

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN EN LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES: UN ENSAYO EN EL MACIZO ORIENTAL DE LA SIERRA DE GREDOS

POR

F. JAVIER SALAS REY

Y

EMILIO CHUVIECO SALINERO

Introducción

Durante los últimos veranos los medios de comunicación han prestado especial interés al seguimiento de los incendios forestales, recogiendo la preocupación generalizada de la población por este fenómeno. El fuego no es un elemento extraño a los ecosistemas mediterráneos; de hecho, se le considera un factor ecológico más, que ha dado lugar, a lo largo del tiempo, a muchos de los paisajes más característicos de nuestro entorno (Trabaud, 1982). Sin embargo, cuando la recurrencia del fuego sobrepasa los ritmos de frecuencias naturales, su acción puede afectar al suelo, degradando el ecosistema a sus estadios más elementales. Precisamente éste es el principal problema que los incendios forestales plantean a los ecosistemas mediterráneos en estos momentos: los ciclos de recurrencia del fuego se

F. Javier Salas Rey y Emilio Chuvieco Salinero. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares.

Estudios Geográficos
Tomo LV, n.º 217, octubre-diciembre 1994

acortan rápidamente en determinados espacios, lo que conlleva situaciones con peligro muy alto de irreversibilidad (Vélez, 1986).

Las estadísticas sobre incendios forestales indican que nuestro país ha sido gravemente afectado por este fenómeno durante las tres últimas décadas. En el período 1961-1990, la superficie quemada (acumulada anualmente) se aproxima a 4.700.000 hectáreas, de las que algo más del 40% eran arboladas. Junto a las pérdidas humanas y económicas que conllevan, hemos de resaltar sus efectos sobre el ecosistema, que, como ya comentamos anteriormente, se va degradando cuando su ciclo de recurrencia se acorta.

En el contexto de la Europa Mediterránea, España es uno de los países más afectados, ocupando, con cifras de 1990-1991, el segundo puesto en función del número de incendios y el primero en cuanto al volumen de pérdidas y al total de superficie quemada. Este papel protagonista, en términos absolutos, se relaciona con nuestra gran superficie forestal con condiciones mediterráneas, muy superior a la de otros países europeos. Ahora bien, en términos relativos, estamos por debajo de otras naciones, ya que el área total afectada por incendios en nuestro país supone el 0'9% de la superficie total forestal, mientras que en Francia alcanza el 1'2%, en Italia el 1'9% y en Portugal el 2'4%.

Estas consideraciones ponen de manifiesto la necesidad de profundizar en la investigación dirigida hacia la prevención de incendios,¹ que permita reducir la ocurrencia de este fenómeno, o al menos atenúe sus efectos.

Geografía e incendios forestales

En el inicio o desarrollo de un incendio forestal concurren numerosos factores de índole humano y medioambiental: meteorología, tipo y estado de la vegetación, morfología del terreno, actividad del hombre, etc. En este sentido, se trata de un fenómeno verdaderamente geográfico, puesto que sus causas están ligadas a factores eminentemente territoriales y sus efectos tienen una clara incidencia en el paisaje. Hasta el momento, las

¹ Este trabajo fue inicialmente financiado por el Servicio de Defensa contra Incendios Forestales del ICONA y, posteriormente, con el proyecto MINERVE de la Comunidad Europea. Han sido muy valiosas las sugerencias de D. Ricardo Vélez, jefe del Servicio de Incendios del ICONA.

líneas de investigación más desarrolladas por geógrafos en el campo de los incendios forestales han sido:

a) La cartografía y evaluación superficial de áreas quemadas, que resulta de notable importancia para analizar las variables que condicionan su presencia, así como para determinar la sensibilidad al fuego de las distintas regiones (Alvarado, 1982; Chuvieco y Congalton, 1988b; Lourenço y Gonçalves, 1990a; Martín y Chuvieco, 1993).

b) La evaluación de los efectos producidos por los incendios forestales en el paisaje. El incendio forestal es uno de los factores explicativos de la estructura y dinámica del paisaje, especialmente en el mundo mediterráneo. Junto al ganado y la tala, el incendio se considera entre los tres elementos causantes de la modificación y destrucción de las formaciones vegetales (Bielza de Ory, 1975). La pérdida de vegetación puede conllevar, en las zonas donde el ciclo de recurrencia se acorta, un aumento en la erosión del suelo, modificándose las condiciones morfológicas. En este sentido, la Geografía puede ser un campo idóneo para analizar los efectos paisajísticos de los incendios (Lourenço, 1988b; Lourenço y Gonçalves, 1990b; Minnich, 1978).

c) La cartografía del riesgo de incendios forestales. Una buena parte de las labores de prevención de incendios forestales se basan en el estudio de la distribución espacial y de las interacciones existentes entre algunos factores medioambientales (determinantes del comportamiento del fuego) y sociales (relacionadas con su inicio), con objeto de catalogar un territorio como «área de riesgo». En este sentido, tanto el objeto de estudio como la metodología a aplicar, son dos cuestiones perfectamente inscritas en la Geografía (Cosentino *et al.*, 1981; Yool *et al.*, 1985; Chuvieco y Congalton, 1989), siendo ésta la línea de investigación seguida en el presente proyecto.

Antecedentes

El objetivo de este ensayo es la consecución de una metodología operativa para la obtención de una cartografía de riesgo de incendios a partir de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) a nivel comarcal o regional. El establecimiento de este tipo de modelos de riesgo cuenta ya con una interesante bibliografía. La teledetección se emplea —en este contexto— para obtener una cartografía de la cubierta

vegetal, variable que sirve de entrada a un SIG, en donde también se introducen otro tipo de variables de destacado efecto en el inicio o desarrollo del fuego (topográficas, meteorológicas, etc).

Desde el punto de vista de los incendios forestales, interesa considerar aquellas características de la vegetación que contribuyen a modificar su inflamabilidad o resistencia al avance del fuego. Para simplificar la amplísima variedad de esas características, se han definido los denominados modelos combustibles, que consideran el estrato protagonista en la propagación del fuego. Su cartografía entraña importantes problemas, ya que las características del material combustible son, por un lado, enormemente dinámicas, y, por otro, exigen un nivel de detalle difícilmente abordable con la periodicidad requerida. En este compromiso entre precisión y rapidez, la teledetección espacial puede jugar un destacado papel, ya que nos permite realizar un inventario global, exhaustivo y periódico del estado de la vegetación. Por otro lado, al interpretarse digitalmente, facilita su conexión con otras variables espaciales.

Por estas razones, se ha ensayado el empleo de la Teledetección en muy variados proyectos de cartografía del riesgo. Numerosos estudios demuestran que esta técnica puede brindar una información suficientemente precisa sobre el estado real del combustible (Rabii, 1979; Salazar, 1982; Dixon *et al.*, 1985). Estos trabajos muestran una elevada correlación entre los modelos combustibles, recogidos a partir del trabajo de campo o fotografía aérea, y la clasificación de imágenes de satélite.

Una vez obtenida la cartografía de la vegetación, se integra con variables meteorológicas, topográficas y de incidencia histórica (frecuencia y causalidad) para dar lugar a la cartografía de riesgo de incendios. Esta metodología se ha aplicado a distintas áreas de Estados Unidos: California (Yool *et al.*, 1985), Nevada (Brass *et al.*, 1983), Montana (Burgan y Shasby, 1984), Washington (Gum, 1985) y Oregón (Agee y Pickford, 1985). Existe también algún ensayo de este tipo sobre Canadá (Van Wyngarden y Dixon, 1989), España (Salas y Chuvieco, 1992 y 1994) e Italia (Marchetti, 1990).

Pero no todos los modelos de riesgo de incendio utilizan necesariamente la teledetección y los SIG conjuntamente. Existe una serie de estudios muy interesantes que incluyen únicamente esta segunda tecnología: cartografía y severidad de incendios potenciales (Salazar, 1987), modelo de

probabilidad de ocurrencia de incendios forestales (Chou, 1992) y cartografía del crecimiento espacial del fuego (Salazar y Power, 1988; Vasconcelos y Guertin, 1992), entre otros.

