

Modelització i tecnologies de la informació per al suport a la lluita contra els incendis forestals

Anna Badia Perpinyà

Universitat Autònoma de Barcelona. Departament de Geografia
08193 Bellaterra (Barcelona). Spain

Data de recepció: gener 1997

Data d'acceptació: gener 1997

Resum

La importància i l'abast dels incendis forestals pels efectes devastadors que tenen fa necessari un estudi detallat i integrat d'una sèrie d'aspectes que inclouen des de l'anàlisi de la causalitat passant per la distribució espacial i temporal dels incendis, fins arribar a l'estudi de la planificació dels recursos i equipaments d'extinció. L'avenç en les tecnologies de la informació ha fet possible integrar aquells elements que intervenen en l'anàlisi del procés d'ignició, de propagació i del comportament del foc facilitant l'establiment de polítiques de prevenció i extinció. L'article analitza tots aquells aspectes que cal considerar en l'anàlisi del perill i del comportament dels incendis i en l'establiment de polítiques de prevenció, fent èmfasi en la importància de la modelització i les tecnologies de la informació per al suport a la lluita contra els incendis forestals.

Paraules clau: tecnologies de la informació, modelització, incendis forestals, perill d'incendi, simulació del comportament del foc.

Resumen. *Modelización y tecnologías de la información para el apoyo en la lucha contra los incendios forestales*

La importancia y el alcance de los incendios forestales por sus efectos devastadores requieren un estudio detallado y integrado de una serie de aspectos que incluyen desde el análisis de la causalidad pasando por la distribución espacial y temporal de los incendios, hasta llegar al estudio de la planificación de los recursos y equipamientos de extinción. El avance en tecnologías de la información ha hecho posible integrar aquellos elementos que intervienen en el análisis del proceso de ignición, de propagación y del comportamiento del fuego facilitando el establecimiento de políticas de prevención y extinción. El artículo analiza los aspectos que se deben considerar en el análisis del peligro y del comportamiento de los incendios y en el establecimiento de políticas de prevención, poniendo énfasis en la importancia de la modelización y las tecnologías de la información como soporte a la lucha contra los incendios forestales.

Palabras clave: tecnologías de la información, modelización, incendios forestales, peligro de incendio, simulación del comportamiento del fuego.

Résumé. *Modélisation et technologies de l'information pour encourager la lutte contre les incendies forestiers*

L'importance et l'ampleur des incendies forestiers à cause de ses effets destructifs, exigent nécessaire une étude détaillée et intégrée d'une série d'aspects qui incluent de l'analyse de

l'azar à l'étude de la planification des ressources et des équipement d'extinction, en passant par la distribution de l'espace et du temps des incendies. Le développement des technologies de l'information permet d'intégrer les éléments qui interviennent dans l'analyse du processus d'ignition, de propagation et du comportement du feu, en facilitant ainsi l'établissement de politiques de prévention et d'extinction. L'article approfondit sur les aspects à considérer dans l'analyse du risque et du comportement des incendies et dans l'établissement de politiques de prévention. D'autre part, l'accent est mis sur l'importance de la modélisation et les technologies de l'information pour encourager la lutte contre les incendies forestiers.

Mots clé: technologies de l'information, modélisation, incendies forestiers, risque d'incendie, simulation du comportement du feu.

Abstract. *Modelling and computer technology to combat forest fires*

The devastating effects of forest fires are such that the topic requires detailed study, integrating the aspects of cause analysis, spatial distribution and temporal incidence, in order to, finally, study the planning of resources and extinction services. Advances in computer technology have made it possible to incorporate the study of aspects related to the process of ignition, propagation and behaviour, which has made it easier to establish prevention and extinction policies. This article examines the elements involved in fire risk and behaviour analysis, and emphasises the importance of modelling and computer technology in combatting forest fires.

Key words: computer technology, modelling, forest fires, fire risk, fire behaviour simulation.

Sumari

Introducció

La importància i la reincidència dels incendis forestals, la destrucció dels recursos naturals, les consegüents pèrdues ecològiques i econòmiques que això comporta i més encara quan es tracta de pèrdues de vides humanes, fa necessari el desenvolupament d'una política de prevenció més eficient. La modelització i la ràpida evolució de les tecnologies de la informació i la seva introducció en aquest camp per al suport a la gestió de la prevenció i/o extinció dels incendis, aporten grans beneficis per dur a terme una planificació més acurada de les àrees més vulnerables als incendis forestals.

La diversitat de factors que determinen el comportament dels incendis forestals necessiten una metodologia d'anàlisi integrada. Els avenços en tecnologia

espacial, i sobretot l'aplicació dels sistemes d'informació geogràfica (SIG), permeten posar en relació tots els elements que intervenen en l'inici i la propagació del foc, i alhora faciliten l'establiment de polítiques de prevenció i extinció dels incendis forestals. És possible d'aquesta manera fer una anàlisi molt més exhaustiva i per tant més efectiva, si es compara amb els mètodes tradicionals que es basen únicament amb sortides de camp, mapes analògics convencionals i anàlisi de fotografies aèries. L'ús d'aquestes tècniques no implica que s'hagin d'abandonar els mètodes tradicionals, ans al contrari, continuen essent sistemes d'informació imprescindibles.

L'aplicació de models en el camp dels incendis forestals ha estat un mètode desenvolupat durant dècades per al suport a les tasques per a la planificació de la prevenció i dels recursos i equipaments d'extinció. La millora d'aquests models ha seguit un curs paral·lel al desenvolupament de noves tecnologies que permeten agilitar l'aplicació dels mateixos models. D'aquesta manera, des dels primers models desenvolupats per a la predicció del comportament del foc, com els de Rothermel (1972), el NFDRS —National Fire Danger Rating System— (Deeming i altres, 1972, 1974) i Albini (1976), que van suposar la base del programa BEHAVE, desenvolupat pels americans —sense una representació cartogràfica específica, però utilitzant sistemes d'informació adaptats als càlculs matemàtics per al desenvolupament d'una aplicació—, s'ha arribat a models que utilitzen com a eina de suport tecnologies de la informació molt més avançades, s'han dissenyat i/o adaptat els sistemes d'informació geogràfica a les aplicacions pròpies de la gestió de la planificació de la prevenció i extinció dels incendis forestals.

