

**RELAZIONE SCIENTIFICA FINALE DEL
PROGRAMMA SHORT MOBILITY 2009 DAL
TITOLO:**

***MODELLAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DI INCENDI BOSCHIVI SU
TERRITORI ETEROGENEI E PROGETTAZIONE DI SISTEMI DI
CONTROLLO***

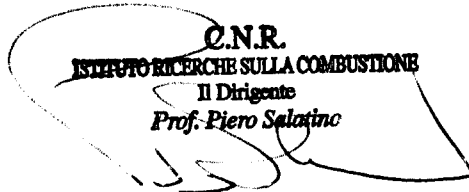
FRUITORE DEL PROGRAMMA:

DOTT. LUCIA RUSSO

PROPONENTE DEL PROGRAMMA:

PROF. PIERO SALATINO

C.N.R.
ISTITUTO RICERCHE SULLA COMBUSTIONE
Il Dirigente
Prof. Piero Salatino



1. Introduzione

Gli incendi boschivi nei paesi mediterranei, sono stati causa, specialmente negli ultimi anni, di danni irreversibili all'ambiente, con distruzione di flora e fauna, perdite di vite umane, perdita della biodiversità, danni economici e cambiamenti climatici[2].

Secondo alcuni dati della commissione europea (EUR 22312 EN), solo nel 2005 la superficie totale distrutta dagli incendi in paesi ad alto rischio (Portogallo, Spagna, Francia, Italia e Grecia) è stata di circa 590000 ettari con circa 73325 incendi e con la morte di circa 41 persone. Successivamente nel 2007 si è verificato un incendio nel territorio greco di enormi dimensioni: il più grande disastro naturale negli ultimi 100 anni in Grecia con la morte di circa 75 persone. E' chiaro che ai fini della prevenzione e del controllo, è di fondamentale importanza capire e quantificare come fattori ambientali (vento, umidità e temperatura), caratteristiche del carburante (tipo, struttura e densità della vegetazione), caratteristiche del territorio (pendenza, altezza e barriere naturali) e interventi umani possono influenzare lo sviluppo di incendi [1, 3-5].

A questo scopo sono stati proposti in letteratura vari tipi di modelli matematici che a secondo della metodologia utilizzata e del livello di dettaglio della descrizione possono essere classificati in [6-8]:

(a) modelli empirici e semiempirici basati sull'analisi statistica di dati ottenuti da incendi reali.

(b) modelli macroscopici, dove si fa uso di equazioni nel continuo attraverso fluido-dinamica computazionale accoppiata ad equazioni di trasferimento del calore e modelli di combustione.

(c) modelli microscopici basati su griglia, dove il fenomeno è descritto in maniera discreta nello spazio e nel tempo e si utilizzano leggi di evoluzione locale per descrivere i meccanismi di propagazione del fronte nell'intorno.

I modelli empirici sono in generale semplici da utilizzare, non richiedono grandi oneri computazionali, possono dare informazioni qualitative e , sotto opportune restrizioni, quantitative sulla dinamica degli incendi .

Tuttavia la maggior parte sono derivati da esperimenti di laboratorio non sempre applicabili a casi reali di incendi boschivi spontanei in territori eterogenei [7, 12-13].

D'altra parte i modelli macroscopici sono derivati da principi primi applicando equazioni di conservazione della massa, dell'energia e del momento [6,14].

Ciononostante, data la "complessità" del fenomeno e la natura stocastica della dinamica, i modelli macroscopici non sono sempre adeguati per predizioni accurate in quanto i fenomeni spazio-temporali che avvengono non sono sempre descrivibili attraverso equazioni alle derivate parziali. Inoltre, anche quando teoricamente accurati, molti modelli macroscopici richiedono grosse risorse di calcolo per simulazioni su larga scala e territori eterogenei. Per la natura "continua" dei modelli macroscopici è, inoltre difficile e spesso impossibile tener conto di politiche di spegnimento dell'incendio. Tale aspetto è invece fondamentale se si vuole implementare il modello per la progettazione di politiche di spegnimento ed il controllo in tempo reale degli incendi.

Tecniche di modellazione multiscala (microscopiche/stocastiche) possono essere utili per supplire agli svantaggi finora descritti per i modelli macroscopici e quelli semi-empirici. Tali tecniche infatti sono in grado di modellare la complessità e la natura stocastica del fenomeno a livello macroscopico definendo la fisica a livello microscopico/locale.

La dinamica a livello macroscopico emerge come risultato di leggi evolutive che operano a livello microscopico. Dunque questi modelli possono incorporare a livello microscopico sia modelli basati su principi primi che modelli semi-empirici, possono modellare eterogeneità spaziali sia per quanto riguarda il comburente che le caratteristiche del territorio, possono essere accoppiati a sistemi geografici informativi GIS (Geographical Information Systems) e possono essere incluse in tempo reale informazioni meteorologiche. Inoltre possono includere meccanismi più complessi di propagazione dell'incendio quali effetto "spotting", velocità e direzione del vento e caratteristiche del comburente. Per tali ragioni negli ultimi anni sono stati fatti molti studi per lo sviluppo di modelli basati su queste tecniche per la predizione di diffusione di incendi spontanei.

Le metodologie di questo genere più significative sono basate su automi cellulari [15-16].

La metodologia sviluppata grazie al programma di short mobility in oggetto si inserisce in questo ambito come tecnica basata su automi cellulari capace di predire la velocità di diffusione di incendi boschivi su territori eterogenei e di larga scala.

Le principali caratteristiche di tale tecnica, descritta in [19, 20] sono: accoppiamento a dati dettagliati GIS, inclusione di dati meteorologici di temperatura e vento così come misurati da stazioni meteorologiche ed in tempo reale; inclusione delle caratteristiche della vegetazione come tipo, densità, infiammabilità, contenuto di umidità e altezza degli alberi.

In particolare rispetto alla tecnica descritta in [19, 20] la metodologia sviluppata consente di tenere in conto l'effetto di spotting e dei tentativi di spegnimento dell'incendio effettuati con aerei ed elicotteri.

Inoltre, il modello sviluppato è stato testato per simulare l'incendio avvenuto nel parco nazionale di Parnitha nella regione greca dell'Attica nel giugno 2007. Il punto di ignizione è stato a circa 80 Km a Nord-est di Atene e il fronte si è mosso velocemente verso il centro del parco nazionale. In circa tre giorni l'incendio distrusse 6000n ettari di foresta dando luogo ad uno dei disastri ambientali mai avvenuto in Grecia. L'incendio è stato combattuto con 10 aerei e 2 elicotteri e si è evoluto su un territorio molto eterogeneo per paesaggio, densità e caratteristiche della vegetazione e per condizioni meteorologiche (vento). Per tale ragione rappresenta un efficace caso di riferimento per la convalida di modelli per la simulazione di incendi spontanei e soprattutto per estrarre informazioni utili circa i fattori più influenti sulla dinamica della velocità del fronte dell'incendio.

