

CAPITOLO 9

I modelli Tiger-FireParadox

Stefano Mazzoleni - *Università di Napoli Federico II*

Francesco Giannino - *Università di Napoli Federico II*

Francisco Rego - *Università di Lisbona*

Ducan Heathfield - *World in a box Finland OY*

Introduzione

All'interno del progetto UE denominato Fire Paradox (FP6-18505), il laboratorio di Ecologia Applicata e Sistemi Dinamici dell'Università degli studi di Napoli Federico II, in cooperazione con l'Istituto Superior di Agronomia di Lisbona, e con la società World in a Box Finland OY, ha sviluppato un sistema integrato per la simulazione di propagazione di incendi boschivi in contesti mediterranei. Tale sistema è un approccio modulare ed in particolare è implementato in due software:

- TigerHazard, modello geometrico di propagazione del perimetro di incendio in funzione della pendenza, vento e tipo di combustibile
- Tiger Lab, modello matematico integrato per la valutazione della velocità e direzione della propagazione del fuoco in funzione del processo di combustione, convezione/diffusione, interazione fuoco-vento. Questo sistema prevede anche l'interazione con gli interventi di lotta anti-incendio.

Il software Tiger Hazard

Tiger Hazard calcola la propagazione del perimetro dell'incendio usando due semplici moduli. Il primo è il calcolo del "rate of spread" (ROS) in funzione del tipo di combustibile e delle condizioni ambientali per i diversi punti del perimetro dell'incendio, ed il secondo è il calcolo geometrico del nuovo perimetro dell'incendio.

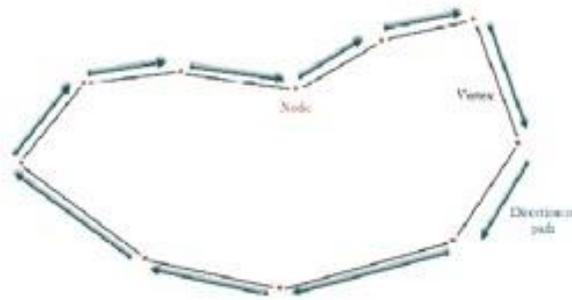
Dati di Input

Il modello richiede i seguenti dati di input:

- DEM (digital elevation map), con una risoluzione della griglia orizzontale di 20-40 metri. La proiezione deve essere UTM metrica WGS84.
- Una mappa di classificazione di combustibile in base alle tipologie di Anderson (vedi capitolo 2 modelli di combustibile). La mappa deve avere una risoluzione orizzontale di 20- 100 metri, e la sua proiezione dovrà corrispondere al DEM.
- Osservazioni e/o previsioni del vento per le aree di interesse (velocità media e le direzioni).

Perimetri Incendio: path e nodi

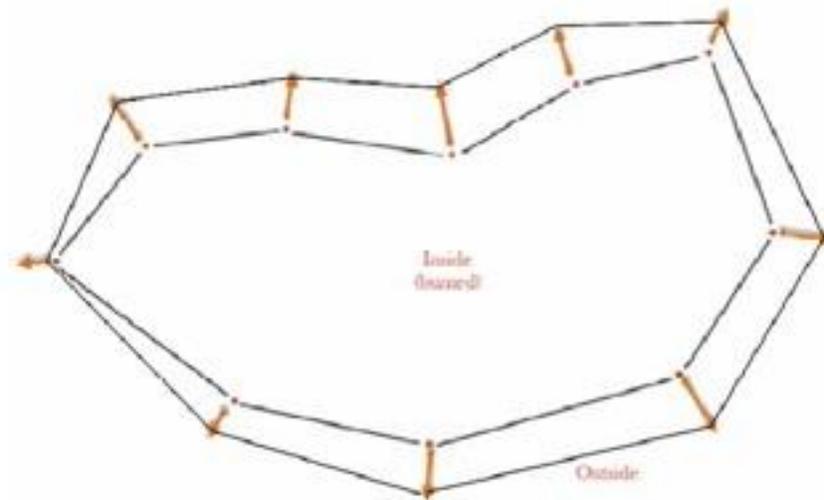
Ogni area percorsa da fuoco è descritta da un perimetro formato da nodi e segmenti. Nel modello un fuoco può avere più di una zona attiva.