Necessitats de coneixement i anàlisi que planteja la lluita contra els incendis forestals

L'anàlisi i gestió dels incendis forestals, així com la formulació de models per a la predicció del perill d'ignició i de propagació i del comportament del foc, es fonamenta en la física i en la química del procés de combustió. És per aquest motiu que en tot projecte d'investigació cal un treball previ de coneixement de la teoria del foc i de tots aquells fenòmens que fan possible que el foc s'iniciï i es propagui. El seu estudi és fonamental per analitzar els factors i les condicions que fan el territori més vulnerable als incendis (tant en termes d'ignició com de propagació) i que permeti examinar amb precisió el comportament del foc pel que fa sobretot a velocitat de propagació i a intensitat calòrica.

Un dels instruments de cara a la lluita contra els incendis forestals, la seva prevenció i extinció, és la possibilitat de determinar el perill en el temps i en l'espai. La predicció dels incendis ha de fer possible respondre les preguntes següents: quan es produiran?, on? i com es desenvoluparan? La predicció del perill és fonamental a l'hora d'establir polítiques de prevenció més efectives. És, doncs, necessari delimitar les zones més vulnerables, tant pel que fa a la ignició resultat del nivell d'activitat dels agents causants, com la propagació a

causa d'uns condicionants favorables, ja siguin permanents o canviants, i analitzar el comportament del foc. És a partir d'aquesta delimitació del perill que és possible optimitzar la distribució dels recursos per a la lluita contra els incendis i preveure el desenvolupament del foc en cas d'incendi. Cal, doncs, aturar-se prèviament a entendre tot el procés de combustió, i determinar els fenòmens condicionants perquè es desenvolupi tot aquest procés i quines relacions s'estableixen entre ells.

La ignició, la propagació i el comportament del foc

L'estudi dels incendis forestals se centra principalment en tres fases: la ignició, la propagació i l'extinció. Es tracta de tres fases del procés del foc temporalment diferents. El procés d'ignició es dona en el moment que un cos entra en combustió. Els components específics de la fase d'ignició són les causes, per les quals cal entendre no només aquells agents que aporten la font de calor al combustible, sinó aquells fets que faciliten la ignició i que donen intensitat suficient a aquests agents perquè la seva activitat pugui originar un incendi.

La propagació es caracteritza per un procés mitjançant el qual el foc consumeix combustible; depèn de la disponibilitat de combustible, de les seves característiques físiques, del pendent del terreny i sobretot de la força i direcció del vent. La propagació té un caràcter específicament territorial; els incendis es desenvolupen territorialment i la seva manera d'analitzar-ho és a partir de l'estudi del comportament del foc. Quan parlem de comportament del foc parlem en termes de creixement i en dos sentits: creixement en intensitat i en extensió.

La probabilitat que un incendi s'iniciï i es propagui s'analitza en termes de perill. En el camp dels incendis forestals s'ha demanat sovint que s'utilitzi la terminologia adient per referir-se a la probabilitat d'ocurrència dels incendis forestals. El cert és que els termes anglosaxons *risk*, *danger* i *hazard* s'han utilitzat indiferentment i amb certa confusió. De totes maneres, al llarg de l'article es parlarà de perill d'ignició i de propagació com a probabilitat d'ocurrència i per fer referència a la vulnerabilitat del territori. El *Glossary of Forest Fire Management Terms* (Merril i altres, 1987), permet aclarir cadascun d'aquests conceptes aplicats en el camp dels incendis forestals.

Factors determinants en l'inici i en la propagació del foc

La lluita contra els incendis forestals ha de passar pel coneixement d'una sèrie d'aspectes que són imprescindibles a l'hora de plantejar possibles iniciatives de gestió. La principal prioritat de coneixement és la diversitat de fenòmens que intervenen en l'inici d'un incendi i la seva propagació passant pel coneixement del possible comportament del foc.

La consideració de les diferents variables que faciliten que la fase d'ignició i de propagació tinguin èxit s'ha fet en funció de la bibliografia més habitual d'incendis forestals (Davis, 1959; Pyne, 1984; etc.) o a partir de diversos models

que tenen com a principal objectiu determinar la probabilitat d'ignició i/o propagació (Rothermel, 1972; Burgan i Rothermel, 1986; Andrews, 1986; etc.).

Cal, en primer lloc, determinar les possibles causes que aporten foc al combustible forestal. Les causes i la freqüència dels incendis permeten determinar les condicions de perill d'una àrea en funció del nombre potencial d'incendis ocorreguts en aquell mateix indret. No és possible conèixer amb exactitud totes les causes dels incendis forestals, però, tanmateix, les estadístiques permeten determinar les tendències generals i orientar una investigació complementària.

Un cop determinades les causes i amb una investigació retrospectiva dels diferents incendis ocorreguts en una àrea determinada, amb la qual cosa és possible deduir la probabilitat d'ignició, cal analitzar tots aquells aspectes que interactuen en el medi i fan possible que la ignició tingui èxit: el combustible forestal, les condicions meteorològiques i la topografia, tal com queda reflectit en l'esquema (figura 1).