Nella presente relazione si riportano i risultati che hanno consentito non solo il rafforzamento della collaborazione tra l'Istituto di Ricerche sulla Combustione con il dipartimento di matematica applicata e scienze fisiche dell' NTUA, ma anche il raggiungimento di interessanti obiettivi scientifici quale lo sviluppo di una nuova metodologia per la modellazione della propagazione di incendi boschivi che tenga conto degli interventi di confinamento e soppressione dell'incendio.

Nella prima parte della relazione verrà esposta la metodologia sviluppata e nella seconda parte verrà commentato il confronto tra i risultati della simulazione dell'incendio con i dati reali ottenuto dal sistema GIS per l'incendio in Parnitha.

2. Metodologia basata su Automi Cellulari

2.1 Definizione della griglia

Il primo passo per lo sviluppo di una metodologia basata su automi cellulari è la definizione di una griglia. La presente metodologia utilizza una griglia bidimensionale che discretizza l'area forestale in un certo numero di celle. Ogni cella rappresenta una piccola porzione di terra ed è stata assunta di forma quadrata, in maniera da poter descrivere otto possibili direzioni di propagazione dell'incendio vedi figura 1).

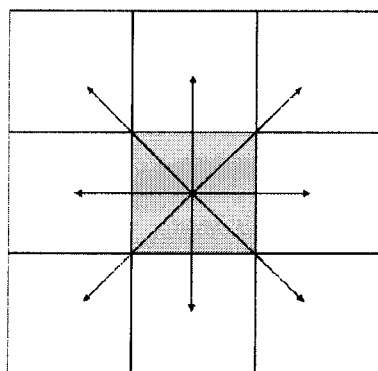


Fig. 1 Possibili direzioni di propagazione dell'incendio su una griglia di celle quadrate.

E' possibile pensare anche a celle di forme diverse (ad es. esagonali [18,21]) per una discretizzazione più fine dello spazio. Tuttavia in questo lavoro si è preferito non incrementare eccessivamente l'onere computazionale con celle di forme più complesse.

2.2 Stato delle celle

Ogni cella è caratterizzata da quattro possibili stati che evolvono in maniera discreta nel tempo. I possibili stati sono i seguenti:

Stato=1: La cella non contiene combustibile derivante da vegetazione . Questo stato può descrivere le celle corrispondenti a parti di città in cui non vi è vegetazione oppure area rurali aride. Il presente modello assume che le celle in questo stato non partecipano alla diffusione dell'incendio.

Stato=2: La cella contiene combustibile derivante da vegetazione che non è bruciato.

Stato=3: La cella contiene combustibile derivante da vegetazione che sta bruciando.

Stato=4: La cella contiene combustibile derivante da vegetazione che è stato bruciato.

Lo stato di ogni cella è registrato come elemento di una matrice (**S**) che da ora in poi verrà chiamata la matrice degli stati. La figura 2 mostra un esempio di come un'area di 16 celle, con un numero casuale di stati, può essere codificata in termini di matrice.

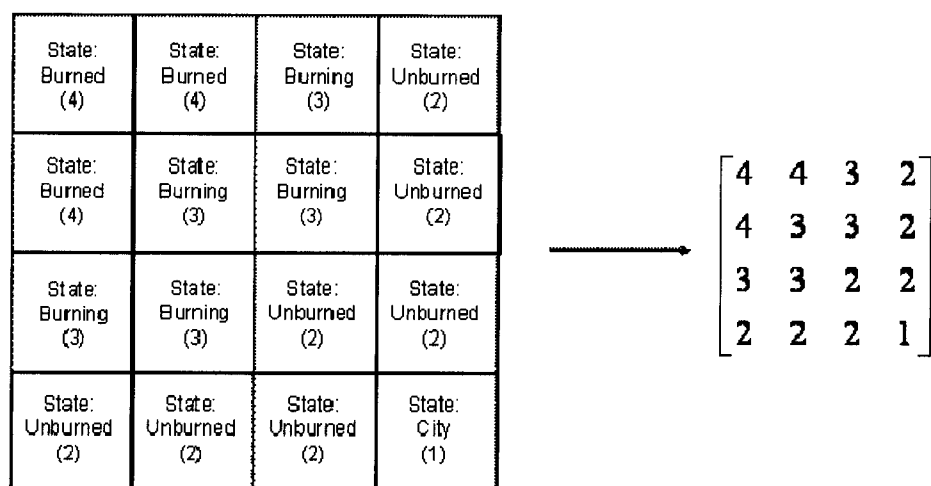


Fig.2 Matrice degli stati **S**

2.3 Leggi di evoluzione

Durante la simulazione, ad ogni istante di tempo discreto t , vengono applicate le seguenti leggi di evoluzione agli elementi i,j della matrice degli stati **S** (e quindi a tutte le celle):

Legge 1: IF $\text{state}(i, j, t) = 1$ THEN $\text{state}(i, j, t+1) = 1$

Questa legge implica che lo stato di una cella che non ha combustibile (cella vuota) rimane la stessa e non può incendiarsi.

Legge 2: IF $\text{state}(i, j, t) = 3$ THEN $\text{state}(i, j, t+1) = 4$

Questa legge implica che una cella che si sta incendiando al tempo corrente si spegnerà all'istante successivo.

Legge 3: IF $\text{state}(i, j, t) = 4$ THEN $\text{state}(i, j, t+1) = 4$

Questa legge implica che lo stato di una cella vuota che si è spenta nell'istante precedente rimane spenta negli istanti successivi.

Legge 4: IF $\text{state}(i, j, t) = 3$ THEN $\text{state}(i\pm 1, j\pm 1, t+1) = 3$ with a probability p_{burn}

Questa legge implica che quando una cella si incendia all'istante corrente, l'incendio può propagarsi alle celle adiacenti con una probabilità pari a p_{burn} . Questa probabilità è una funzione di vari parametri che influenzano la velocità di avanzamento dell'incendio e verrà analizzata in dettaglio in seguito. Va notato che essendo la griglia quadrata l'incendio può propagarsi alle celle adiacenti $i\pm 1, j\pm 1$, che sono le otto celle mostrate in figura 1.

2.4 Variabili che influenzano la velocità di propagazione dell'incendio

La metodologia sviluppata considera le seguenti variabili che influenzano la velocità di propagazione dell'incendio: il tipo, la densità, l'altezza e il contenuto in umidità della vegetazione, la velocità del vento e la direzione, l'inclinazione del terreno e l'effetto "spotting" (che verrà descritto in seguito).

Le variabili che sono specifiche della zona, ovvero tipo e densità di vegetazione ed inclinazione del terreno sono riportate in una matrice simile alla matrice degli stati. La probabilità p_{burn} è calcolata con la seguente equazione:

$$p_{burn} = p_0 (1 + p_{veg}) (1 + p_{den}) p_w p_s p_m p_h \quad (1)$$

dove

p_{den} = la probabilità che l'incendio si propaghi per effetto della densità locale di vegetazione

p_{veg} = la probabilità che l'incendio si propaghi per effetto del tipo locale di vegetazione

p_w = la probabilità che l'incendio si propaghi per effetto della direzione e della velocità del vento

p_s = la probabilità che l'incendio si propaghi per effetto dell'inclinazione del terreno.

p_m = la probabilità che l'incendio si propaghi per effetto dell'umidità contenuto nella vegetazione

p_h = la probabilità che l'incendio si propaghi per effetto dell'altezza della vegetazione

mentre p_0 indica la costante di probabilità che una cella, adiacente alla cella che sta bruciando e contenente un certo tipo e densità di vegetazione, venga investita dall'incendio nell'istante successivo, in condizioni di assenza di vento e di inclinazione del terreno.

