En España, junto a la investigación llevada a cabo por la Universidad de Alcalá de Henares (Madrid), y los proyectos desarrollados por las Comunidades autónomas en sus respectivos territorios, destaca el *Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV)* que basándose en el modelo de riesgo de incendios establecido por ICONA, determina, a partir de imágenes de satélite, el grado de riesgo que afecta a España y el Sur de Europa.

Esta labor, realizada por encargo del Área de Defensa contra Incendios Forestales de la Dirección General de Conservación de la Naturaleza del M.A.P.A. implica el procesamiento diario y en tiempo real de datos procedentes del Satélite NOAA-14, a los que el centro de Valladolid tiene acceso directo desde Internet. Mediante la combinación adecuada de bandas se determina el estado de la vegetación y se compara con imágenes de épocas anteriores para elaborar un mapa de riesgo diario de incendios. El territorio español se presenta dividido en celdas de 10 x 10 kilómetros, correspondientes a las áreas donde ICONA sitúa cuadrillas de vigilancia, y a cada una de ellas se asigna un valor que oscila entre 0, sin riesgo, y 4, riesgo

extremo. Sin embargo, pese al enorme interés de este proyecto, sus resultados muestran grandes lagunas debidas a la falta de información para la mayor parte del territorio estudiado, lo que hace que sea poco operativo.

En la misma línea trabaja el Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT), organismo dependiente de la Universidad de Oviedo. Creado en 1985 con un planteamiento interdisciplinar que le ha permitido desarrollar un variado aspecto de líneas de trabajo relacionadas con la investigación aplicada en los recursos naturales y la ordenación del territorio. Cuenta con un laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección donde se han desarrollado numerosos trabajos relacionados con la problemática de los incendios forestales dedicando especial atención a su incidencia en la comunidad autónoma del Principado de Asturias.

También, la Junta de Andalucía, a través del Servicio de Prevención de Incendios y Restauración Forestal de la Consejería de Medio Ambiente, ha desarrollado una serie de actuaciones destinadas a facilitar las labores de prevención y extinción de incendios forestales. Estas actividades se incluyen en el Sistema de Información Ambiental de Andalucía (*Siamba*), diseñado para la evaluación, gestión y planificación de los recursos naturales y socioeconómicos haciendo uso de las nuevas tecnologías.

En este contexto destaca la puesta en marcha, en 1995, del Centro Operativo Regional del Sistema de Información Geográfica BACARES, como un sistema de referenciación de los incendios que se producen, permitiendo asociar a una base cartográfica digitalizada un fichero que contiene datos sobre perímetros afectados por el fuego, descripción de los sucesos e imágenes más representativas de los mismos. En 1995 se completó la automatización del sistema de captación y transmisión de imágenes de incendios que son enviadas directamente desde los aviones a los centros de operación.

La comunidad autónoma andaluza dispone además de un sistema automático para la localización y evaluación de incendios forestales, SALEIF, cuya información se integra junto a diversas capas temáticas sobre topografía, tipos de vegetación, accesos, etc., en un sistema de información geográfica destinado a mejorar los planes de defensa contra incendios. Con el sistema SALEIF, que incorpora instrumentos de posicionamiento global (GPS) conectados a un ordenador, se sobrevuela el incendio en helicóptero, obteniendo de forma automática y en tiempo real los perímetros y superficies afectadas por el fuego.

La preocupación por el problema de los incendios forestales en las últimas décadas ha contribuido a aumentar el número de profesionales dedicados a su estudio en nuestro país. Vinculados generalmente con universidades españolas como las de Oviedo, Cantabria, León, Extremadura, Valencia, Alicante, Baleares o Valladolid, ha favorecido la inclusión de nuevas técnicas de Sistemas de Información Geográfica y tratamiento de imágenes de sensores remotos para el análisis y seguimiento de los incendios.

Se han creado grupos de trabajo y Laboratorios de Teledetección, y SIG en la Escuela Técnica Superior Agraria de la Universidad de Lérida y en el Instituto de Desarrollo Regional, dependiente de la Universidad de Castilla-La Mancha. Destacan también las contribuciones del Instituto Astrofísico de Canarias, el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, el SIGTE, Servicio de SIG y Teledetección de la Universidad de Gerona, o el Grupo de Métodos cuantitativos, SIG y Teledetección dependiente de la Universidad Autónoma de Madrid. La Escuela de Montes, vinculada a ésta última Institución, ha desarrollado recientemente un paquete informático, denominado CARDIN, para la simulación del comportamiento del fuego en incendios de superficie.

Por su parte, las Universidades de Gerona y Sevilla ejercen en España las funciones de secretarías del *Geographical Information*

Systems International Group (GISIG). Se trata de una asociación, sin ánimo de lucro constituida en 1992, e integrada por unas cien organizaciones de veintidós países europeos con el objetivo de establecer una red europea que recoja las actividades relacionadas con los SIG y sus aplicaciones territoriales, agrupando a expertos de diversas nacionalidades para facilitar el intercambio de información y transferencias tecnológicas, promoviendo proyectos en común y favoreciendo la participación en programas europeos, que ayuden a difundir esta tecnología.

Entre las empresas ubicadas en España y dedicadas a la comercialización de imágenes de satélite y software específico para SIG destaca INSA, Ingeniería y Servicios Aeroespaciales, que participa, junto con el LATUV, Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid, y otras empresas en proyectos financiados por la Unión Europea. Destacan también los distribuidores oficiales en España de productos, en su mayor parte americanos, como son INFOCARTO, ATLAS, TRAGSATEC o ERMAPPER, destinados al tratamiento digital de la información geográfica.

La idoneidad de los Sistemas de Información Geográfica como instrumento de análisis espacial está ampliamente reconocida en nuestros días. La propuesta que se desarrolla aquí pretende ser otra aportación en el campo de la cartografía del riesgo de incendios forestales mediante la aplicación de esta tecnología SIG a un espacio natural de alto interés en la región de Murcia: Sierra Espuña y su entorno. La versatilidad de este tipo de sistemas permite la utilización integrada de las bases de datos que configuran el modelo de riesgo y la aplicación de éste a otras áreas con idéntico tipo de información.

2.5. Programas y proyectos de lucha contra incendios forestales en los países de la Europa Mediterránea.

La investigación europea sobre los incendios forestales comenzó lentamente entre 1960 y 1980, centrándose en el papel ecológico de los incendios. Se consideraban parte del ecosistema forestal natural ya que gracias a ellos se elimina la parte muerta de la biomasa que frena el nuevo crecimiento. Sin embargo, esta situación cambió bruscamente a partir de los años ochenta, al aumentar exponencialmente el número y magnitud de los incendios, como consecuencia de los cambios sociales y económicos y la falta de reacción de las políticas forestales.

En 1977 y 1981 se celebraron en California dos importantes conferencias internacionales sobre incendios forestales en ecosistemas de tipo mediterráneo, que sirvieron para resumir conocimientos, establecer contactos internacionales y definir temas de investigación. A finales de los años 80 la Comisión Europea pone en marcha uno de los primeros proyectos multinacionales dentro del programa EPOCH (*European Programme On Climatology and Natural Hazards, 1989-1992*), centrado en el desarrollo de modelos de incendios y detección automática. La necesidad de poner en práctica una política medioambiental común, lleva a los países miembros a poner en marcha en 1985 el Programa CORINE (*Coordination of Information on the Environment, 1985-1990*). En el marco de este Programa, el proyecto *Biotopes* desarrolla una cartografía temática basada en el análisis de imágenes de satélite, donde se muestra la importancia de las zonas afectadas por el fuego.

En 1990, el Programa cuatrienal del Medio Ambiente financió la investigación de este tipo de sucesos, apoyado en el interés suscitado en la Primera Conferencia Internacional sobre incendios forestales celebrada ese mismo año en Portugal. Los primeros resultados de ésta se mostraron cuatro años más tarde en una Segunda Confe-

rencia Internacional, Portugal, 1994, que motivó la transformación del Programa del Medio Ambiente en el Programa del Medio Ambiente y del Clima, dentro del Cuarto Programa Marco de la Unión Europea (1994-1998). Su interés radica en que, además de considerar el papel natural de los incendios, sus causas y efectos socioeconómicos, propone la preparación y convalidación de modelos de evolución, predicción y contención del fuego en terrenos forestales. También otorga un papel esencial a las actividades de educación y formación científica y técnica en el ámbito de la ordenación del medio ambiente. Es de destacar el papel desempeñado por la Escuela Europea de Climatología y Riesgos Naturales, dedicada a la organización de cursos monográficos sobre estos temas.

Especial interés revistió el celebrado en Grecia en 1992, donde se abordaron aspectos generales de los incendios forestales y su evolución histórica en los países de la Europa meridional, así como métodos de gestión, evaluación del riesgo y ayuda a la toma de decisiones, aspectos socioeconómicos y legislativos, la dinámica posterior a los incendios y sus interacciones con el paisaje de los ecosistemas mediterráneos.

En 1996, la Comisión Europea publicó su primer informe con datos de Francia, Grecia, Italia, Portugal y España para los años 1989-1993, enfatizando la compleja tarea que supone la protección contra los incendios y la necesidad de abordar el problema desde diversas perspectivas: i) prevención: incluyendo la necesidad de la educación pública, legislación adecuada, policía y formación de personal especializado, así como la gestión adecuada de la materia combustible; ii) extinción: perfeccionamiento de personal y disponibilidad de equipos para el control de la propagación; iii) rehabilitación y gestión de zonas quemadas.

La Tercera Conferencia Internacional sobre Incendios forestales. Portugal, 1998, puso de manifiesto los grandes avances conseguidos en el conocimiento de los incendios, por lo que el programa

de Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible del Quinto Programa Marco de la Unión Europea (1998-2000) ha continuado trabajando en ésta línea mediante técnicas de previsión, prevención, evaluación y reducción del impacto de los grandes peligros naturales entre los que destacan los incendios forestales. Para ello se han completado investigaciones ya iniciadas y se han puesto en práctica nuevos modelos de lucha contra el fuego basados en el desarrollo de nuevas tecnologías, como son los Sistemas de Información Geográfica y los datos procedentes de sensores remotos, que permiten conocer mejor el territorio y los riesgos que le afectan.

Entre los diversos proyectos subvencionados por la Comisión Europea (DG XII y CCI) en la última década para hacer frente al problema de los incendios forestales destacan:

- *Modélisation Incendie et Etudes de Risques pour la Valorisation de l'Environnement (MINERVE, 1992-1994).*

Su objetivo es desarrollar un software que ayude a la toma de decisiones en la gestión de áreas con riesgo de incendios mediante el estudio de la probabilidad de ignición y estudios de simulación que permitan conocer de forma anticipada la evolución más probable de un supuesto incendio así como las consecuencias del mismo sobre el medio. Los países integrantes, España, Francia, Italia y Portugal, aportan diferentes metodologías relacionadas con las condiciones particulares de cada territorio, analizando y comparando los resultados para determinar índices de riesgo standard a nivel europeo.

- *Simulation des incendies de forêts (1992-1994)*

Los países participantes, España, Francia, Grecia y Bélgica, desarrollan diversos modelos de comportamiento del fuego basados en el análisis de la cobertura vegetal y simulaciones matemáticas de las condiciones atmosféricas dominantes. Además de ensayos en laboratorio, se realizan experimentos en diversas áreas piloto pre-

viamente seleccionadas en las que se han producido incendios reales.

- *Mediterranean Forest Fire Fighting Integrated Strategic Tool (MEFISTO, 1994-1996).*

Integrado por investigadores de Italia, Grecia, Portugal y el Reino Unido, el proyecto tiene como objetivo una actualización de los diversos sistemas y estrategias de simulación en tiempo real de los incendios forestales en los ecosistemas mediterráneos, tendentes a optimizar los recursos disponibles para luchar contra el fuego.

La integración en un Sistema de Información Geográfica de todos los factores, geográficos y meteorológicos, que intervienen en los incendios, permitirá establecer estrategias de prevención adecuadas, especialmente relacionadas con la ubicación y dimensiones de los cortafuegos, limpieza del terreno y la localización y equipamiento de los medios de extinción.

- *Remote Sensing of large wildland fires in the European Mediterranean basin (MEGAFIRES, 1996-1998).*

Este proyecto constituye el marco de referencia para la utilización de las imágenes de satélite en el estudio de los grandes incendios forestales que afectan a los países de la Europa Mediterránea. Para ello se establecen tres líneas prioritarias de actuación: por un lado la *estimación del riesgo*, desarrollando diversas metodologías para cartografiar y clasificar el riesgo de incendios a escala global y local, mediante la integración de la información extraída de las imágenes de satélite con un SIG específicamente desarrollado para la cartografía del riesgo, incluyendo la influencia sobre el medio de las acciones antrópicas, y modelos de simulación espacial del comportamiento del fuego. En segundo lugar, la *rápida detección durante el incendio*, ya que la disponibilidad en tiempo real de esta información así como un eficaz procesamiento y transmisión de información so-

bre la propagación del frente de fuego al personal encargado de su control resulta de máximo interés para la minimizar el tiempo necesario en el control del suceso. Por último, el proyecto se centra en el *análisis post-incendio* ya que la información de los sensores remotos permite localizar y cartografiar las áreas afectadas y que deben ser objeto de un tratamiento adecuado.

Interviene en este proyecto Portugal, Italia, Francia, Grecia y España, que ocupa un papel destacado con la participación de prestigiosos investigadores de la Universidad de Alcalá de Henares, personal de la empresa Infocarto, S.A. y responsables de la Consejería de Medio-Ambiente de la Comunidad Autónoma de Andalucía.

- *Autonomous Forest Fire detection and prevention aid system Integrating Remote Multisensor terminals (AFFIRM, 1996-1998).*

Con la participación de España, Francia y Holanda el objetivo del proyecto es el desarrollo y posterior comercialización de un completo sistema de prevención, control y detección automática de incendios forestales, a partir de la información de sensores remotos. El proyecto trabaja con un sistema de detección dotada de una red de terminales autónomos repartidos por los bosques y conectados por satélite con un centro operacional. Estos terminales tienen cámaras de vídeo y una serie de equipos para la adquisición y procesamiento de imágenes, que permiten a los terminales, previo filtrado de falsas alarmas por inteligencia artificial, descubrir el comienzo de un incendio mediante la detección del humo.

El sistema es un consorcio entre la empresa española *Indra*, especializada en comunicaciones por satélite, ingeniería de sistemas y coordinación, *Ecole des Mines* de París, Francia, que aporta la inteligencia artificial y las técnicas de evaluación de riesgos, *TNO Physics and Electronics Laboratory* en Países Bajos, encargada del procesamiento de imágenes, y la *Universidad Politécnica de Cataluña*, que se encarga de las técnicas de compresión de imágenes.

Esta información constituye una ayuda esencial para la detección de los primeros síntomas de un incendio, permitiendo una intervención inmediata sobre el mismo. No obstante su coste es muy superior al de las técnicas tradicionales, y ampliamente generalizadas, de observación directa sobre el terreno por parte del personal responsable.

- *Fire events risk assessment through remote sensing (FIERS, 1998-1999).*

Basándose en la necesidad de mejorar la organización y coordinación de las acciones durante las operaciones de control y extinción de los incendios forestales, Italia y Francia proponen un método de organización de los cuerpos nacionales de Protección Civil en función de los valores de un índice de riesgo diseñado a partir de índices de vegetación y temperatura de la superficie terrestre. Estos datos proceden de imágenes de satélite procesadas mediante las técnicas utilizadas en el proyecto MINERVE.

- *Land Use Change Interactions with in Mediterranean landscapes (LUCIFER, 1996-2000).*

La diversidad natural y cultural de los paisajes mediterráneos se considera muy ligada a la utilización ancestral de la tierra por parte del hombre, que contribuye a la riqueza de estos ecosistemas. Sin embargo, los cambios socioeconómicos ocurridos especialmente en las últimas décadas han dado lugar a importantes transformaciones. Paralelamente se ha producido un incremento en el número de incendios y el fuego ha producido alteraciones muy significativas en estos ecosistemas.

El proyecto LUCIFER, en el que intervienen España, Francia, Portugal, Italia, Grecia y Alemania, aborda los cambios de la estructura paisajística producidos durante las cuatro últimas décadas en zonas propensas a los incendios dentro de la Europa mediterránea.

nea. Además, estudia las nuevas relaciones suelo-agua-nutrientes en las áreas quemadas, analizando las transformaciones del medio, como consecuencia de la colonización de las zonas afectadas por nuevas especies, en detrimento de la vegetación autóctona. Entre las técnicas de análisis empleadas destacan las imágenes de satélite y el ensayo de modelos de comportamiento del fuego.

- *Programme for a European Traffic system with Highest Efficiency and Unprecedented Safety (PROMETHEUS 1998-2000).*

Con la participación de Grecia, Italia, Portugal, Francia y Suiza, centra sus esfuerzos en el desarrollo de un sistema de información geográfica (GIS) y sistemas de control el fuego (FMIS) para la implementación y apoyo de técnicas de gestión de los incendios forestales.

Se compone de seis módulos relativos a la prevención, gestión del combustible, comportamiento del fuego, extinción, impacto en el suelo, vegetación y ecosistemas, que pueden operar de forma independiente, analizando cada una de las características, o bien de manera integrada para la administración y planeamiento de la prevención. Su característica fundamental es la consideración del fuego como parte de los ecosistemas mediterráneos, donde se ha venido utilizando desde antiguo por lo que PROMETHEUS pretende desarrollar una aproximación a la gestión del fuego desde una perspectiva de integración, en lugar de su control o supresión.