La lluita contra els incendis forestals

Hi ha tres aspectes clau que són els que han d'orientar la investigació en el camp dels incendis forestals:

- La distribució espacial i temporal dels incendis i la possibilitat de preveure el seu comportament. Conèixer com es distribuïran els incendis tant en l'espai com en el temps i preveure la seva tendència és un requisit previ a l'establiment de polítiques de prevenció i extinció. En aquest sentit, l'aplicació de models és el procediment més adequat, ja que possibilita una simplificació de la realitat. La modelització del perill i el comportament dels incendis ofereix la possibilitat d'ordenar el territori d'acord amb una probabilitat més o menys gran que es produeixi un incendi i d'acord amb la magnitud que pot agafar el foc una vegada iniciat. Amb la modelització s'intenta reproduir determinades condicions o fenòmens que incideixen en aquest perill, per tal de poder planificar una resposta adequada, ja sigui a l'inici de l'incendi o en la seva fase de propagació. Si bé la distribució espacial del perill permet establir àrees de protecció prioritàries, l'anàlisi del comportament permet reproduir situacions perilloses derivades del

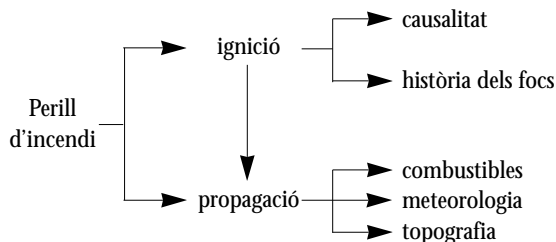


Figura 1. Components del perill d'incendi.

desenvolupament esperat del foc. Per tant, la simulació del comportament permet reproduir condicions de perill i alhora facilita el fet d'anticipar canvis en les pautes del perill i el comportament.

- Mesures subsegüents de cara a l'optimització de la prevenció i la distribució dels equipaments i dels recursos d'extinció. Si es coneix la distribució espacial i temporal dels incendis és possible establir mesures per localitzar de manera més coherent els equipaments i les infraestructures d'extinció.
- La presa de decisions. La presa de decisions és, sens dubte, un dels aspectes que cal considerar en la lluita contra els incendis forestals, ja que té un component polític important per les responsabilitats que se'n deriven; la presa de decisions dependrà tant de les consideracions pertinents a partir de la distribució espacial del perill, com de l'anàlisi (en funció d'aquesta mateixa distribució del perill) de la viabilitat de la distribució dels equipaments i infraestructures d'extinció.

En tots tres casos, la modelització i les tecnologies de la informació tenen un paper fonamental. El mètode més utilitzat per al suport a la lluita contra els incendis forestals ha estat històricament la modelització. Fer un recull exhaustiu de les diferents tendències en la modelització requeriria un ampli espai de dedicació, per tant, en l'apartat que segueix faré una selecció d'aquells més representatius.

Actualment es dediquen molts esforços en l'aplicació de les tecnologies de la informació per al suport al desenvolupament de models per a la gestió global dels incendis. Del que es tracta en aquest article és d'insistir en la importància de la modelització i de les tecnologies de la informació per al suport a la lluita contra els incendis forestals.

La modelització per a l'anàlisi del perill i del comportament del foc

La modelització permet reproduir determinades condicions i fenòmens que incideixen tant en la ignició com en la propagació dels incendis per tal de poder planificar una resposta adequada en cas d'incendi o plantejar modificacions que redueixin la vulnerabilitat del territori.

Establir uns criteris per a la tipificació de models és força complex, i més si tenim en compte que no hi ha una tradició establerta en aquest tipus de classificacions. Una tipificació potser simplista, però que permet fer-se una idea de les principals tendències en aquest camp podria ser la següent:

- Models estàtics
 - Models basats en la causalitat i en l'ocurrència d'incendis.
 - Modelització cartogràfica clàssica dels SIG.
 - Models associats a les condicions meteorològiques.
- Models dinàmics
 - Models de combustible.
 - Simulació global dels paràmetres de comportament.
 - Simulació espacial del comportament.

Models estàtics

L'anàlisi del perill dels incendis forestals s'ha tractat sovint des d'un punt de vista estàtic, és a dir, tenint en compte variables que no canvien al llarg de l'aplicació del model. Aquests models s'han anomenat sovint *models bàsics de perill*, en el sentit que donen una informació global sobre la probabilitat d'ignició i la propagació. La vegetació, la topografia (elevació, orientació i pendent), la història dels focs —centrada sobretot en l'anàlisi de la causalitat i la freqüència dels incendis—, són variables que tenen una representació cartogràfica que no canvia contínuament. L'interès de l'aplicació d'aquests tipus de models és el d'obtenir informació de les zones més vulnerables, les zones amb més alta probabilitat que s'iniciï i es propagui un incendi.

- Els models aplicats per a la determinació de l'ocurrència han estat desenvolupats en funció de diversos factors. Hi ha qui ha partit de l'anàlisi de la distribució històrica dels focus de foc (Johnson i Van Wagner, 1985; Danserau i altres, 1993). Els qui s'han basat únicament en la causalitat dels incendis per reflectir-ne la incidència (ICONA, 1982). Alguns s'han centrat en les causes humanes basant-se en tècniques d'anàlisi de regressió logística, en l'assumpció que la distribució de Poisson pot servir per modelitzar l'ocurrència d'incendis causats per les persones (Martell i Bevilacqua, 1989). D'altres utilitzen com a mètode les xarxes neurals basant-se en les relacions entre diferents informacions (Vega-Garcia i altres, 1993). La predicció de l'ocurrència d'incendis a través de les causes humanes ha de permetre relacionar el nombre d'incendis amb l'afluència humana a les zones de perill més alt. Hi ha qui s'ha especialitzat en l'estudi de l'ocurrència centrant-se en la freqüència de decàrregues elèctriques (Flannigan i altres, 1991).
- Els models basats en diferents ponderacions i valoració de variables, els que anomenariem *modelització cartogràfica clàssica dels SIG*. Dins d'aquest grup hi trobem aplicacions de models com ara les de Chuvieco i Congalton (1989), Salas i Chuvieco (1992) o el Mapa de risc d'incendi forestal de Catalunya (1990) de l'ICC.
- Les condicions meteorològiques tenen uns efectes directes i decisius en la determinació del perill, tant d'ignició com de propagació. Aquestes variables han estat sobretot emprades per al càlcul de la humitat dels combustibles, factor determinant en la ignició quan la font de calor es troba en disponibilitat. Els diferents mètodes utilitzats per al càlcul de l'estat de la vegetació han estat ja sigui mitjançant el dèficit hídric (ICONA, 1982) o bé a través de la relació entre l'evapotranspiració i les precipitacions (De Fusco i altres, 1994). Els models de predicció del perill d'incendi basats exclusivament en fenòmens meteorològics no són gaire nombrosos, tot i que, sobretot a l'àrea mediterrània, n'hi ha alguns casos (Palmieri i Cozzi, 1983; Bovio i altres, 1984; Palmieri i altres, 1992; Sol, 1989; Roux i Sol, 1991; De Fusco i altres, 1994). Generalment, però, les variables meteorològiques s'integren amb d'altres fenòmens, com ara estadístiques d'incendi, el tipus de combustible o variables referents al terreny (ICONA, 1982; Mapa de risc d'incendi estival del Departament

d'Agricultura, Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya, DARP, elaborat des del 1992).

