

## **Mappatura della propensione all'innescò di incendi boschivi mediante *favourability functions*: un caso di studio**

Alberto Pistocchi – Dante Neri\*

### **Premesse**

Gli incendi boschivi sono una delle criticità ambientali di cui negli anni più recenti è emersa l'importanza su tutto il territorio nazionale.

Si tratta di fenomeni difficilmente modellabili e prevedibili, sia perché l'innescò e la propagazione di un incendio dipendono in modo complesso dalla storia climatica locale nei giorni precedenti l'incendio (e quindi la modellazione richiede la conoscenza delle precipitazioni, dell'evapotraspirazione, del vento...), sia perché quasi sempre l'origine degli incendi è antropica, fortemente casuale e spesso volontaria, e ciò rende difficile ogni previsione.

D'altra parte, è oggi sempre più sentita l'esigenza di mappare le aree a maggiore propensione all'incendio, sia per la protezione civile, sia per la gestione del patrimonio forestale e del territorio in generale. A tal fine, le tecniche tradizionali possono essere divise in:

- metodi di indicizzazione sintetica *rule-based* (*Bradshaw et al., 1983*)
- metodi di indicizzazione sintetica *physically based* (*Palmieri et al., 1992*)
- metodi di simulazione fisica dei processi ( p.es. *Rothermel, 1972*).

Nel primo caso, si danno regole empiriche per classificare il territorio sulla base di un punteggio di pericolosità.

Nel secondo caso, si usa un indice convenzionale collegato a grandezze fisiche significative per evidenziare le aree di maggiore criticità (per esempio un indice di aridità, connesso all'evapotraspirazione etc.).

Nel terzo caso, con l'uso di modelli matematici si simulano l'innescò e la propagazione dell'incendio secondo leggi fisiche di natura empirica o teorica.

Esistono esempi in letteratura di analisi condotte allo scopo di caratterizzare la distribuzione spaziale degli incendi su scala vasta (p.es. nazionale), per definire gradienti e zone a particolare propensione mediante le proprietà di autocorrelazione del fenomeno (*Pereira et al., 1998*). Generalmente, tuttavia, il procedimento per la localizzazione del

---

\* Studio di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio Alberto Pistocchi  
Viale G.Carducci, 15 –Cesena  
Tel. e Fax 0547367336  
E-mail [alberto.pistocchi@libero.it](mailto:alberto.pistocchi@libero.it)  
[dante.neri@libero.it](mailto:dante.neri@libero.it)

rischio è più efficace se tiene conto di possibili variabili causali, anche per fornire indicazioni di controllo e di gestione.

Molti Paesi si sono dotati di un sistema standardizzato di indicizzazione del territorio in ordine al rischio di incendio. Si rinvia a Calabri (1996) per una breve introduzione sull'argomento.

In molte aree, è pressoché impossibile produrre una cartografia del rischio di incendio basata su informazioni meteorologiche, per via di una troppo frammentaria e incompleta disponibilità di dati.

In generale, è necessario pensare alle diverse fasi della analisi per la previsione e prevenzione degli incendi come ad un ragionamento in continuo, che procede da zonazioni di carattere generale, per giungere alla previsione specifica di dettaglio. Yuan (1997) propone un "ciclo dell'informazione" relativo agli incendi, costituito dall'integrazione sinergica di vari livelli di rappresentazione dei fenomeni a seconda delle scale spazio-temporali e delle finalità degli studi.

In questo spirito un approccio probabilistico non parametrico, che consenta di calcolare un indice di propensione al fenomeno per ogni punto del territorio, è da inserire in un quadro modellistico più complesso, e non sostituisce altre forme di analisi.

Nel presente studio si illustra un'applicazione di questo approccio al territorio del Comune di Sogliano al Rubicone, sito in area pedemontana in provincia di Forlì-Cesena. Si tratta di un'area prevalentemente arida, in cui le attività dominanti sono quelle zootecniche e, subordinatamente, quelle agricole. In totale, il Comune in esame è stato colpito da 37 incendi nel periodo 1994-1998, distribuiti come da Figura 1. Dunque il fenomeno degli incendi costituisce una priorità per gli interventi di protezione civile, ed è utile individuare le aree 'calde' per poter focalizzare la sorveglianza e il controllo. La mappatura che viene qui presentata consente di evidenziare queste aree compatibilmente con l'informazione disponibile, e fornisce al contempo indicazioni sulle strategie di acquisizione e gestione di informazioni necessarie, ma oggi incomplete o mancanti.