- *Forest Fire Management and Fire Prevention System (FOMFIS, 1997-2000)*

El objetivo general del sistema FOMFIS es la obtención de un entorno operativo de planificación y gestión de la prevención y lucha contra incendios forestales, a escala regional, integrando metodologías y técnicas relacionadas con la cartografía automática de los combustibles forestales, análisis de riesgos climáticos y socioeconómi-

cos, métodos probabilísticos y simulaciones de la propagación de incendios.

El proyecto está integrado por nueve organizaciones de cuatro países mediterráneos: seis miembros aportan la tecnología para el sistema, tres de los cuales son consultores ambientales, *Epsilon* (Grecia), *Iberinsa* y *Sesfor* (España); dos son productores de sistemas: *Software A.G.* (España/Italia) y *SEMA Group* (España), y, por último, una empresa española especializada en imágenes *Ibersat*, que se encarga de las técnicas de cartografía forestal. La aplicación práctica de la experiencia se asigna a tres usuarios potenciales *Xunta de Galicia* (España), *CPFA* (Francia) y *NAGREF* (Grecia), para comprobar los resultados sobre escenarios reales.

Entre los productos de planificación y gestión que se esperan obtener destacan: una cartografía actualizada de los combustibles forestales, basada en técnicas de análisis digital de imágenes obtenidas por teledetección, mapas actualizados de riesgo de ocurrencia de incendios en función de la caracterización climática y socioeconómica de la zona analizada, determinación de las posibles situaciones de fuego basadas en el conocimiento experto previo y en la simulación de la propagación de incendios forestales, análisis del grado de adecuación de los planes actuales de prevención y extinción de incendios forestales frente al riesgo de ocurrencia y caracterización de los fuegos calculados, y, finalmente, una disposición óptima de recursos e infraestructura según los riesgos estimados.

Se trata por tanto de una herramienta para la gestión de superficies quemadas, la prevención de fuegos y la reducción de posibles daños. Además, los resultados se ofrecen en términos de costo de la lucha anti-incendio y de la cantidad de daños que éstos pueden ocasionar, lo que implica una mejora en la utilización de los recursos y en las estrategias de lucha contra el fuego. Su lanzamiento al mercado estaba previsto para el año 2000.

- *FUEGO Programme (1998-1999) y Proyecto FUEGO (1999-2001).*

El primero forma parte del subprograma *Space techniques applied to environmental monitoring and research*. En él participan, además de Italia y Francia, diversos organismos españoles como el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas" y el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, ambos con sede en Madrid, la Xunta de Galicia, y las empresas Transformaciones Agrarias S.A. e Ingeniería y Servicios Aeroespaciales S.A..

Constituye uno de los proyectos más serios para investigar los beneficios potenciales de la observación espacial en la lucha contra los incendios forestales en las áreas mediterráneas. Tiene la finalidad de diseñar y construir un prototipo de sensor para un sistema satélite especializado en la vigilancia y detección de incendios forestales, estandarizado en las regiones de la Europa Mediterránea, y susceptible de ser extrapolado a otras zonas del mundo con características similares (Carmona-Moreno *et al.*, 1999).

El Proyecto FUEGO es continuación del anterior, aunque ahora intervienen también investigadores portugueses, alemanes y griegos, además de incrementarse la participación española con la inclusión del Ministerio de Medio Ambiente, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y el Laboratorio de sensores remotos de la Universidad Carlos III de Madrid.

Además de hacer una revisión crítica y puesta al día de las técnicas y métodos utilizados en la detección y combate de incendios forestales mediante la utilización de imágenes de satélite, exponen el desarrollo de nuevas formas de control para estos eventos a través de una constelación de mini-satélites contruidos para este fin, bajo la denominación de FFEW (*Forest Fire Earth Watch*). La información suministrada por estos aparatos hace posible la detección casi inmediata del fuego, de forma que el operador tenga cono-

cimiento de ello transcurridos tan sólo 15 minutos desde su inicio. También permite mantener un seguimiento activo de su evolución, lo que convierte a esta herramienta en un instrumento de máximo interés en la lucha contra los incendios.

La última revisión del proyecto realizada en noviembre de 1999 expone los resultados de las simulaciones llevadas a cabo con imágenes procedentes de fuegos reales (INSA, 1999), y una serie de ajustes técnicos destinados a reducir cuantía de la inversión necesaria para la puesta en funcionamiento.

- *Spot Fire : mechanisms analysis and modeling (SALTUS, 1998-2001).*

Se centra en el estudio del comportamiento de las partículas incandescentes que se desprenden de un incendio ya comenzado y que son transportadas por convección pudiendo ocasionar fuegos secundarios incluso a cientos de metros de distancia del frente principal.

Participan en el proyecto Francia, Portugal, Italia, Grecia y España. Entre sus líneas prioritarias de actuación figuran, por un lado, el desarrollo de modelos probabilísticos, basados en el estudio estadístico de una muestra de quinientos incendios recientes, donde se contempla el papel de la topografía en la producción de focos secundarios de fuego, y, por otro, el análisis físico del fenómeno en sí, con la realización de simulaciones digitales del transporte de partículas y ensayos de laboratorio.

Los resultados obtenidos, además de incrementar los conocimientos sobre este proceso, pueden ayudar a la toma de decisiones de planeamiento y prevención del fuego y aumentar la seguridad de los efectivos destinados a control y extinción.

- *Space Applications Institute: Project 03: Natural Hazards, Floods and Fires: Risk and Damage Assessment (1999-2002).*

Vinculado al Quinto Programa Marco de la Unión Europea, el proyecto de riesgos naturales dedica especial atención a la problemática de los incendios forestales. Propone el análisis del riesgo de incendios forestales mediante la integración de diversos índices derivados de factores estructurales, que a penas varían en cortos periodos de tiempo, y factores dinámicos que sí lo hacen, entre los que se contemplan básicamente la vegetación y condiciones meteorológicas.

Junto a estos proyectos directamente relacionados con la problemática de los incendios forestales, se están llevando a cabo otras propuestas que sin tener como objetivo prioritario este tema, abordan la cuestión por sus implicaciones en la conservación del medio ambiente.

Un ejemplo de este tipo de actuaciones lo constituye el proyecto EFICS (*European Forestry Information and Communication System*), dependiente del Instituto Forestal Europeo (*European Forest Institute, EFI*), destinado a analizar y comparar la información existente sobre la estructura y operaciones en el sector forestal de la Comunidad. Este organismo financia también una investigación sobre la dinámica del carbón en los bosques europeos tratando de cuantificar las reservas y potencial futuro del mismo, mediante el programa LTEEF-II, en el que se utilizan técnicas de sensores remotos. En este contexto han aplicado el software EFISCEN (*European Forest Information Scenario*), desarrollado inicialmente en la Universidad de Suecia que contempla la influencia de los incendios forestales sobre el medio y que ha servido para realizar una valoración de las producciones futuras de madera y carbón europeas (Scheihaas, 1999).

3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS INCENDIOS FORESTALES

3.1. Los incendios forestales en España

3.1.1. Análisis temporal.

La superficie total afectada por los incendios forestales en España en los últimos treinta y seis años supera las 5.500.000 hectáreas. La evolución temporal presenta una tendencia creciente, tanto en el número de sucesos como en la superficie quemada (figura 5). De los 268.669 eventos registrados, sólo el 5,8 por ciento corresponde al periodo 1961-1969, incrementándose al 15,4 por ciento en los años setenta, y alcanzando el 35,2% y 43,6% en los ochenta y noventa respectivamente.

Similar comportamiento se observa en la superficie afectada por el fuego: en los años sesenta se sitúa en 430.104 hectáreas, que se multiplicaron por 3,6 en la década de los setenta (1.538.759), y por 1,6 en los ochenta (2.409.118), descendiendo ligeramente en los seis primeros años de la década de los noventa (1.276.897).

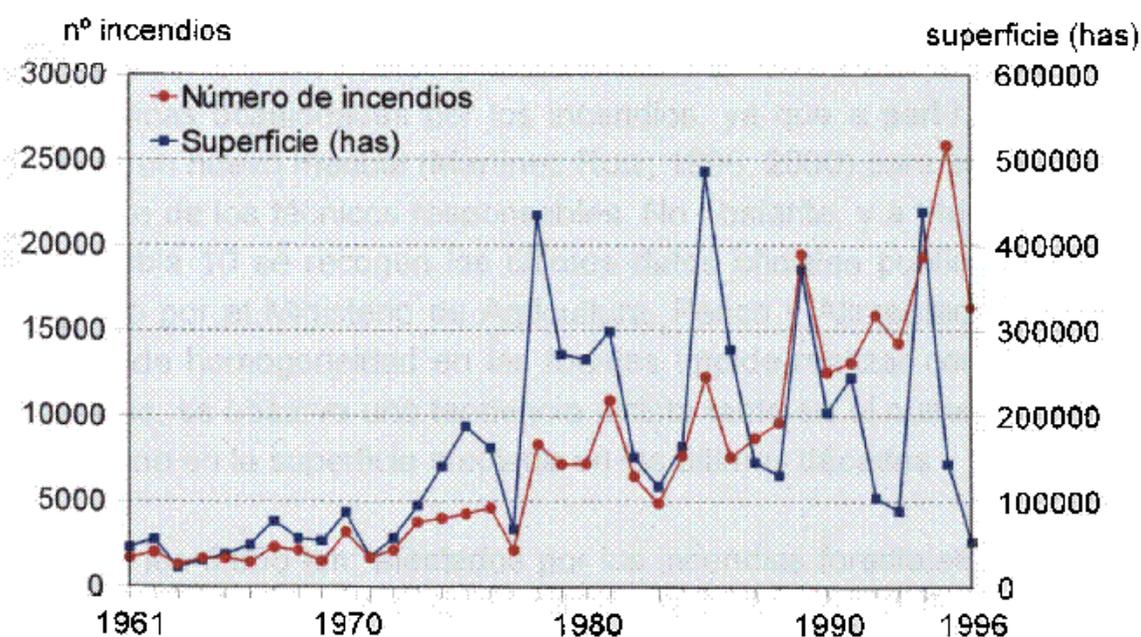


Figura 5. Número de incendios y superficie afectada. España (1961-1996).

(Fuente: Anuarios Estadísticos (INE) y Anuarios de Estadística Agraria)

Esta tendencia general resulta especialmente significativa a partir de 1978, año en el que se alcanza el primer máximo histórico al arder 434.867 hectáreas, valor sólo superado en 1985 y 1994, cuando el fuego afectó a 486.327 y 438.738 hectáreas respectivamente, consolidándolos como los más nefastos de la serie analizada.

Pese al crecimiento real producido durante este periodo, se observa que no existe una correlación temporal entre el incremento de la superficie afectada y el aumento del número de sucesos, especialmente a partir de 1990, ya que, a pesar contabilizarse más eventos, la superficie total afectada disminuye considerablemente. La causa de esta divergencia radica en el hecho de que entre 1980 y 1985, dependiendo de la comunidad autónoma de que se trate, y de forma generalizada a partir de los años 90, empiezan a contabilizarse incendios que antes no se consideraban, como por ejemplo los que se producían en montes particulares, o los que afectaban a menos de una superficie determinada (con anterioridad a la fecha indicada no se incluían los incendios que afectaban a menos de una hectárea) etc.

El mismo problema se plantea a la hora de cuantificar las pérdidas económicas ocasionadas por los incendios, ya que a partir de 1994 se elabora un nuevo manual (Martínez Ruiz, 1996, 2000) para su evaluación por parte de los técnicos responsables. No obstante, y a título indicativo, en la tabla 10 se recogen los últimos datos oficiales publicados a este respecto por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Aunque la falta de homogeneidad en las fuentes impide realizar comparaciones rigurosas, se observa una tendencia alcista tanto en el número de incendios como en la superficie afectada en las últimas décadas.

De los 5.655 km² afectados por los incendios forestales en este periodo, el 42,1 por ciento era superficie arbolada, aunque los porcentajes varían de unas décadas a otras (figura 6). Mientras que entre 1961 y 1969 la superficie arbolada afectada por el fuego se sitúa en el 48,6 por ciento, se observa un descenso en las dos décadas siguientes, 43,0 por ciento y 39,5 por ciento en los años setenta y ochenta respectivamente, y

Tabla 10. Incendios forestales en España: número, superficie afectada y pérdidas económicas (1961-1996).

Año	Número de incendios	Superficie afectada (hectáreas)	Pérdidas en: (millones de pesetas)		
			Productos primarios	Beneficios ambientales	Total Pérdidas
1961	1.680	46.251,0	928	575	1.503
1962	2.022	55.482,0	598	507	1.105
1963	1.302	22.679,0	311	312	623
1964	1.645	31.398,0	372	546	918
1965	1.686	38.018,0	412	599	1.011
1966	1.443	49.354,0	446	700	1.146
1967	2.299	76.575,0	575	858	1.433
1968	2.109	56.628,0	549	695	1.244
1969	1.494	53.719,0	484	656	1.140
1970	3.202	87.324,0	764	1.176	1.940
1971	1.714	34.945,0	334	657	991
1972	2.148	57.283,0	559	1.016	1.575
1973	3.765	95.257,0	1.118	1.574	2.692
1974	3.980	140.211,0	1.992	7.709	9.701
1975	4.242	187.314,0	4.121	13.885	18.006
1976	4.596	162.300,0	3.974	12.575	16.549
1977	2.148	67.540,0	981	3.393	4.374
1978	8.324	434.867,0	9.205	17.639	26.844
1979	7.167	271.718,0	6.790	16.819	23.609
1980	7.193	265.954,0	6.774	18.992	25.766
1981	10.882	298.436,0	9.557	29.570	39.127
1982	6.443	151.644,0	4.871	25.945	30.816
1983	4.880	117.599,0	4.197	21.640	25.837
1984	7.649	164.698,0	5.797	26.552	32.349
1985	12.284	486.327,0	18.752	52.142	70.894
1986	7.574	277.513,0	17.379	42.107	59.486
1987	8.679	145.793,0	6.007	42.704	48.711
1988	9.595	129.989,0	6.026	31.918	37.944
1989	19.419	371.165,4	30.753	58.699	89.452
1990	12.526	203.719,2	13.692	52.267	65.959
1991	13.086	244.809,3	19.865	62.767	82.632
1992	15.871	104.505,8	8.916	21.873	30.789
1993	14.240	89.174,3	8.076	19.812	27.888
1994	19.268	438.737,6	73.025	147.512	220.537
1995	25.824	143.481,7	18.078	24.968	43.046
1996	16.320	52.469,2	4.955	4.063	9.018
Total	268.699	565.487,5	291.233	765.422	1.056.655

(Fuente: Anuario de Estadística Agraria, 1997).

un nuevo incremento en la década de los noventa hasta alcanzar el 44,4 por ciento del total.

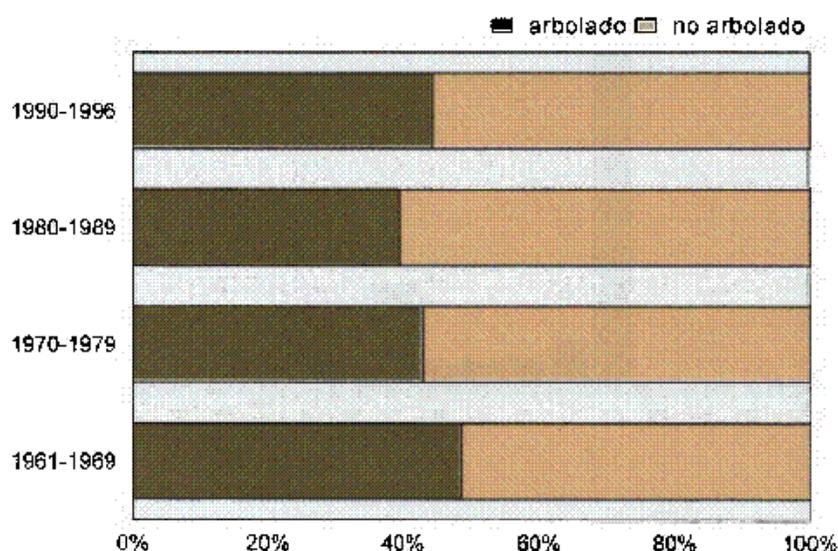


Figura 6. Evolución del tipo de superficie afectada por los incendios forestales en España (1961-1996).

(Fuente: Anuarios Estadísticos y Anuarios de Estadística Agraria)

El análisis de los incendios por comunidades autónomas para el periodo 1989-1996 (anexo 3) muestra a Galicia como la comunidad que registra un mayor número de sucesos, 66.240, en estos ocho años. El segundo y tercer lugar lo detentan Castilla y León (16.025 hectáreas) y Andalucía (11.491 hectáreas) respectivamente (figura 7).

En conjunto, estas tres comunidades registran el 71,9 por ciento del total nacional. En el resto del territorio, el número de incendios se sitúa por debajo de 5.000, destacando los dos conjuntos insulares y La Rioja que presentan valores inferiores a 1.000.

Estos datos globales enmascaran contrastes entre valores anuales extremos. La diferencia más significativa corresponde a Galicia, que en 1995 registró 15.253 eventos frente a los 4.045 contabilizados en 1990. La región con mayor uniformidad es Canarias que detenta un máximo en 1994 (94 incendios) y un mínimo en 1990 con 31.