Models dinàmics

L'anàlisi dels models de comportament dels incendis forestals s'associa als models dinàmics. Si els models estàtics permeten representar els fenòmens de manera estable, els models dinàmics permeten analitzar el component canviant de l'incendi atenent l'anàlisi de la propagació en termes sobretot de velocitat de propagació i d'intensitat del foc. A més, els models dinàmics permeten simular el comportament del foc sotmès a unes condicions canviant, tant meteorològiques com de vegetació i terreny al pas del front de la flama. Aquests models de simulació són útils sobretot per a la planificació de la distribució dels recursos i dels equipaments d'extinció, ja que permet reproduir el desenvolupament del foc, simular el comportament perillós del foc i, per tant, i analitzar si la zona afectada té recursos i equipaments a l'abast i veure quins són els recorreguts òptims per accedir-hi.

Tradicionalment la simulació s'ha realitzat a partir de la interpretació de les dades numèriques fruit del càlcul de paràmetres globals de comportament a partir de diferents variables; el desenvolupament de nous mètodes d'anàlisi ha permès afegir un valor molt important a aquesta informació, el component espacial, de manera que es pot observar visualment el comportament del foc, analitzar les condicions perilloses i, per tant, l'adequació i la distribució de recursos i equipaments d'extinció.

Un dels principals objectius plantejats per a la gestió dels incendis forestals és la tipificació dels combustibles desenvolupada sobretot per estimar el comportament del foc, ja que la predicció del comportament és fonamental per a la determinació del perill d'incendi, la supressió del foc i la seva planificació (Pyne, 1984). Inicialment la tipificació dels combustibles prové dels requeriments dels models de comportament. Els models de combustible s'han desenvolupat per ser integrats juntament amb d'altres variables, sobretot per a la determinació del comportament del foc.

El que s'intenta buscar amb la tipificació dels combustibles són models de combustible representatius, que proporcionin una descripció qualitativa d'un tipus general de vegetació —qualitat i quantitat del combustible viu i mort, mida de les partícules i profunditat del llit del combustible—, els quals poden ser utilitzats en un model matemàtic per tal de calcular com cremaran els diferents tipus de vegetació en diferents condicions mediambientals (Shasby i altres, 1981).

El procés de modelització dels combustibles va començar l'any 1914 als Estats Units quan es van identificar tres tipus de coberta vegetal: pastura, matoll i arbrat. Combinat amb informació meteorològica, cada tipus expressa una certa capacitat d'ignició i velocitat de propagació; de mica en mica aquests models s'anaren refinant. Cap al 1930 el concepte de tipus de coberta vegetal es va passar a anomenar *tipus de combustible*. Les noves estratègies de control del

foc anaven demanant més refinament i els desenvolupaments en la predicció del perill d'incendi i de modelització del comportament del foc demanaven noves classificacions del combustible (Pyne, 1984). Actualment està força acceptada la tipificació en tretze models de combustible —tres de pastures, quatre de matollars, tres per a formacions de bosc dens i tres per a formacions de bosc aclarit o restes d'operacions silvícoles—, formulada per Rothermel (1972, 1983), adaptada també pel NFDRS (Deeming i altres, 1972) i Burgan (1987). El programa BEHAVE opera sobre la base d'aquests tretze models de combustible per al càlcul de la predicció del comportament del foc. Els models de combustible d'aquest programa han estat adaptats posteriorment pel programa Cardin encarregat per ICONA a l'Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid (Martínez-Millán i altres, 1992). ICONA (1992) va realitzar treball de camp per tal d'identificar sobre el terreny aquests diferents models de combustible. De totes maneres, cal elaborar models de combustible adaptats a les condicions particulars de cada territori i és en aquest sentit que diverses administracions hi dediquen molts esforços. Actualment el Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAM, per encàrrec del DARP, està elaborant el mapa de combustibles forestals per a totes les comarques de Catalunya, partint dels models de combustibles del BEHAVE (Pons i altres, 1995; Terrades, 1996)

La simulació global dels paràmetres de comportament del foc ha de permetre reproduir el comportament d'un incendi en unes condicions favorables de propagació, podent calcular la velocitat de propagació i la direcció del front de la flama i possibilitar l'assaig de pautes de comportament, analitzar situacions perilloses i, per tant, ajudar a la planificació dels equipaments i dels recursos d'extinció.

Els primers estudis basats en la propagació del foc i dirigits per l'USDA Forest Service se centraven en l'estudi de les relacions existents entre les condicions de combustió i les variables que podien ajudar els responsables de la gestió forestal a resoldre els problemes dels incendis. Es va arribar a la conclusió que les variables com la humitat i la càrrega del combustible, la velocitat del vent, la humitat relativa de l'aire, el pendent i l'orientació, tenien uns efectes directes sobre els incendis. Fons (1946) va ser el primer que va intentar descriure la propagació del foc utilitzant un model matemàtic, fixant-se en l'escalfor del foc, en com els combustibles lleugers transporten el foc i on hi ha suficient oxigen per suportar la combustió.

A partir d'aquí van anar sorgint d'altres models matemàtics amb l'objectiu de calcular la velocitat de propagació i la intensitat del foc (Rothermel, 1972; Deeming i altres, 1972; Albini, 1974). El model matemàtic desenvolupat per Rothermel (1972), el més conegut i estudiat, ha estat el punt de referència de molts altres models, tant de perill d'incendi (tot i que en molts d'aquests només ha estat un punt de referència teòric), com de predicció del comportament del foc.