2.5 Effetto del tipo e della densità di vegetazione

Gli effetti del tipo e della densità di vegetazione sono rappresentati dalle probabilità p_{veg} e p_{den} rispettivamente. Sia il tipo che la densità di vegetazione sono suddivisi in un numero discreto di categorie. In particolare, il tipo di vegetazione è stato suddiviso in 10 categorie che dipendono dal tipo di alberi presenti in ogni cella. Mentre la densità di vegetazione è stata suddivisa in tre categorie che vanno da 1 a 3, dove 1 rappresenta una vegetazione sparsa e 3 una vegetazione densa. Tipo e densità sono classificati attraverso due matrici, la matrice di vegetazione e la matrice di densità. Ad ogni rispettiva categoria è assegnato un valore delle probabilità p_{veg} e p_{den} .

2.6 Effetto del contenuto di umidità nella vegetazione.

Studi sperimentali hanno mostrato che l'inflammabilità della vegetazione e conseguentemente la velocità di propagazione dell'incendio dipende

esponenzialmente dal contenuto in umidità della vegetazione stessa che può essere determinata attraverso l'essiccazione di campione di vegetazione, come:

$$C_m = \frac{C_w - C_d}{C_d} \quad (2)$$

Dove C_w e C_d sono la massa dei campioni prima e dopo l'essiccazione rispettivamente. La relazione che tiene conto del contenuto in umidità della vegetazione risulta essere [25]:

$$R_m = a \exp(-bC_m) \quad (3)$$

Dove R_m è la velocità di propagazione, C_m è la percentuale (%) di umidità della vegetazione, a e b sono costanti da determinare attraverso una regressione dei dati sperimentali.

2.7 Effetto dell'altezza della vegetazione

Un'altro fattore che influenza la velocità di propagazione degli incendi è l'altezza della vegetazione. Fernandes [25] suggerisce una legge di potenza del tipo:

$$R_h = h^d \quad (4)$$

Per tener conto dell'effetto dell'altezza della vegetazione sulla velocità di propagazione dell'incendio. La relazione è stata ricavata attraverso la regressione di dati sperimentali.

2.8 Effetto della direzione e della velocità del vento.

Molte sono le relazioni empiriche che sono state suggerite in letteratura per modellare l'effetto del vento sulla velocità di propagazione del fronte dell'incendio [9, 10, 22]. La più utilizzata, riportata in [9,10] è la seguente:

$$R_w = R_{0w} \exp(\beta \theta_f)$$

dove R_w rappresenta la velocità di propagazione in presenza di vento, R_{0w} è la velocità di propagazione quando la velocità del vento è uguale a zero, θ_f è l'angolo della fiamma misurato dalla direzione perpendicolare alla direzione della velocità di propagazione e β è la costante che in genere si ottiene dalla regressione lineare dei dati sperimentali [17]. Quando la direzione della velocità di propagazione è la stessa di quella del vento allora l'angolo è fissato pari a θ_f , mentre se sono di direzione opposta l'angolo è fissato pari a $-\theta_f$; per tutte le altre direzioni l'angolo θ_f è posto uguale a zero. La seguente espressione empirica è stata suggerita in [23] per calcolare l'angolo della propagazione dell'incendio:

$$\tan(\theta_f) = 0.4226V$$

dove V denota la velocità del vento.

Nel nostro caso abbiamo applicato una relazione empirica più flessibile dove la probabilità che contiene l'effetto della velocità del vento e della sua direzione è calcolata dalle seguenti espressioni:

$$p_w = \exp(c_1 V) f_t, \quad f_t = \exp(V c_2 (\cos(\theta) - 1))$$

dove c_1 , c_2 sono costanti da determinare e θ è l'angolo tra la direzione di propagazione dell'incendio e la direzione del vento. Da notare che usando questa formula la direzione del vento può avere un qualunque valore

continuo tra 0° e 360° , a differenza della maggior parte delle tecniche menzionate dove la direzione del vento può solo assumere valori discreti. La figura 3 mostra la forma generale della probabilità p_w in funzione dell'angolo θ per alcuni valori arbitrari di c_1, c_2 e della velocità del vento V .

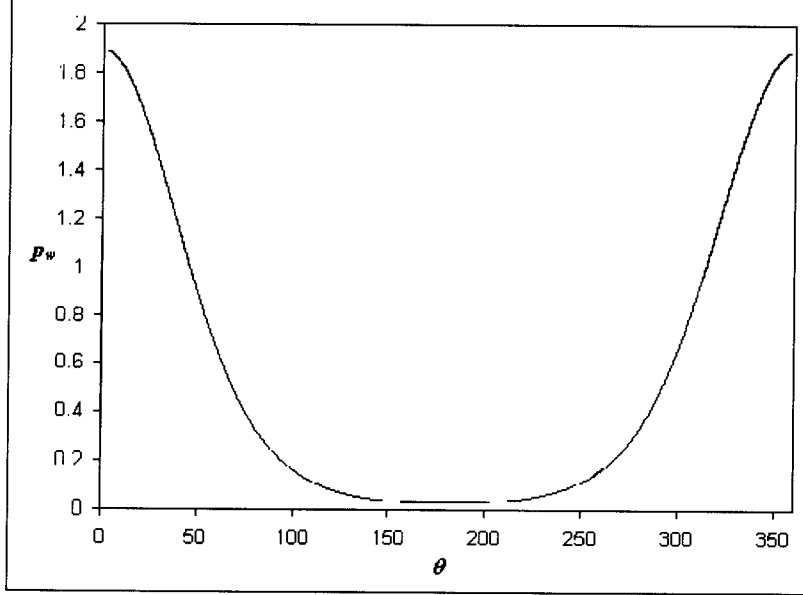


Figura 3 Effetto dell'angolo θ sulla probabilità p_w .

2.9 Effetto dell'inclinazione del terreno.

L'effetto dell'inclinazione del terreno è modellato utilizzando la seguente equazione proposta in [24]:

$$R_s = R_{0,s} \exp(a\theta_s)$$

dove $R_{0,s}$ è la velocità di propagazione quando l'inclinazione è uguale a zero, θ_s è l'angolo dell'inclinazione del terreno (nella specifica cella) e a è una costante che può essere stimata dai dati sperimentali. Secondo l'equazione (7), la probabilità che modella l'effetto dell'inclinazione del terreno può essere espressa come:

$$p_s = \exp(a\theta_s)$$

Va notato che siccome la griglia è quadrata, la pendenza deve essere calcolata in maniera differente a seconda che le celle sono adiacenti o diagonali alla cella che brucia. Più precisamente, per celle adiacenti l'angolo di inclinazione è espresso da:

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{E_1 - E_2}{l}\right)$$

Dove E_1 e E_2 sono l'altitudine delle due celle e l è la lunghezza del lato quadrato, invece per celle diagonali la formula diventa:

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{E_1 - E_2}{l\sqrt{2}}\right)$$

2.10 Effetto "spotting".

L'effetto "spotting" è un fenomeno caratterizzato dalla combustione di materiale di piccole dimensioni come ramoscelli e piccoli pezzi di tronchi che possono essere trasportati dal vento o proiettati per altri motivi, per poi ricadere in regioni lontane dal fronte di propagazione dell'incendio. Tale materiale può eventualmente creare nuovi fronti in dipendenza del tipo e della densità di vegetazione delle zone colpite.