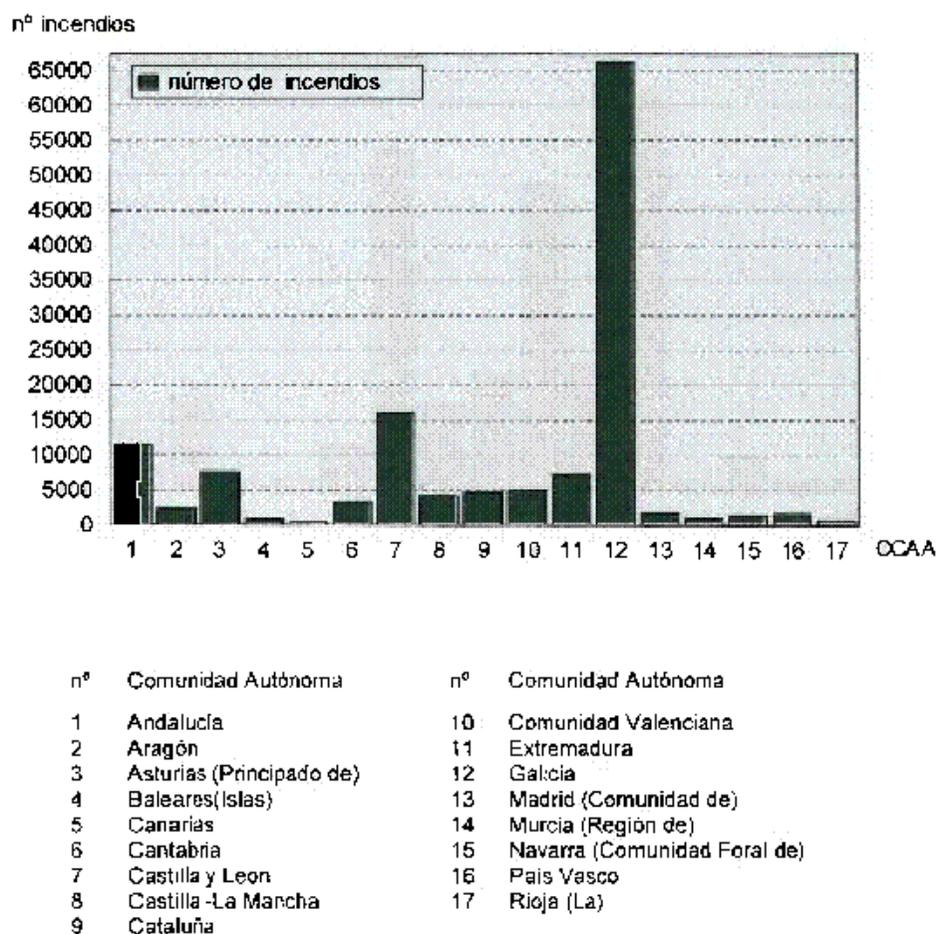


Figura 7. Distribución del número total de incendios por Comunidades Autónomas en el territorio nacional (1989-1996).

(Fuente: Anuarios de Estadística Agraria).

Respecto a la superficie total afectada en cada comunidad autónoma (figura 8), Galicia y Castilla-León vuelven a ocupar los dos primeros puestos a nivel nacional con un total de 344.486 y 295.576 hectáreas afectadas respectivamente, en el periodo 1989-1996.

En tercer lugar, y desplazando a Andalucía, se sitúa la Comunidad Valenciana, con algo más de 260.000 hectáreas, constatando que, pese a registrar sólo 4.940 incendios, sus consecuencias han sido mucho más devastadoras que en otras regiones.

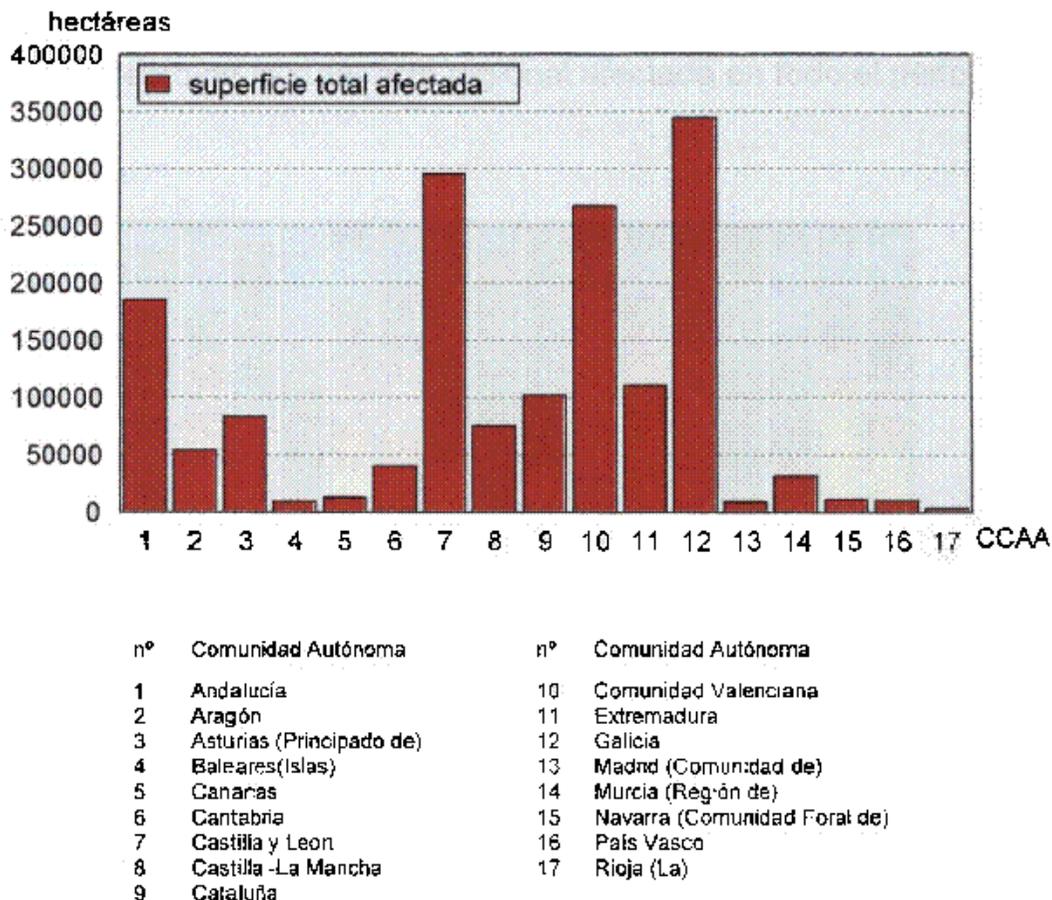


Figura 8. Superficie total afectada por incendios forestales en el territorio nacional (1989-1996)

(Fuente: Anuarios de Estadística Agraria)

En el recuento, por comunidades autónomas, de las superficies incendiadas entre 1989 y 1996, (figura 9), destacan los años 1989, 1991 y 1994. En estos tres años ardieron 105.471 hectáreas, que constituyen el 64 por ciento del total de este periodo. Analizando las series de cada comunidad, destacan como zonas más afectadas en 1989 Galicia, El País Vasco y La Rioja, mientras que en 1991 lo fueron Andalucía y Extremadura.

El fuego ejerce su papel más devastador en 1994, año en que se vieron afectadas cerca de 440.000 hectáreas localizadas mayoritariamente en Aragón, Castilla-La Mancha, Cataluña, Comunidad Valenciana, y Región de Murcia. Destaca de manera significativa ésta última, en la

que ardieron en tan sólo un año, 26.835 hectáreas, que representan el 85,3 por ciento de la superficie regional afectada en todo el periodo.

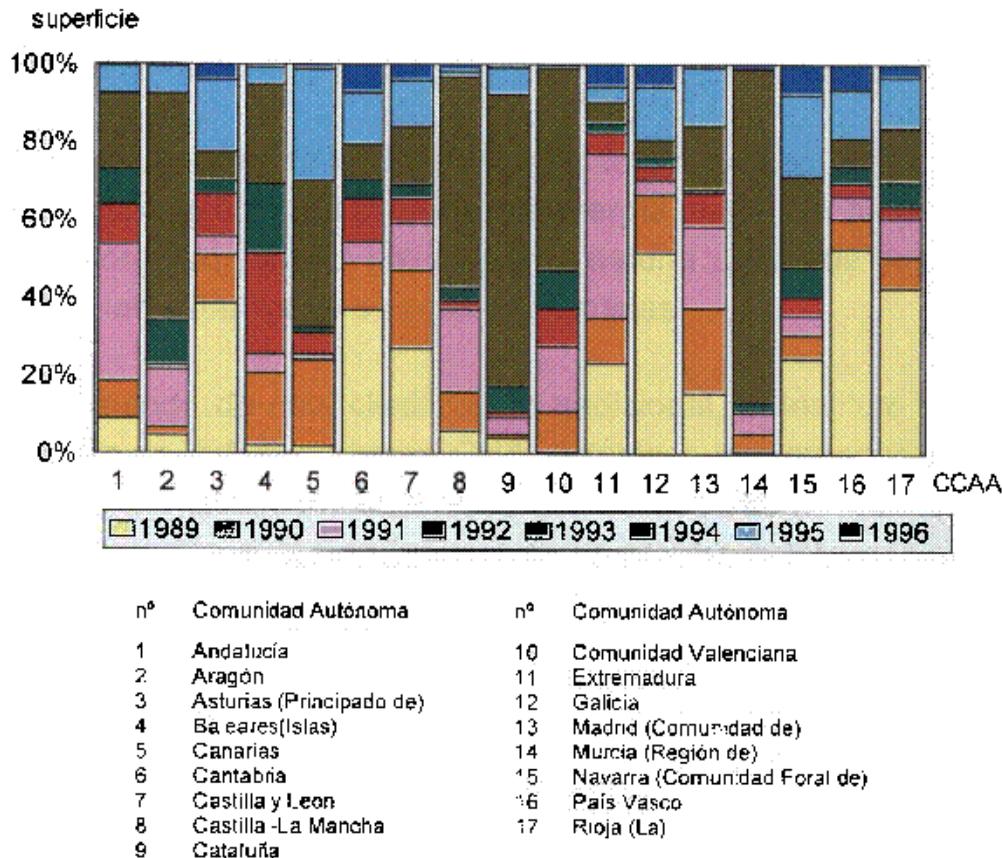


Figura 9. Porcentajes anuales de superficie afectada por el fuego expresados por comunidades autónomas.

(Fuente: Anuarios de Estadística Agraria)

3.1.2. Causalidad de los incendios forestales

La situación de España en el contexto de los países europeos mediterráneos hace partícipe a nuestro territorio de las características medioambientales propias de estos ecosistemas. El acusado descenso de las precipitaciones acompañado de un significativo aumento térmico, especialmente en la época estival, someten a la vegetación a un fuerte estrés hídrico haciéndola más vulnerable al inicio y propagación del fuego. Sin

embargo pese a darse las condiciones idóneas, para que un material empiece a arder es necesario un aporte importante de calor, en definitiva energía, que actúe sobre los otros dos elementos del triángulo de fuego, combustible y oxígeno, haciendo que se alcance el punto de ignición y se inicie la combustión.

La causalidad de los incendios se determina según el origen de ese foco emisor de calor. Esta fuente de energía puede ser propia de la naturaleza, los rayos son el único agente natural capaz de provocar incendios, o bien estar ligada a acciones humanas.

Partiendo de esta clasificación tradicional, el Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) establece tres grandes conjuntos de causas: *naturales*, como consecuencia de la caída de rayos, *desconocidas* en aquellos casos en los que no es posible determinar el origen del foco inicial de calor, y *antropicas*, divididas a su vez en negligencias, intencionados y otras causas. Estas categorías han sido adoptadas por la actual Dirección General de Conservación de la Naturaleza (Ministerio de Medio Ambiente) y así constan en las fichas de incendios.

Se considera "negligencia" toda acción imprudente, realizada de forma consciente o no, de la que se deriva un incendio. Incluye la quema de basuras, quemas agrícolas o de pastos, los trabajos forestales en los que se utilice el fuego, hogueras realizadas sin las debidas precauciones, acciones derivadas de fumadores por cerillas o colillas mal apagadas, y otras acciones como por ejemplo el abandono de cristales en el monte que puedan tener graves consecuencias.

Bajo el epígrafe "otras causas", se incluyen los incendios debidos a líneas eléctricas, ferrocarril, presencia de motores y máquinas en el monte o la realización de maniobras militares. Algunos autores consideran este conjunto de causas como "accidentes" por la dificultad que entraña su previsión. Los incendios intencionados tienen una vinculación directa con el hombre, que desea que el fuego se extienda sobre una zona. Los motivos pueden ser muy diversos, desde la enemistad o rencillas

personales entre propietarios vecinos, especulaciones sobre terrenos y productos del monte hasta las inexplicables intenciones que mueven a los pirómanos a actuar. Estos factores de índole social, económico y político están más relacionados con las tareas propias de una investigación sociológica.

Las estadísticas de causalidad disponibles para el periodo 1972-1995 (figura 10 y anexo 4) muestran el bajo porcentaje correspondiente a incendios originados por causas naturales, apenas el 3,8 por ciento como promedio, frente a aquéllos en los que interviene el hombre, que superan el 50 por ciento. Entre estos últimos destaca de manera significativa el elevado porcentaje de incendios intencionados (38,8 por ciento), valor situado muy por encima de los correspondientes a negligencias o posibles accidentes.

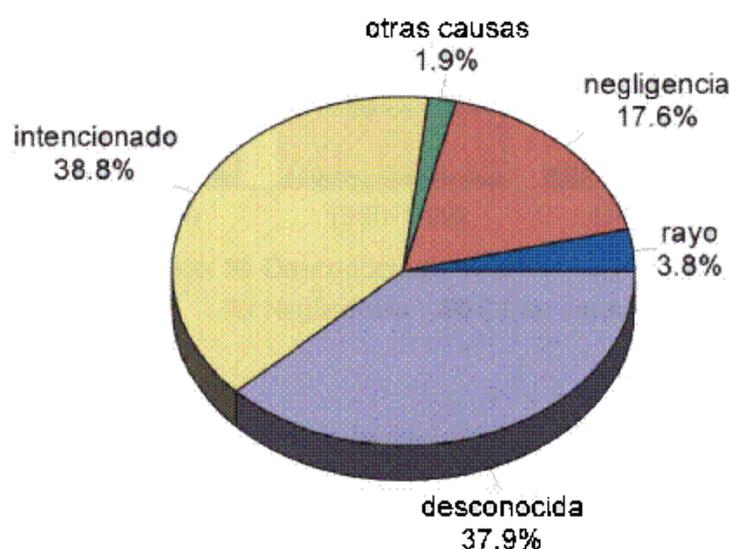


Figura 10. Causalidad de los incendios forestales en España (1989-1996)

(Fuente: Anuarios Estadísticos)

La categoría "desconocida" engloba aquellos sucesos en los que no ha sido posible determinar con exactitud la causa del incendio. No obstante su elevada cuantía, 37,9 por ciento, hace sospechar la inclusión, en este apartado, de todos los incendios en los que, bien por desconocimiento real o bien por descuido u omisión involuntaria, no se dejó constancia expresa de la causa, al rellenar el correspondiente parte del incendio.

La evolución temporal de la causalidad (figura 11) muestra como dato más significativo el incremento que se ha producido en los incendios intencionados, pasando de representar el 31,4 por ciento en los años setenta, al 37,7 por ciento en los ochenta y 50,5 por ciento en los cinco primeros años de la década de los noventa. En contrapartida se observa un mayor rigor a la hora de establecer la causa del incendio, ya que en la década de los noventa los porcentajes del apartado "desconocida" disminuyen sensiblemente.

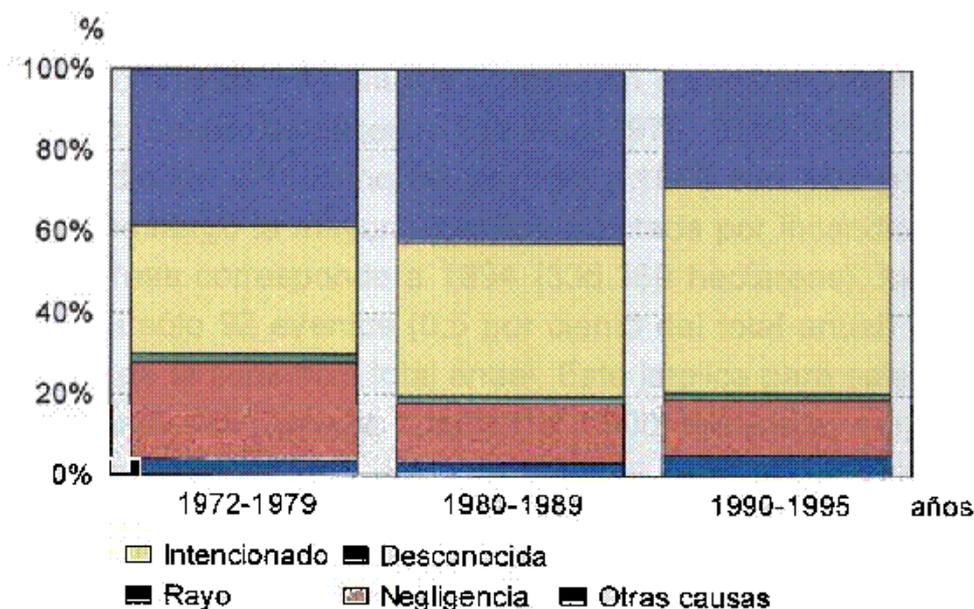


Figura 11. Evolución temporal de la causalidad de los incendios forestales en España (1972-1995)

(Fuente: Anuarios de Estadística Agraria)

3.1.3. Los grandes incendios forestales en España (1970-1995)

A pesar del elevado número de incendios forestales registrados en España en las últimas décadas, sólo un reducido número de estos sucesos son los responsables de las mayores pérdidas. Se trata de los "grandes incendios", entendiéndose como tales aquéllos que afectan a superficies superiores a 500 hectáreas. Éste es el umbral señalado en las estadísti-

cas sobre incendios elaboradas en nuestro país por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Anuarios de Estadística Agraria) y el Instituto Nacional de Estadística (Anuarios), pese a que otras clasificaciones (Vélez Muñoz, 1987) diferencian entre "incendios de gran magnitud", los que afectan entre 500 y 1000 hectáreas, y "grandes incendios" cuando superan las 1000 hectáreas.