L'idea che sottende l'approccio qui presentato, noto come *integration modelling*, è di valutare l'influenza di vari fattori sulla possibilità che si verifichi un fenomeno. Sovrapponendo diversi tipi di informazioni ( sull'uso del suolo, sulle grandezze meteorologiche e idrologiche, sulla topografia...) si dovrebbe poter estrarre un'indicazione che nessuno dei tematismi presi separatamente è in grado di dare.

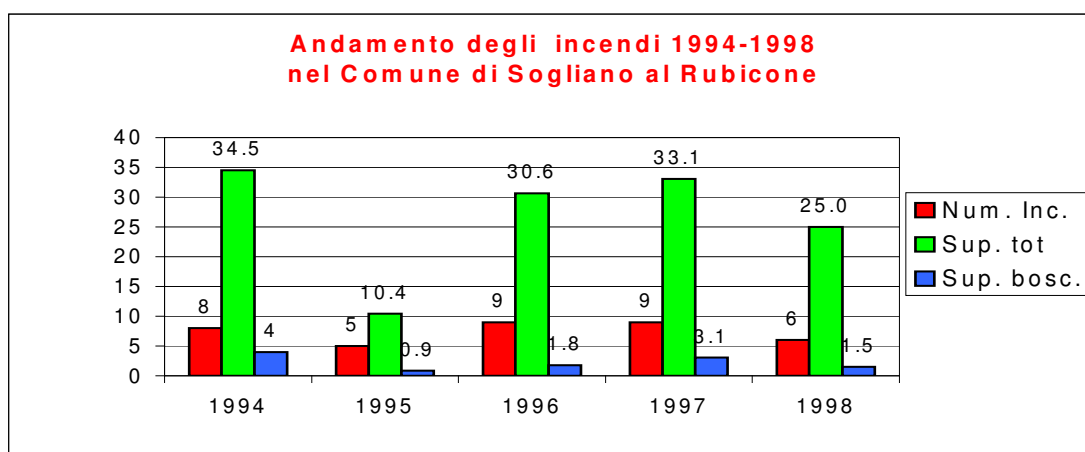


Figura 1 – incendi censiti nel Comune di Sogliano al Rubicone ( 1994-1998)

### **Aspetti metodologici e affidabilità**

Per *integration modelling* si deve intendere lo studio di fenomeni che si manifestano in relazione a determinate cause, attraverso l'analisi di queste ultime, ovvero l'uso congiunto di più tipi di dati per prevedere fenomeni che da essi in qualche modo dipendono.

I criteri con cui operare l'integrazione di informazioni differenti derivano dalla conoscenza del problema da parte degli esperti, ma è spesso indispensabile, e comunque molto utile, partire dall'osservazione di un fenomeno in un'area, per inferire i criteri con cui i fattori ritenuti casualmente rilevanti si combinano a generarlo. La previsione del verificarsi futuro di un evento è talvolta *knowledge driven* (basata sull'esperienza), ma spesso non può che essere *data driven*, cioè basata sull'analisi di regolarità e ricorrenze nelle combinazioni di fattori causali al verificarsi dell'evento nel passato. In generale, non si può affermare che, in corrispondenza del coesistere di più fattori di predisposizione per il fenomeno, questo si verificherà effettivamente, ma solo che un luogo è 'propenso' al fenomeno. In generale, le metodologie possono essere assunte sotto la denominazione complessiva di 'funzioni di propensione' (*favourability functions*, Chung e Fabbri, 1993).

Nel seguito si esporranno brevemente le considerazioni teoriche che sottendono questo approccio. Il risultato di detta operazione è una mappa che riporta per ogni località un punteggio esprime la *favourability*, o predisposizione, a che in essa si possa verificare un incendio.

Un vantaggio dell'approccio quantitativo è la possibilità di controllare l'affidabilità del risultato attraverso il test statistico del "prediction rate", illustrato in maggior dettaglio in seguito.