Estos índices de riesgo presentan cuatro posibles formas de integración: a) uso de un criterio cualitativo para asignar valores de riesgo a los cruces de las variables (Yool *et al.*, 1985), b) adaptación de índices de riesgo utilizados por los Servicios Forestales (Agee y Pickford, 1985), c) creación de nuevos modelos de riesgo, basados en una ponderación selectiva cualitativa de las variables de riesgo (Chuvienco y Congalton, 1989), y d) creación de modelos de riesgo de orientación local, donde el peso de cada variable está en función de su correlación con la incidencia del fuego para esa zona (Chou, 1992).

El grado actual de peligro de incendios forestales

A la hora de llevar a cabo este trabajo no optamos por la creación de un nuevo índice de peligro sino por la adaptación del índice utilizado por el ICONA. Éste, el Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales (fig. 1), evalúa la probabilidad de que se produzca un incendio forestal en un momento determinado (Vélez, 1985; ICONA, 1990a). Este índice combina un indicador meteorológico (Grado Meteorológico de Peligro —GMP—) con el llamado coeficiente de Riesgo Local de Incendios, siendo este último, a su vez, una conjunción de los índices de inflamabilidad, causalidad y riesgo espacio-temporal.

En la actualidad sólo está en funcionamiento el GMP, que informa sobre el contenido de humedad del combustible fino muerto que se halla presente en el suelo, y es responsable del inicio de la mayor parte de los incendios forestales. Este índice se obtiene a partir de las siguientes variables: temperatura, humedad relativa, velocidad y carácter desecante del viento, orientación de las vertientes, pendiente y grado de exposición al sol del combustible. Estas variables se combinan mediante una serie de tablas para obtener la probabilidad de ignición del combustible y el nivel de alerta requerido. Sus cálculos se realizan tres veces al día, y se pretende que sean incluidos en una base de datos junto al Índice de Riesgo Local de Incendios, en estos momentos no operativo, para obtener el Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales. La forma de integrar ambos compo-

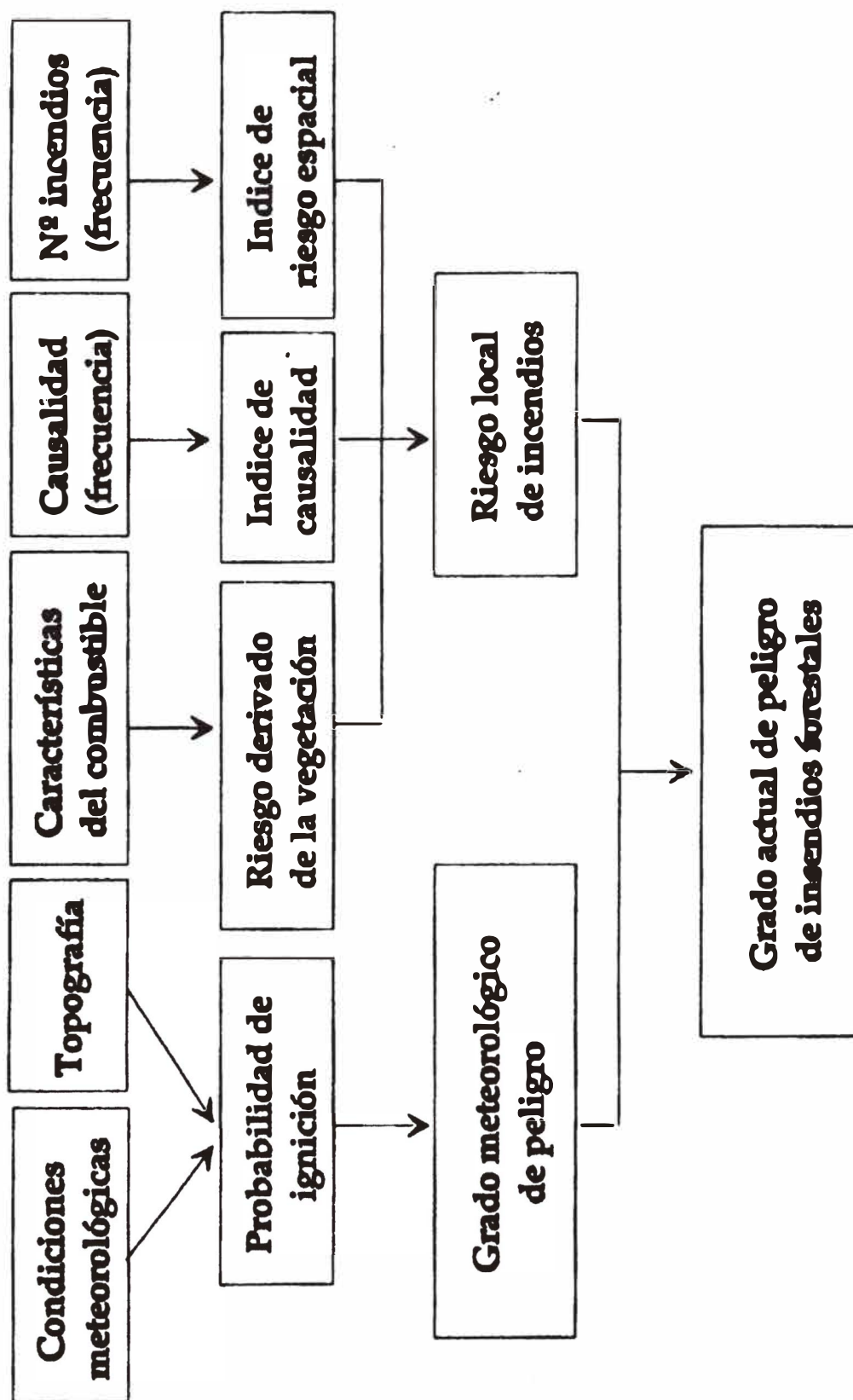


FIGURA 1.—Estructura del grado actual de peligro de incendios forestales (ICONA)

nentes no ha sido todavía establecida, existiendo únicamente una serie de apuntes para llevarla a cabo.

El área de estudio

La zona de estudio está situada en el Sureste de la provincia de Ávila, queda enmarcada por las coordenadas UTM 343000, 4478000 y 371000, 4457000 (zona 30T) y abarca una superficie de unos 600 km². Se trata de una zona eminentemente montañosa, correspondiente al macizo oriental de la Sierra de Gredos (fig. 2).

Las formaciones geológicas de esta zona son las típicas del Sistema Central, siendo predominantes las rocas ígneas y metamórficas pertenecientes al zócalo paleozoico de la Meseta. La altitud es muy variable, desde los sectores culminantes de la Sierra de Gredos (Lanchamala, 2.009 m.)