Ogni perimetro è chiamato 'percorso' o path. Ogni percorso è costituito da un elenco di "nodi", che sono implicitamente uniti da vertici internodali. Il percorso è circolare e le linee non divergono: ciascun nodo nel percorso ha esattamente un nodo prima e dopo un nodo. Ad un nodo è assegnato il valore di primo nodo. L'ultimo nodo è quindi quello prima del primo nodo.

Propagazione del perimetro dell'incendio (movimento nodo verso l'esterno)

Con l'avanzare della simulazione l'area del fuoco avanza. In ogni passo di simulazione, i nodi si spostano verso l'esterno per formare un nuovo perimetro maggiore.

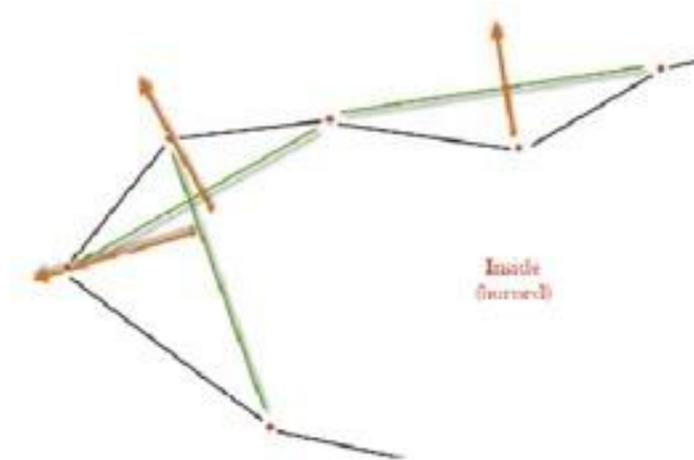


Ogni nodo stabilisce una direzione in cui si sposta (vedi paragrafo successivo per determinazione direzione) e una intensità determinata dal coefficiente di diffusione (Rate of Spread – ROS). Se il ROS è negativo, il nodo non si muove: i nodi quindi non possono muoversi all'indietro nella zona bruciata quando la simulazione è del tipo forward.

Direzione dei nodi

La direzione di movimento per ogni nodo viene determinata considerando i due nodi vicini. Infatti, se viene tracciata una linea tra il nodo precedente e quello successivo del nodo in considerazione, la direzione dello spostamento sarà perpendicolare a tale asse.

Dal momento che la direzione di ogni nodo è determinata dalle posizioni dei suoi vicini, il nuovo perimetro non può essere immediatamente calcolato. In particolare,



ad ogni passo di simulazione, viene prima calcolata la direzione di movimento per ogni nodo e poi applicato a tutti i nodi allo stesso tempo.

Velocità dei nodi

Il calcolo della intensità/velocità dei nodi è determinato dalla formula:

$$\text{ROS_Effective} = \text{ROS_max} * \text{WindEffect} * \text{SlopeEffect} \quad (1)$$

dove ROS_max (m/hour) è il ROS massimo del fuel type considerato, WindEffect ([0,8], adimensionale) è il fattore limitante del vento e SlopeEffect ([0,2], adimensionale) è il fattore limitante della pendenza.

In particolare sono di seguito riportati i valori del ROS_MAX in funzione dei tipi di vegetazione (classificazione di Anderson, Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior Hal E. Anderson)

ROS_MAX fuel type	Windspeed of 5 mi/h (8 km/h) m/hour
1	1 569.11
2	704.09
3	2 092.15
4	1 508.76
5	362.10
6	643.74
7	402.34
8	32.19
9	150.88

I valori dell'effetto del vento sul ROS sono riportati di seguito in tabella (REF: A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels Rothermel)

wind effect wind (km/h)	effect
8.04672	1
16.09344	1.5
24.14016	2
32.18688	3
40.2336	6
48.28032	8
56.32704	4
64.37376	0.8
72.42048	0