Supponiamo che  $A$  sia il dominio oggetto di analisi, ovvero la regione di studio. Sia poi  $F$  il fenomeno del quale si è rappresentata su una carta l'occorrenza in occasione di osservazioni di campagna (per esempio gli incendi avvenuti negli ultimi 5 anni). Se sono disponibili  $r$  insiemi di dati (*layers*) rappresentati ciascuno su una mappa (carta tematica) e coprente tutto  $A$ , possiamo definire per ciascuno di essi una 'funzione di partizione':

$$v_k: A \Rightarrow [1, 2, \dots, n_k]$$

che assegna ad ogni punto (o *pixel*) di  $A$  una delle  $n_k$  classi nelle quali è diviso il layer  $k$ -esimo (per esempio, tale funzione potrebbe essere quella che ad ogni punto associa una classe vegetazionale (uso del suolo) di appartenenza).

Si può inoltre definire un'altra funzione:

$$R_k: [1, 2, \dots, n_k] \Rightarrow [a, b]$$

che associa ad ognuna delle classi in cui è diviso il layer un valore compreso fra  $a$  e  $b$ , due numeri che devono soddisfare alcune proprietà. Il numero associato a ciascuna classe rappresenta il grado di favourability da associare ad ogni classe del layer nei riguardi di un dato fenomeno. Per esempio, si può dare a ciascuna classe di uso del suolo un valore di predisposizione all'innescio e propagazione di un incendio, ovvero un numero crescente con la predisposizione stessa. Questo valore di predisposizione è un indice della "ragionevolezza" che il fenomeno accada in presenza di una certa caratteristica del territorio. Definiamo allora la funzione di favourability come la composizione di  $R$  e  $V$ :

$$F_k = R_k \circ V_k$$

Gli estremi dell'intervallo,  $a$  e  $b$ , devono essere scelti dal modellista sulla base della propria interpretazione della "ragionevolezza": se questa viene interpretata come la probabilità dell'accadimento, allora deve essere  $a=0$ ,  $b=1$ . Altre grandezze possono essere prese a misura della "ragionevolezza", come ad esempio le funzioni di appartenenza della teoria dei fuzzy sets (Zadeh, 1965, 1968), o i certainty factors (Shortliffe e Buchanan, 1975; Heckermann, 1986; cit. in Chung e Fabbri, 1993). In quest'ultimo caso, ad esempio,  $a=-1$  e  $b=1$ .

Se la favourability è intesa come probabilità, si può invocare il teorema di Bayes, per cui la probabilità condizionata che si verifichi un fenomeno  $F$ , data la concomitante presenza degli attributi  $E_1, \dots, E_n$  (supposti fra loro condizionatamente indipendenti) è

$$\text{Prob}(F/E_1, \dots, E_n) = (\text{pps}_1 \dots \text{pps}_n) * (\text{ppa}_1 \dots \text{ppa}_n) / \text{ps}_{F_{n-1}} * \text{pps}_1 \dots \text{pps}_n$$

essendo:

- $\text{pps}_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) la probabilità a priori che una certa classe di attributo si verifichi sul dominio A
- $\text{ppa}_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) la probabilità che, data una certa classe di attributo, F si verifichi sul dominio A; essa è calcolata con la formula (Chung e Fabbri, 1993)  $\text{ppa}_i = 1 - (1 - (\text{area}_i)^{-1})^{nb(i)}$ , essendo  $\text{area}_i$  l'area di A dove si incontra la classe di attributo i-esima, e  $nb(i)$  l'area di A dove insieme all'attributo i-esimo si incontra anche un'evidenza di F
- $\text{pps}_1 \dots \text{pps}_n$  la probabilità congiunta di  $E_1, \dots, E_n$ , ovvero la probabilità di incontrare tutti gli n eventi simultaneamente
- $\text{ps}_F$  la probabilità a priori di incontrare un'evidenza di F su A

Per applicare questa regola, si deve stilare una mappa per ciascuna combinazione delle classi di attributo che si identificano sul territorio. Questo viene fatto automaticamente in un GIS mediante l'operazione di cross, ovvero di identificazione di tutti i poligoni per i quali si assiste ad una combinazione unica degli attributi.

Se al posto della probabilità, valutata con la regola di Bayes, si ricorre ai certainty factors, occorre considerare invece le seguenti espressioni (Fabbri et al. , 1998 ).