El National Fire Danger Rating System (NFDRS), desenvolupat per l'USDA Forest Service (Deeming i altres, 1972, 1974), té les seves arrels en el model

matemàtic desenvolupat per Rothermel. L'enfocament d'aquest model se centra a elaborar un mètode de determinació de les condicions de perill d'incendi a partir de la valoració del comportament del foc. Aquest model va aparèixer el 1972 amb l'interès principal de relacionar informació meteorològica i informació que fa referència a la combustibilitat per arribar a la predicció del comportament del foc seguint la mateixa línia del model matemàtic desenvolupat per Rothermel. El NFDRS és un model matemàtic format per diversos submodels. Té una estructura força complexa que es basa en les observacions meteorològiques, algunes de més genèriques, com la humitat relativa, la temperatura de l'aire, la cobertura dels núvols i la velocitat del vent, i d'altres de més específiques, com les mesures diàries de la temperatura mínima i màxima i la durada de les precipitacions per tal d'avaluar la humitat i la temperatura del combustible viu i mort. Per mesurar la humitat del combustible lleuger es controla el contingut d'aigua, mitjançant el pes del combustible. A part d'aquests paràmetres es té en compte la influència de l'ésser humà, el pendent associat al vent i el model de combustible. A través d'aquests paràmetres és possible arribar a determinar: l'índex d'incendi causat per l'ésser humà, l'índex de combustibilitat i l'índex de gravetat. El 1974 (Deeming i altres, 1974), una altra vegada el 1978 (Deeming i altres, 1978) i el 1988 (Burgan, 1989) el van refinar tot afegint-hi nous models de combustible. A partir d'aquest moment es van desenvolupar alguns programes que permetien calcular els paràmetres globals del comportament del foc. El més destacat i aplicat, i que de fet és el més adaptat per diverses administracions de països amb una gran problemàtica d'incendis forestals, és el programa BEHAVE (Andrews, 1983; Andrews, 1986; Burgan i Rothermel, 1984; Andrews i Chase, 1989; Andrews i Bradshaw, 1990).

Un dels principals objectius del desenvolupament posterior de models de comportament del foc ha estat la simulació espacial de la propagació dels incendis forestals. Seguint els principis de les formulacions dels models matemàtics enumerats anteriorment, han anat sorgint una sèrie d'aplicacions interessades sobretot en el component espacial de la simulació, el programa CARDIN que es basa en el contagi de cel·les reproduint una estructura el·líptica (Martínez-Millan, 1991) o els models basats en autòmats cel·lulars, com l'aplicat per Clarke i altres (1994) o el model anomenat Firestorm desenvolupat pels canadencs (Lee, 1990; Buckley i Lee, 1993).

Les tecnologies de la informació i la lluita contra els incendis forestals

La simulació del comportament s'ha realitzat tradicionalment mitjançant formulacions matemàtiques que calculen la velocitat de propagació i la intensitat del front de la flama. La introducció del component espacial de la simulació ha permès representar la velocitat de propagació sobre el terreny, convertint la simulació en quelcom més visual i útil de cara a la prevenció i optimització de la distribució dels recursos i els equipaments d'extinció, ja que permet analitzar espacialment les interaccions que s'estableixen en el territori. És el desen-

volupament de les tecnologies de la informació el que ha fet possible l'evolució d'aquests models de comportament, ja que els sistemes d'informació tradicionals que s'utilitzaven per al suport als primers models tenien les seves limitacions, tant de resultats com de velocitat d'aplicació. Amb els anys aquests sistemes han permès integrar i relacionar nous components, la qual cosa dóna més consistència als mateixos models.

Els sistemes d'informació i la modelització en el camp dels incendis forestals han anat evolucionant en el compliment d'un objectiu fonamental, el suport i la millora de la presa de decisions en la planificació de la prevenció i l'extinció. La finalitat de qualsevol sistema d'informació és el d'ajudar a resoldre problemes més o menys complexos i així millorar l'habilitat de l'usuari a l'hora d'avaluar aspectes de política, comparar alternatives i facilitar la presa de decisions.

Des dels primers sistemes de càlcul utilitzats per a la predicció del perill i el comportament dels incendis forestals fins als mètodes utilitzats actualment, la quantitat i la qualitat de models ha augmentat enormement, de la mateixa manera que els sistemes d'informació utilitzats en tots els processos de modelització han anat millorant. Des dels primers models sense cap mena de suport informàtic, basats en l'anàlisi de camp, passant pels primers models matemàtics amb sistemes de càlcul més o menys adaptats, però sense la representació espacial del fenomen dels incendis forestals, continuant per l'ús dels SIG com a eina de suport i integració de diferents variables —que en un primer moment es centraven en senzilles aplicacions de models basats en ponderacions— no adaptats a les necessitats pròpies dels incendis forestals, fins arribar a models basats en un sistema interactiu que integren diversos mòduls d'anàlisi basant-se en un SIG per ser específicament aplicat a la gestió dels incendis forestals, s'ha passat per un procés intens d'investigació, tant en el camp de la problemàtica dels incendis forestals com en el de les tecnologies de la informació. En aquest sentit, un dels principals aspectes que es va discutir a l'*International Workshop of Remote Sensing and GIS applications to forest Fire Management System*, del mes de setembre de 1995, fou la importància de les noves tecnologies (més concretament en referència a la teledetecció i als SIG) per al suport a la lluita contra els incendis forestals.

L'aplicació de les noves tecnologies com els SIG, la teledetecció i més recentment els sistemes de posicionament global (GPS) han obert un ampli sector de recerca. Les aplicacions de la teledetecció s'havien mantingut sovint al marge de les aportacions dels SIG, però la integració és ja avui un fet, a causa de les grans possibilitats dels SIG com a plataforma integradora per les seves capacitats funcionals sobretot de gestió i anàlisi de grans volums de dades. D'aquesta manera, la teledetecció i els GPS s'han convertit en fonts per subministrar dades als SIG. Un recull de les diferents aportacions de la teledetecció i els GPS als estudis sobre els incendis forestals el trobem a Nunes i altres (1995) i Gracia i altres (1992) respectivament.