Un classico esempio del fenomeno "spotting" sono le pigne incandescenti che, pur essendo troppo pesanti per essere trasportate dal vento, vengono proiettate in aria per poi ricadere anche a centinaia di metri di distanza. Ovviamente la natura probabilistica di questo fenomeno rende piuttosto difficile la definizione di un modello deterministico che lo descriva. Nel presente programma di ricerca si è scelto

di incorporare tali azioni a lungo raggio cercando di approssimare il fenomeno di spotting dovuto alle pigne, essendo i pini gli alberi più comuni della macchia mediterranea. La tecnica può essere comunque facilmente estesa a diversi tipi di effetto “spotting”.

Nel caso di una foresta di pini si può assumere che ogni cella che brucia, possa proiettare in aria un numero di pigne incandescenti pari a N_p . Tale numero viene estratto da una distribuzione di tipo Poisson con valore medio λ . La direzione verso cui ogni pigna è proiettata è quindi ricavata da una distribuzione uniforme. Il parametro finale da valutare per modellare tale fenomeno di “spotting” è la distanza d_p coperta da ogni pigna. Tale distanza è funzione di due componenti: la prima componente rappresenta la spinta di una pigna e può essere modellata in maniera probabilistica; la seconda è la direzione del vento e la sua velocità. L’effetto combinato di queste due componenti può essere modellato con la seguente espressione:

$$d_p = r_n \exp(Vc_2 (\cos(\theta_p) - 1))$$

Dove r_n è un numero casuale ricavato da una distribuzione normale con una data media e deviazione standard e θ_p è l’angolo tra la direzione del vento e la direzione della traiettoria delle pigne incandescenti. Conoscendo l’angolo della traiettoria e la distanza, possono essere facilmente calcolate le celle che verranno colpite dalle pigne. Se queste celle bruceranno oppure no, dipende sia dal tipo che dalla densità di vegetazione. Così è possibile definire una probabilità costante p_{c0} che una cella venga colpita dall’incendio per effetto “spotting” per poi correggere questo valore di probabilità attraverso un fattore p_{cd} che dipende dal tipo e dalla densità di vegetazione della cella. Ovvero:

$$p_c = p_{c0} (1 + p_{cd})$$

Infine si aggiunge alle leggi di evoluzione già descritte, una quinta legge che tiene conto dell’effetto “spotting”:

Rule 5: IF $\text{state}(i, j, t) = 3$ THEN $\text{state}(i \pm i_c, j \pm j_c, t+1) = 3$ con probabilità p_c

dove i_c e j_c sono indici che dipendono dalla distanza d_p e dalla direzione della traiettoria della pigna.

2.11 Modellazione della politica di spegnimento dell'incendio.

Per la progettazione di efficienti politiche di gestione del rischio è di fondamentale importanza prevenire, modellare e sopprimere la diffusione del fronte dell'incendio.

Politiche di prevenzione prevedono la collocazione di sistemi di monitoraggio, l'apertura di strade che rendano raggiungibili le zone anti-incendio o dove si sta sviluppando il fronte, la rimozione periodica del materiale vegetale che si deposita sul suolo e che può favorire la propagazione dell'incendio. D'altro canto una volta che l'incendio è divampato bisogna mettere in atto una strategia di confinamento e soppressione dell'incendio.

Nonostante l'importanza di una pianificazione degli interventi, la maggior parte vengono effettuati sulla base di procedure standardizzate e basate sull'esperienza [25]. Tuttavia errori dovuti alla sottostima della situazione per l'impossibilità di predire l'evoluzione dell'evento possono avere delle conseguenze disastrose. In questo contesto, le elevate potenzialità di calcolo e la possibilità di modellare l'evoluzione del fronte anche includendo le strategie di spegnimento, può dare dunque nuovi sviluppi sui metodi di pianificazione degli interventi stessi.

Il modello sviluppato include una politica di spegnimento effettuata attraverso aerei il cui intervento dipende dalla forma assunta dal fronte dell'incendio, dalla distanza dal lago o dalla costa marina più vicina, dalla velocità dell'aereo v_{cruise} , la velocità di schiumaggio dell'acqua $R_{skimming}$ e, infine, il livello di ricoprimento del suolo. La figura 4 mostra una tipica forma della porzione di suolo ricoperta dall'acqua che viene scaricata dall'aereo in un solo colpo.

Si assume che gli aerei che intervengono sono N e che la risorsa d'acqua più vicina si trova ad una distanza media d dal fronte dell'incendio. Aerei comunemente usati in tali operazioni possono volare solo in condizioni di vento non troppo severe e solo

durante il giorno. Si assume dunque che le ore di intervento sia t_h al giorno. Sotto queste ipotesi, il tempo necessario all'aereo per rifornirsi di acqua e ritornare sul fronte per scaricare l'acqua sul fronte dell'incendio, sia approssimativamente:

$$t_{attack_cycle} = 2 \frac{d}{v_{cruise}} + \frac{V_c}{R_{skim\ min\ g}} \text{ (in minuti)},$$

dove V_c è il volume d'acqua che può trasportare l'aereo. Il rallentamento dovuto all'operazione di scarico dell'acqua è stato trascurato, ma può essere facilmente incluso.

L'intervallo tra i due tempi discreti a cui avvengono due interventi successivi è dunque, $t_{CA_cycle} = \frac{t_{attack_cycle}}{T}$ dove T è l'intervallo discreto della simulazione CA.

Infine, assumendo l'operazione continua di N aerei per t_h ore, gli interventi sono distribuiti del tempo secondo una distribuzione di Poisson con una frequenza di

$$r_{drops} = \frac{N}{t_{CA_cycle}} \text{ per intervallo di tempo.}$$

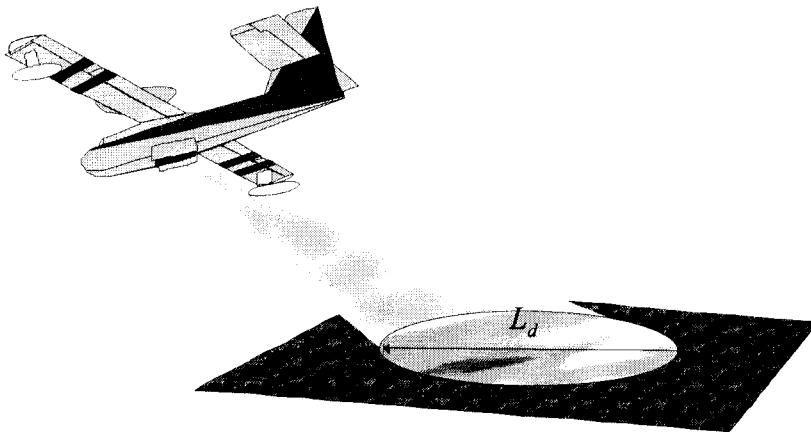


Figure 4 Porzione di suolo tipicamente ricoperta dall'acqua in fase di scarico dall'aereo.