1. I certainty factors per una classe di attributo possono essere definiti come:

$$CF(i) = [\text{Prob}(F/E_i) - \text{Prob}(F)] / [\text{Prob}(F/E_i)(1 - \text{Prob}(F))], \text{ se } [\text{Prob}(F/E_i) > \text{Prob}(F)]$$

$$CF(i) = [\text{Prob}(F/E_i) - \text{Prob}(F)] / [\text{Prob}(F)(1 - \text{Prob}(F/E_i))], \text{ se } [\text{Prob}(F/E_i) < \text{Prob}(F)]$$

essendo  $\text{Prob}(F)$  la probabilità a priori di incontrare un' evidenza di F; il certainty factor (CF) per un attributo varia fra  $-1$  e  $1$ , indicando per valori prossimi a  $-1$  la tendenza del fenomeno ad accadere in assenza dell'attributo, e per valori prossimi a  $1$  la tendenza ad accadere in sua presenza.

2. Il certainty factor di due attributi è dato da:

$$CF(1+2) = CF_1 + CF_2 - CF_1 * CF_2, \text{ se entrambi i CF sono non-negativi}$$

$$CF(1+2) = CF_1 + CF_2 / \min(\text{abs}(CF_1), \text{abs}(CF_2)), \text{ se i CF hanno segno opposto}$$

$$CF(1+2) = CF_1 + CF_2 + CF_1 * CF_2, \text{ se entrambi i CF sono negativi}$$

3. La procedura si applica iterativamente per più attributi:

$$CF(1+2+3) = CF(1+2) + CF(3) + \dots$$

Un'altra possibilità è quella di ricorrere alla logica fuzzy. Questa è formalmente analoga a quella classica booleana, salvo per il fatto che una affermazione non è mai semplicemente vera o falsa, ma possiede un grado di verità variabile fra zero e uno. Questo grado di verità è chiamato 'membership function', ed esprime il grado di appartenenza di un oggetto a un insieme. Spesso, per praticità, si tende a confondere la membership con la

probabilità a priori che l'evento espresso dall'affermazione si verifichi ( $pp_{ai}$ ,  $i=1, \dots, n$ ). In tal caso, la funzione assume un valore che viene stimato dalla frequenza relativa di accadimento.

Per quanto detto, si definiscono le seguenti operazioni logiche:

fuzzy 'and'= $\min(pp_{ai}, i=1, \dots, n)$

fuzzy 'or'= $\max(pp_{ai}, i=1, \dots, n)$

fuzzy-prodotto= $\prod(pp_{ai}, i=1, \dots, n)$

fuzzy-somma= $(1-\prod(1-pp_{ai}), i=1, \dots, n)$

fuzzy-'gamma operation'= $(\text{fuzzy-somma})^\gamma(\text{fuzzy-prodotto})^{(1-\gamma)}$

(generalmente,  $\gamma=0,7$ )

In questo modo, si possiedono regole per la combinazione numerica di mappe, ciascuna esprime un fattore causale dell'evento. Il risultato della combinazione è la mappa complessiva della predisposizione all'evento in ciascun punto del territorio in esame.

Occorre precisare che la funzione di favourability di una classe di attributo viene stimata con la frequenza in quella classe degli eventi osservati, solo quando non esistono alternative migliori. È invece auspicabile che la favourability sia stimata, ogni volta che ciò sia possibile, da un esperto a partire dai dati osservati, ma non esclusivamente con essi, in modo automatico.

Occorre inoltre ricordare che le probabilità che risultano dai calcoli non esprimono grandezze reali, ma solo indici di probabilità, o di predisposizione. Non possono pertanto essere utilizzate in modo diretto per valutazioni sui tempi di ritorno degli eventi.

La predizione che deriva dall'assegnazione di un punteggio di favourability ad ogni punto del territorio, combinando le favourability delle diverse classi tematiche di attributi in un punto con le regole sopra discusse, deve essere sottoposta sempre ad una validazione.

Uno strumento statistico per validare la predizione è il prediction rate ( Chung e Fabbri, 1996).

Si divida il campione degli eventi osservati in due gruppi, uno dei quali viene utilizzato per stimare le frequenze dell'evento in ogni classe-attributo di ciascuna carta tematica (calibrazione): il prediction rate è definito come la curva che si ottiene riportando in grafico l'area cumulata della regione in esame, ordinata per punteggio di favourability decrescente, e in funzione di essa la percentuale cumulata di incendi (fra quelli non usati per la calibrazione) che si incontrano in quell'area, e che quindi sono 'previsti' dal modello. La curva del prediction rate indica la bontà del modello, trovandosi tanto più schiacciata sull'asse delle ordinate quanto maggiore è la capacità del modello di 'separare' in una piccola percentuale di area le zone effettivamente più pericolose. Una mappa a

distribuzione completamente casuale del rischio di incendio avrebbe una curva del prediction rate uguale alla bisettrice del quadrante del grafico.