I valori dell'effetto della pendenza sul ROS sono riportati di seguito in tabella (REF: <http://www.forestencyclopedia.net/p/p4/p140/p354/p447/p486/p489>)

slope effect	
slope&(%)	effect
0	1
10	1.033333
20	1.1
30	1.166667
40	1.266667
50	1.4

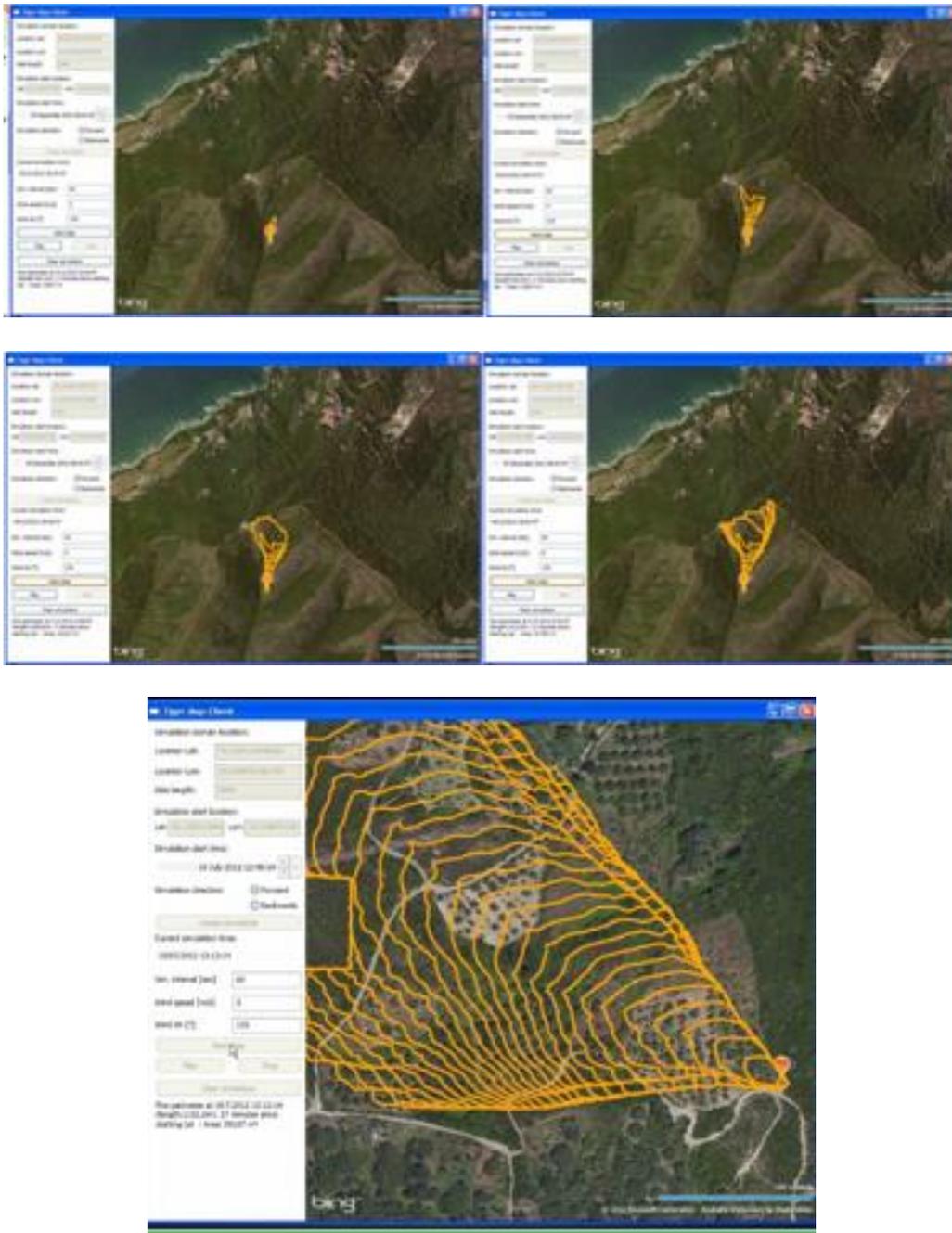
Inserimento/Eliminazione dei nodi

Con il procedere della simulazione, la distanza tra i nodi puo' aumentare. L'algoritmo inserisce quindi dei nuovi nodi in modo da avere una adeguata e costante densità di nodi e mantenere il path "flessibile". In particolare dopo ogni passo di simulazione, sono inseriti nodi tra i segmenti che si sono raddoppiati in quel time step e i nodi vengono inserite a metà del segmento.

Analogamente, in alcune parti del perimetro, i nodi possono convergere. Quando i nodi sono troppo vicini, il loro valore informativo diventa molto basso. Alcuni nodi vengono, quindi, ri- mossi dal path. Dopo ogni passo di simulazione, sono eliminati i nodi dei perimetri che si sono ridotti della metà.

Simulazione in Tiger Hazard

Di seguito sono riportate delle schermate del prototipo del tool Tiger Hazard in cui e' possibile vedere i perimetri dell'incendio (in arancione) nei diversi time step della simulazione.



Tiger Lab

Il software Tiger Lab, attualmente usato all'interno del progetto del Corpo Forestale dello Stato denominato "Forest Fire Area Simulator" finalizzato alla realizzazione di un laboratorio virtuale di simulazione propagazione e lotta agli incendi boschivi, utilizza un approccio modellistico integrato e modulare (vedi paragrafo Sistemi integrati del Capitolo 1).