Indicando con L_d (vedi fig.4) la lunghezza media della porzione di suolo ricoperta per singolo scarico, allora la porzione di suolo ricoperta per ogni intervallo di tempo è $r_{drops} \cdot L_d$. In questo contesto dunque alle regole di evoluzione già descritte vanno aggiunte le seguenti:

Rule 6: (a) Ad ogni intervallo di tempo calcola il numero di scarichi k che avvengono secondo la funzione di densità di probabilità di Poisson:

$$f(k) = \frac{r_{drops}^k \exp(-r_{drops})}{k!}$$

(b) calcola come $n = \frac{r_{drops} \cdot L_d}{l_{cell}}$ il numero di celle che sono sul fronte dell'incendio ovvero scegli il numero di celle con stato uguale a 3.

Rule 7: Per ognuna delle n celle si assegna una probabilità p_{ext} che l'incendio possa estinguersi, ovvero:

IF state(i, j, t) = 3 THEN state(i, j, t) = 4 con probabilità p_{ext}

Tali leggi vanno implementate prima della legge 4.

3. Applicazione all'incendio del parco nazionale di Parnitha.

La metodologia proposta è stata applicata per la previsione dell'incendio che ha avuto luogo sulla montagna di Parnitha il 27 giugno del 2007 in Grecia. L'incendio iniziò circa alle 20:00 partendo da tre punti differenti a distanza di circa 150 metri l'uno da l'altro ed ha avuto una durata di circa tre giorni con la distruzioni di 6000 ettari di parco. La figura 5 mostra una immagine satellitare del disastro che mostra l'area interessata dall'incendio. In giallo è marcata la zona considerata per il confronto con la simulazione al calcolatore.

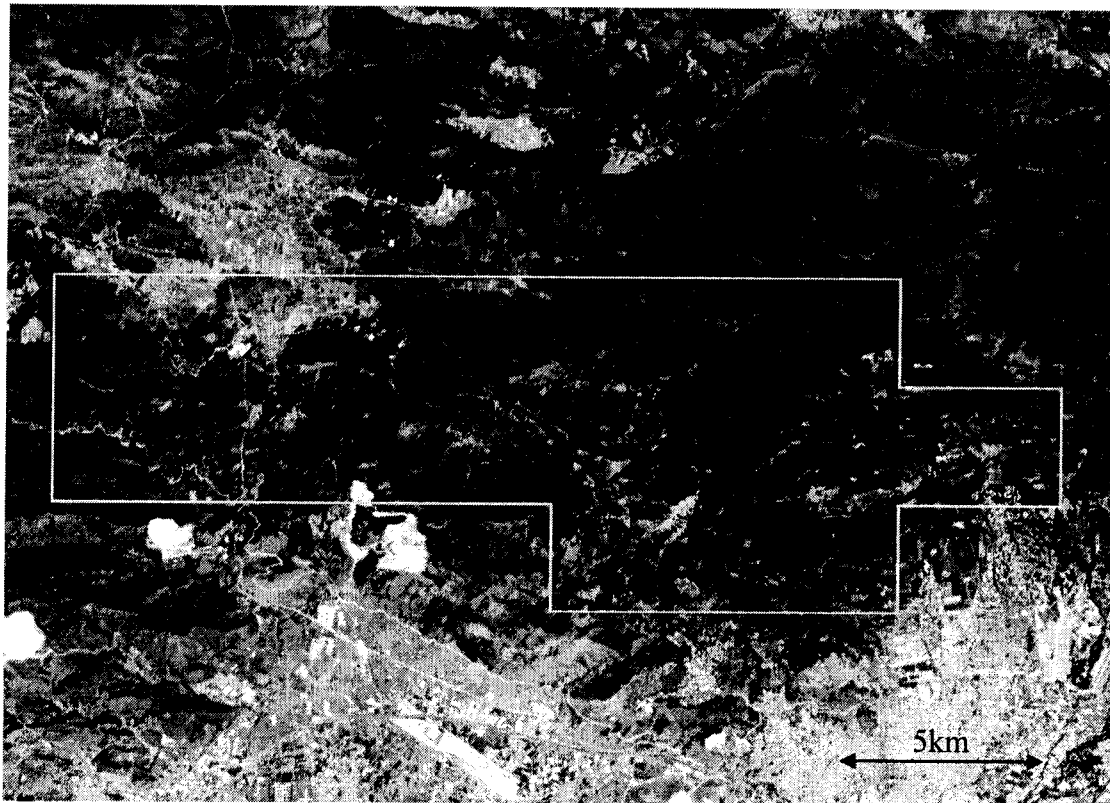


Figura 5 Area bruciata in Parnitha- immagine satellitare

Tale incendio presenta le caratteristiche ideali per poterlo considerare un esempio di riferimento per la convalida di modelli di propagazione degli incendi. Infatti, innanzitutto il suolo dove l'incendio si è propagato è eterogeneo con una altitudine variabile da 200m a 1400m. La figura 6 mostra le variazioni di altitudine della zona interessata.