### ***Dati utilizzati e risultati***

I parametri utilizzati per determinare la predisposizione agli incendi rappresentano le tre categorie normalmente indicate in letteratura: fattori meteorologici, fattori topografici e fattori vegetazionali (Calabri, 1996). Essi sono stati scelti come segue:

aridità: influenza direttamente il contenuto d'acqua del combustibile, soprattutto di quello morto (in questo studio è stato utilizzato l'indice di aridità medio annuo di de Martonne);

esposizione: è un indicatore dell'irraggiamento solare e quindi della temperatura e dell'umidità;

uso del suolo: è un indicatore della presenza di biomassa, e cioè di combustibile utile all'innescio e alla propagazione dell'incendio;

pendenza: una elevata pendenza facilita l'avanzamento del fuoco verso le zone più alte, preriscaldando con la convezione dell'aria calda i combustibili sovrastanti non ancora interessati dalle fiamme;

quota topografica: è un indicatore dell'intensità del vento;

accessibilità, intesa come distanza dalle strade e quindi come possibilità di azione per gli incendiari.

La

Figura 2 mostra diagrammaticamente i fattori causali utilizzati.

Per effettuare i calcoli, si è fatto ricorso alla mappa delle evidenze costituite dagli incendi verificatisi negli ultimi 5 anni.

Nel caso in esame, si è effettuato il calcolo secondo le regole di Bayes, della combinazione dei *certainty factors*, e secondo gli operatori della logica *fuzzy*, ricorrendo alla stima della *membership function* mediante le frequenze di accadimento.