Il processo fisico principale del software è descritto in figura 1: la combustione di un pixel genera un flusso di calore verso l'alto che richiama per convezione aria "fresca" dai pixel laterali.

Modello di combustione e Convezione

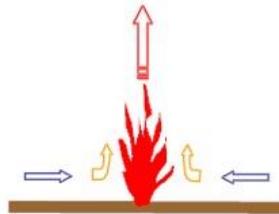
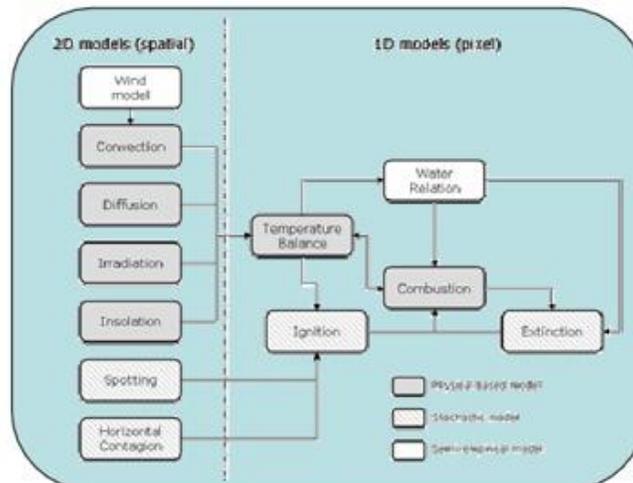


Figura 1: rappresentazione schematica dei processi fisici considerati in Tiger Lab.

L'implementazione di questo modello fisico è dovuta all'integrazione del modello pixel di combustione e bilancio termodinamico con i modelli di dinamica laterale e relazione spaziale tra i diversi pixel (figura 2).

Figura 2: rappresentazione dei modelli e delle relazioni tra questi nel software Tiger Lab.



Ingegneria antincendio, tecnologie dell'informazione e pianificazione dell'emergenza nel sistema integrato di videosorveglianza e telerilevamento degli incendi boschivi nelle regioni Puglia e Calabria

Modello di combustione

Il modello di combustione simula il consumo di combustibile e la relativa produzione di calore in una cella in funzione dell'umidità, della temperatura e delle tipologie di combustibile. Il modello consente quindi di rappresentare dinamicamente il valore della temperatura, attraverso le seguenti variabili di stato: quantità e temperatura delle emissioni gassose, massa fogliare, temperatura alla chioma, massa legnosa, temperatura in rapporto al carico di umidità della chioma, classe diametrale degli alberi interessati, livello di umidità del legno, temperatura in rapporto al carico di umidità del legno (vedi equazioni di riferimento).