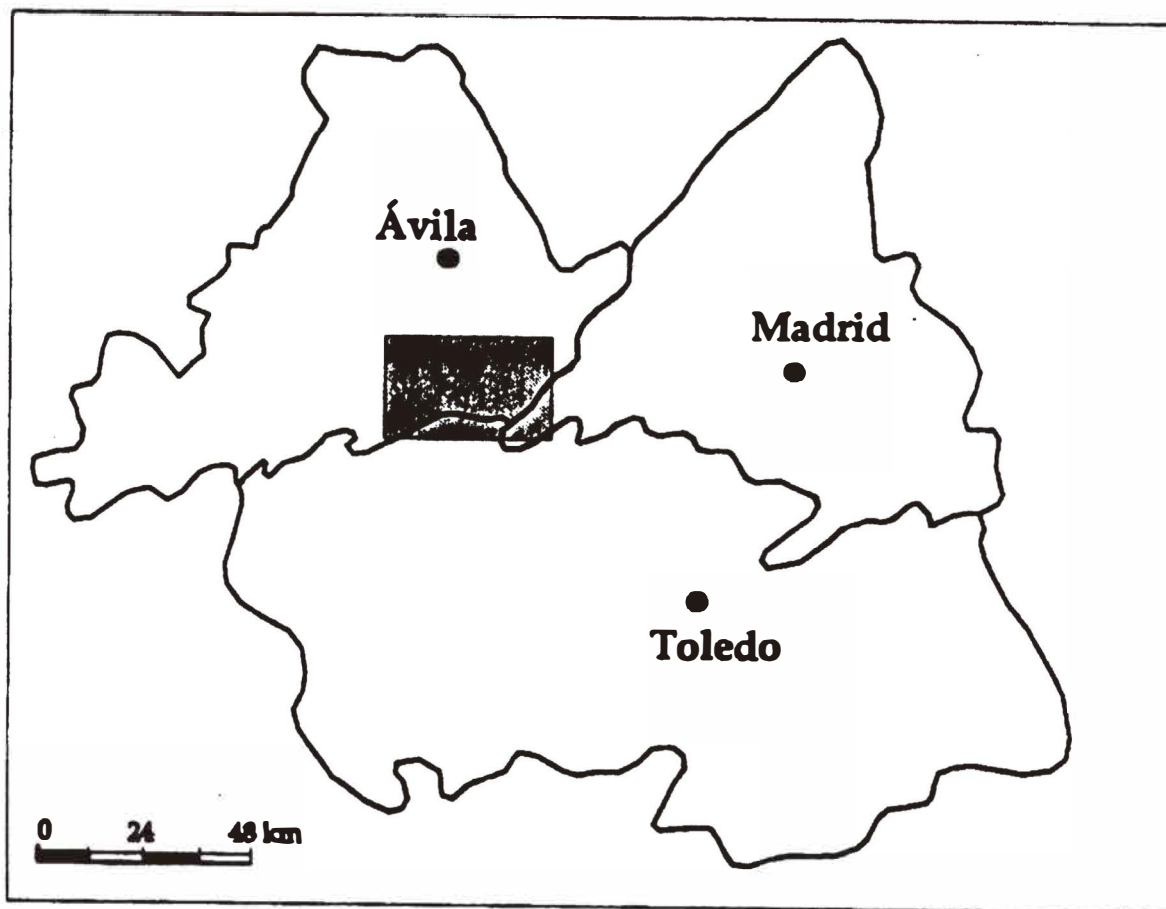


FIGURA 2.—Localización del área de estudio

hasta los valles del Alberche y del Tiétar (en torno a los 415 m.). Debido a estos marcados contrastes altitudinales, las pendientes llegan a alcanzar valores muy elevados (superiores al 100%), dando lugar a un relieve vigoroso.

Su climatología se caracteriza por temperaturas suaves (temperatura media anual entre 8° y 14 °C) y precipitaciones abundantes (entre 500 y 1.500 mm. anuales), existiendo una importante variabilidad debida a la orografía. La cantidad de agua precipitada en el período estival no alcanza el 10% del total anual (casi toda de carácter tormentoso). Las temperaturas experimentan un máximo estival, período en el que el termómetro sobrepasa casi diariamente los 30 °C. Atendiendo a estas características, el riesgo potencial de incendios en esta zona es muy acentuado durante el verano.

La vegetación climática de la zona está constituida, principalmente, por el roble melojo (*Quercus Pyrenaica*), la encina (*Quercus rotundifolia*) y, en las zonas de mayor altitud, el piorno (*Cytisus purgans*). Los bosques originarios poseen escasa representación en la actualidad, habiendo sido sustituidos por repoblaciones de pinos (*Pinus pinaster*, *Pinus pinea*), cultivos de castaños (*Castanea sativa*) y terrenos de uso pascícola. La vegetación arbustiva y subarbustiva, que ocupa una extensa superficie del área de estudio, está formada por matorrales retamoides (*Genistion floridae*), brezales y jarales (*Ericenion aragonensis*, *Cistion laurifolii*) y piornales (*Thymo mastichinae-Cytisetum multiflori*).

Esta zona ha sido históricamente muy afectada por los incendios forestales, habiendo registrado, durante el período 1968-87, un total de 323 incendios, que afectaron a 7.573 ha. (superficie acumulada anualmente), en su mayor parte de superficie arbolada. La distribución espacio-temporal (mayor número de incendios en los meses y días de la semana y en las zonas de mayor actividad humana) y la causalidad de estos incendios (más del 80% de los incendios han sido producidos por el hombre, ya sea intencionadamente o por negligencias) reflejan la importancia de la actividad humana en su origen, si bien, las fuertes pendientes, el período estival seco y caluroso y la vegetación altamente inflamable determinan la fácil propagación de los mismos.

Cartografía de riesgo de incendios forestales

El Grado Actual de Peligro de Incendios Forestales se calcula a nivel nacional por lo que su resolución espacial es muy baja (cuadrículas de 10 x 10 Km.). Nuestra metodología parte de establecer un SIG formado por las variables que compone de este índice, con una resolución espacial mucho mayor (cuadrículas de 30 x 30 m.).

Este hecho ha determinado la exclusión o sustitución de algunas de las variables que componen este índice. La frecuencia y causalidad de incendios sólo pueden ser representadas en cuadrículas de 10 x 10 Km., puesto que sólo a ese nivel de detalle se recoge en los partes forestales, por lo que han sido reemplazadas por la proximidad a vías de comunicación y áreas de ocio, que, tras el estudio de los partes de incendios forestales de los últimos veinte años, aparecen bastante relacionadas con el inicio de los incendios forestales. Por otra parte, la dificultad que presenta la modelización del viento ha hecho que esta variable no haya podido ser incluida en este modelo de riesgo.

En función de este hecho se han generado, en formato digital raster, referenciadas en coordenadas UTM y con una resolución en terreno de 30 x 30 m., las siguientes capas temáticas para la elaboración del modelo de riesgo: mapas de pendiente, orientaciones (a partir del Modelo Topográfico Digital, MTD), modelos combustibles (mediante clasificación digital de imágenes de satélite), temperaturas, humedades relativas (con el uso del MTD y observaciones meteorológicas en terreno) y factor de riesgo humano (trazado vial y zonas recreativas). Junto a ellas, se generaron el mapa de altitudes y la imagen de iluminación (a partir del MTD) para ser utilizadas en la clasificación de la imagen de satélite.

Obtención de las variables

Modelo Topográfico Digital.—La topografía del terreno condiciona, directa o indirectamente, el inicio y comportamiento del fuego. El valor de la pendiente modifica su velocidad y sentido de propagación, en tanto que la orientación y la altitud determinan las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento) que intervienen a su vez en el inicio y extensión del fuego. Este hecho explica la inclusión de variables topográficas en la mayor parte de índices de riesgo existentes.

La altitud, pendiente y orientación, pueden obtenerse en soporte digital a partir de un Modelo Topográfico Digital (MTD). A la hora de realizar este trabajo no se disponía de un MTD para la zona de estudio con una resolución espacial adecuada, por lo que el primer paso fue su generación. La utilización de imágenes de satélite y el análisis e integración de variables propuestos recomendaban el uso del formato raster, desechando las estructuras vectoriales.² Este hecho reducía los métodos de interpolación disponibles a dos: a) medias móviles, que estima la altitud de un punto mediante una media de las altitudes de los puntos muestrales más próximos, ponderada de acuerdo a su distancia al punto a estimar, y b) interpolación lineal, que utiliza dos curvas de nivel contiguas para determinar las altitudes de los puntos no muestrales situados entre ellas.

En nuestro caso, procedimos a digitalizar las curvas de nivel maestras y las cotas del mapa topográfico 1:50.000 del Servicio Geográfico del Ejército, añadiendo curvas de menor equidistancia en las zonas de relieve más suave. Con esta información, se realizaron varios ensayos con el método de medias móviles, modificando el radio de búsqueda y el algoritmo de interpolación. Los errores del mejor modelo resultante eran muy superiores a los obtenidos a partir del algoritmo de interpolación lineal, que con 200 puntos de verificación ofreció un error cuadrático medio de 9'8 m. y un error máximo de 32 m. Además, los modelos obtenidos mediante medias móviles presentaban un excesivo suavizamiento en las líneas de cumbres y valles, de difícil solución ya que van ligados al propio algoritmo de interpolación. A la luz de los resultados elegimos el MTD obtenido mediante interpolación lineal, cuyo error medio cuadrático estaba dentro de los límites de error medio permisibles establecidos por el USGS, entidad pionera en el campo de los MTDs (Elassal y Caruso, 1983).