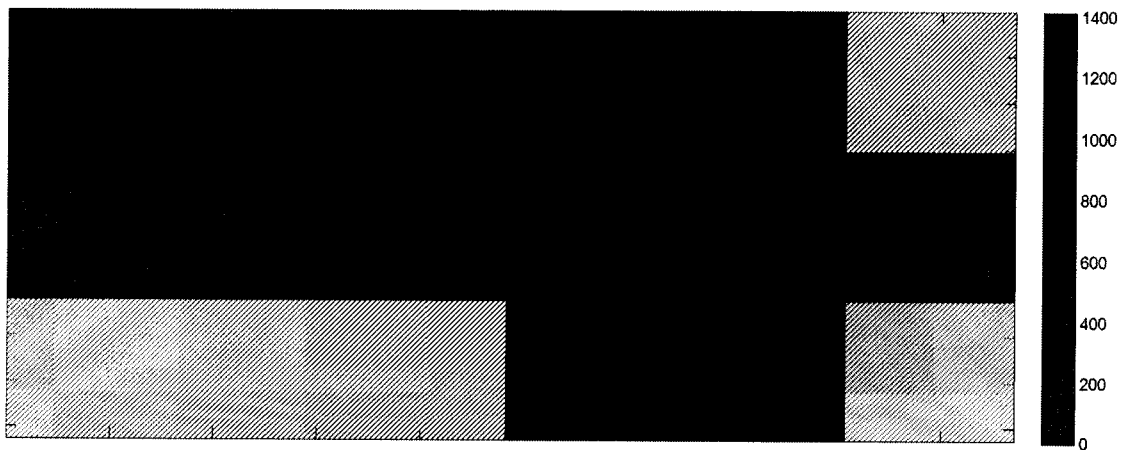
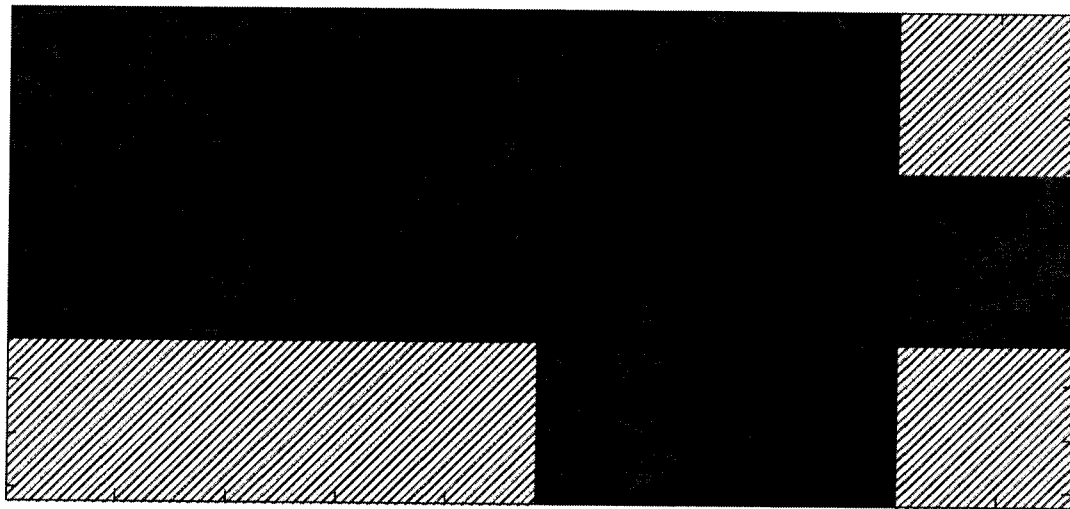
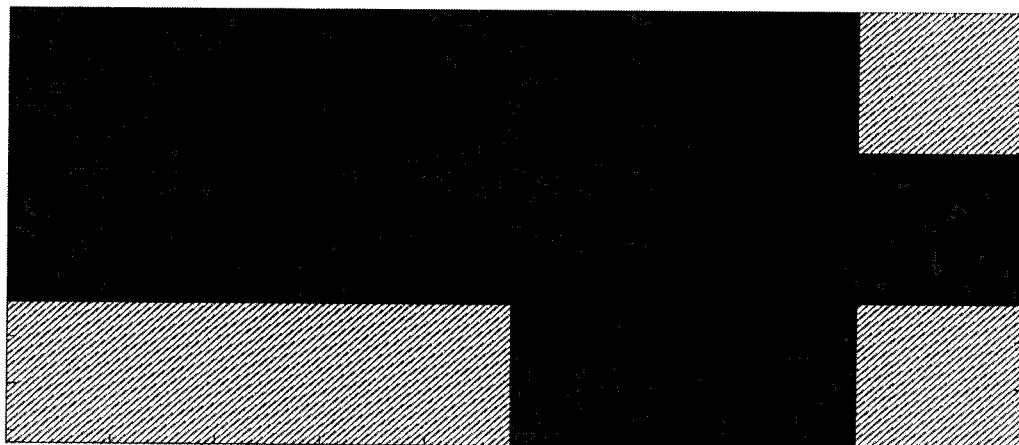


Figura 6. Variazione dell'altitudine nell'area di Parnitha.



- Other Lands
- Residential Districts
- Black Pine
- Riverine Vegetation
- Juniper
- Fir
- Cypress
- Grasslands
- Alepo Pine
- Oak
- Croplands
- Shrub

Figura 7. Tipo di vegetazione nell'area di Parnitha.



- Dense Vegetation
- Normal Vegetation
- Sparse Vegetation

Figura 8. Densità di vegetazione nell'area di Parnitha

Un altro aspetto di interesse che ha reso tale incidente particolarmente attraente è stato la diversificazione in densità e tipo di vegetazione che caratterizza tale zona.

La figura 7 e la figura 8 mostrano il tipo di vegetazione e densità caratteristiche della zona, dove si può notare l'esistenza di almeno 10 diverse varietà di alberi.

Da notare che le figure 6-8 non sono altro che diagrammi delle altitudini, della densità di vegetazione e delle matrici di vegetazione che sono stati creati sulla base delle informazioni geografiche digitali. In particolare è stato impiegato un sistema GIS, detto Arc GIS 9.2 by ESRI, che ha consentito la creazione di file che codificano il tipo e la densità della vegetazione e l'altitudine. Tali file sono stati creati attraverso la digitalizzazione delle immagini satellitari dell'area interessata prima e dopo che avvenisse l'incendio.

3.1 Risultati della simulazione

In tabella 1 sono riportate le condizioni meteorologiche in cui è avvenuto l'incidente. I valori delle probabilità p_{den} e p_{veg} sono stati scelti empiricamente e sono riportati nelle tabelle 2 e 3 rispettivamente.

Table 1. Condizioni meteorologiche a Parnitha durante l'incendio (7/27/07 – 7/30/07).

Variable	Value
Direzione del vento	West nelle prime 32 ore, NorthWest dopo
Velocità del Vento	9-11m/s(~5 Beaufort)
Temperatura media	31 °C
Umidità	33%

Table 2. Valori della probabilità p_{veg} in funzione del tipo di vegetazione

Category	Type	p_{veg}
1	Shrub	0.4
2	Croplands	-0.3
3	Oak	0.2
4	Alepo Pine	0.4
5	Grasslands	0.4
6	Cypress	0.4
7	Fir	0.2
8	Juniper	0.3
9	Riverine Vegetation	0
10	Black Pine	0.2
11	Residential District	-1
12	Other Lands	-1

Table 3. Valori della probabilità p_{den} in funzione della densità di vegetazione

Category	Density	p_{den}
1	Sparse	-0.4
2	Normal	0
3	Dense	0.3

Table 4. Valori dei parametri caratteristici dell'algoritmo CA.

Parameter	Symbol	Value
Spread probability under no wind and flat terrain	p_0	0.6
Slope parameter	a_s	0.063
Moisture parameter 1	a	3.258
Moisture parameter 2	b	0.111
Vegetation height parameter	d	0.932
Wind parameter 1	c_1	0.045
Wind parameter 2	c_2	0.191

Table 5. Valori dei parametri caratteristici della modellazione della tattica di spegnimento dell'incendio.

Parameter	Symbol	Value
Expected number of drops	r_{drops}	0.5
Mean drop length	l_d	100m

La probabilità costante p_0 e i valori dei parametri caratteristici dell'effetto dell'inclinazione del suolo, il vento, il contenuto di umidità e l'altezza della vegetazione sono stati valutati in base ad una procedura di ottimizzazione [19] e i loro valori sono stati confrontati con quelli riportati in letteratura [1, 9, 10].

I valori finali per questi parametri sono riportati in tabella 4. Infine, la tabella 5 mostra i parametri caratteristici del strategie di spegnimento dell'incendio.