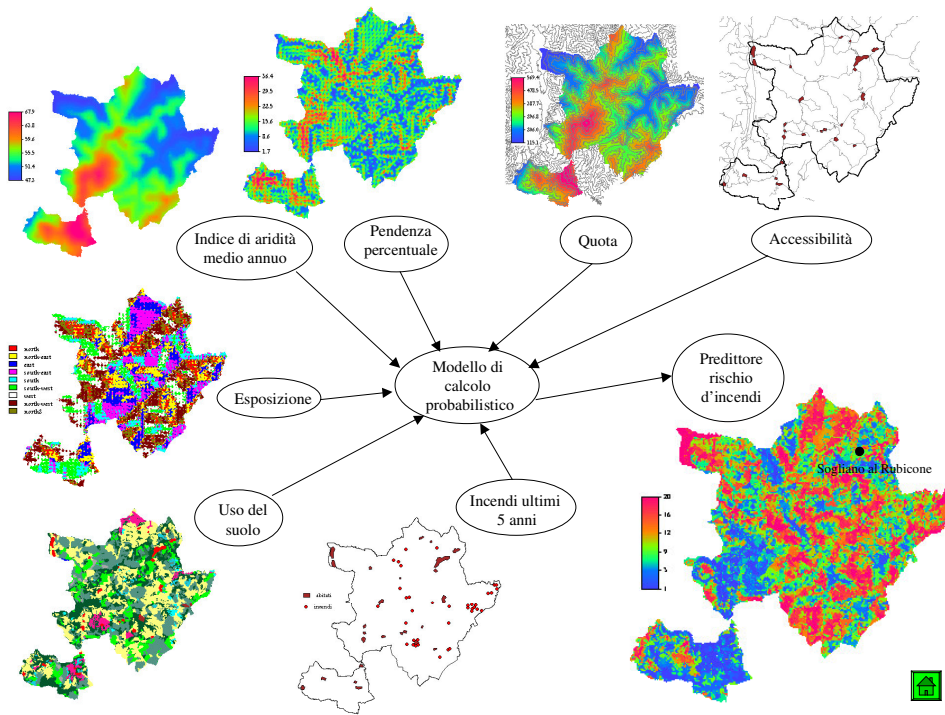


Figura 2- fattori causali utilizzati nella valutazione e schema di calcolo

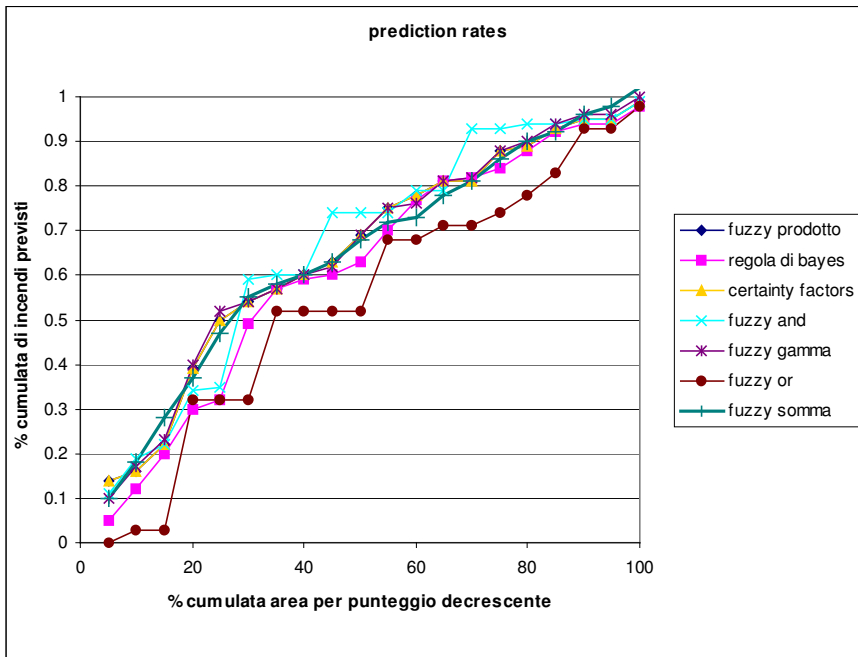
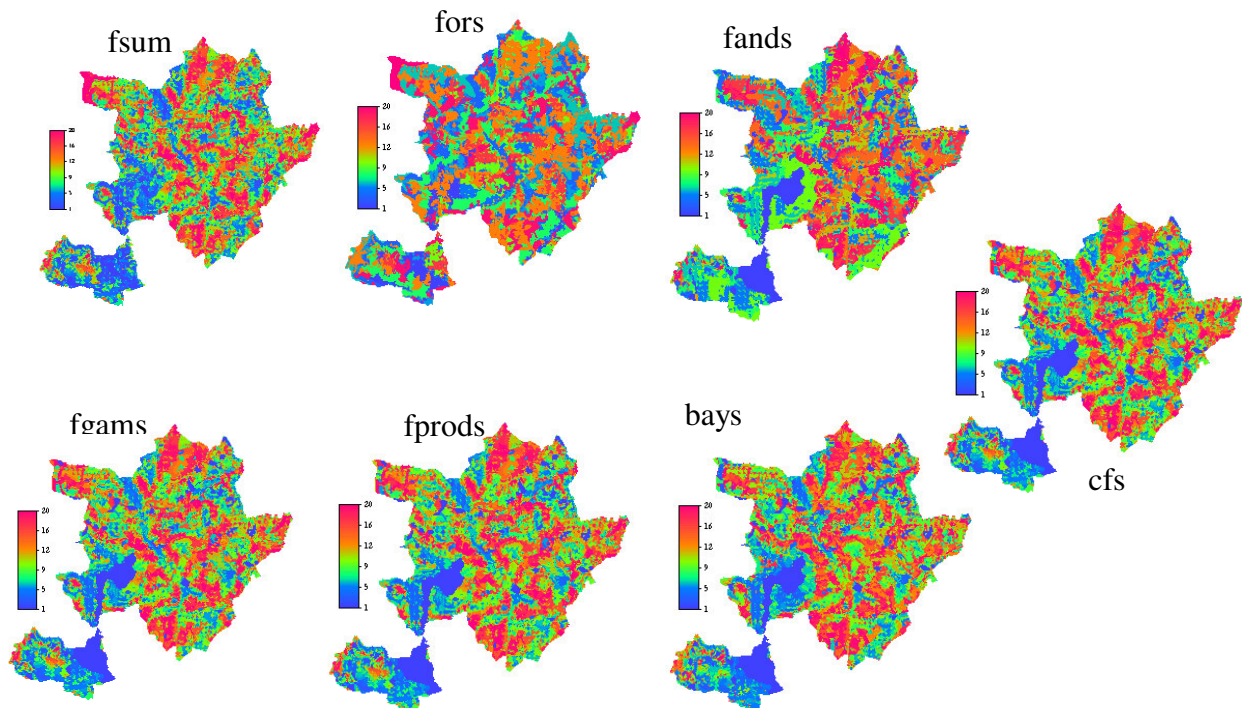