A partir del MTD se generaron, aplicando una ventana de cálculo de 3 x 3 *pixels*, los mapas de pendiente y orientación. También obtuvimos la imagen de iluminación del relieve (fig. 3), calculada para un ángulo de elevación solar de 55° y un ángulo azimutal de 180°. Este ángulo se eligió por corresponderse con las condiciones de adquisición de la imagen utilizada para la cartografía de la vegetación.

² Sobre las estructuras de datos en un SIG pueden consultarse Bosque (1992) y Burrough (1986).

estos trece modelos a la vegetación española (ICONA, 1990b), apareciendo en nuestra zona de estudio los siguientes:

Modelo 1: pastizal continuo fino, seco y bajo, con altura por debajo de la rodilla. El matorral o el arbolado cubren ~~menos de un~~ tercio de la superficie.

Modelo 2: igual al anterior, pero el matorral o arbolado cubren más de un tercio de la superficie sin llegar a dos tercios.

Modelo 4: matorral o arbolado joven muy denso de unos dos metros de altura.

Modelo 5: matorral denso pero bajo, altura no superior a 0'6 metros.

Modelo 6: matorral más viejo e inflamable que en el modelo 5, con alturas entre 0'6 y 1'2 metros.

Modelo 7: matorral muy inflamable, de 0'6 a 2 metros de altura, que propaga el fuego bajo el arbolado.

Modelo 9: hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas sin presencia de matorral. La hojarasca está formada por acículas largas, como en masas de *Pinus pinaster*, o por hojas grandes rizadas, como las de los rebollos (*Quercus pyrenaica*) o las de los castaños (*Castanea sp.*).

La cartografía de modelos combustibles resulta extremadamente laboriosa. Como hemos visto, los modelos combustibles se definen no tanto por el tipo de dosel vegetal como por la vegetación presente en el suelo (sotobosque), por cuanto estos modelos están pensados para la simulación de fuegos de superficie. Puede ocurrir que la cubierta forestal impida obtener información sobre los componentes basales (pastizal o matorral arbolados), lo que imposibilita la discriminación de estos sectores con el empleo de sensores remotos (ya sea fotografía aérea o imagen de satélite).

Pese a este problema, la teledetección puede brindar una información de gran interés para la cartografía de combustibles. Por un lado, permite estratificar la vegetación en zonas de composición uniforme, agilizando posteriormente el trabajo de campo. Además, proporciona información en rangos del espectro no captados por otros medios más tradicionales (infrarrojos próximo y medio). Finalmente, proporciona una información actualizada, rápida y en formato digital, lo que permite su conexión directa a un SIG, y el recurso a variables auxiliares en el reconocimiento de categorías. En nuestro caso, incluimos en la clasificación variables

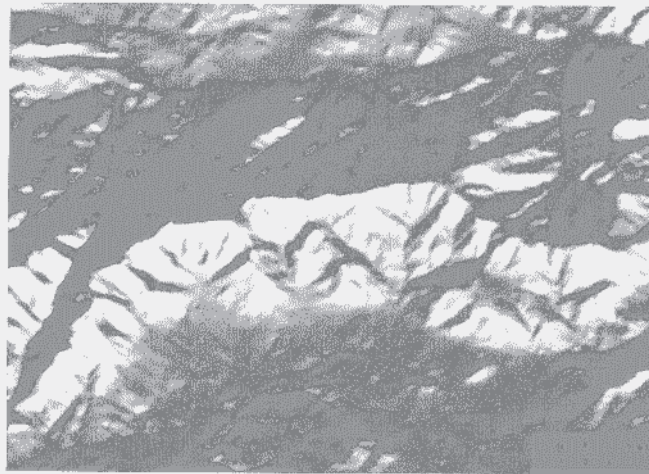


FIGURA 3

Vegetación.—El estado del combustible depende de un elevado número de características: cantidad disponible de combustible para la ignición, su densidad, grado de compactación, inflamabilidad, etc., determinantes de su comportamiento ante el fuego y de su probabilidad de ignición. Medir todas estas propiedades es un proceso demasiado lento para hacer predicciones de incendios; por ello, se ha optado por utilizar modelos combustibles que clasifican las formaciones vegetales de acuerdo a esas características (Anderson, 1982; Burgan y Rothermel, 1984). Estos modelos hacen referencia tanto al comportamiento como a la ignición.

El Servicio Forestal Estadounidense (US Forest Service), en el marco de desarrollo del programa de simulación de propagación de incendios de superficie BEHAVE (Andrews, 1986; Andrews y Chase, 1989; Burgan y Rothermel, 1984), ha creado trece modelos combustibles en función del elemento propagador del fuego (Anderson, 1982). El Servicio de Defensa Contra Incendios Forestales del ICONA ha realizado una adaptación de

topográficas y de textura, con objeto de mejorar la discriminación de modelos combustibles. A partir de esas premisas abordamos esta cartografía mediante tratamiento digital de una imagen Landsat-TM adquirida el 28 de julio de 1988. Esta imagen resultaba idónea para nuestro trabajo por la ausencia de cobertura nubosa, buena iluminación, baja humedad del suelo y condición de máximo riesgo de la vegetación.

La imagen seleccionada carecía de referenciación cartográfica, por lo que procedimos a su corrección geométrica, a fin de integrarla con las variables auxiliares. Se seleccionaron 20 puntos de control, en rasgos no sujetos a dinamismo temporal (cruces de carreteras, presas, etc.) y distribuidos lo más uniformemente posible sobre el territorio abarcado por la imagen. A partir de estos puntos se calculó un polinomio de segundo grado con error cuadrático medio de 29'2 m. (aproximadamente un *pixel*). El trasvase de la información original de la imagen a las nuevas coordenadas se llevó a cabo mediante convolución cúbica, que promedia los valores digitales de los 16 *pixels* más próximos.

Una vez realizada la corrección geométrica nos dispusimos a la clasificación digital de la imagen. La mayor parte de los autores distinguen dos métodos de clasificación (Chuvienco, 1990): a) supervisada, en la que el intérprete selecciona sobre la imagen una serie de muestras representativas de las categorías que pretende obtener, clasificándose el conjunto de la imagen en una de esas categorías, en función de su similitud a esas muestras; y b) no supervisada, donde es el ordenador el que aísla una serie de categorías, en función de contar con niveles digitales homogéneos, dando al intérprete la labor de otorgar un significado temático a esos grupos. Por último, se han propuesto métodos que combinan los dos anteriores, a los que se ha denominado mixtos (Chuvienco y Congalton, 1988a). En este trabajo, ensayamos varias modalidades de clasificación digital: no supervisada, supervisada y mixta; siendo esta última la que ofrecía mejores resultados.

Esta clasificación ha sido denominada mixta porque combina procesos estadísticos no supervisados (análisis de cluster, análisis discriminante) con información de terreno y algoritmos de clasificación supervisada (máxima probabilidad). En un primer paso se realizó un análisis discriminante con 144 parcelas de campo (que representan los modelos combustibles presentes en el área de estudio), utilizando las 6 bandas del sensor TM (excepto el infrarrojo térmico cuya resolución espacial es

muy inferior a la del resto) y cinco bandas auxiliares: altitud, pendiente, iluminación —obtenidas a partir del MTD— y dos bandas de textura ³ —a partir del rojo e infrarrojo próximo, TM3 y TM4, respectivamente—, ya que la situación topográfica y la textura de las formaciones vegetales pueden ser factores importantes a la hora de discriminar los modelos combustibles.

Mediante el análisis discriminante fueron desechadas, debido a su escasa relevancia, tres de las once bandas: pendiente, iluminación y textura del infrarrojo; así como 55 de los casos, en los que no coincidían los valores predichos y los reales.