I risultati della simulazione sono mostrati in Fig. 9. L'area finale bruciata è mostrata in colore nero mentre i contorni rossi rappresentano il fronte di avanzamento dell'incendio ogni intervallo di tempo pari a 3 ore. Dal confronto con la figura 5 è evidente che la superficie reale bruciata dall'incendio è molto simile a quella ottenuta

per simulazione del modello proposto. Eventuali discrepanze sono però facilmente giustificabili dalla digitalizzazione dell'area derivante dall'immagine satellitare. A conferma di ciò, basta pensare che negli incendi reali ci sono piccole porzioni di foresta rimaste indenni immerse in grandi aree bruciate che in genere non appaiano nell'immagine satellitare.

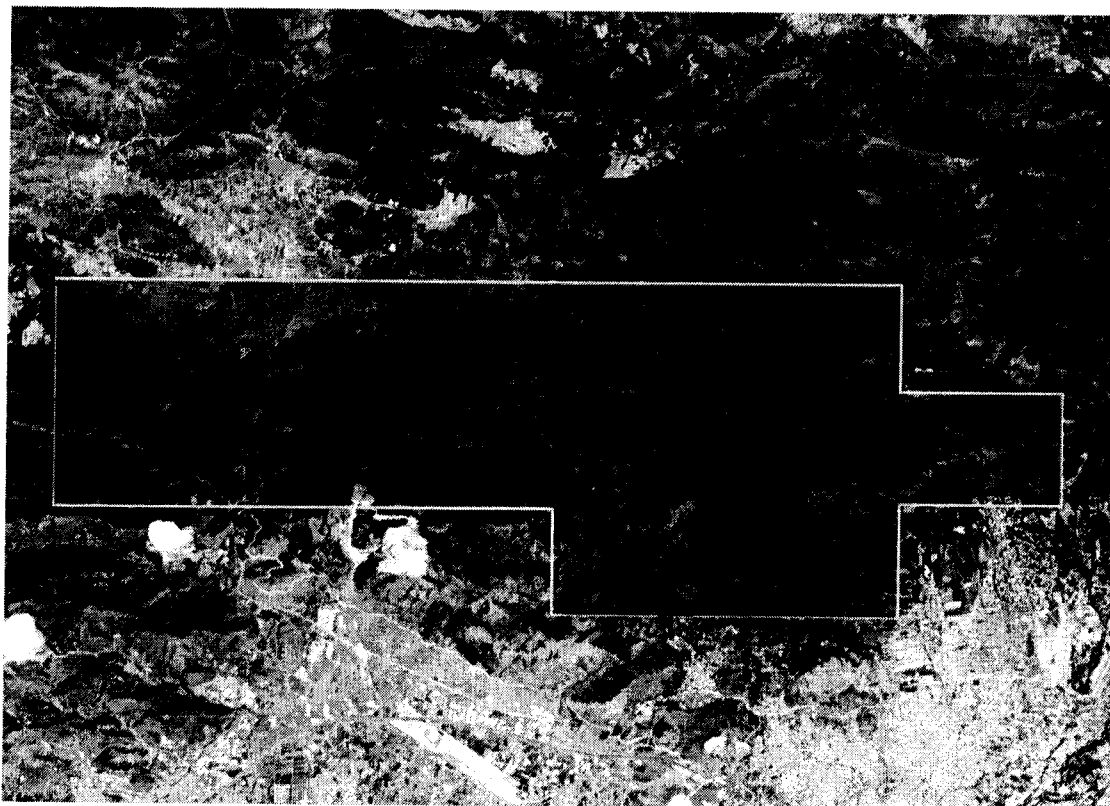


Figura 9 Area bruciata come prevista dal modello.

I risultati della simulazioni invece prevedono la presenza di tali porzioni. Inoltre la limitata risoluzione spaziale delle foto-mappe determina una certa incertezza rispetto alla esatta caratterizzazione delle vegetazione. Infine, ci sono molti altri fattori che rendono impossibile una esatta corrispondenza tra i dati simulati e quelli reali, come l'incertezza riguardo i dati meteorologici e la mancata modellazione di alcuni fenomeni (fluidodinamica dell'aria).

Tuttavia è chiaro che il modello proposto riproduce in maniera abbastanza accurata la dinamica dell'incendio anche in suolo eterogeneo e con vegetazione variabile in densità e tipo.

Tale modello potrebbe essere quindi utilizzato per avere una predizione in tempo reale della dimensione del disastro così da organizzare le politiche di spegnimento in maniera più efficiente. Ad esempio, nel caso in esame, avrebbero dovuto intervenire prima che l'incendio arrivasse al centro del parco e in questo una previsione del disastro avrebbe potuto aiutare nella prevenzione. Infatti, guardando l'evoluzione del fronte, si può vedere che il modello predice che dopo 51 ore di simulazione, il fronte si divide in due parti che poi si riuniscono dopo 3 ore. Sarebbe stato possibile quindi concentrare le strategie di spegnimento al momento della separazione del fronte per evitarne la riunione e quindi ridurre l'entità dei danni.

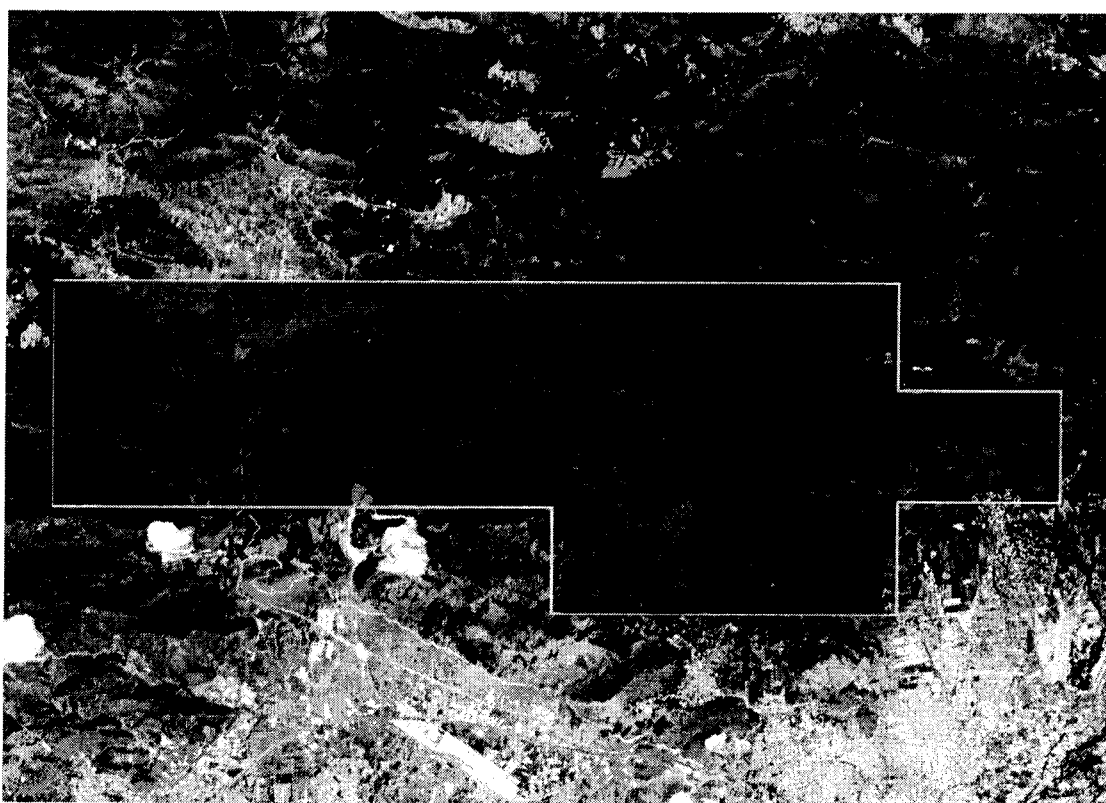


Figura 10. Area bruciata come prevista dal modello in assenza di interventi di spegnimento.