La evolución de la frecuencia y magnitud de los grandes incendios en España (figura 12 y tabla 11) durante el periodo 1970-1995 muestra grandes contrastes interanuales. Destacan de manera significativa, por su elevado número de sucesos, los años 1978, 1985, 1986, 1989 y 1994, correspondiendo el máximo del periodo a 1985 con 162 grandes incendios. Sin embargo la mayor superficie afectada por incendios de más de 500 hectáreas corresponde a 1994 (335.360 hectáreas), lo que supone que en tan sólo 92 eventos (0,5 por ciento del total anual) ardió el 76,4 por ciento de la superficie total anual. Esto implica para este año una superficie media por incendio superior a 3.500 hectáreas, muy por encima del resto de la serie.

En el extremo opuesto aparece el año 1971, en el que tan sólo se registraron 8 grandes incendios, que afectaron a un total de 7.138 hectáreas, que representa el 20,4 por ciento de la superficie quemada sobre el total anual. Similares porcentajes presentan los años 1988, 1989 y 1972, que detentan valores de 22,9, 22,4 y 26,7 por ciento respectivamente. En todos los casos la superficie media por incendio fue inferior a 1.000 hectáreas.

En general se observa que un reducido número de grandes incendios forestales, que nunca rebasan el 2 por ciento de los eventos registrados anualmente, afectan por sí solos a más del 20 por ciento de la superficie anual quemada. Sólo en cuatro de los veintiséis años analizados estos incendios suponen entre el 20 y el 25 por ciento del total anual, mientras que en los restantes se supera ampliamente este porcentaje,

hasta el extremo de llegar a representar el 76,4 por ciento en el caso de 1994.

El carácter destructivo de estos grandes incendios queda patente también en los valores de superficie media afectada, que salvo en cuatro ocasiones (1988, 1989, 1971 y 1972) supera las 1.000 hectáreas correspondiendo el máximo a 1994 (3.645 hectáreas).

Tabla 11. Número de incendios mayores de 500 hectáreas y superficies afectadas en España (1970-1995)

AÑO	nº incendios >500 has	% sobre total anual	sup. afectada por incendios >500 has.	% sobre total anual	superficie promedio
1970	31	1,0	32.406,0	37,1	1.045,4
1971	8	0,5	7.138,0	20,4	892,3
1972	17	0,8	15.299,0	26,7	899,9
1973	20	0,5	24.973,0	26,2	1.248,7
1974	45	1,1	46.773,0	33,4	1.039,4
1975	58	1,4	92.413,0	49,3	1.593,3
1976	55	1,2	59.807,0	36,8	1.087,4
1977	16	0,7	24.106,0	35,7	1.506,6
1978	156	1,9	191.142,0	44,0	1.225,3
1979	84	1,2	110.009,0	40,5	1.309,6
1980	77	1,1	106.600,0	40,1	1.384,4
1981	79	0,7	95.775,0	32,1	1.212,3
1982	41	0,6	48.712,0	32,1	1.188,1
1983	32	0,7	50.183,0	42,7	1.568,2
1984	53	0,7	57.181,0	34,7	1.078,9
1985	162	1,3	201.703,0	41,5	1.245,1
1986	104	1,4	148.726,0	53,6	1.430,1
1987	35	0,4	36.563,0	25,1	1.044,7
1988	31	0,3	29.746,0	22,9	959,5
1989	92	0,5	82.987,0	22,4	902,0
1990	56	0,4	66.184,0	32,5	1.181,9
1991	73	0,6	126.180,0	51,5	1.728,5
1992	18	0,1	30.919,0	29,6	1.717,7
1993	26	0,2	44.038,0	49,4	1.693,8
1994	92	0,5	335.360,0	76,4	3.645,2
1995	26	0,1	31.700,0	22,1	1.219,2

Fuente: Anuarios de Estadística Agraria

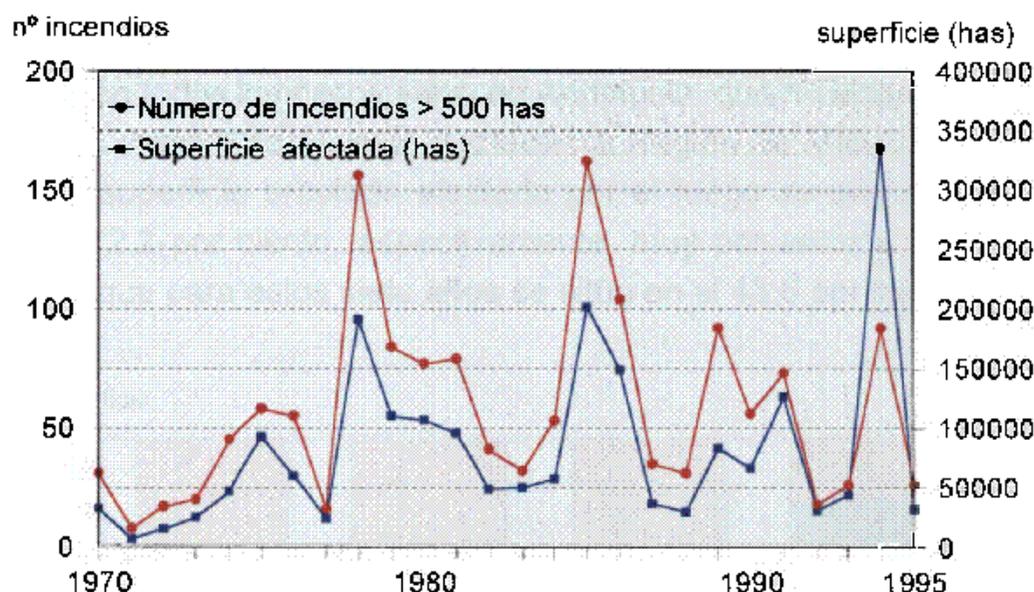


Figura 12. Número de incendios mayores de 500 hectáreas y superficie afectada en España (1970-1995)

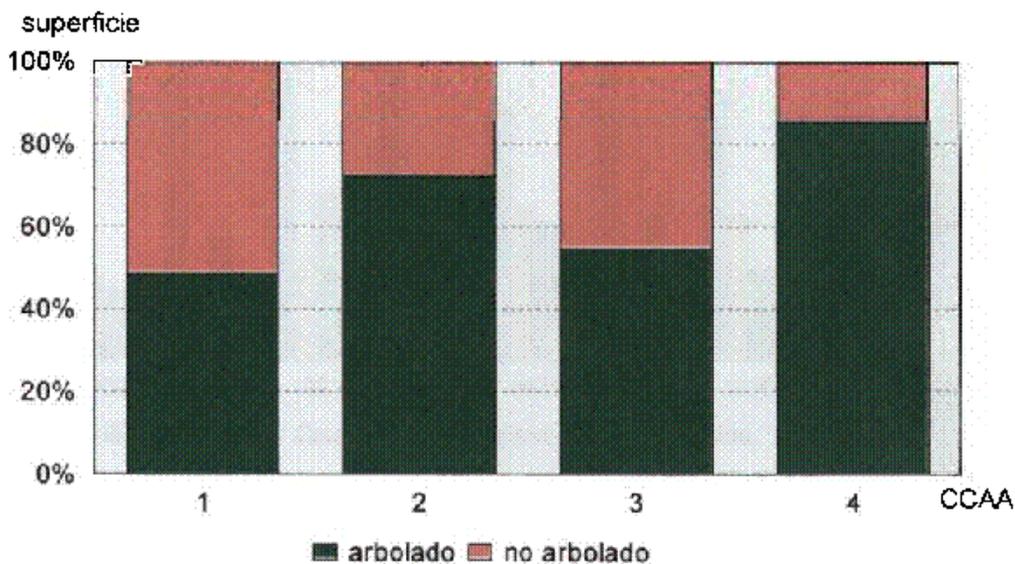
(Fuente: Anuarios de Estadística Agraria)

3.2. Los incendios forestales en la vertiente peninsular mediterránea (1989-1996)

En las páginas precedentes se hace un repaso a la evolución de los incendios forestales en España, considerando de forma conjunta todo el territorio nacional. Sin embargo, la ubicación de la zona de estudio en el Sureste Peninsular justifica un breve análisis de la problemática de estos sucesos en el contexto mediterráneo español.

Se consideran integradas en la vertiente peninsular mediterránea las comunidades autónomas de Andalucía, Región de Murcia, Comunidad Valenciana y Cataluña, prescindiendo de Baleares debido al carácter insular de este territorio. Analizando conjuntamente las cuatro comunidades, en el periodo 1989-1996 se han producido un total de 22.215 incendios forestales, afectando a 586.510 hectáreas, que representan el 16,3 y el 35,5 por ciento del total nacional respectivamente.

La distribución del tipo de superficie afectada por los incendios varía sensiblemente de una región a otra (figura 13), siendo mayor la superficie arbolada en todos los casos salvo en Andalucía, que no alcanza el 50 por ciento. En el extremo opuesto destacan la Región de Murcia y Cataluña, donde la superficie arbolada afectada por el fuego se eleva al 85,5 por ciento y 72,2 por ciento respectivamente, muy por encima de la media nacional, que para estos siete años se sitúa en el 43,6 por ciento.



- 1.- Andalucía 3.- Comunidad Valenciana
2.- Cataluña 4.- Región de Murcia

Figura 13. Tipo de superficie afectada por incendios forestales en la vertiente peninsular mediterránea (1989-1996).

Fuente: Anuarios de Estadística Agraria

La distribución anual del número de incendios por comunidades (figura 14) muestra a Andalucía como la región con mayor número de incendios durante el periodo considerado, con valores extremos de 1.986 sucesos en el año 1991 frente a 673 en 1996, y un media anual superior a 1.435 incendios.

El segundo lugar en el ranking del número de incendios lo ocupa la Comunidad Valenciana, siendo también 1991 el año que registra una

mayor incidencia. La media anual, 617,5 incendios, es inferior a la mitad de la andaluza y ligeramente superior a la de Cataluña, 592. La Región de Murcia es la que registra el menor número de incendios de las cuatro, salvo en 1990 que además de ser el máximo, se sitúa por encima de Cataluña. La media para esta región es de 131 incendios.

nº incendios

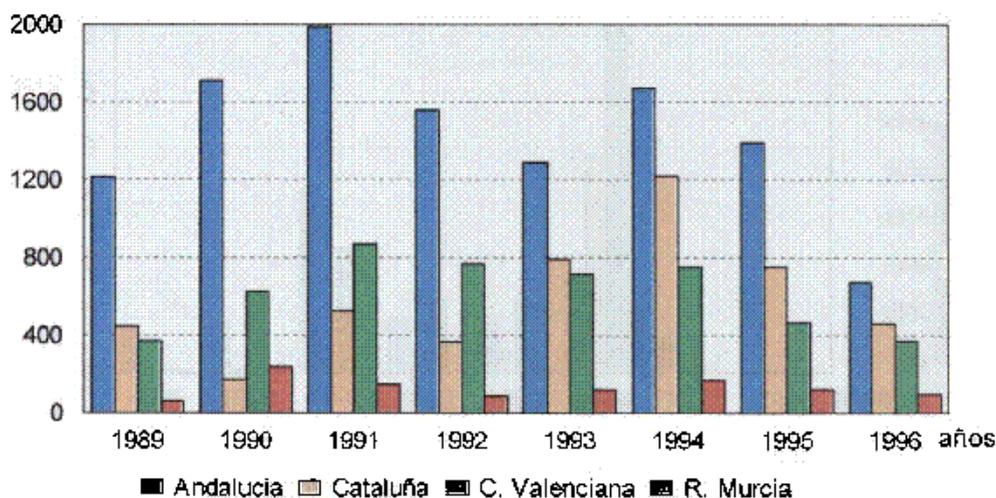


Figura 14. Número de incendios anuales en la vertiente peninsular mediterránea (1989-1996)

Fuente: Anuarios de Estadística Agraria

Esta clasificación varía sustancialmente al considerar la superficie total afectada en cada comunidad autónoma (figura 15). Casi la mitad de toda la superficie quemada en estos ocho años en la vertiente peninsular mediterránea (586.510 hectáreas) pertenece a la Comunidad Valenciana, el 31,6 por ciento a Andalucía, 17,4 por ciento a Cataluña y en torno al 5,5 por ciento a Murcia.

En todas las regiones salvo en Andalucía, donde 1991 es el año con mayor número de incendios y superficie afectada, destaca el año 1994 por la extraordinaria destrucción de masa arbórea. Ese año el fuego se extendió sobre 138.405 hectáreas en la Comunidad Valenciana (51,8 por ciento del área total quemada durante el periodo), 76.625 hectáreas en Cataluña (74,9 por ciento) y 28.837 hectáreas en Murcia (85 por ciento).

La superficie afectada en la vertiente peninsular mediterránea supone el 35,6 por ciento del total nacional en este año, lo que permite considerarlo como el más perjudicial, no sólo de esta región sino de todo el territorio español.

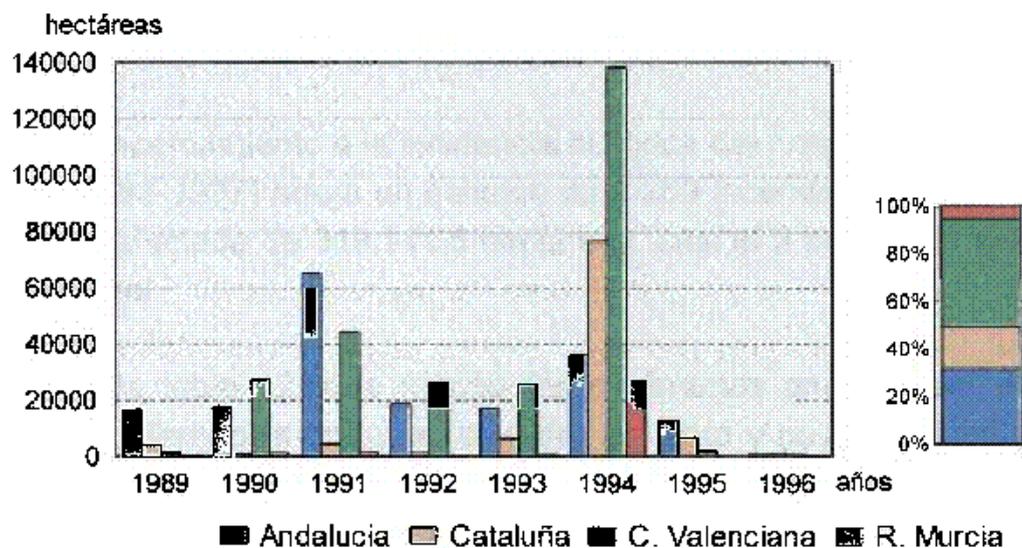


Figura 15. Superficie total afectada por incendios forestales en la vertiente peninsular mediterránea y valores porcentuales para cada comunidad autónoma (1989-1996)

Fuente: Anuarios de Estadística Agraria

Considerando los valores absolutos, la Región de Murcia es la comunidad autónoma de la vertiente mediterránea española que registra menos incendios forestales entre los años 1989-1996, y donde la superficie total quemada es menor. Sin embargo, atendiendo al porcentaje de superficie arbolada afectada por el fuego respecto al total de cada comunidad, presenta los valores más altos de la Península Ibérica (anexo 5).

3.3. Los incendios forestales en la Región de Murcia (1983-1997)

El paisaje de la Región de Murcia incluye una pluralidad de geoambientes dentro del dominio semiárido mediterráneo, cuyas complejas interac-

ciones físicas y humanas lo convierten en un ámbito singular. Su ubicación en el SE peninsular y por tanto, su participación de las características medioambientales que le son propias, elevada evapotranspiración anual, lluvias escasas muy irregulares y torrenciales, veranos cálidos y secos que conducen a situaciones de alto estrés hídrico en la vegetación, hacen de este espacio una zona especialmente sensible a la ocurrencia de incendios forestales.

Un acercamiento a la incidencia histórica del fuego en los últimos 15 años (1983-1997) arroja un balance de 1.289 incendios con una superficie total afectada de 319.111,6 hectáreas, casi el 3 por ciento del territorio regional.