Una vez seleccionadas las bandas (8) y los casos a utilizar (89) se les aplicó un análisis de cluster. El algoritmo utilizado encontró separabilidad entre 18 agrupaciones, algunas de las cuales estaban integradas por varias categorías de combustibles. Ante esta situación, unimos las parcelas que, dentro de cada clase, formaban parte de un mismo modelo combustible, obteniendo 34 campos de entrenamiento. Con estos campos se llevó a cabo una clasificación supervisada de la imagen, mediante un algoritmo de máxima probabilidad. Al fichero resultante se le aplicó un filtro de mayoría (mediante una ventana de 5 x 5 *pixels*) con objeto de suavizar los resultados de la clasificación.

Para la verificación de la cartografía resultante se han utilizado los 144 campos de entrenamiento iniciales, obteniendo una fiabilidad global de la clasificación del 72%. De estos campos iniciales, únicamente once fueron utilizados como campos de entrenamiento con la información original, el resto de campos de entrenamiento eran valores promedios entre varios de los iniciales, por lo que creemos no queda invalidada su utilización como campos de verificación. En general, la clasificación resultante no presentaba grandes conflictos, a excepción del modelo 7 (matorral arbolado), que resulta muy difícil de discriminar. Los modelos 1 y 2 (pastizales) presentan exactitudes en torno al 80 y 70%, respectivamente. Las láminas de agua y los modelos 5 (matorral bajo) y 9 (arbolado) son los mejor discriminados, con exactitudes en torno al 90%; en tanto que los

³ Estas bandas se obtienen a partir del cálculo de la varianza de los niveles digitales correspondientes, para cada *pixel*, a una ventana de los *pixels* vecinos (3 x 3).

modelos 4 (matorral alto) y 6 (matorral medio) son los peor discriminados, con valores próximos al 65%. Las zonas agrícola-ganaderas y urbanas poseen valores intermedios entre los grupos anteriores (70-90%). Las principales confusiones se produjeron entre los modelos 4, 7 y 9.

Variables meteorológicas.—Las variables meteorológicas desempeñan un papel fundamental en la obtención de los índices de riesgo de incendio forestal. Desafortunadamente los datos climáticos sólo están disponibles para puntos específicos del territorio: los observatorios meteorológicos, distribuidos de forma dispersa a lo largo de nuestra geografía. La existencia de éstos resulta especialmente insuficiente en zonas montañosas, donde la topografía condiciona fuertemente la climatología. A todo ello hemos de añadir que, en el caso de la humedad relativa, los registros son todavía mucho más escasos, ya que sólo aparecen en las estaciones meteorológicas de mayor importancia. En suma, existen notables dificultades para llevar a cabo la representación espacial de estas variables.

Por este motivo, nos ha parecido conveniente introducir algunos métodos de interpolación y extrapolación para estimar los valores climáticos de cualquier punto a partir de los valores registrados en las estaciones meteorológicas más próximas. De este modo, se conseguiría una mayor precisión en el cálculo y estudio de la distribución espacial del índice de peligro. Además, estos métodos aprovechan las posibilidades de análisis espacial que ofrecen los SIGs, por lo que resultan consecuentes con la metodología general adoptada en este trabajo. Estas técnicas de interpolación y extrapolación parten del análisis de las relaciones espaciales entre las variables climáticas y otras ligadas al territorio, como son la topografía (altitud, orientación, pendiente), localización geográfica (latitud, longitud, distancia) y cobertura vegetal. Todas estas variables pueden incorporarse a un SIG, aprovechando además sus herramientas de modelización para la estimación de datos en áreas sobre las que no existen estaciones meteorológicas.

1. Mapa de temperaturas.—Podemos dividir los métodos de interpolación más utilizados para la estimación de la temperatura en dos categorías: a) espacial (polígonos de Thiessen, medias móviles, kriging, análisis de tendencia), que engloba los métodos que estiman el valor de la variable en cada punto sin observación a partir de la distancia o posición respecto a los puntos que cuentan con observaciones, y b) por funciones de regresión (lineal simple y múltiple, polinomios de segundo y

tercer grado, curva logística), basadas en el cálculo de una función entre la variable climática y una o varias variables ligadas al territorio.

El principal inconveniente de los métodos de interpolación espacial es la consideración del territorio como isotrópico. En nuestro caso, la escasez de observatorios en el área de estudio, así como la gran variabilidad interna debida a la topografía aconsejaban el uso de métodos de interpolación por funciones de regresión.

La zona de estudio cuenta con cuatro observatorios meteorológicos, todos ellos por debajo de los 1.000 m. de altitud. Para realizar estimaciones a partir de regresión era necesario contar con un mayor número de estaciones climáticas, que representaran mejor las posibles diferencias topográficas (altitud y orientación, principalmente) y espaciales (latitud y longitud) presentes en la zona de estudio. Decidimos utilizar una red más numerosa de estaciones, que incluye una región climática similar a la estudiada, esto es, las zonas más próximas del Sistema Central en sus dos vertientes. Se seleccionaron todas las estaciones con datos de temperatura (más de cinco años consecutivos en el período 1961-90, recomendado por la OMM para datos de temperatura en zonas montañosas) situadas, aproximadamente, a más-menos un grado de la zona de estudio y que formasen parte del Sistema Central o sus valles adyacentes. En total se han utilizado 27 estaciones con datos térmicos, comprendidas entre la ciudad de Segovia y el Pantano de Rosarito (Toledo), límites septentrional y meridional, y el Barco de Ávila y Pozuelo de Alarcón (Madrid), límites occidental y oriental.

Ninguna de las 27 estaciones seleccionadas poseía series completas, por lo que el primer paso fue el relleno de lagunas mediante el método de regresión (Galán y Fernández, 1992). Para llevar éste a cabo, aplicamos en primer lugar el método de las secuencias (Jansá, 1983), criterio no paramétrico recomendado por la OMM para la verificación de las observaciones. El siguiente paso fue la selección de la estación base a utilizar para cada una de las estaciones restantes, eligiendo aquella con la que existía mayor afinidad geográfica, proximidad espacial y coeficiente de correlación (siempre superior a 0'7).

Tras el relleno de lagunas de las estaciones meteorológicas, realizamos varios ensayos para correlacionar variables topográficas (altitud, pendiente y orientación) y locacionales (latitud y longitud) con la distribución

espacial de las temperaturas. Teniendo en cuenta los resultados de estos ensayos, optamos por aplicar una función de regresión simple ya que únicamente la variable altitud aportaba información relevante a la variación de la temperatura. Establecimos regresiones lineal y exponencial entre altitud y temperatura, que ofrecieron, al 95% de probabilidad, coeficientes de determinación y correlación de 89'8% y -0'95, respectivamente, para la regresión lineal y 90'1% y -0'95 para la exponencial. Los errores de estimación también eran muy parecidos, con 0'83° y 0'88 °C de error medio para la lineal y exponencial, respectivamente. En consecuencia, seleccionamos la regresión lineal, que presentaba un menor error medio y los procesos de cálculo necesarios eran más sencillos. A partir de esa ecuación y el MTD obtuvimos la cartografía de la temperatura para nuestro área de estudio.

Los resultados nos ofrecen una variación térmica entre 20° y 34 °C, siendo el valor promedio 28'7 °C. Los valles presentan las mayores temperaturas, que superan los 32 °C en el del Tiétar; en tanto que las más bajas aparecen en las zonas de cumbres.

2. Mapa de humedad relativa.—A diferencia de la temperatura se han diseñado muy pocos métodos de estimación de la humedad relativa a partir de mediciones realizadas en las estaciones meteorológicas más cercanas. La escasez de observatorios que registren esta variable ha determinado que los métodos de interpolación espacial sean insuficientes para escalas de detalle. Por otra parte, la gran dependencia de la humedad relativa con respecto a la temperatura ha dado lugar a que su estimación se realice a partir de las mediciones de esta última (temperaturas media y del punto de rocío). Este es el caso del método de extrapolación que hemos utilizado en este trabajo, sugerido por Kerry Anderson, investigador del Servicio Forestal Canadiense (Anderson, 1993).