Figura 3 – prediction rates per i vari predittori

Dopo la validazione, il modello probabilistico scelto per la predizione degli incendi è il l'operazione di fuzzy-somma. Come si vede dal diagramma di Figura 3, questo modello presenta la parte iniziale del *prediction rate* più alta di tutti gli altri: a parità di area

indagata, la fuzzy-somma è in grado di prevedere il numero più alto di incendi tra quelli che si sono già verificati. La Figura 4 riporta le mappe ottenute utilizzando i diversi predittori. E' importante sottolineare che la cosa vale nel caso specifico e per i dati disponibili, mentre non è vera in senso generale ed assoluto.



**Figura 4- mappe della predisposizione all'incendio secondo le varie tecniche di calcolo**

Dall'analisi della favourability delle varie classi in ogni carta tematica, è anche possibile estrarre l'indicazione su quali fattori sono più rilevanti rispetto agli altri, a quali fattori la previsione è maggiormente sensibile, e quindi quali analisi e approfondimenti futuri possono fornire indicazioni più utili. La discussione di questo aspetto esula tuttavia dagli scopi della presente memoria.

## **Conclusioni**

La memoria ha illustrato l'applicazione di tecniche basate su favourability functions per la mappatura della predisposizione all'incendio boschivo. Si è fatto riferimento al caso di studio del Comune di Sogliano al Rubicone, in provincia di Forlì-Cesena. Mediante le tecniche ricordate è stato possibile individuare aree giudicate a maggiore predisposizione, sulla base di alcuni fattori causali del fenomeno. Il test statistico basato sul *prediction rate* ha consentito di affermare che l'operazione di fuzzy-somma funziona meglio delle altre, in questo caso specifico, e pertanto può essere scelta come predittore.

Lo studio è essenzialmente una zonizzazione preliminare, ed è in grado di indicare le zone cui prestare particolare attenzione, mentre per una gestione operativa del fenomeno è necessario passare a indici di maggiore dettaglio fisico, aggiornati in tempo reale e che tengano conto dei vari fenomeni meteoroclimatici, secondo un ciclo dell'informazione *sensu* Yuan, 1997.

### **Bibliografia**

- Bradshaw, L.S., Deeming, J.E., Burgan, R., Cohen, J.D., The national fire danger rating system: technical documentation; Gen.tech. report INT-169, Ogden, UT, USDA, Forest Service, 1983
- Calabri, G., La prevenzione degli incendi boschivi
- Chung, C.F., Fabbri, A.G., The representation of geoscience information for data integration, Non Renewable Resources, 1993
- Fabbri, A.G., Chung, C.F., Three bayesian prediction models for landslide hazard, IAMG International Conference, Ischia, Na, 1998
- Palmieri, S., Inghilesi, R., Siani, A.M., Martellacci, C., Un indice meteorologico di rischio per incendi boschivi, Boll. Geofisico, Anno XV, n.5, dic. 1992
- Pereira, J.M.C., Carreiras, J.M.B., Perestrello de Vasconcelos, M.J., Exploratory data analysis of the spatial distribution of wildfires in Portugal (1980-89), Geographical Systems, vol. 5, 1998
- Rothermel, R.C., A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, Research Paper INT-115, USDA Forest Service, 1972
- Yuan, M., Use of knowledge acquisition to build wildfire representation in Geographical Information Systems, Int. Jour. Of Geogr. Information Science, vol. 11, no. 8, 1997
- Zadeh, L.A., Fuzzy sets, IEEE Informatics and Control, n.8, 1965
- Zadeh, L.A., Probability measures of fuzzy events, Jour. Math. Analysis and application, v.10, 1968

Lo studio è stato finanziato dal Comune di Sogliano al Rubicone, nell'ambito delle analisi preliminari alla stesura del Piano regolatore generale, coordinate dall'arch. E.Preger. Si ringrazia il Comune, attraverso il quale i dati sono stati resi disponibili.