En la tabla 12, que recoge los resúmenes anuales, se observan grandes diferencias entre las décadas ochenta y noventa. Entre 1983 y 1988 apenas si se producen una veintena de incendios cada año. En 1989 esta cifra se eleva a 61 y aumenta considerablemente a partir de 1990. La razón fundamental que explica estos contrastes nada tiene que ver con la variación del número real de sucesos. Estas diferencias son debidas a un mayor rigor en el control de los eventos a partir de 1990, dejando constancia de todos y cada uno de los desplazamientos efectuados por los servicios de extinción de la Comunidad Autónoma.

Esto implica además importantes diferencias respecto a las superficies consideradas. Entre 1983 y 1989 el fuego habría afectado a 542 hectáreas frente a las 31.370 hectáreas del periodo 1990-1997. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en 1994 se produce el incendio mas grave de los ocurridos en la Región de Murcia, al menos desde que existen datos estadísticos (1983). Un total de 29.019 hectáreas, según los datos oficiales, sufren los efectos devastadores del fuego, que entre los días 4 y 8 de julio recorre los municipios de Moratalla, Calasparra y Cieza. Casi el 90 por ciento del territorio afectado, 25.920 hectáreas, corresponde a terrenos forestales. Prescindiendo de este evento tan singular, la superficie quemada en la década de los noventa sería de 5.450

hectáreas en 1.104 sucesos lo que arroja una media de 4,9 por incendio frente a las 2,9 hectáreas de superficie media de los años ochenta.

Tabla 12. Incendios forestales registrados en la Región de Murcia, 1983-1990.

año	número incendios	superficie (hectáreas)	año	número incendios	superficie (hectáreas)
1983	25	95,5	1991	148	1.650,3
1984	24	199,9	1992	88	271,8
1985	19	31,9	1993	120	631,3
1986	13	6,4	1994	171	26.834,6
1987	22	13,9	1995	122	74,7
1988	20	7,9	1996	99	329,2
1989	61	186,4	1997	118	81,6
1990	239	1.496,2			
Totales		1.289 incendios			319.116,6 hectáreas

Fuente: Resúmenes anuales. Partes de Incendios, Comunidad Autónoma de Murcia.

En conjunto, el porcentaje de superficie arbolada afectada por el fuego (84,9 por ciento del total) supera ampliamente a las zonas no arboladas (15,1 por ciento), aunque existen variaciones de unos años a otros, como se muestra en la figura 16.

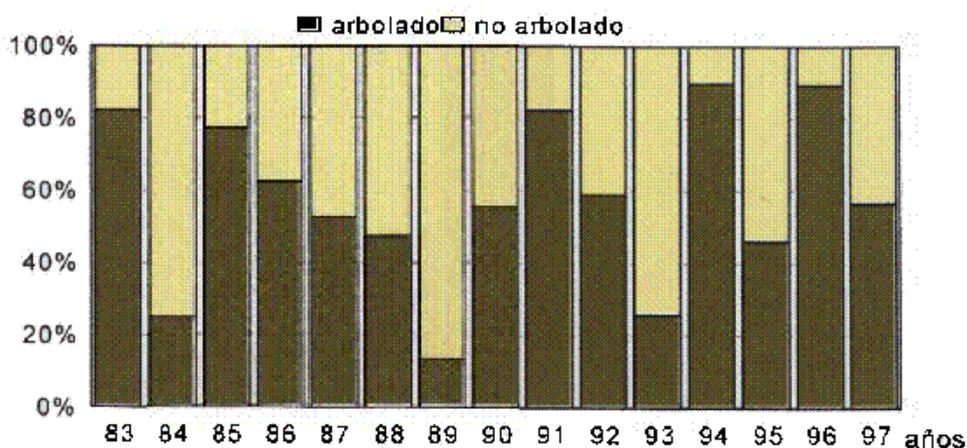


Figura 16. Tipo de superficie afectada por los incendios forestales en la Región de Murcia (1983-1997).

Fuente: Partes de Incendios forestales.

En ella se observa un marcado contraste entre los años 1984, 1989 y 1993, en los que el fuego se extendió mayoritariamente sobre zonas no arboladas, y el resto de la serie, donde resultaron afectadas las zonas arbóreas. En 1994 y 1996 la superficie arbolada devastada por el fuego alcanzó una extensión desproporcionada llegando a superar el 90 por ciento del área anual quemada. El mismo comportamiento con valores próximos, aunque ligeramente inferiores, presentan los años 1983, 1985 y 1991.

La distribución mensual del número de incendios presenta una clara dicotomía entre el periodo estival (junio, julio, agosto y septiembre), y el resto del año. En estos cuatro meses se producen más del 75 por ciento de los incendios anuales, alcanzándose el máximo en agosto (figura 17). Durante el verano la vegetación está sometida a condiciones de riguroso estrés hídrico y las temperaturas llegan incluso a superar los 40°C en algunas zonas de la Región. Las precipitaciones, escasas a lo largo del año (300-320 mm en gran número de estaciones) son mucho más exiguas y a veces inexistentes en la época estival.

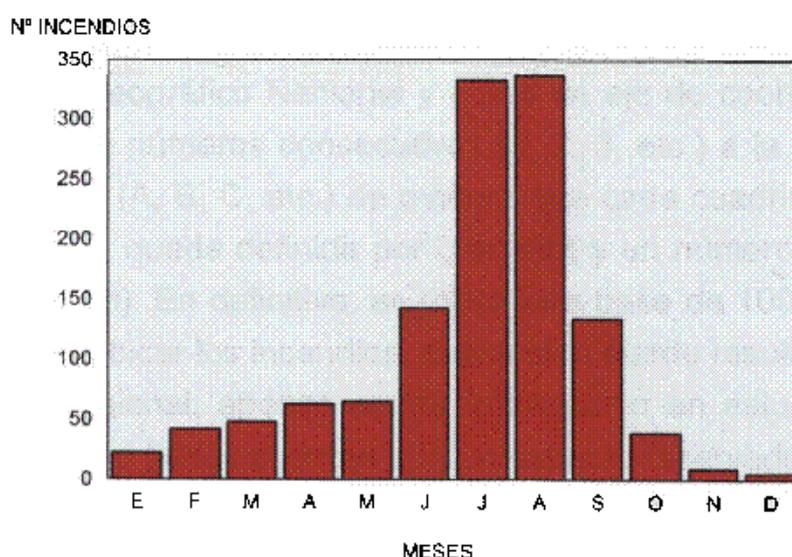


Figura 17. Distribución mensual del número de incendios forestales en la Región de Murcia (1985-1997)

Fuente: Resúmenes mensuales. Partes de Incendios, Comunidad Autónoma de Murcia.

Es el periodo de mayor riesgo durante el cual deben extremarse las precauciones. Además, una vez comenzado el incendio, las posibilidades de propagación se incrementan al disminuir la humedad ambiental. Las altas temperaturas favorecen la desecación del combustible haciéndolo más fácilmente inflamable.

En la lucha contra los incendios resulta especialmente interesante analizar las causas que los producen. Para ello se utilizan los datos procedentes de los "Partes de Incendios" elaborados por el Servicio de Protección contra Incendios de la Región de Murcia, con los que se confeccionan las estadísticas oficiales. Los agentes forestales son los encargados de cumplimentar estas fichas-modelo (figura 18), donde se recogen diversas características referidas a cada uno de los sucesos, tales como su localización espacial y temporal, causas, superficie afectada, medios empleados en su control y extinción, etc.

Estos documentos, que constituyen la principal fuente de información sobre los incendios, son de vital importancia para su estudio, aunque adolecen de una serie de deficiencias que limitan en gran medida su utilidad. La más importante es el método empleado para la localización espacial de los eventos. Se utiliza un mapa base escala 1/200.000 del Servicio Geográfico Nacional y sobre un eje de coordenadas imaginario se asignan números consecutivos (1, 2, 3, etc.) a la coordenada X y letras a la Y (A, B, C, etc.) de manera que cada cuadrícula UTM de 10x10 kilómetros, queda definida por una letra y un número (1A, 1B, 1C..., 2A, 2B, 2C, etc). En definitiva, se utiliza una base de 100 kilómetros cuadrados para ubicar los incendios, que si bien puede resultar útil para trabajos a nivel regional, apenas aporta información en estudios de detalle. No obstante las fichas cuentan con un espacio reservado para el croquis de situación, aunque, como ha podido constatar durante la realización de este trabajo, generalmente no se cumplimenta. De los 920 partes consultados, sólo en dos de ellos se había realizado este esquema.

Estas deficiencias se encuentran parcialmente compensadas con los datos sobre el nombre del monte o del paraje, así como el apartado 3.2: "iniciado junto a", que hace referencia a la ubicación del incendio. Aunque diferencia entre carretera, senda, casa, lugares con afluencia de excursionistas y otros lugares en el monte, no deja de ser una información poco precisa. Más de la mitad de los eventos (figura 19) empezarían en lugares indeterminados del monte y sólo serían localizables mediante un reconocimiento "in situ" del terreno, siempre y cuando aún permanezcan sus huellas en el paisaje, o bien por medio de la información que puedan aportar los pobladores de la zona.

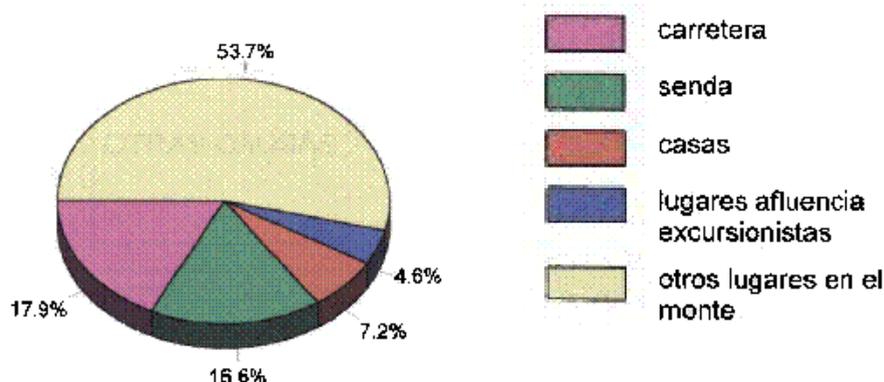


Figura 19. Porcentajes representados por el tipo de localización en el inicio de los incendios forestales (Región de Murcia, 1985-1997)

Fuente: Partes de Incendios Comunidad Autónoma de Murcia (1985-1997)

Los incendios que comienzan en lugares próximos a vías de comunicación, carreteras o sendas, superan el 34 por ciento, siendo un factor indicativo de la influencia antrópica.

Las fichas recogen también la distribución de incendios según la causa de origen (tabla 13). Establece una tipología que implícitamente diferencia entre causas naturales (rayo) y antrópicas, que serían todas las demás a excepción de las incluidas en el último epígrafe "desconocida". La inclusión del apartado "intencionado" implica la necesidad de considerar también la influencia de aspectos de índole social, económica

y política, que nada tienen que ver con las condiciones naturales de la zona. La figura 20 muestra en porcentajes las causas de los incendios en la Región de Murcia.

Tabla 13. Tipología de causas de los incendios forestales

NATURALES	Rayo
NEGLIGENCIAS	Quema agrícola Quema pastos Trabajos forestales Hogueras Fumadores Quema basuras Otras negligencias
OTRAS CAUSAS	Ferrocarril Líneas eléctricas Motores y máquinas Maniobras militares
INTENCIONADO	
DESCONOCIDA	

Fuente: Parte de incendio forestal (ICONA, 1982).

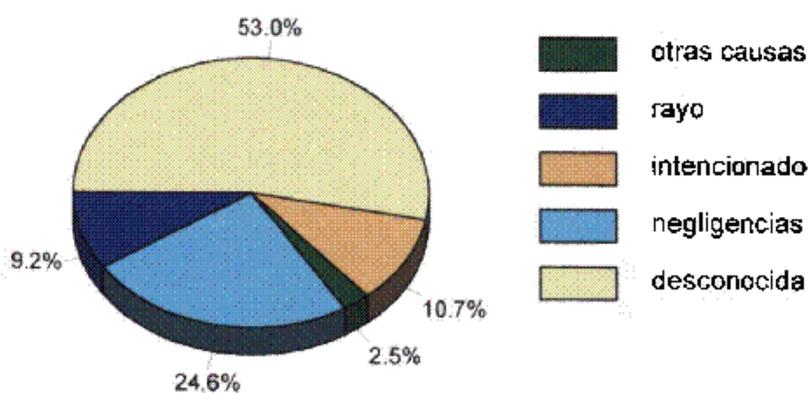


Figura 20. Distribución porcentual de la causalidad de los incendios forestales en la Región de Murcia (1985-1997)

Fuente: Partes de Incendios, Comunidad Autónoma de Murcia, 1985-1997.

Es importante destacar que la mayor parte de los incendios carece de catalogación exacta. Se atribuye más del 50 por ciento a causas desconocidas y la influencia humana está presente en más del 35 por ciento de los casos, ya sea a través de una acción directa (el 10,7 por ciento son intencionados) o indirecta, (el 27,1 por ciento se deben a negligencias y otras causas como maniobras militares, líneas eléctricas, etc.). Tan sólo el 9,2 por ciento se producen de forma natural y son debidos a la caída de rayos.

4. METODOLOGÍA

4.1. Introducción

La diversidad de factores que intervienen en el inicio y posterior desarrollo de un incendio forestal requiere la adopción de una metodología integrada, basada en la aplicación de diferentes índices y modelos. Cada una de estas variables se analiza y procesa en función de la naturaleza de los datos, para generar una serie de capas temáticas que se incorporan al SIG. Esta cartografía digital, convenientemente georeferenciada, informa acerca de las variables iniciales y deducidas y su distribución espacial sobre el territorio, posibilitando el establecimiento de relaciones topológicas o de vecindad entre ellas (Fedra, 1993). La integración de estas capas, a través de modelos distribuidos y la aplicación de índices específicos, dará como resultado la zonación del riesgo. También se desarrollan simulaciones del comportamiento del fuego, aplicando un software diseñado para conocer la evolución del incendio sobre un "escenario digital" que reproduce las características del terreno. Por último se analiza la utilidad de imágenes procedentes de sensores remotos en la localización de zonas afectadas por el fuego.

4.2. Tratamiento de variables mediambientales a través de SIG

4.2.1. Variables topográficas

El relieve, como elemento estructurador del paisaje, influye de manera decisiva en los incendios. Además de condicionar la distribución de pendientes y orientaciones, incide sobre las variables meteorológicas, afectando sobre todo a las temperaturas, precipitaciones, vientos y humedad.

- Elaboración del Modelo Digital del Terreno (MDT)

Un Modelo Digital del Terreno (MDT) es una representación de las alturas existentes en el territorio, en formato digital, adecuado a su tratamiento con el ordenador (Bosque Sendra, 1997). Es una capa básica

ya que a partir de ella, y mediante la aplicación de diversos algoritmos, pueden obtenerse los componentes básicos de la topografía de la zona.

Para generar el MDT se utilizan las hojas 932-II, 932-IV, 933-I, 933-II, 953-II y 954-I, correspondientes al Mapa Topográfico Nacional escala 1/25.000 del Instituto Geográfico Nacional. La entrada de datos se efectúa mediante tableta digitalizadora, en formato A3 (Calcomp Drawing Board II) utilizando un programa de entorno CAD (AUTOCAD V.12 para MS-DOS). Cada curva de nivel con equidistancia de 10 metros y los puntos de cota se digitalizan como entidades independientes, asignando en cada caso el valor altitudinal correspondiente. Se emplea el método de punto a punto, con una equidistancia media de 2 milímetros entre dos vértices consecutivos de una misma polilínea, resultando mucho más laborioso pero también más preciso que el modo continuo o automático. Las cotas, que aparecen señaladas como tales en mapa topográfico se digitalizan como polilíneas cerradas de radio muy pequeño, para así evitar posibles distorsiones por el efecto "estrella" (Salas Rey, 1994) a la hora de rasterizar los ficheros.

Éste es un proceso muy tedioso y requiere la dedicación de un gran número de horas de trabajo, pues al tratarse de un terreno de montaña el número de curvas presentes en el mapa base es muy elevado. No obstante es el método más aceptado para producir un MDT de calidad.

La utilización de IDRISI para obtener la imagen *raster* del MDT requiere una adecuación previa del fichero de curvas de nivel de AUTOCAD. Aunque el software americano dispone de un paquete específico para el intercambio de ficheros entre ambos programas (*Acdtoidr*) se opta por exportar el fichero de entorno CAD con formato DXF y procesarlo con una aplicación de QBASIC creada específicamente para convertir este tipo de ficheros vectoriales, de estructura interna compleja, en otros más sencillos, de extensión VEC, donde cada isolínea está definida por su correspondiente altitud, número de puntos que la forman y coordenadas X e Y de cada uno de los vértices que la integran.

IDRISI es capaz de interpretar este nuevo formato vectorial y crear, aplicando diversas órdenes (*initial*, *lineras*) incluidas en el módulo de entrada de datos (Data Entry), una serie de imágenes necesarias para obtener el MDT. El comando *intercon*, perteneciente a este mismo módulo, realiza la interpolación espacial a partir de una imagen *raster* de las curvas de nivel. Para cada píxel del mapa de salida se busca la línea de máxima pendiente que une las dos curvas de nivel contiguas al píxel (Ronald, 1992, 1996).

Para que esta operación se realice correctamente es necesario tener la precaución de prolongar la digitalización de las curvas de nivel más allá de los límites establecidos para la zona de estudio. IDRISI trabaja con matrices regulares de números y en las zonas de borde aparecen distorsiones que es preciso eliminar mediante una sencilla operación de recorte.