Este método calcula la humedad relativa de un punto a partir de la temperatura real y la del punto de rocío de la estación meteorológica más próxima, del gradiente térmico altitudinal de la zona y de la diferencia de altitud entre este punto y la estación meteorológica utilizada. Se asume una atmósfera estable, un gradiente y una cantidad de humedad absoluta constantes y la no existencia de influencias locales de la superficie. La humedad re relativa es el resultado del cociente entre la presión de saturación del vapor de agua y la presión del vapor de agua a temperatura

ambiente, deduciéndose la presión, de acuerdo a la ecuación hidrostática, como una función exponencial de la altitud.

En función de estas premisas, la humedad relativa de cualquier zona puede estimarse a partir de una estación meteorológica próxima con mediciones de temperatura del aire y del punto de rocío, mediante la siguiente expresión:

$$U = \frac{e_s(T) \exp\left(-\frac{g\Delta z}{R_d\left(T + \frac{\gamma\Delta z}{2}\right)}\right)}{e_s\left(T + \frac{\gamma\Delta z}{2}\right)}$$

siendo U la humedad relativa en tantos por 1, $e_s(T_d)$ la presión del vapor saturante a temperatura T_d , T y T_d las temperaturas actual y del punto de rocío (K), respectivamente, de la estación base, Δz la diferencia de altitud entre el punto a estimar y la estación meteorológica base, g la aceleración gravitacional, γ el gradiente térmico altitudinal de la zona y R_d la constante de la ecuación de estado de los gases, que para el aire es 287'05 J/Kg. K. Esta ecuación requiere la presión de vapor saturante (e_s) para la temperatura actual y la del punto de rocío (T y T_d). Para su obtención se ha utilizado la siguiente expresión matemática:

$$\log_{10}(e_s) = 9,4041 - \frac{2354}{T}$$

expresándose la temperatura (T) en Kelvin.

A partir de estas ecuaciones, utilizando el MTD y los datos obtenidos de la estación de Piedralaves, se generó el mapa de humedades relativas (fig. 4). Los resultados nos ofrecen una humedad relativa entre 17 y 31%, siendo el valor promedio 21%. Los valles presentan los valores menores de humedad relativa, que solamente descienden de 18% en el del Tiétar; en tanto que los más altos aparecen en las zonas de cumbres.

Factor humano.—Al analizar los partes de incendio de los últimos años destaca la alta incidencia de la actividad humana en la causalidad de incendios forestales de la zona de estudio. El 80% de los incendios han sido debidos al hombre, ya sea por negligencia o intencionados, poseyendo un mayor peso los primeros. Por su parte, en el grupo de las negligencias, las más significativas son las originadas por fumadores (37'2%), las quemas agrícola-ganaderas (25'7%) y las provocadas por hogueras (16'8%).

aplicación del test de la χ^2 confirmó una diferencia significativa entre las frecuencias observadas y las esperadas de incendios, en función de su lugar de origen (cuadro I).

Para la obtención del mapa de riesgo humano se digitalizaron todos los caminos y carreteras del área de estudio, así como las zonas con afluencia de excursionistas. Considerando que la actividad humana no se ciñe al estrecho margen de la carretera o camino, sino que se dispersa en torno a ellos, procedimos a delimitar corredores de proximidad. En nuestro caso, señalamos un corredor de 150 m. en torno a cada carretera y camino. De este modo creamos un mapa de riesgo asociado al hombre compuesto por cuatro categorías: zonas por donde atraviesa o a menos de 150 m. de una carretera, zonas de ocio, zonas por donde atraviesa o a menos de 150 m. de un camino y otras zonas en el monte. Las ponderaciones de cada una de estas categorías son proporcionales a la frecuencia de aparición de incendios.

Diseño de un SIG orientado a la evaluación de riesgo

Nuestro modelo de riesgo, en función del propuesto por el ICONA, está compuesto por tres subíndices: probabilidad de ignición, riesgo derivado de la vegetación y riesgo asociado a las actividades humanas. Para su integración hemos considerado el carácter multiplicativo de los factores que inciden en el inicio o comportamiento de un incendio, opinión más extendida entre los expertos en prevención de incendios; no obstante, debido a la novedad del factor de riesgo humano en este tipo de índices, no

CUADRO I
VARIABLES DE ENTRADA EN EL TEST DE SIGNIFICACIÓN ESTADÍSTICA

	Carreteras	Caminos	Z. Ocio	Otros	Total
Nº de incendios	77	45	13	161	296
% Sup. ocupada	1,9	8,7	0,5	88,9	100
Nº inc. esperados	5,6	25,8	1,5	263,1	296
Grado de riesgo	23	3	14	1	—



Figura 4

Este hecho evidencia la necesidad de introducir, en los índices de riesgo de incendios forestales, un elemento que recoja la probabilidad de que se origine un incendio por causas humana. En nuestra propuesta hemos adoptado una primera aproximación a este factor que relaciona la actividad humana con las vías de comunicación y con las zonas en las que se realizan actividades de ocio (zonas de excursionistas y acampadas, principalmente). Evidentemente, las carreteras y caminos son las líneas habituales de penetración para la realización de la mayor parte de las actividades humanas, por lo que su influencia resulta especialmente significativa en aquellos incendios cuyas causas estén relacionadas con el hombre. Este hecho es confirmado en el apartado «junto a» de los partes de incendio, que hace referencia al lugar del inicio del fuego. En este apartado, el 26% de los incendios se producen próximos a carreteras, en tanto que estas vías de comunicación sólo ocupan el 1,9% de la superficie del área de estudio; algo similar sucede con los caminos y las zonas de ocio. La

hemos querido resaltar demasiado su importancia, por lo que ha sido introducido con carácter aditivo. La integración de estos tres índices se ha llevado a cabo mediante la siguiente función:

$$RI = (PI/10) * V + RH$$

siendo RI el riesgo de incendios, V el riesgo derivado de la vegetación y RH el riesgo asociado a la actividad humana.

Probabilidad de ignición.—Los datos de partida fueron la temperatura y la humedad relativa del aire, que se combinaron, en función de las tablas creadas por el ICONA, para la obtención de la humedad básica del combustible. Posteriormente se corrigió ésta en función de la pendiente, orientación y exposición del combustible (soleado o en sombra), resultando la humedad corregida del combustible. Finalmente, se combinó la variable anterior con la temperatura y el grado de exposición al sol de los combustibles para la obtención de la probabilidad de ignición.

El mapa resultante presenta valores de probabilidad de ignición entre 40 y 100%, siendo el valor más frecuente el de 60%. Los valores más elevados, el 100%, aparecen en el valle meridional y, muy escasamente, en el septentrional. Los valores más bajos, el 40%, aparecen en las zonas arboladas más elevadas. Los valores intermedios aparecen en ambas laderas del sistema montañoso.

Riesgo derivado de la vegetación.—Para otorgar el peso y grado de riesgo de los modelos combustibles previamente cartografiados, llevamos a cabo un cálculo de su velocidad de propagación con el programa BEHAVE utilizando las condiciones meteorológicas y topográficas medias del área de estudio. Los resultados obtenidos eran comparables a los ofrecidos por otros autores en zonas de características similares (Anderson, 1982; AMA y Tragsatec, 1993). A partir de estos valores se otorgaron los grados de riesgo a cada modelo combustible, dando un valor de riesgo 10 al modelo con máxima velocidad de propagación y distribuyendo el resto de los valores en proporción a ese (cuadro II).

Riesgo asociado a las actividades humanas.—Se obtuvo, como antes se indicó, a partir de las zonas de accesibilidad y áreas de ocio, ponderadas de acuerdo a la incidencia histórica del fuego.