Equazioni di riferimento

Leaf and wood consumption

$$\frac{dL}{dt} = -k_{LW} \cdot r(T_L) \cdot L \quad \frac{dW}{dt} = -k_{LW} \cdot r(T_W) \cdot \min(W, Exp_W)$$

dove i parametri k_{LW} e k_{LW} rappresentano l'effetto del carico di umidità del fogliame e del legno nella combustione; $r(T_L)$ e $r(T_W)$ la classe di reazione del fogliame e del legno (fattore Arrhenius) e Exp_W è la massa di legno esposta;

Water relation

$$\frac{dML}{dt} = -k_{LW} \cdot ML \quad \frac{dMW}{dt} = -k_{LW} \cdot MW$$

in cui k_{LW} e k_{LW} sono le variabili riguardanti l'umidità evaporata del fogliame e del legno;

Leaf and Wood temperature balance

$$\frac{dT_i}{dt} = c_{s_i} \cdot i = \sum_{j=L,W} \left[A_j \cdot (T_G - T_i) \cdot (h_{j_wind} + h_{j_no_wind}) \right] + \frac{d}{dt} \cdot H_i - \sum_{j=L,W} \frac{dMj}{dt} \cdot \lambda_{j_vap} - S_j \cdot \epsilon_j \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T_a^4)$$

dove $i=L$ e W , c_{s_i} sono la media ponderata del calore prodotto di un specifico fogliame e legno, H_i rappresentano il contenuto di calore del fogliame e del legno.

Gas temperature balance

$$\frac{dT_G}{dt} = c_{s_G} \cdot G = \sum_{j=L,W} A_j \cdot (h_{j_wind} + h_{j_no_wind}) \cdot (T_i - T_G) + \sum_{j=L,W} S_j \cdot \epsilon_j \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T_a^4) - \sum_{j=L,W} \frac{dMj}{dt} \cdot \lambda_{j_vap}$$

dove, c_{s_G} lo specifico calore del gas, A_j son oil trasferimento di calore sulla superficie, h_{j_wind} sono i coefficienti di trasferimento di calore in condizioni di vento, $h_{j_no_wind}$ sono i coefficienti di trasferimento di calore in condizioni di assenza di vento, S_j sono le superfici di irradiazione, ϵ_j sono l'emissività del fogliame e del legno, σ è la costante di Stephan Boltzman, T_a è la temperature dell'ambiente (~300K), λ_{j_vap} sono il calore di evaporazione del fogliame e del legno.

Nella figura 3 sono riportati i valori di temperature delle simulazioni di quattro combustibili con valori di umidità differenti (3%, 7%, 15%, 25%)