La utilización del proceso de rasterización de IDRISI para generar los MDT ha sido criticada debido a los problemas que se plantean, derivados del funcionamiento interno del programa: por un lado, si dos curvas de nivel están muy separadas pueden aparecer áreas sin interpolar, y por otro, pueden producirse efectos de "falsa meseta" y efectos "estrella" allí donde la ausencia de puntos de cota o la excesiva separación entre el punto culminante de un relieve y la última curva de nivel representada condicione la asignación a la cumbre del relieve del valor de la curva de nivel digitalizada. En ambos casos juega un papel esencial el tamaño que se asigna al píxel, es decir, la resolución de la imagen.

En la elaboración del MDT de Sierra Espuña la posibilidad de encontrar zonas donde no se realice la interpolación es muy pequeña, debido al método de digitalización empleado, la resolución adoptada y la proximidad y elevado número de curvas de nivel del mapa base.

Por tanto, aunque no se esperaba la presencia de "huecos", para comprobarlo se procesa el MDT con una aplicación de QBASIC desarro-

llada de forma específica para detectar este efecto, confirmando que no existe este tipo de problemas.

Una vez "chequeado" el MDT suelen aplicarse filtros para suavizar las angulosidades resultantes de la interpolación lineal. El filtrado de imágenes consiste en aplicar un operador de vecindad a cada píxel de la imagen, modificándolo en función del valor de sus ocho píxeles vecinos y del suyo propio. La orden *filter* del módulo de procesamiento de imágenes (Image Processing) de IDRISI ofrece la posibilidad de usar filtros predefinidos o bien utilizar una matriz establecida por el usuario. Así por ejemplo, la aplicación de una matriz de tres por tres píxeles promedia el valor del píxel central en función de los valores circundantes, asignándole a éste el valor medio.

En definitiva el filtrado modifica el valor real de los píxeles de la imagen asignándoles un valor promedio por lo que, en el caso del modelo digital, es preferible utilizarlo con posterioridad a la obtención de la cartografía básica derivada del mismo: altitudes, pendientes, orientaciones, evitando así distorsiones en la imagen original. En muchas ocasiones el filtrado se utiliza únicamente para mejorar la calidad de los resultados impresos.

La última etapa consiste en "recortar" la imagen procedente del filtrado, excluyendo los sectores que quedan fuera del área de estudio. Para ello, además de las curvas de nivel, se digitalizan los límites de la zona, situando esta información, bien en un fichero independiente o bien en una capa distinta dentro del mismo, lo que permite una mayor precisión al ser posible visualizar conjuntamente el total de la información. Aunque se introduce como una polilínea, siguiendo el mismo procedimiento de punto a punto, recibe un tratamiento diferenciado. Constituye un polígono cerrado al que se le asigna una etiqueta identificativa, mediante la definición de un nodo interior, por medio de la cual se asocia una base de datos referente a las características del polígono. Esta capa de AUTOCAD se exporta como un fichero de formato DXF y se procesa con el programa ARC/INFO, creando una imagen booleana donde los píxeles incluidos

en el área de estudio toman valor 1, asignado a su etiqueta, frente a los sectores adyacentes a los que se les asigna el valor 0.

Aunque no existe conexión directa entre imágenes *raster* generadas con ARC/INFO e IDRISI, el módulo de intercambio de ficheros de este software permite exportar en formato ERDAS de 8 bits, que IDRISI recupera manteniendo todas sus características. Únicamente será preciso introducir las coordenadas UTM correctas, proceso que se realiza manualmente accediendo al fichero de documentación (orden *document*). Con este proceso se dispondrá de una imagen *raster* de los límites, imprescindible para eliminar los sectores circundantes del área de estudio.

La orden *overlay* del módulo de álgebra de mapas de IDRISI (Map Algebra) permite superponer y realizar operaciones matemáticas entre dos imágenes de forma que el resultado es un nuevo fichero *raster*, donde el valor de los píxeles viene definido por la relación establecida entre los valores de los píxeles de entrada. Multiplicando la imagen booleana de los límites y el resultado de la rasterización, una vez filtrado, se obtiene el MDT definitivo, donde cada píxel del interior de la zona de estudio mantiene su valor original, ya que se multiplica por la unidad, al tiempo que se eliminan los sectores circundantes que pasan a detentar el valor 0.

- Cartografía de altitudes.

A partir de la imagen original del modelo digital, sin recortar ni filtrar, donde cada píxel de 15 x 15 metros tiene el valor altitudinal asignado en la interpolación, se obtiene el mapa de altitudes. El procedimiento se basa en la orden *reclass* de IDRISI que permite, partiendo de una imagen con valores numéricos de cualquier tipo (discretos o continuos), modificar el valor temático de un píxel o conjunto de píxeles, generando una nueva imagen.

En la reclasificación se agrupan los posibles valores de altitud en 15 rangos de 100 en 100 metros, adaptando los extremos al máximo y mínimo local de Sierra Espuña. Con el fin de dotar de mayor claridad el

mapa resultante, de forma que a simple vista se aprecie la configuración topográfica de la zona, se definen intervalos de 200 en 200 metros, reduciendo a 8 el número de tramas o tonos de color imprescindibles para su representación gráfica.

Una vez filtrada y recortada la imagen, se exporta con formato TIF al software ARC/VIEW GIS 3.2 (Esri, 1999) donde se realiza la composición definitiva, insertando la escala y leyenda correspondientes y aplicando la paleta de colores más adecuada a la variable que se está representando. Este proceso para la edición de la imagen final se aplica a todas las figuras derivadas de IDRISI ya que su módulo de impresión adolece de importantes deficiencias que impiden obtener resultados de calidad.

- Cartografía de pendientes y orientaciones.

Mediante la orden *surface*, incluida en el módulo Context Operators de IDRISI, se pueden obtener las pendientes (*slope*), orientaciones (*aspect*) o ambas a la vez, de forma automática, a partir del Modelo Digital del Terreno.

La pendiente se define como la medida del desnivel entre dos puntos, es decir, la diferencia de altura existente entre ellos en relación a la distancia que los separa. Los resultados suelen expresarse en grados o porcentajes, dependiendo del método empleado para su determinación.

En un MDT "*raster*" donde cada píxel está rodeado de otros ocho es difícil establecer con claridad la pendiente del punto central, ya que puede adoptar ocho valores distintos. El problema se resuelve mediante la obtención del plano tangente a la superficie en ese punto. Los elementos que caracterizan a este plano son la máxima inclinación respecto al plano horizontal, gradiente, y la orientación o dirección geográfica de una línea perpendicular a las isolíneas de altura. Para cada punto central se obtendrán las pendientes de sus ocho o cuatro vecinos (Bosque Sendra, 1997). Este mismo autor plantea diversas soluciones para determinar cuál de las ocho o cuatro pendientes que se pueden calcular para cada

punto del mapa de alturas es la que define su pendiente verdadera. Entre las distintas opciones que plantea, una de las posibilidades que apunta como más adecuada es la asignación, al punto central, del máximo valor obtenido para los cuatro píxeles vecinos (norte, sur, este y oeste).

Este procedimiento, denominado "*Rook's case*", es el que utiliza internamente *surface* para representar las pendientes de un territorio a partir del MDT, y es el que se aplica a la imagen de Sierra Espuña para generar el mapa correspondiente, expresando los resultados en porcentajes. El amplio rango de valores obtenido para el conjunto de píxeles que componen la imagen se analiza mediante un histograma de frecuencias, determinando el número y amplitud de los intervalos a representar. Superadas las fases de reclasificación, filtrado y recorte, se compone el mapa temático de esta variable.

La orientación de un lugar se define como el azimut hacia el que mira el plano tangente (o plano de máxima pendiente) en ese punto del mapa. Puede expresarse de forma cuantitativa, en grados respecto al norte, o en valores cualitativos, en cuyo caso existen nueve posibilidades: norte, sur, este, oeste, noreste, sureste, suroeste, noroeste y plano. Esta última opción supone una orientación "hacia arriba" del plano tangente, es decir, un valor cero de pendiente, indicativo de la inexistencia de inclinación.

El método de cálculo más generalizado en los SIG's de formato *raster* es el mismo que para las pendientes. Partiendo del modelo digital del terreno, el comando *aspect* determina la orientación del plano de pendiente en cada píxel central o de referencia, haciendo intervenir a los cuatro más inmediatos situados arriba, abajo, a su izquierda y a su derecha.

El fichero se procesa siguiendo las pautas señaladas anteriormente y los resultados, que recogen el valor en grados para cada píxel, se transforman mediante reclasificación en su equivalencia cualitativa res-

pecto a los puntos cardinales según la correspondencia establecida en la tabla 14.

Tabla 14. Intervalos de grados de azimut correspondientes a las categorías de orientación.

valores cuantitativos (grados)	valores cualitativos (puntos cardinales)
0-22,5	Norte
22,5-67,5	Noreste
67,5-112,5	Este
112,5-157,5	Sureste
157,5-202,5	Sur
202,5-247,5	Suroeste
247,5-292,5	Oeste
292,5-337,5	Noroeste
337,5-360,0	Norte
-1	Zonas llanas

4.2.2. Variables climáticas

- Consideraciones previas.

La descripción de los rasgos climáticos dominantes en un área plantea una serie de dificultades derivadas, por un lado, de la naturaleza misma de los datos, ya que son valores puntuales referidos al lugar concreto donde se encuentra ubicado el observatorio, por lo que será necesario utilizar métodos indirectos para hacer extensivos estos datos a la totalidad del territorio. Por otro, la heterogeneidad temporal de las series disponibles debido a la ausencia de información en algunas de las estaciones meteorológicas, implica la adecuación previa a un período común para el que se realiza la estimación de datos puntuales no registrados.

En el análisis climático de Sierra Espuña y su entorno se consideran un total de doce observatorios, ubicados tanto en el interior como en las proximidades del área de estudio. Los registros térmicos y pluviométricos disponibles, en la mayoría de ellos, para el periodo 1968-1997, han sido facilitados por el Centro Meteorológico Territorial de Murcia.

La secuencia temporal recomendada por la Organización Meteorológica Mundial para caracterizar un territorio desde el punto de vista climático es de treinta años. La distinta puesta en servicio de los observatorios, el cierre de alguno de ellos e incluso la ausencia de registros en años concretos, por pérdida parcial de información, abandono temporal, etc., hace necesario un tratamiento previo de adecuación. Se consideran los años 1968-1997 como periodo de análisis, y se procesan las series disponibles de medidas directas para completar las lagunas existentes en cada observatorio.

Entre los métodos propuestos para el relleno de series térmicas y pluviométricas, uno de los más comúnmente utilizados es el establecimiento de una matriz de correlación. El método se basa en la obtención del coeficiente de correlación entre los datos disponibles en cada observatorio a completar (dependiente) y los correspondientes al mismo periodo en la estación considerada como "base", que cuenta con la serie completa (independiente). Esta selección se realiza siguiendo criterios de proximidad, altitud similar y buena correlación entre los registros de años comunes disponibles.

El relleno de "lagunas" se efectúa a partir de valores medios mensuales y se obtiene una recta de ajuste entre cada par de conjuntos de datos, cuya aplicación permite reconstruir las series incompletas. Pese a que en todos los casos los coeficientes de correlación resultantes son muy buenos, entre 0,96 y 0,99, hay que tener en cuenta que se trata de valores deducidos, siempre susceptibles de variación respecto a los reales, por lo que así se hace constar en aquellas estaciones meteorológicas que han sido completadas utilizando este procedimiento.

Para solventar el problema de la dispersión espacial de los observatorios se han propuesto diferentes técnicas, basadas, sobre todo, en criterios de interpolación, cuyo objetivo es estimar el valor de una variable en una determinada posición espacial (punto no muestral), a partir de valores conocidos de esa variable en otras posiciones (puntos muestrales). Los registros pluviométricos están influidos tanto por factores regio-

nales, proximidad o lejanía al mar y situación latitudinal de los observatorios, como por otros de carácter local, donde ejerce un papel fundamental la topografía. El conocido aumento de las precipitaciones con la altitud confieren a este factor una significación especial en áreas de montaña, haciendo que diversas propuestas contemplen únicamente estas dos variables para estimar las lluvias en puntos no muestrales del territorio

En general pueden diferenciarse dos conjuntos de métodos: por un lado, aquéllos que estiman el valor en el punto no muestral a partir de la distancia respecto a los puntos muestrales, agrupados genéricamente bajo la denominación de interpolación espacial (polígonos de Thiessen, medias móviles con ponderación de la distancia o "krigeage"). Y por otro, la interpolación por funciones de regresión, que considera otros factores como latitud, longitud, pendiente y altitud y su influencia sobre las variables climáticas. En esta línea se encuentran las regresiones lineales, simples o múltiples, ajustes por funciones polinómicas y análisis de componentes principales.

Los buenos ajustes obtenidos, especialmente en áreas homogéneas, y su relativa sencillez de cálculo, han consolidado a las rectas de regresión lineal como uno de los métodos más utilizados en la estimación de datos climáticos.

- Precipitaciones

La distribución espacial de las precipitaciones en Sierra Espuña se analiza mediante el establecimiento de una regresión lineal múltiple, incluyendo como variables independientes la longitud y latitud (expresadas en coordenadas UTM), que ponderan la influencia de la ubicación espacial de los enclaves, y la altitud (en metros) que representa los condicionamientos locales. Se prescinde de la pendiente, ya que apenas aporta información debido a la fuerte correlación que tiene con la altitud ($r=0,9$) cuyo sentido físico y espacial es más representativo. La variable dependiente en la ecuación de regresión es la precipitación anual. Los ajustes se realizan por el método *Stepwise Forward* utilizando el paquete esta-

dístico SX V-4.0, que ofrece información sobre el nivel de significación de los parámetros, siendo posible seleccionar la recta que presenta un mejor ajuste. En ocasiones el orden de introducción de las variables en el modelo puede suponer variaciones en los resultados, pero ello no influye en este caso concreto, ya que el ajuste es el mismo independientemente de la secuencia de entrada.

Una vez conocida la recta de ajuste, $y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3$, donde x_1 es la altitud, x_2 la longitud y x_3 la latitud del observatorio, y a , b , c y d constantes, se elabora el mapa de isoyetas anuales de la zona de estudio, siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

En primer lugar es necesario disponer de tres imágenes independientes: el modelo digital del terreno, donde el valor de cada píxel, su altitud (x_1) se multiplica por la constante correspondiente (b), utilizando la orden *scalar* (incluida en el módulo de álgebra de mapas de IDRISI), y otros dos ficheros del mismo tamaño y características donde cada píxel, en lugar de la altitud detente su valor longitudinal (x_2), y latitudinal (x_3), cada uno de los cuales se multiplicará por su correspondiente constante (c y d).

Puesto que se cuenta con el MDT será preciso únicamente crear las imágenes de longitudes y latitudes. Éstas pueden generarse con otros programas como SURFER, que a partir de dos coordenadas extremas permite definir una malla en la que los nodos presentan un valor y espaciamiento determinado, o bien, mediante comandos del propio IDRISI. Se opta por la última opción evitando la importación de ficheros cuyo formato (*.GRD) requiere una adecuación previa para su incorporación a IDRISI.

El procedimiento es sencillo: se genera una imagen nueva (*document, initial*), con las mismas coordenadas, resolución y número de filas y columnas que el MDT de la zona de estudio, actualizando la primera y última columna con los valores de la coordenada "x" mínima y máxima, en el caso de la longitud (ya que aumenta de este a oeste), y la primera y última fila con los valores de "y" máxima y mínima, para la latitud, que

decrece de norte a sur. Ambos harán referencia al punto central del píxel, lo que deberá ser tenido en cuenta para definir correctamente la resolución de la imagen. A continuación, aplicando a cada imagen la orden *trend*, del módulo estadístico (Statistical/Time Series Analysis), se obtendrán dos nuevas imágenes en cada una de las cuales el valor de los píxeles representa la longitud y latitud respectivamente, correspondientes al punto central de los mismos.

Por otra parte, la orden *scalar* permite realizar operaciones matemáticas básicas (suma, resta, multiplicación, división y exponencial) entre una constante y los valores de los píxeles que componen una imagen. La aplicación de estas técnicas, combinadas con las de superposición (*overlay*) para operaciones entre ficheros *raster*, dan como resultado una nueva imagen en la que se recoge la distribución espacial de las precipitaciones sobre el territorio. Después de la reclasificación y recorte correspondiente, se confecciona el mapa de isoyetas anuales.

- Temperaturas.

El método empleado en la elaboración del mapa de isotermas medias anuales es el mismo que para las precipitaciones. Como variables independientes se contemplan la altitud, longitud y latitud aplicando la función de regresión múltiple, cuyos resultados confirman la estrecha relación entre las temperaturas y la altitud propia de sectores montañosos. La escasa significación de las otras variables, que son excluidas, puede deberse a la reducida extensión del área considerada.

En la aproximación a las características térmicas de la zona se analizan también los registros extremos, en aquellos observatorios que poseen medidas directas, cartografiando su distribución sobre el territorio con el mismo procedimiento empleado para los valores medios mensuales. También se estudia la autocorrelación temporal que presentan las temperaturas máximas absolutas como aproximación al comportamiento de los registros térmicos de la zona en los últimos treinta años y su relación con la ocurrencia de incendios forestales.

- Vientos

La escasez de datos disponibles y la estrecha relación del viento con factores locales, especialmente la topografía, constituyen las dificultades más importantes para valorar sus características en cada uno de los píxeles que componen la imagen *raster* del área de estudio.