Integración de las variables.—Estos tres subíndices fueron integrados mediante la fórmula anteriormente descrita y el fichero resultante fue

CUADRO II
GRADO DE RIESGO DE LOS MODELOS COMBUSTIBLES

Modelo combustible	Vel. propagada	Grado de riesgo
1	39	7,6
2	14	2,7
4	51	10,0
5	9	1,8
6	14	2,7
7	11	2,2
9	3	0,6

reclasificado en cuatro categorías de riesgo en función del criterio esbozado por el ICONA, de acuerdo al siguiente baremo:

Grave: > 36; Alto: 12 -36; Moderado: 3 -12; Bajo: < 3

La distribución de superficies resultante es: a) riesgo bajo: 5.735 ha. (14'60%), b) moderado: 13.408 ha. (34'14%), c) alto: 10.009 ha. (25'49%), y d) grave: 10.122 ha. (25'77%). Los valores de máximo riesgo aparecen, principalmente, en los valles. Son zonas de alta probabilidad de ignición (superior al 80%) cubiertas por pastos y matorral (modelos 1 y 4, principalmente). En esta categoría se integran el 50% de las zonas de máximo riesgo humano, el 84% de riesgo alto y el 31% de moderado. Los valores de alto riesgo se encuentran, junto a la primera categoría, en los valles y en las laderas de ambas vertientes. Predominan matorrales (modelos 5, 6 y 7) y pastos (modelo 2) de menor riesgo que los de la categoría anterior. Su probabilidad de ignición es alta (superior al 70%). Engloba el 50% de las zonas de máximo riesgo humano, el 16% de riesgo alto y el 31% de moderado. Con riesgo moderado aparecen las zonas más elevadas de ambas vertientes, cubiertas por matorral bajo (modelo 5), y en zonas arboladas (modelo 9) de media ladera y del Valle del Tiétar. Son zonas de probabilidad de ignición media (50-70%) y con áreas de riesgo humano bajo y moderado. Las zonas de riesgo bajo están formadas por masas arboladas de ambas vertientes. Su probabilidad de ignición es baja (inferior al 60%) y sólo se localizan áreas de bajo riesgo humano.

modelos o índices ya existentes (probabilidad de ignición del ICONA, modelos combustibles del BEHAVE...) y aceptados en el campo de los incendios forestales.

Por otro lado, de acuerdo a las estadísticas, a nivel nacional, del ICONA, más del 96% de los incendios mayores de 500 ha. del verano de 1993 ocurrieron en condiciones de peligro de altas a extremas, si bien, estos datos únicamente hacen referencia a la probabilidad de ignición.

Conclusiones

La cartografía resultante puede constituir un instrumento eficaz de gestión, complementando los sistemas de alerta convencionales. Permite estratificar un área relativamente amplia (aquí se han incluido 580 Km,² pero podría haber sido una zona mucho más extensa) en niveles de riesgo, localizados con alta precisión geográfica. De esta forma, podrían concentrarse los esfuerzos de prevención en estos sectores, paliando la escasez de recursos. La cartografía de riesgo a este nivel de detalle puede emplearse para la gestión del combustible (planificar quemas controladas, limpiezas manuales o mecánicas del sotobosque, etc.), diseñar líneas cortafuegos (pistas de tierra o corredores de vegetación), localizar torretas de vigilancia, planificar las cuadrillas móviles, situar estaciones meteorológicas, generar planes de ataque, localizar medios de extinción, etc.

Finalmente, el formato digital de las variables utilizadas permite una fácil y rápida actualización, facilita el uso de otros criterios para su ponderación e integración y posibilita su uso en otras labores de gestión forestal (gestión del combustible, planes de pre-extinción, etc.).

BIBLIOGRAFÍA

- AGEE, J.K. y PICKFORD, S.G. (1985): *Vegetation and fuel mapping of North Cascades National Park. Final Report*, Seattle, College of Forest Resources.
- ALVARADO, E.J. (1982): «Distribución espacial de los incendios forestales en Cáceres», *NORBA* (Revista de Arte, Geografía e Historia), 3, pp. 77-88.
- AMA (C.A.M.) y TRAGSATEC (1993): *Plan de protección contra incendios de los ecosistemas forestales de la Comunidad Autónoma de Madrid*, Madrid, no publicado.
- ANDERSON, H.E. (1982): *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*, USDA, Forest Service.

- ANDERSON, K. (1993): *Variación de la humedad relativa en función de la altitud*, aportación personal.
- ANDREWS, P.L. (1986): *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system -Burn subsystem, part 1*, USDA, Forest Service.
- ANDREWS, P.L. y CHASE, C.H. (1989): *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system -Burn subsystem, part 2*, USDA, Forest Service.
- BIELZA DE ORY, V. (1975): «Una visión geográfica acerca de la degradación del paisaje y los problemas del medio ambiente», *Cuadernos de investigación (Geografía e Historia)*, 1 (2), pp. 15-39.
- BOSQUE SENDRA, J. (1992): *Sistemas de Información Geográfica*, Madrid, Rialp.
- BRASS, J., LIKENS, W.C. y THORNHILL, R.R. (1983): *Wildland Inventory for Douglas and Carson City Counties, Nevada, Using Landsat and Digital Terrain Data*, NASA Technical Paper 2, 137, Moffet Field.
- BURGAN, R.E. y ROTHERMEL, R.C. (1984): *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system -Fuel subsystem*, Gen. Tech. Rep. INT -167, USDA, Forest Service.
- BURGAN, R.E. y SHASBY, M.B. (1984): «Mapping broad-area fire potential from digital fuel, terrain, and weather data», *Journal of Forestry*, 82, pp. 228-231.
- BURROUGH, P.H. (1986): *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Oxford, Clarendon Press.
- CHOU, Y. (1992): «Management of wildfires with a geographical information systems», *International Journal of Geographical Information Systems*, 6 (2), pp. 123-140.
- CHUVIECO, E. (1990): *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Madrid, Rialp.
- CHUVIECO, E. y CONGALTON, R.G. (1988a): «Using Cluster Analysis to Improve the Selection of Training Statistics in Classifying Remotely Sensed Data», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (9), pp. 1275-1281.
- (1988b): «Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data», *Geocarto International*, vol. 3, pp. 41-54.
- (1989): «Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping», *Remote Sensing of Environment*, 29, pp. 147-159.
- COSENTINO, M.J., WOODCOCK, C.E. y FRANKLIN, J. (1981): «Scene analysis for wildland fire-fuel characteristics in a Mediterranean climate», *Proc. 15 th Inter. Symp. on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, pp. 635-646.
- DIXON, R., SHIPLEY, W. y BRIGGS, A. (1985): «Landsat -A tool for mapping fuel types in the Boreal Forest of Manitoba: a pilot study», *Fort Collins, Pecora X Symposium*, pp. 392-393.
- ELASSAL, A.A. y CARUSO, V.M. (1985): *Digital elevation models*, U.S. Geological Survey, Circular 895-B.
- GALÁN, E. y FERNÁNDEZ, F. (1992): «Metodología del análisis temporal y espacial de los elementos climáticos», *Proc. Actas del V Coloquio de Geografía Cuantitativa*, Universidad de Zaragoza, pp. 437-451.
- GUM, P.W. (1985): «Computerization of fire dispatch utilizing satellite imagery "Okanogan Project"», *Fort Collins, Pecora X Symposium*, pp. 315-325.
- ICONA (1990a): *V Curso Superior sobre defensa contra incendios forestales*, Madrid, ICONA.
- ICONA (1990b): *Clave fotográfica para la identificación de modelos de combustible*, Madrid, ICONA.
- JANSÁ GUARDIOLA, J.M. (1983): *Curso de Climatología*, Madrid, Instituto Nacional de Meteorología.

La cartografía de riesgo resultante (fig. 5), que engloba probabilidad de ignición y peligro asociado al comportamiento, puede ser de gran interés para los servicios de planificación y defensa contra incendios forestales, ya que recoge, como hemos indicado, una valoración de las variables más destacadas en el inicio y desarrollo del siniestro, con un nivel de resolución espacial bastante elevado.