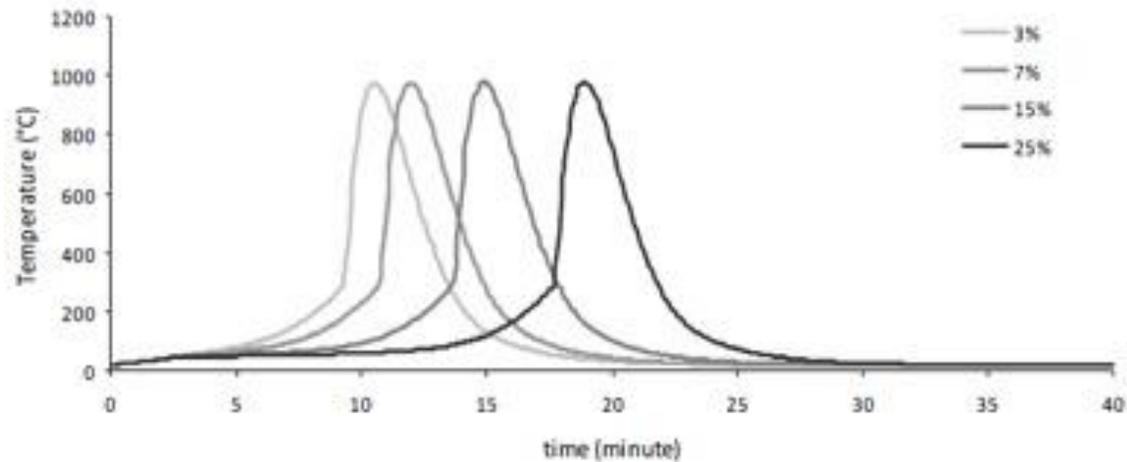
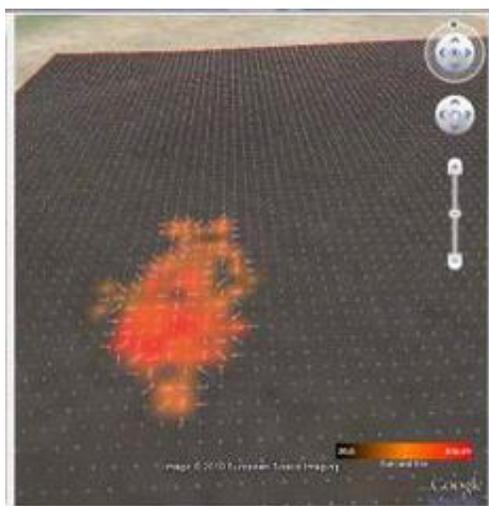


Figura 3: dinamica della temperature (°C) dovuti alla combustione di vegetazione con diversi gradi di umidità.

Modello di convezione/diffusione e interazione fuoco-vento

Il modello calcola i flussi laterali di convezione e diffusione dovuti ai seguenti quattro processi: flusso convettivo nel piano, flusso diffusivo nel piano, flusso convettivo verticale, fonte di calore dovuta alla combustione del pixel. Nel box sotto sono riportate le equazioni di riferimento Tiger Lab prevede anche l'interazione tra fuoco e vento atmosferico. In particolare il software calcola il campo eolico di fondo (direzione ed intensità in ogni cella) in funzione del vento geostrofico, corretto per orografia e rugosità superficiale del terreno e successivamente corregge questo campo di vento attraverso l'interazione con i flussi di convezione dovuti al fuoco. In figura 4 è possibile vedere i vettori di intensità e direzione del vento corretti dalla presenza del fuoco (zona rossa).

Figura 4: Rappresentazione dei vettori vento all'interno di una simulazione di Tiger Lab.



Modello spotting

Durante un evento incendio boschivo di grandi dimensioni, è molto importante valutare la possibile insorgenza di nuovi punti di innesco, dovuti ad elementi in combustione attiva trasportati dai fenomeni convettivi creati dal fuoco (Figura 5).

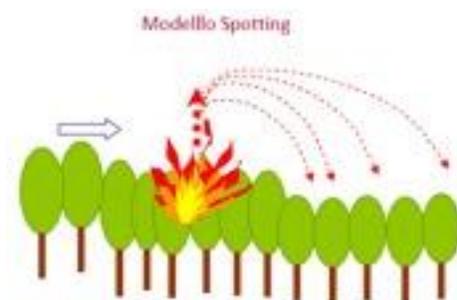


Figura 5: rappresentazione schematica del modello Spotting in Tiger Lab

Tiger Lab permette il calcolo e la visualizzazione delle probabili traiettorie di questa tipologia di propagazione incendio al fine di valutare la distribuzione e la distanza del rischio di innesco, nelle aree circostanti un incendio boschivo.

La figura 6 riporta la simulazione di due eventi spotting, l'area arancione indica la traiettoria di elementi ancora in combustione attiva, l'area grigia indica elementi ormai spenti e quindi non più pericolosi.



Figura 6: Simulazione di due eventi di “fire spotting” nel software Tiger Lab.