De ahí que las últimas propuestas relacionadas con la simulación y combate de incendios forestales (Saura *et al.*, 1999) se inclinen por considerar la velocidad y dirección del viento general de la zona. No obstante es aconsejable realizar mediciones sobre el terreno, en el momento de producirse el incendio, para establecer hipótesis sobre el comportamiento más previsible del fuego, de forma que pueda contribuirse de la manera más eficaz a su control.

En el caso de Sierra Espuña todos los observatorios considerados son termopluviométricos, excepto Pliego que sólo registra precipitaciones. Para solventar este problema se analizan las series de las dos estaciones más cercanas que poseen este tipo de registros: Alcantarilla (UTM 655527,4202678) y Lorca Cerealicultura (UTM 615610,4168229). La información de partida, proporcionada por el Centro Meteorológico Territorial de Murcia, está referida a la frecuencia y recorrido del viento. El primero cuenta con una serie bastante completa, 1968-1997, mientras que en Lorca Cerealicultura sólo se dispone de los últimos ocho años (1990-1997). Mediante análisis estadístico se deduce la velocidad media anual y mensual para el mes de mayor riesgo de incendios de la zona de estudio, agosto, y la dirección predominante en ambos casos.

- Humedad relativa del aire.

Dadas las características de los observatorios meteorológicos del área de estudio, ninguno de ellos posee registros de humedad relativa del aire. El más cercano y con una serie lo suficientemente larga para ser representativa (1968-1997) es Alcantarilla (UTM 655527,4202678). Las diferencias de ubicación y altitud, Alcantarilla está a tan sólo 89 metros so-

bre el nivel del mar, hacen que estos valores sean inferiores a los que podrían medirse en Sierra Espuña, donde la cubierta vegetal y altitud condicionan un aumento de la humedad. La extrapolación de este dato al ámbito de estudio se justifica por el hecho de que, en cualquier caso, significa la imposición de condiciones aún más estrictas de las que realmente cabe esperar.

A partir de esta información, y teniendo en cuenta los registros térmicos, se obtiene la humedad básica del combustible mediante una serie de tablas creadas por ICONA para sustituir a la tediosa labor de recogida de muestras y comparación de pesos antes y después de someterlas al secado en estufa. Este procedimiento se detalla al exponer el desarrollo del modelo de riesgo bajo unas condiciones meteorológicas particulares.

- Indicadores bioclimáticos

La ocurrencia de heladas, detectable mediante el análisis de las temperaturas mínimas extremas, constituye un buen indicador del termoclima de un territorio. Se consideran meses de helada probable aquéllos cuya temperatura media de mínimas es mayor de 0°C, siempre que las mínimas absolutas estén por debajo de este valor. Si la media de las mínimas es menor de 0°C se entiende que la helada es segura. El espacio comprendido entre ambos representa la duración del periodo vegetativo.

A partir de estos datos se obtiene el índice de termicidad, según la propuesta de Rivas Martínez (1987, 1990, 1993). Este autor parte de la influencia de las temperaturas medias anuales (T) sobre la vegetación, corregidas por la inclusión de la media de las máximas (M) y de las mínimas (m) del mes mas frío, que en el caso del área de estudio es enero. En función de los resultados de $It = (T+M+m) \times 10$, establece una serie de umbrales para los pisos bioclimáticos, definidos como el espacio comprendido entre unas altitudes y caracterizado por unos parámetros climáticos determinados que constituye el hábitat de una determinada combinación de especies y comunidades vegetales que le son propios (pisos de vegetación).

El estudio se completa con la elaboración de las fichas hídricas correspondientes a las estaciones con registros termo-pluviométricos y la confección de los diagramas ombrotérmicos más representativos mediante las posibilidades gráficas del programa Bioclima V. 1.0 (Alcaráz Ariza, 1993). Este software se utiliza también para el cálculo de la evapotranspiración potencial (*ETP*) y evapotranspiración real (*ETR*) por el método de Thornthwaite (1948, 1951), información que resulta esencial para determinar las disponibilidades hídricas mensuales que, aplicando el criterio de Lautensach y Mayer (1960), permite definir meses húmedos ($ETP-ETR < 0$), intermedios ($ETP-ETR$ entre 0 y 25 mm) o secos ($ETP-ETR > 25mm$).

La representación del clima mediante diagramas ofrece una visión de conjunto de sus características, permitiendo una comparación rápida entre observatorios. La mayoría de estos gráficos representan valores de precipitación (*P*) y temperatura (*T*) trazando ambas curvas con escalas diferentes, de forma que la de las temperaturas es el doble de la de las precipitaciones ($P=2T$). Se consideran así meses húmedos aquéllos en los que la primera queda por encima de la segunda. Este modelo propuesto inicialmente por Gaussen y Bagnouls (1957), modificado por Walther y Lieth (1967) y adaptado por Rivas Martínez (1993), ha sufrido revisiones posteriores.

4.2.3. La cubierta vegetal

La información de base utilizada en el análisis de la cubierta vegetal ha sido el mapa de unidades fisionómicas de vegetación y las descripciones sobre el estado de las masas forestales, que forman parte de los Estudios Básicos para la elaboración del Plan de Ordenación de Recursos Naturales de Sierra Espuña (Agencia Regional para el Medio Ambiente y la Naturaleza, 1993). Esta cartografía es utilizada actualmente por la Dirección General del Medio Natural en todos los trabajos que se realizan dentro de los límites del Parque. También se han tenido en cuenta estudios locales sobre la vegetación del Parque (Aguila y Provencio, 1989;

Baeza Berna, 1989; Parra Tomás, 1996; Cánovas Gil *et al.*, 1997; Alcaraz Ariza *et al.*, 1989, 1991, 1998, Ortiz Martínez, 1999) así como los trabajos que sobre este espacio se han realizado para confeccionar el Atlas del Medio Natural de Región de Murcia (Alcaraz Ariza *et al.*, 1999).

Una vez identificadas las unidades que aparecen en la zona de estudio, se cotejan y contrastan con observaciones de campo y con la información extraída de los mapas 1/5.000 del Servicio de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria de la Comunidad Autónoma de Murcia, donde la información se analiza a nivel de subparcela. En ocasiones, los datos procedentes del Catastro de Rústica adolecen de falta de adecuación a la realidad, fruto de las demoras que se producen por parte de los propietarios de las tierras en declarar los cambios de cultivos llevados a cabo en sus propiedades. Sin embargo, en el caso concreto de Espuña, estas zonas quedan reducidas a los sectores periféricos y son poco representativas de la cubierta vegetal dominante en el territorio. En cualquier caso, el trabajo de campo tiene una importancia extrema ya que servirá para cotejar "in situ" la información recopilada de las distintas fuentes, realizando las oportunas correcciones.

El procedimiento para integrar la cubierta vegetal difiere, en parte, de la metodología anterior, ya que los datos están referidos a superficies, polígonos, y no a elementos lineales como el caso de las curvas de nivel.

Cada unidad de vegetación se considera un polígono independiente y se digitaliza, en AUTOCAD, como una polilínea cerrada. De forma simultánea, y situando la información en una capa diferente, se asigna a cada uno de ellos una etiqueta conectada mediante un nodo interior. El etiquetado es el vínculo que permite asociar a cada polígono una base de datos donde constará, al menos, el número de polígono, es decir su etiqueta, y un código, previamente establecido, que identifica el tipo de vegetación correspondiente.

Una vez digitalizados los 254 polígonos del área de estudio y sus etiquetas, el fichero se exporta con formato DXF a ARC/INFO. Este po-

tente software permite recuperar ficheros vectoriales generando coberturas mediante la orden "*dxfar*". El tratamiento de ficheros de polígonos con este SIG, de estructura vectorial, responde básicamente a razones prácticas que simplifican la digitalización.

Se denomina cobertura a un conjunto de elementos geográficos ligados mediante una topología específica y cuyos atributos son almacenados en una base de datos asociada. Se trata, en definitiva, de una manera de organizar la información, equivalente en cierta medida a la estructura arborescente propia de los directorios y subdirectorios característica del sistema operativo MS-DOS.

Aplicando distintos comandos, "*clean*", "*joinitem*", se obtiene una imagen *raster* en la que cada polígono está identificado por un código asignado de manera interna y cuya vinculación con las etiquetas de AUTOCAD se recoge en una base de datos, *pat.dbf*, creada automáticamente por el programa al generar la cobertura.

El fichero *raster* se exporta con formato ERDAS de 8 bits y se recupera en IDRISI, incorporando también al directorio de trabajo el fichero *pat.dbf* generado de forma interna por ARC/INFO.

Mediante la orden *dbidris* (incluida en el módulo de gestión de atributos de IDRISI, *Attribute Data Management*) se extrae la información necesaria de esta base de datos, creando un fichero de valores de IDRISI, con extensión VAL, que se asocia a la imagen que se acaba de importar (orden *Assing*). El resultado es un fichero IMG donde el valor de los píxeles que forman los polígonos corresponde al tipo de cubierta según la codificación previamente establecida, es decir, representa el mapa de vegetación de la zona de estudio.

El mapa de combustibles se genera a partir de la reclasificación (orden *reclass*) de esta imagen. Esta operación lleva implícito, no obstante, cierto grado de libertad en la elección de las clases, ya que se aplican combustibles-tipo preestablecidos, según los modelos definidos por Ro-

thermel (1983) (capítulo 2). En la tabla 15 se muestra la correlación obtenida para cada tipo de cubierta. La imagen se recodifica eliminando las áreas sin interés forestal (zonas urbanas y agrícolas).

Tabla 15. Clasificación de la vegetación de Sierra Espuña según los modelos combustibles de Rothermel, 1983

Modelo combustible	Cobertura vegetal
Modelo 1	- matorral de margas - cultivos abandonados
Modelo 4	- repoblaciones recientes
Modelo 5	- matorral bajo
Modelo 6	- matorral alto
Modelo 7	- matorral de alta montaña
Modelo 8	- pinares bajos - carrascal - pinar + matorral bajo
Modelo 9	- pinares altos - pinar alto + carrascal

Los pequeños retazos calificados como cultivos abandonados, donde aparece un matorral poco desarrollado, se incluyen en el modelo 1, que contempla la presencia de rastrojos y herbáceas anuales acompañados de algunas plantas leñosas dispersas.

Es imprescindible señalar que en la actualidad la mejor herramienta para el estudio de la cubierta vegetal es la teledetección. Las imágenes de satélite proporcionan una información actualizada sobre el estado de las formaciones (Álvarez González, 1995), permitiendo establecer zonas de composición uniforme, al tiempo que su formato digital facilita la integración de estos datos con las demás variables espaciales que intervienen en el inicio y desarrollo de los incendios. Sin embargo, el mayor obstáculo para su empleo reside en el elevado coste económico que supone la adquisición de una serie temporal de imágenes lo suficientemente larga para extraer conclusiones sobre el estado de la vegetación para distintas épocas del año. Por esta razón no se ha podido contar en este estudio con una fuente de información tan valiosa que permitiría mejorar la clasificación de los modelos combustibles, a partir del análisis de imágenes recientes, y que harían posible el control y seguimiento de la evolución de la cubierta vegetal.

4.2.4. Factor antrópico

La integración de la actividad humana en el modelo de riesgo se realiza mediante el análisis de los partes de incendios forestales disponibles para la zona de estudio, dedicando especial atención a sus causas y a la ubicación espacial de los focos iniciales, determinando si existe una localización "preferente" entre las categorías que se establecen: carretera, senda, lugares con afluencia de excursionistas y otros lugares en el monte. Ante la imposibilidad de concretar espacialmente el lugar de origen de los incendios incluidos en esta última categoría, el factor antrópico se contempla ligado a los principales caminos y carreteras que atraviesan la sierra, cuya importancia se pone de manifiesto en el capítulo relativo a la incidencia histórica de los incendios forestales en Sierra Espuña.

La inclusión de esta variable se realiza mediante la digitalización de las principales carreteras, caminos vecinales y locales que aparecen en el mapa base (Topográfico E 1/25.000 del Servicio Geográfico Nacional),

completando y cotejando esta información con la que aparece en los "mapas de líneas" escala 1/5.000 elaborados por el Servicio de Cartografía de la Comunidad Autónoma de Murcia y con la procedente de la cartografía de polígonos catastrales, escala 1/5.000, del Catastro de Rústica dependiente del Servicio de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria de Murcia.

La metodología es similar a la utilizada para las variables anteriores: digitalización, del eje central de las distintas vías de comunicación por medio del método punto a punto, aplicado con AUTOCAD V-12 sobre el soporte de una tableta Drawing Board II. Se establecen dos categorías: por un lado, carreteras, que incluye las principales vías de acceso al Parque, que se encuentran asfaltadas y por las que está permitido el tráfico rodado, y por otro, caminos destinados a usos agrícolas, sendas y pistas forestales, sin asfaltar y que tienen restringido o prohibido el acceso libre de vehículos de cuatro ruedas, y por los que únicamente es posible transitar a pie o en bicicleta.

Las capas de AUTOCAD se exportan como ficheros independientes con formato DXF al software ARC/INFO, donde se recuperan y generan las coberturas correspondientes.

En los partes de incendios se contemplan las zonas adyacentes a estos ejes de comunicación como los lugares más frecuentes de inicio del fuego, lo que motiva la definición, en torno a éstas, de un corredor de proximidad de 150 metros, siguiendo el criterio utilizado por Salas Rey (1994) para el establecimiento de áreas de riesgo de incendios en un sector montañoso correspondiente al macizo oriental de la Sierra de Gredos.

Estos corredores de proximidad se crean utilizando la orden *buffer* de ARC/INFO sobre cada una de las coberturas, de forma que los ficheros vectoriales son convertidos en *raster* asignado internamente un código a cada zona de influencia y a los polígonos que se generan de forma automática como resultado de la proximidad de los *buffers*, y que corres-

ponden a sectores excluidos de los mismos. Estos ficheros se exportan con formato ERDAS de 8 bits incorporándolos a IDRISI con el mismo tamaño e idéntica georeferenciación que los anteriores.

Una vez en IDRISI los ficheros son tratados de forma independiente, para determinar la superficie correspondiente a cada una de las categorías establecidas previamente. Las carreteras se reclasifican (*reclass*) asignando valor 1 a los *buffers* y valor 0 al resto del territorio. El mismo proceso se aplica al fichero de caminos, aunque en este caso con valores de 2 y 0. Mediante técnicas de álgebra de mapas, *overlay*, se "suman" las dos imágenes de forma que el resultado muestra, además de las zonas de influencia de cada categoría que detentan valores de 1 y 2 respectivamente, aquellos sectores donde ambas coinciden y que aparecen con valor 3 en la imagen. Estas zonas comunes se asimilan a las carreteras, principales vías de penetración de la población en el área de estudio, al ser las únicas por las que se permite circular libremente a vehículos con motor.

Se establecen por tanto tres categorías para el análisis del factor antrópico en el área de estudio: la primera corresponde a las principales carreteras y su zona de influencia de 150 metros, la segunda a los caminos y sendas y su corredor de proximidad, también de 150 metros, y la tercera engloba el territorio excluido de las dos anteriores, incluyendo los incendios que tienen su inicio en "otros lugares en el monte".

A partir de la información sobre la localización de los focos iniciales del fuego recogida en los Partes de Incendios de Sierra Espuña, se pondera la importancia de cada categoría mediante la aplicación de un test de significación estadística (χ^2 cuadrado). El número de incendios esperados para cada una de ellas (le) es función de la superficie ocupada por categoría ($\%Sc$), deducible de la cartografía de riesgo asociado al hombre, y del número total de sucesos ocurridos en el área de estudio (It), integrados mediante la expresión matemática $le = (It) \times ((\%Sc)/100)$. Las diferencias entre los incendios observados y los esperados contribuyen a la valoración del riesgo.

Los resultados de esta ecuación se utilizan para crear un fichero de valores que relaciona el código utilizado para cada categoría y su grado de riesgo. Mediante la orden *assign* de IDRISI se establece la relación entre este fichero y la imagen creada en la fase anterior, sustituyendo el valor de cada píxel por su grado de riesgo correspondiente.

Por último, y para contemplar únicamente las zonas con interés forestal, el fichero se multiplica por una imagen booleana generada a partir de la cartografía de las formaciones vegetales, en la que se asigna el valor 1 a los terrenos forestales, que no varían, y valor 0 a cultivos y núcleos urbanos que quedan así excluidos.

4.3. Modelización del riesgo de incendios mediante SIG

La modelización del riesgo de incendios en Sierra Espuña y su entorno se lleva a cabo mediante la aplicación práctica de dos propuestas:

La primera corresponde al Índice de Riesgo Local de Incendios de ICONA, único componente en vigor del Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales (ICONA, 1983). Definido por este organismo como la probabilidad de que se produzca un incendio en una zona, se estima a través de tres subíndices que reflejan la frecuencia de incendios (F_i), la peligrosidad de las causas (C_i) y la peligrosidad de los modelos combustibles (V_i). Según los resultados de su expresión matemática $RL = F_i \times C_i \times V_i$, se establecen cuatro categorías de riesgo: bajo (< 25), moderado (25-100), alto (100-300) y grave (> 300). No obstante sus valores extremos se sitúan en 1 y 1000, ya que a su vez cada subíndice se encuentra tabulado con un rango de variación de 1 a 10.