Evaluación de los resultados

No ha sido posible llevar a cabo una validación del modelo propuesto ya que con posterioridad a su creación no se han producido, afortunadamente, incendios de grandes dimensiones en la zona de estudio. Por ello, únicamente podemos evaluar este modelo en función de las premisas utilizadas en su creación, que en su mayoría han sido obtenidas a partir de

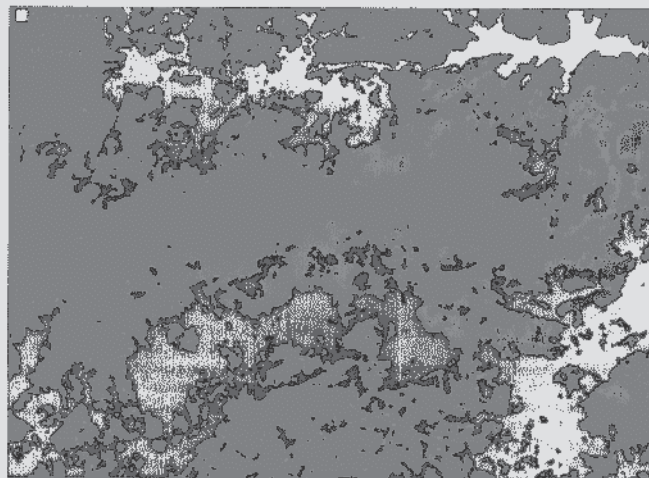


FIGURA 5

- LOURENÇO, L. (1988a): «Incêndios florestais entre Modêgo e Zêzere no período de 1975 a 1985», *Cuadernos de Geografía*, 7, Centro de Mecânica dos Fluidos, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidad de Coimbra.
- (1988b): *Evolução de vertentes e erosão dos solos, nas serras de Xisto do Centro de Portugal, em consequência de incêndios florestais. Análise de casos observados em 1987*, Centro de Mecânica dos Fluidos, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidad de Coimbra.
- LOURENÇO, L. y GONÇALVES, A.B. (1990a): «Cartography of forest fires recorded in Central Portugal from 1983 to 1989», *Proc. International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, pp. A.08-1 a A.08-16.
- (1990b): «The study and measurement of surface flow and soil erosion on slopes affected by forest fires in Serra da Lousã», *Proc. International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, pp. C.05-1 a C.05-13.
- MARCHETTI, M. (1990): «Forest fire hazard map: pilot project for Italy», Coimbra, *International Conference Forest Fire Research*, pp. B25-1 a B25-12.
- MARTIN, M.P. y CHUVIECO, E. (1993): «Using AVHRR images for fire mapping and fire growth monitoring in the mediterranean forests», *International Workshop on Satellite Technology and GIS for mediterranean forest mapping and fire management*, Thessaloniki (en prensa).
- MINNICH, R.A. (1978): *The Geography of Fire and Conifer Forests in the Eastern Transverse Ranges*, California, tesis doctoral, U.C. Los Angeles.
- RABII, H.A. (1979): *An Investigation of the Utility of Landsat-2 MSS Data to the Fire-Danger Rating Area, and Forest Fuel Analysis within Crater Lake National Park*, Oregon State University, tesis doctoral.
- SALAS, J. y CHUVIECO, E. (1992): «¿Dónde arderá el bosque? Previsión de incendios forestales mediante un S.I.G.», Madrid, *I Congreso de la AESIGYT, «Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión Territorial»*, pp. 430-446.
- (1994): «Geographic Information Systems for Wildland Fire Risk Mapping», *Wildfire*, 3 (2), pp. 7-13.
- SALAZAR, L.A. (1982): *Remote Sensing Techniques Aid in Preattack Planning for Fire Management*, Berkeley, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, USDA, Forest Service.
- (1987): *Study plan: spatial analysis of fire load potential*, Gen. Tech. Rep., Berkeley, Pacific Southwest Experiment Station.
- SALAZAR, L.A. y POWER, J.D. (1988): «Three dimensional representations for fire management planning: a demonstration», *Proc. GIS'88*, San Antonio (Texas), pp. 948-960.
- TRABAUD, L. (1982): *Effects of past and present fire on the vegetation of the French Mediterranean Region*, Gen. Tech. Rep., Berkeley, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, USDA, Forest Service.
- VASCONCELOS, M. y GUERTIN, D.P. (1992): «Firemap. Simulation of fire growth with a Geographic Information System», *International Journal of Wildland Fire*, 2, pp. 87-96.
- VÉLEZ, R. (1985): «Aplicación de la predicción del peligro para la prevención de los incendios forestales», en *Estudios sobre prevención y efectos ecológicos de los incendios forestales*, Madrid, ICONA, pp. 15-19.
- (1986): «Incendios forestales y su relación con el medio rural», *Revista de Estudios Agro-Sociales*, n. 136, Madrid.
- YOOL, S.R., ECKHARDT, D.W., ESTES, J.E. y COSENTINO, M.J. (1985): «Describing the brushfire hazard in southern California», *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 75, pp. 417-430.

RESUMEN.—*Sistemas de Información Geográfica y Teledetección en la previsión de incendios forestales: Un ensayo en el Macizo Oriental de la Sierra de Gredos.* Presentamos una aportación metodológica a la cartografía del riesgo de incendio forestal en espacios mediterráneos con el uso de dos nuevas tecnologías de análisis espacial, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Teledetección. Este ensayo ha sido realizado en el sector oriental de la Sierra de Gredos, zona históricamente castigada por este fenómeno. Siguiendo las pautas marcadas por el Grado Actual de Peligro de Incendios, índice creado por el ICONA, hemos espacializado e integrado en un SIG las variables topográficas y meteorológicas, los modelos combustibles y el componente de riesgo humano, que determinan el inicio y propagación del incendio forestal. A partir de estas variables se han creado tres mapas de riesgo, *Probabilidad de Ignición*, *Riesgo derivado de la Vegetación* y *Riesgo asicado a las Actividades Humanas*, cuya combinación ha dado lugar al *Riesgo Local de Incendios*, objetivo último de este proyecto. Esta metodología permite estratificar, con bastante precisión geográfica, en niveles de riesgo un área relativamente amplia. De esta forma, podrían concentrarse los esfuerzos de prevención (planes de defensa y extinción) en estos sectores, paliando la escasez de recursos.

PALABRAS CLAVE.—Cartografía. Sistemas de Información Geográfica. Teledetección. Prevención de Incendios Forestales.

ABSTRACT—*Forest Fires Risk Mapping using Geographic Information Systems and Remote Sensing: a test study in the Gredos Sierra.* Geographic Information System and Remote Sensing techniques are proposed as suitable tools for mapping the spatial distribution of forest fire danger. Using as study case an area severely affected by forest fires in Central Spain, topography, meteorological data, fuel models and man-caused risk were spatialized and incorporated to a GIS. Three danger maps were generated: probability of ignition, fuel hazard and human risk, and all of them were overlaid in an integrated fire danger map, based upon the criteria established by the Spanish Forest Service. GIS make it possible to improve our suppression planning (specially when hotshot crews are involved) and to elaborate regional fire defence plans.

KEY WORDS.—Cartography. Geographic Information Systems. Remote Sensing. Forest Fire Risk.

RESUMÉ.—*Systèmes d'Information Géographique et Télédétection dans la prévention d'incendies forestiers: un essai dans le Massif Oriental de la Sierra de Gredos.* On présente un apport méthodologique à la cartographie du risque d'incendie forestier sur des espaces méditerranéens en utilisant deux technologies nouvelles d'analyse spatial, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la Télédétection. Cet essai a été réalisé sur le secteur oriental de la Sierra de Gredos, zone qui a été historiquement touchée par ce phénomène. Tout en suivant les règles du «Degré actuel de danger d'incendies» créé par l'Institut Espagnol pour la conservation de la nature, on a spatialisé et intégré sur un SIG les variables topographiques et météorologiques, les modèles combustibles et le composant de risque humain qui déterminent le début et/ou la propagation de l'incendie forestier. A partir de ces variables on a créé trois cartes de risque : Probabilité d'ignition, Risque due à la végétation et Risque lié aux activités humaines dont la combinaison a abouti au Risque local d'incendies, but dernier de ce projet. Cette méthodologie permet de stratifier une zone assez grande en différents niveaux de risque avec de précision géographique. De cette façon on pourrait concentrer les efforts de prévention (travaux de défense et d'extinction) sur ces secteurs, en palliant la manque de ressources.

MOTS CLÉ.—Cartographie. Systèmes d'information Géographique. Télédétection. Prévention d'incendies forestiers.