Dati di Input e output

Tiger Lab richiede i seguenti dati di input:

- DEM (digital elevation map) per ogni area in cui il sistema sarà applicato, con una risoluzione della griglia orizzontale di 1-20 metri. La proiezione dovrà essere UTM metrica WGS84.
- Una mappa di classificazione di combustibile in base alle tipologie di Anderson. La mappa dovrà avere una risoluzione orizzontale di 1-20 metri, e la sua proiezione dovrà corrispondere al DEM.
- Osservazioni e/o previsioni del vento per le aree di interesse (velocità media e le direzioni).

Queste informazioni potranno essere calcolate sia con misurazioni sul campo (on-site) che con dati “general” per l'intera area (vento geostrofico).

- La mappa dei poligoni delle aree percorse dal fuoco, con l'informazione relativa alla tempistica dell'estensione dell'incendio
- Dati meteo (temperatura, umidità dell'aria, precipitazione) durante l'evento di incendio e immediatamente precedenti.

Ingegneria antincendio, tecnologie dell'informazione e pianificazione dell'emergenza nel sistema integrato di videosorveglianza e telerilevamento degli incendi boschivi nelle regioni Puglia e Calabria

Gli output del sistema sono (nel caso della propagazione) i perimetri di propagazione del fuoco modulati nel tempo.

Simulazione in Tiger Lab

Le simulazioni in Tiger Lab si basano sulle seguenti procedure:

1. calcolo del campo di vento(direzione e intensità a metà altezza di fiamma) su tutta l'area interessata dalla simulazione
2. definizione della direzione e intensità della pendenza del suolo per l'intera area
3. calcolo del modello di combustione in funzione del tipo di combustibile e dell'umidità di questo
4. combinazione degli effetti del vento e della pendenza con le tipologie di combustibile per predire la velocità di propagazione.
5. Tecniche del controfuoco
6. Attività di spegnimento aereo e con mezzi terrestri.

La figura 7 riporta la simulazione di due fronti di fuoco sviluppati uno in piano e l'altro in pendenza; l'immagine dimostra come orografia combinata con il vento e i moti convettivi, abbia una diversa influenza sull'evoluzione di un fronte di fuoco con medesime caratteristiche spaziali originarie.

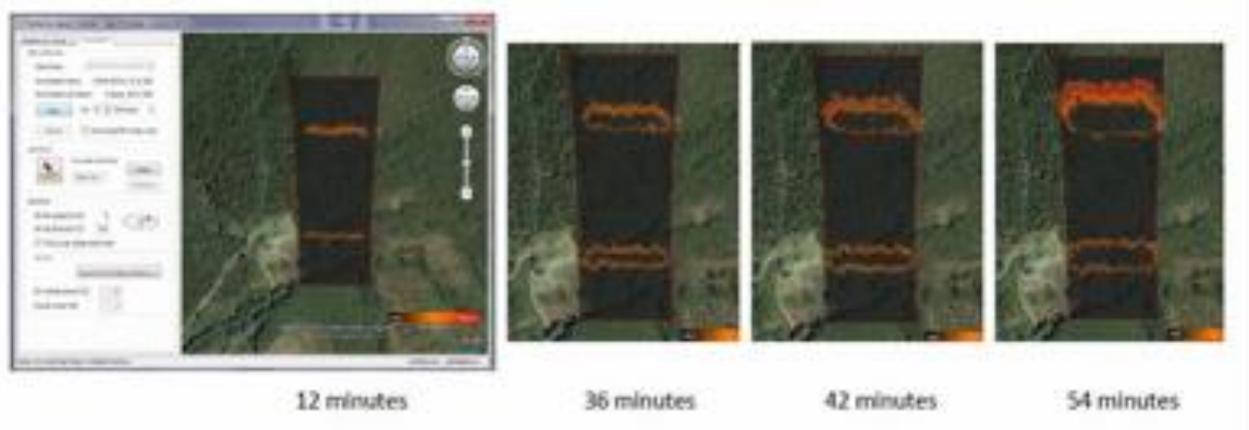


Figura 7: Simulazione dell'effetto pendenza nel software Tiger Lab.