Actualment les investigacions en el camp dels incendis forestals van cap a un intent de trobar eines operatives al servei de la lluita contra els incendis forestals.

Els SIG com a plataforma integradora

Els SIG com a eina capaç de capturar, emmagatzemar, manipular, analitzar, modelitzar i presentar dades referenciades espacialment per a la resolució de problemes complexos de planificació i gestió (NCGIA, 1991), ofereix la possibilitat d'actuar com a eina de suport a la presa de decisions sobre la problemàtica dels incendis forestals. Grossman (1994) es refereix als SIG com a plataforma que permet la combinació de diferents tipus d'informació; considera que és la columna vertebral de tot el procés de la informació espacial. Els principals avantatges dels SIG respecte a uns altres sistemes d'informació són: la possibilitat de treballar amb informació georeferenciada i les seves capacitats d'anàlisi espacial —posant en relació diverses informacions espacials—, i la facilitat de poder posar en relació objectes espacials amb els seus atributs temàtics.

Els SIG ajuden a donar una visió més objectiva de la problemàtica dels incendis forestals, ja que posa a disposició de l'analista tota una sèrie d'eines que faciliten la integració i l'anàlisi de tots els fenòmens que intervenen en l'estudi dels incendis forestals. La figura 2 reflecteix les funcionalitats principals dels SIG per a la gestió global dels incendis forestals.

Els SIG per al suport a la gestió global dels incendis forestals

La diversitat de factors que intervenen en l'anàlisi dels incendis forestals requereix un sistema que permeti la gestió global, tant en situacions d'emergència real com per a la planificació dels recursos de prevenció. Per tant, la integració de diversos mòduls d'anàlisi i la possibilitat de dissenyar una

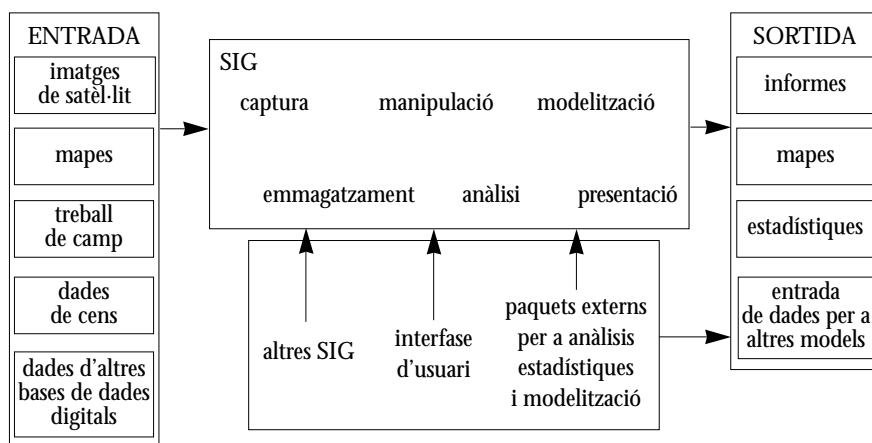


Figura 2. Funcionalitats d'un SIG per a la gestió global dels incendis forestals (adaptat a partir de Fisher i Nijkamp, 1992).

interfase d'usuari personalitzada, farà possible una optimització de la prevenció i l'extinció.

Integració de diversos mòduls d'anàlisi

El fenomen dels incendis forestals i la seva anàlisi inclou diversos factors que cal tenir en consideració a l'hora d'elaborar un SIG que suporti les tasques de planificació de la prevenció. El perill d'ignició i de propagació i el comportament del foc són aspectes dels incendis que s'han de poder analitzar conjuntament, ja que tot i ser influenciats per fenòmens diferents o aquests tenen més o menys importància segons el que es tracti, estan interrelacionats, per tant, ha de ser possible tractar-los des d'un mateix sistema.

L'objectiu que ha de complir un SIG és el d'associar en un mateix sistema un conjunt d'elements que necessita l'usuari per a la presa de decisions. Una experiència en aquest camp és el FMIS (*Fire Management Information System*) (Wybo i altres, 1994), és un sistema d'informació per a la gestió dels incendis forestals que integra una base de dades relacional amb un SIG; aquest va lligat a unes aplicacions específiques: índex de perill, simulació de la propagació i detecció del foc, consells per al desenvolupament de plans de supressió del foc. La principal funció del FMIS és el de donar suport a la presa de decisions de cara a la prevenció i a l'extinció.

Aquests sistemes integren productes comercials amb un disseny específic de mòduls per al càlcul basats en una interfase d'usuari. Vasconcelos (1995) fa una relació d'alguns dels aspectes que hauria de facilitar un SIG integrat: control i predicció de la informació meteorològica, valoració del perill mitjançant un o més índexs de perill, detecció de focs a temps, simulació de la propagació, consells de cara a la supressió del foc i suport a la presa de decisions de supressió del foc. Caldria afegir l'anàlisi de xarxes de cara a les actuacions d'extinció, l'anàlisi de l'assignació i distribució de recursos i avaluació en general de mesures i polítiques de prevenció.

Per tant, un SIG per al suport a la gestió global dels incendis forestals ha d'integrar una base de dades molt completa i coherent amb un conjunt de funcionalitats que permetin donar suport a la presa de decisions en cas d'incendi, lligant tots els possibles components que intervenen en el coneixement de les característiques dels incendis forestals. Per tant, no només es tracta de la predicció del perill i comportament dels incendis, sinó de la integració de diversos factors per fer possible una anàlisi posterior que permeti resoldre aspectes com la racionalització de la distribució dels equipaments i els recursos d'extinció, tot estudiant també l'abast d'aquests recursos i els camins òptims d'accés a les zones de més perill.