Altre interessanti informazioni possono essere acquisite applicando il modello per simulare l'evento in assenza di interventi di spegnimento del fronte. La figura 10 mostra la simulazione in queste condizioni e, come si può notare, la superficie rimasta bruciata risulta simile mettendo in luce che la strategia di intervento non è stata abbastanza efficace. Va detto, comunque, che la superficie totale bruciata risulta 46.009km^2 in assenza di misure di intervento e 42.437km^2 , ovvero nettamente inferiore, in presenza di tentativi di spegnimento del fronte.

4. Conclusioni

Il presente programma di short mobility ha consentito il rafforzamento e il proseguimento di una collaborazione tra l'Istituto delle Ricerche sulla Combustione e la National Technical University of Athens sul tema della modellazione di incendi boschivi. Infatti durante il periodo di short-mobility è stato possibile non solo messa a punto di una metodologia per la modellazione della propagazione di fronti di incendi basata su automi cellulari, ma anche la realizzazione di interessanti risultati scientifici che sono stati oggetto di pubblicazione su riviste leader del settore [26]. Il modello sviluppato e descritto nel dettaglio nella presente relazione presenta la novità di riuscire a simulare anche le politiche di spegnimento del fronte tramite lo scarico di acqua da aerei.

Il modello prevede efficacemente lo sviluppo e lo spegnimento del fronte ed è stato testato sulla base di dati ottenuto dal sistema GIS per l'incendio reale avvenuto nella regione di Parnitha nel giugno del 2007. Il buon accordo con i dati forniti dalle immagini satellitari dimostrano che il modello può essere efficacemente utilizzato per ottimizzare le strategie di spegnimento in tempo reale. Obiettivi futuri prevedono la convalida del modello su incendi avvenuti sul territorio italiano.

Inoltre, gli incoraggianti risultati scientifici ottenuti grazie a questa collaborazione, hanno dato una ulteriore spinta alla creazione di una piattaforma per la pianificazione di progetti europei centrati sulla tematica della prevenzione e del controllo degli incendi boschivi.

Bibliografia

- [1] E.A. Johnson, *Fire and Vegetation Dynamics: Studies from the North American Boreal Forest*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- [2] Y. Bergeron and M.D. Flannigan, Predicting the effects of climate change on fire frequency in the southeastern Canadian boreal forest, *Water, Air, Soil Pollut.* 82(1995), 437–444.
- [3] W. Fons, Analysis of fire spread in light forest fuels, *J. Agr. Res.*, 72(1946), 93-121.
- [4] F.A. Albin and J.K. Brown, Mathematical modelling and predicting wildland fire effects, *Combustion, Explosion and Shock waves*, 32(1996), 520-533.
- [5] M.D. Flannigan and B.M. Wotton, Climate, weather and area burned, in E.A. Johnson and K. Miyanishi (Eds.), *Forest Fires: Behavior & Ecological Effects*, Academic Press, 2001, pp. 335–357.
- [6] A.L. Sullivan, A review of wildland fire spread modelling, 1990-present, 1: Physical and quasi-physical models. arXiv:0706.3074v1 [physics.geo-ph], 2007.
- [7] A.L. Sullivan, A review of wildland fire spread modelling, 1990-present 2: Empirical and quasi-empirical models. arXiv:0706.4130v1 [physics.geo-ph], 2007.
- [8] A.L. Sullivan, A review of wildland fire spread modelling, 1990-present 3: Mathematical analogues and simulation models. arXiv:0706.4130v1 [physics.geo-ph], 2007.
- [9] M.G. Cruz, M.E. Alexander, R.H. Wakimoto, Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. *Canadian Journal of Forest Research* 35(2005), 1626-1639.
- [10] B.J. Stocks, M.E. Alexander, R.A. Lanoville, Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME). *Canadian Journal of Forest Research*, 34(2004), 1543–1547.
- [11] P. Fernandes, Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal. *Forest Ecology and Management*, 144(2001), 67–74.
- [12] G. Byram, Scaling laws for modeling mass fires, *Pyrodynamics*, 4(1966), 271–284.
- [13] N. Cheney and J. Gould, Fire growth in grassland fuels. *International Journal of Wildland Fire*, 5(1995), 237–247.

- [14] E. Pastor, L. Zarate, E. Planas, J. Arnaldos, Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour, *Progress in Energy and Combustion Science*, 29 (2003), 139-153.
- [15] J. Von Neumann, *The theory of self-reproducing automata*, University of Illinois Press, Urbana IL, 1966, 388.
- [16] D. Wolfram, *Universality and Complexity in Cellular Automata*, *Physica D* 10(1984), 10-35.
- [17] S. G. Berjak, J. H. Hearne, An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system, *Ecological Modelling*, 148(2002), 133-151.
- [18] Z. Yongzhong, E. Youhao, H. Tao, Z. Songbing, W. Jihe, A CA-based information system for surface fire spreading simulation, *IEEE, IGARSS '05 Proceedings*, 2005, 3484- 3487
- [19] A. Alexandridis, D. Vakalis, C.I. Siettos, G.V. Bafas, A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990, *Applied Mathematics and Computation*, 204(2008), 191-201.
- [20] Russo L. *Modellazione della propagazione di incendi boschivi: applicazione di automi cellulari*. Relazione short-mobility 2008
- [21] G.A. Trunfio, Predicting wildfire spreading through a hexagonal cellular automata model, in: P.M.A. Sloot, B. Chopard, A.G. Hoekstra (Eds.), *ACRI 2004*, LNCS 3305, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004, pp. 385–394.
- [22] F. Morandini, X. Silvani, L. Rossi, P.A. Santoni, A. Simeoni, J.H. Balbi, J.L. Rossi, T. Marcelli, Fire spread experiment across Mediterranean shrub: Influence of wind on flame front properties, *Fire Safety Journal*, 41(2006), 229–235.
- [23] N. P. Cheney, Fire behaviour, in *Fire and the Australian Biota*, A. M. Gill, G. H. Groves, I. R. Noble, (Editors.), Australian Academy of Science, Canberra, 1981, 157-175.
- [24] D.R. Weise, G.S. Biging, Effects of wind velocity and slope on flame properties, *Can. J. For. Res.*, 26(1996), 1849-1858.
- [25] J.F. Franklin, and J.K. Agee, Forging a science-based national forest fire policy. *Issues in Science and Technology* 20(2003), 59-66.
- [26] A. Alexandridis, D. Vakalis, Russo L., C.I. Siettos, G.V. Bafas. Wildland Fire spread Modelling using Cellular Automata: Evolution in Large-Scale Spatially Heterogeneous Environments under Fire Suppression Tactics, *International Journal of Wildland Fires*, in press 2009.