Ofrece una estimación global del riesgo y fue diseñado para trabajar utilizando como base el mapa topográfico nacional escala 1:200.000 y su división en cuadrículas de 100 km², lo que le hace poco operativo en estudios de detalle. Sin embargo es el método empleado en los Planes de Protección Civil de Emergencias para Incendios Forestales en la Región

de Murcia para estimar, anualmente, el riesgo de incendios en los municipios que integran la comunidad autónoma.

La segunda propuesta se basa en el método desarrollado por Salas Rey (1994) a partir del esquema general del Grado Actual de Peligro de Incendios de ICONA. Introduce una serie de modificaciones que permiten contemplar las condiciones particulares que confluyen sobre el territorio, ponderando la influencia de las variables que intervienen en el inicio y posterior desarrollo del incendio, para establecer una cartografía detallada de la zonación del riesgo.

Este índice contempla la probabilidad de ignición (PI), la facilidad de propagación derivada de los modelos combustibles (V) y un factor de riesgo antrópico (RH), que supone una innovación respecto a planteamientos anteriores que no consideraban la actividad humana ligada a la ocurrencia de incendios forestales. Los tres elementos del Índice, integrados mediante la ecuación $RI = (PI/10) \times V + RH$, se consideran desde el punto de vista espacial y se representan como imágenes en formato digital utilizando las posibilidades que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica para el estudio de variables regionalizadas. La evaluación del riesgo se realiza en función del establecimiento de áreas donde confluyen una serie de características.

Este modelo se aplica al área piloto de Sierra Espuña - Gebas para los meses que registran un mayor número de sucesos, deducidos del estudio de la frecuencia y magnitud de los incendios forestales en la zona, confeccionando una cartografía del riesgo de incendios que contemple las temperaturas máximas absolutas de la zona, las más favorables para el inicio y desarrollo del fuego. Para el mes más crítico se analizan también otras situaciones térmicas, temperaturas medias y medias máximas, con el fin de ponderar la influencia de esta variable en la zonación del riesgo.

El cálculo de los tres subíndices, PI , V y RH , se realiza mediante las posibilidades que ofrece IDRISI para trabajar con imágenes *raster*, com-

binando la información proporcionada por los ficheros digitales que contienen la distribución espacial de las variables sobre el área de estudio y una serie de tablas diseñadas por ICONA para cuantificar cada subíndice en función de los valores que aquéllas presenten. En esta fase será preciso generar nuevas capas temáticas y adecuar alguna de las elaboradas en fases previas para que se ajusten las tabulaciones establecidas. Cada parámetro se calcula de forma independiente creando una serie de ficheros intermedios de manera que al final del proceso se disponga de tres imágenes, cuya integración con el módulo *overlay* de IDRISI permite confeccionar los mapas de riesgo.

4.4. Aplicación de programas de simulación

En los últimos años, la búsqueda de instrumentos que permitan combatir con éxito el problema de los incendios forestales ha dado lugar al desarrollo de paquetes informáticos destinados a predecir el comportamiento del fuego. Se basan en simulaciones de la propagación de las llamas bajo unas condiciones climáticas, topográficas y de vegetación determinadas, que permiten conocer casi de inmediato su evolución más previsible. Pueden utilizarse de forma simultánea a la detección del incendio, y favorecer así la adopción de métodos de control eficaces desde los primeros instantes del suceso, o bien, para realizar ensayos sobre escenarios alternativos que permitan optimizar los sistemas de vigilancia y control sobre las zonas más sensibles.

Mediante el empleo de uno de estos programas, concretamente el software americano denominado *FARSITE (Fire Area Simulator)* (Finney, 1997), se llevan a cabo una serie de ensayos para las condiciones particulares del área de estudio. Este simulador gráfico del avance y comportamiento del fuego está considerado como uno de los más completos ya que, además de los módulos de simulación incluye otros específicos para la aplicación de técnicas de control y extinción. Sus resultados pueden integrarse en otros SIG ya que permite la exportación de datos en diversos formatos.

La estructura interna del programa requiere métodos específicos para introducir las variables involucradas en el incendio, diferenciando básicamente dos tipos de ficheros: por un lado, los de estructura *raster*, donde se incluyen altitudes, pendientes, orientaciones, modelos combustibles y fracción de cabida cubierta (que relaciona la suma de las proyecciones horizontales de las copas de los árboles y la superficie horizontal sobre la que se asienta la masa arbórea), además de la altura de copas, altura del sotobosque y densidad de copas, siendo estos tres últimos de carácter opcional. Las ocho capas temáticas convenientemente georeferenciadas deben estar referidas a la misma porción del territorio, tener idéntica resolución y número de filas y de columnas. Todas ellas se generan en un SIG alternativo, en este caso se ha hecho en *IDRISI*, desde donde se exportan e incorporan a *FARSITE* previa adecuación de sus cabeceras. Por otro, es preciso elaborar una serie de ficheros *ascii*, a partir de los menús del programa o cualquier editor de texto, que dotados de una extensión determinada, contendrán información acerca de los combustibles y los datos de viento y características térmicas, pluviométricas y de humedad para el momento de la simulación.

Una vez introducidos todos los ficheros, el paso previo para realizar la simulación es generar, mediante la orden *generate landscape file* del módulo de entrada de datos (*input*), uno nuevo denominado "landscape", que relaciona toda la información precedente y sobre el cual se llevan a cabo los ensayos. La fase siguiente consiste en definir los parámetros que van a controlar la simulación, donde se especifica la duración asignada al incendio, la fecha y hora de inicio y final, tiempo máximo para el que se suponen constantes las condiciones de propagación del fuego en un punto determinado y el intervalo temporal para el que se quieren obtener los resultados. También es posible activar la visualización de dos relojes que muestran el transcurso del tiempo durante la simulación en relación a la hora de inicio y para el intervalo horario asignado. Por último y antes de activar la orden *start* del módulo *Simulate*, hay que introducir un foco o focos iniciales que suponen el punto de partida del incendio.

La aplicación de FARSITE se concreta en seis simulaciones realizadas para distintas zonas previamente seleccionadas dentro del área de estudio, utilizando como criterio de selección la presencia sobre el territorio de un determinado tipo de modelo combustible. La finalidad es analizar, para las mismas condiciones meteorológicas, la respuesta que ofrecen las distintas formaciones vegetales. Como excepción, no se realiza ningún ensayo para los matorrales de alta montaña, cuya discontinuidad horizontal deja al descubierto extensos afloramientos del sustrato rocoso que suponen un freno a la expansión del fuego.

Todos los resultados de las simulaciones se exportan al software ARC/VIEW GIS 3.2 (Esri, 1999), donde se realiza la composición gráfica definitiva.

4.5. Utilidad de los SIG en la prevención del riesgo de incendios forestales

La organización de la información espacial que proporcionan los SIG y sus posibilidades para procesar y actualizar las variables geográficas que almacenan, los convierte en una herramienta idónea para la gestión de problemas ambientales (Moldes Teo, 1995; Barredo Cano, 1996, 1997). Entre sus múltiples aplicaciones dentro del ámbito forestal como la ordenación de montes, planificación de aprovechamientos comerciales, análisis integrado de plagas, etc. (Labranedo y Martínez Vega, 1988) destaca su empleo en relación con los incendios forestales.

En esta línea sirven de apoyo para localizar y cuantificar superficies afectadas por el fuego, integrando la información de las capas temáticas con la procedente de sensores remotos y sistemas de posicionamiento global, GPS (Chuvieco y Salas, 1996). A partir de esta información la evaluación de daños puede hacerse con precisión, al ser posible, entre otros aspectos, la identificación de "islas" o zonas sin quemar dentro de perímetro del incendio (González Alonso, 1993, 1994). También se han

utilizado para realizar seguimientos históricos de la dinámica del fuego y sus efectos sobre los ecosistemas (Baker, 1992) y en tareas de planificación y control sobre las zonas quemadas (Quintanilla y Castro, 1998), debido a la facilidad para actualizar las bases de datos asociadas a las variables que intervienen en el sistema. También la teledetección es utilizada por Belda *et al.*, 1999, para establecer relaciones entre índices de vegetación normalizada, precipitaciones y humedad del suelo en las zonas forestales de la provincia de Alicante.

Sin embargo, la mejor forma de luchar contra las nefastas consecuencias de los incendios forestales es tratar de evitar que éstos se produzcan, o al menos, minimizar su número y las pérdidas que ocasionan. Para lograrlo resulta obvio que la prevención debe ocupar un lugar destacado en el estudio de estos sucesos. A este respecto, el empleo de una base de datos especializada como son los SIG (Woods & Gossette, 1992) resulta muy eficaz para abordar cuestiones que, como la prevención, requieren un estudio integrado de paisaje.

Mediante la combinación de capas temáticas georeferenciadas es posible analizar de manera conjunta los factores que condicionan la presencia del fuego (naturales o antrópicos) y las variables que determinan su comportamiento (climáticas, topográficas o relacionadas con la vegetación), aspectos esenciales para conocer el riesgo de incendios que afecta a un territorio (Castro & Chuvieco, 1998). La capacidad para sintetizar la información geográfica que tienen los SIG facilita el análisis pormenorizado de las características del territorio y su relación con las causas que motivan la ocurrencia de incendios. Disponer de una cartografía detallada del grado de riesgo permite el desarrollo de acciones específicas adaptadas a las condiciones particulares de la zona sobre la que se pretende actuar.

A partir de estos mapas de riesgo de incendios pueden establecerse una serie de medidas preventivas, orientadas tanto a reducir el número de sucesos como a minimizar los efectos devastadores del fuego.

Entre las primeras, resulta imprescindible la identificación de las causas ligadas al origen de los incendios, tratando de actuar sobre ellas siempre que sea posible. Aunque muchos incendios pueden deberse a la caída de rayos, (el 25 de agosto de 2000 una tormenta eléctrica originó cuarenta focos en Aragón, alguno de los cuales no pudo ser controlado hasta tres días después, quemando un total de más de 1.000 hectáreas de monte en Zaragoza y Huesca), la mayoría de los sucesos se vinculan directa o indirectamente a actividades humanas. La intencionalidad constituye uno de los graves problemas con los que se tienen que enfrentar las brigadas forestales. Generalmente se vinculan a especulaciones urbanísticas y su objetivo suele ser la búsqueda de una recalificación del suelo con fines comerciales, aunque también pueden deberse a disputas o venganzas personales entre los propietarios de las tierras, o a otros motivos de índole social. Los ejemplos más cercanos corresponden al último verano (agosto de 2000), durante el cual se ha llegado a plantear que los incendios ocurridos en el Parque Natural de Cazorla, en Jaén, fueron obra de trabajadores forestales a los que se había despedido por reestructuración y ajustes de plantillas, o los fuegos intencionados que durante tres días se sucedieron en la Sierra de Ricote, Murcia, y que fueron provocados por la misma persona que finalmente pudo ser identificada. En general, estos incendios suelen presentar serias dificultades para ser controlados ya que normalmente cuentan con varios focos activos ubicados en lugares de difícil acceso, donde la topografía dificulta la llegada de los medios de combate y favorece una rápida propagación de las llamas.

El estudio de la causalidad mediante SIG, realizando un inventario de las zonas afectadas que contemple el lugar donde comenzó el fuego y la causa que lo originó, puede contribuir a extremar las precauciones en aquellos sectores que se muestren más sensibles, incrementando, si es posible, los puestos de vigilancia y control para lograr una rápida detección del fuego, o utilizando los datos procedentes de sensores remotos que indiquen la presencia de fuentes de calor anómalas sobre el territorio. Además la información espacial propia de los SIG y su posibilidad de actualización permite realizar seguimientos de la evolución de los usos

del suelo en las zonas quemadas, e identificar las posibles vinculaciones entre la ocurrencia de un incendio y el cambio de uso de suelo rústico a urbanizable en sus diversas modalidades (programado o no programado). Un estudio serio que ponga en evidencia la existencia de esta relación podría constituir la base para el establecimiento de medidas restrictivas más severas tendentes a impedir la pérdida de masa forestal.

Por otra parte, la prevención se orienta también a minimizar los efectos del fuego, por lo que la síntesis del conjunto de datos e información geográfica que contienen los SIG, referidos a un territorio que lo diferencian e individualizan de otras zonas, puede utilizarse como punto de partida para la ubicación idónea de elementos de defensa que contribuyan a retardar la propagación del fuego en caso de producirse. La apertura de cortafuegos, faja de terreno en la que se elimina totalmente la vegetación y en la que se suele emplear maquinaria pesada, debe considerarse como parte integrante de las tareas de limpieza del monte. Deben mantenerse limpios durante todo el año mediante talas periódicas para evitar que el rebrote de la vegetación les reste eficacia ya que su objetivo es frenar el avance de las llamas al entrar en contacto con una zona donde no hay material disponible para arder. La anchura es variable y depende de las características del territorio, pero sobre todo del tipo de combustible y la facilidad para ser atacados por el fuego (Velez Muñoz, 1987). En zonas con escaso porte, donde únicamente pueden producirse incendios de superficie se estima una anchura variable entre 15 centímetros y 4 metros. Por el contrario sectores muy poblados con un importante desarrollo vertical de la vegetación donde sea posible la transmisión del fuego a través de las copas de los árboles deben tener una anchura mínima entre 7 y 10 metros.

El conocimiento del territorio que proporcionan los SIG puede ser muy útil durante el desarrollo de un incendio. La apertura de líneas de defensa se apoyará en elementos preexistentes que supongan una discontinuidad en la vegetación, como por ejemplo cortafuegos, carreteras, caminos, o cauces fluviales, por lo que disponer de una completa cartografía en la que se contemplen estos elementos permitirá detectar con

rapidez su presencia en las proximidades del incendio. La topografía ejerce un papel esencial en la velocidad de avance de las llamas, por lo que la ubicación idónea de las líneas de defensa cuando el fuego asciende por una ladera será en la ladera opuesta, inmediatamente después de la cumbre (ICONA, 1981). La visión de conjunto que proporcionan los SIG puede contribuir también a seleccionar, en función de las características del incendio, el lugar más apropiado para su instalación además de facilitar información acerca de las vías de acceso hasta el lugar elegido de los medios humanos y materiales encargados de su ejecución.

La posibilidad de considerar los rasgos físicos del área tales como la configuración topográfica, características meteorológicas o de vegetación, aquéllos otros específicos vinculados a la localización y estado de líneas preventivas de defensa, cortafuegos, ubicación de puntos de agua o el trazado de las posibles vías de acceso para las brigadas de extinción terrestres, puede ayudar a la distribución estratégica de los efectivos de lucha contra el fuego, de manera que, en caso de producirse un incendio, sea posible realizar un despliegue eficaz de los mismos, mejorando las labores y tiempos de extinción y garantizando una mayor seguridad de los efectivos humanos que intervengan. En este sentido han demostrado su eficacia en el diseño de rutas de acceso óptimas para los efectivos de control y en la planificación de las redes de caminos forestales (Hernández Navarro, 1996).

Por otra parte, los SIG se han considerado también como campo de pruebas para el estudio de procesos ambientales o el análisis de impactos causados por decisiones de planeamiento (Borrough, 1986). Desde la perspectiva de la prevención ofrecen la posibilidad de realizar simulaciones como aproximación a la predicción del comportamiento del fuego y el estudio de su crecimiento y desarrollo en un "escenario digital", que reproduce las condiciones del paisaje (Albini & Baughman, 1979). En este sentido adquieren un interés especial programas como FARSITE, diseñado específicamente para la simulación y combate de incendios forestales, y que adopta una organización de la información propia de los SIG

mediante capas temáticas georeferenciadas, permitiendo la incorporación de sus resultados a otros programas a través del módulo de exportación de datos.

Aunque FARSITE adolece de algunas limitaciones técnicas, sólo admite ficheros en formatos GRASS o ARC/INFO y la calidad de las representaciones gráficas que ofrece debería mejorar, su empleo en la realización de ensayos-tipo que contemplen las características de la zona de estudio bajo las condiciones meteorológicas más frecuentes, resulta de gran interés para conocer el comportamiento más previsible del fuego antes de que éste se produzca. Además puede utilizarse de forma simultánea a la detección del fuego, al proporcionar en pocos minutos información esencial sobre la evolución más probable que tendrá el incendio, permitiendo así optimizar la distribución de efectivos y técnicas de control. El programa cuenta también con un módulo específico para simular el combate de incendios, mediante la implementación de una serie de bases de datos que deben contener información acerca de las características de los efectivos disponibles, entre las que destacan su tipología (medios humanos o mecánicos, y dentro de éstos últimos aéreos o terrestres), número y lugar donde se encuentran ubicados. A partir de estos datos es posible realizar estimaciones sobre los tiempos necesarios para poner en práctica sus actuaciones así como evaluar la efectividad de las mismas.

Teniendo en cuenta que la mayoría de las técnicas de combate de incendios se basan en la estimación, por parte de los responsables de las tareas de extinción, de cuál va a ser el comportamiento del fuego dependiendo del lugar de origen, características del territorio afectado y condiciones particulares dominantes en el momento del incendio (Velez Muñoz, 1985), quizá sea interesante la incorporación de este software como una herramienta útil de apoyo a la toma de decisiones por parte de los organismos encargados de la lucha contra los incendios forestales.

La integración de esta información en el SIG, cuyas bases de datos deben actualizarse periódicamente con datos de campo y de sensores

remotos, puede ayudar a los responsables de extinción, ya que permite ensayar diversos métodos de ataque, valorando su eficacia según las características de cada fuego, y realizar estimaciones sobre el despliegue de recursos materiales y humanos necesarios para su control.