Cap a un sistema interactiu

Un altre aspecte que cal tenir en consideració en el desenvolupament d'un SIG orientat a la lluita contra incendis forestals és el seu disseny, el qual s'ha de

basar principalment en un sistema d'interfase d'usuari. Els factors que cal tenir en compte en el disseny d'una interfase d'usuari fan referència a l'objectiu principal de l'aplicació, al conjunt de tasques que s'han de realitzar i a les característiques de l'usuari.

D'experiències d'aplicacions de SIG basats en un sistema d'interfase cal destacar el model Firestorm, basat en la simulació del comportament del foc, el FMIS, basat en un sistema integrat per diverses aplicacions, el SIG per a la lluita contra els incendis forestals del Consell Comarcal del Bages (SIGIF) (Nunes i altres, 1996), que pretén desenvolupar un sistema integral que abasti el conjunt de necessitats d'informació i d'anàlisi associades a la prevenció i extinció dels incendis forestals. En una primera fase s'ha desenvolupat, en una àrea pilot, el que és la localització d'equipaments i infraestructures d'extinció i l'anàlisi de xarxes, però està pensat i dissenyat perquè tingui continuïtat de cara al desenvolupament de noves aplicacions.

L'objectiu final d'un SIG basat en una interfase d'usuari és el de donar suport a la presa de decisions per a la planificació de la prevenció adaptat a la tasca específica que cal desenvolupar, la lluita contra els incendis forestals, de manera que sigui senzill de ser utilitzat per una persona aliena a aquests nous sistemes d'informació.

Conclusions

De l'anàlisi dels diferents models i de les possibilitats que ofereixen les tecnologies de la informació se'n desprèn que les tecnologies de la informació, i més concretament els SIG, faciliten el tractament i l'anàlisi de gran quantitat d'informació i, per tant, són una eina molt eficaç per al suport a l'aplicació de models i per al suport a la gestió global de la lluita contra els incendis forestals. En aquest sentit, un SIG integrat pel suport a la lluita contra els incendis forestals s'ha d'orientar a la gestió global perquè sigui realment efectiu de cara a l'establiment de polítiques de prevenció i extinció. Per tant, aquest ha de permetre:

- Conèixer el perill, tant la seva distribució espacial com temporal.
- Anticipar canvis en les pautes del perill, facilitant prediccions de les condicions del medi o humanes.
- Prendre decisions en les accions que haurien de tenir-se en compte per tal de minimitzar el perill d'ignició i de propagació.
- Aplicar mesures subsegüents de cara a l'optimització de la prevenció i la distribució dels equipaments i dels recursos d'extinció, amb tot el que això comporta.

Per tant, els SIG es converteixen en un sistema capaç d'integrar diverses necessitats de coneixement i anàlisi, i alhora permeten definir actuacions posteriors de cara a la prevenció i a l'extinció. Arribar a aquest punt d'integració requereix un esforç de coordinació de tota una sèrie de treballs d'investigació previs que van des de la determinació de la causalitat fins la distribució espacial i temporal del perill. Fins fa poc no es disposava de mitjans tècnics

per ponderar adequadament els factors implicats en el perill dels incendis; actualment, gràcies a les tecnologies de la informació, és possible assolir una objectivitat més gran del problema, ja que permeten:

- Dirigir els mitjans de prevenció, tant d'infraestructures com de vigilància, cap a les àrees territorials de més perill o més vulnerables.
- Racionalitzar l'aplicació de mesures legislatives en relació amb la restricció de l'ús del foc en les èpoques i zones de més perill, entre d'altres mesures.
- Actualitzar i millorar la informació sobre tots aquells aspectes que influeixen els incendis forestals en el moment que es generen noves dades.
- Dur a terme programes de prevenció i control del comportament del foc en àrees concretes qualificades de perilloses.

Totes aquestes accions han de poder ser tractades a partir d'un sistema que permeti una integració de mètodes de modelització i de gestió global, ja que la finalitat més important que es persegueix és la de servir per al suport a la presa de decisions en la lluita contra els incendis forestals. En resum, un SIG per a la lluita contra els incendis forestals serà útil si es té en compte l'objectiu final, es té un coneixement exhaustiu de les característiques del fenomen que s'estudia, es disposa d'una base de dades consistent i fiable i es coneixen les seves capacitats i limitacions.

Bibliografia

- ALBINI, F.A. (1976). *Computer-based Models of wildland Fire Behavior: A Users Manual*. Ogden, Utah: USDA Forest Service, Intermountain Research Station.
- ANDREWS, P.L. (1983). «A system for predicting the behavior of forest and range fires». Proceedings of the *Conference on Computer simulation in Emergency Planning*, San Diego, California.
- (1986). *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system. Burn subsystem, part 1*. USDA: Forest Service.
- ANDREWS, P.L.; CHASE, C.H. (1989). *BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system. BURN subsystem, part 1*. General Technical Report INT-194. Ogden, Utah: USDA Forest Service, Intermountain Research Station.
- ANDREWS, P.L.; BRADSHAW, L.S. (1990). *RXWINDOW: defining windows of acceptable burning conditions based on desired fire behavior*. General Technical Report INT-273. Ogden, Utah: USDA Forest Service, Intermountain Research Station.
- BUCKLEY, D.J.; LEE, B.S. (1993). «Forestry Canada applies GIS technology to forest fire management». *GIS '93 Symposium*. Vancouver: British Columbia, p. 109-113.
- BURGAN, R.E. (1989). «1978 National Fire Danger Rating System Revisions», presentat a *10th Conference on Fire and Forest meteorology*, 17 al 21 d'abril, Ottawa, Canadà.
- BURGAN, R.E.; ROTHERMEL, R.C. (1986). *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system -fuel subsystem*. Gen. Tech. Rep. Int-167. USDA: Forest Service.
- CHUVIECO, E.; SALAS, J. (1996). «Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS». *International Journal of geographical Information System*, vol. 10 (3), p. 333-345.

- CLARKE, K.C.; BRASS, J.A.; RIGGAN, P.J. (1994). «A Cellular Automaton Model of Wildfire Propagation and Extinction». *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 60 (11), novembre de 1994, p. 1355-1367.
- DANSEREAU, P.R.; BERGERON, Y. (1993). «Fire history in the southern boreal forest of northwestern Quebec». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 23, p. 25-32.
- DAVIS, K.P. (1959). *Forest fire, control and use*. Nova York: McGraw-Hill.
- DEEMING, J.E. i altres (1972). *National Fire-Fire Danger Rating System*. US Forest Service, Research Paper RM-84.
- (1974). *National Fire-Fire Danger Rating System*. US Forest Service, Research Paper RM-84 revised.
- (1978). *The National Fire-Fire Danger Rating System*. US Forest Service, Gen. Tech. Rep. INT.39.
- DE FUSCO, L.; MARTELLACCI, C.; PERONI, P.; BAGNI, M. (1992). «A prototype system for forest fire prevention and control». *Proceedings of the central symposium of the International Space Year Conference*. Munich.
- FISHER, M.M.; NIJKAMP, P. (1994). «Geographical information systems and spatial analysis». *The annals of Regional Science*, 26, p. 3-17.
- FLANNIGAN, M.D.; WOTTON, B.M. (1991). «Lightning-ignited forest fires in north-western Ontario». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 21, p. 277-287.
- GRACIA, I.; MÉRIDA, J.C. (1992). «Aplicaciones de técnicas GPS al problema de los incendios forestales». Presentat al curs *Lucha contra los incendios forestales*, Centro Internacional de Altos Estudios Agronómicos Mediterráneos (CIHEAM), organitzat per l'Institut Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (IAMZ) i l'Institut Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA), 11-29 de maig.
- GROSSMANN, W.D. (1993). «Challenges from ecology to application and design of Geographical Information System». Comunicació presentada a les jornades sobre *The synergistic use of Remote sensing, Geographical Information Systems and Dynamic models for resource management*. Saragossa, 11-15 d'abril de 1994.
- ICONA (1982). *Manual de predicción del peligro de incendios forestales*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. Sección de Incendios Forestales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- INSTITUT CARTOGRÀFIC DE CATALUNYA (1990). *Mapa de risc d'incendi forestal. Catalunya 1:250.000*. Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura Ramaderia i Pesca, Direcció General de Medi Natural; Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Institut Cartogràfic de Catalunya.
- (1992). *Mapa d'incendis forestals de Catalunya (1986-1990). 1:500.000*. Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura Ramaderia i Pesca, Direcció General de Medi Natural; Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Institut Cartogràfic de Catalunya.
- JOHNSON, E.A.; VAN WAGNER, C.E. (1985). «The theory and use of two fire history models». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 15, p. 214-220.
- LEE, B.S. (1990). «An overview of IFMIS: the Intelligent Fire Management Information System», *International Conference on Forest Fire Research*. 19-22 de novembre, 1990, Coimbra, Portugal.
- MARTELL, D.L.; BEVILACQUA, E. (1989). «Modelling seasonal variation in daily people-caused forest fire occurrence». *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 19, p. 1555-1563.
- MARTÍNEZ-MILLÁN, J. i altres (1991). *CARDIN, un sistema para la simulación de la propagación de incendios forestales*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes

- de Madrid, Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, vol. 0.
- MERRIL, D.F.; ALEXANDER, M.F. (1987). *Glossary of Forest Fire Management Terms*. Ottawa, Ontario: National Research Council Canada, 4a edició.
- NCGIA, (1991). *Core curriculum*. Santa Barbara: Universitat de Califòrnia.
- NUNES, J.; CERDÁN, R.; SÁNCHEZ, F.; BADIA, A.; FERRERO, I. (1996). «Desenvolupament d'un sistema d'informació geogràfica per a la lluita contra els incendis forestals». *Documentis d'Anàlisi Geogràfica*, 28, p. 55-78.
- PALMIERI, S.; COZZI, R. (1983). «Il ruolo della meteorologia nella prevenzione e controllo degli incendi boschivi». *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, XLIII, 4.
- PALMIERI, S.; INGHILESI, R.; SIANI, A.; MARTELLACCI, C. (1992). «Un indice meteorologico di rischio per incendi boschivi». *Bolletino Geofisico*, any XV, 5, p. 49-62.
- PYNE, S.J. (1984). *Introduction to wildland fire. Fire management in the United States*. Nova York/Chichester/Brisbane/Toronto/Singapore: John Wiley & Sons.
- ROTHERMEL, R.C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. General Technical Report INT-115, Odeon, Utah, USDA Forest Service, Intermountain Research Station.
- ROUX, D.; SOL, B. (1991). «Participation de Meteo-France a la Reunion Technique sur l'Information Meteorologique pour les Incendes de Forêt». *Technical Meeting on Meteorological Information for Forest Fire*, Rabat.
- SALAS, J.; CHUVIECO, E. (1990). «¿Dónde arderá el bosque? Previsión de incendios forestales mediante un SIG». *Actas I Congreso AESIGIT*, Madrid, AESIGIT, p. 430-446.
- SHASBY, M.B.; BURGAN, R.R.; JOHNSON, G.R. (1981). «Broad area forest fuels and topography mapping using digital Landsat and terrain». *Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium*.
- SOL, B. (1989). *Risque numerique meteorologique d'incendies de forêt en zone mediterraneenne*. Nota de treball SMIR/SE, 1.
- TERRADES, J. (coord.) (1996). *Ecologia del foc*. Barcelona: Proa.
- VASCONCELOS, M.J.P. (1995). «Integration of remote sensing and geographic information systems for fire risk management». Proceedings of *International Workshop Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management*, Universidad de Alcalá de Henares, 7-9 de setembre de 1995, p. 129-147.
- VEGA-GARCÍA, C.; WOODARD, P.M.; LEE, B.S. (1993). «Geographic and temporal factors that seem to explain human-caused fire occurrence in Whitecourt Forest, Alberta». *GIS'93 Symposium*, Vancouver, British Columbia, febrer de 1993.
- WYBO, J.L.; GUARNIERI, F. (1994). «FMIS: Fire Management Information System». Proc. 2nd Int. Conf. Forest Fire Research, vol. 1, A.03, p. 95-104, Coimbra, novembre de 1994.