

Simulazione della propagazione di un incendio

Sistemi Complessi: modelli e simulazione

Gioele De Pianto	Vincenzo Corso
<code>g.depianto@campus.unimib.it</code>	<code>v.corso3@campus.unimib.it</code>
Matricola: 845002	Matricola: 880965

Giugno 2022

Indice

Elenco delle figure	3
1 Introduzione	4
1.1 Possibili soluzioni	4
1.2 Obiettivi del progetto	4
2 Stato dell'arte	5
2.1 Tipologie di modelli	5
2.2 Automi cellulari	5
2.3 Panoramica dei modelli basati su automi cellulari	6
2.4 Il modello Karafyllidis et Thanailakis	6
2.5 Il modello Encinas	8
2.6 Il modello Alexandridis	9
3 Descrizione del modello	10
3.1 Regola locale	10
3.2 Componente altitudine	10
3.3 Componente vento	11
3.4 Componente pioggia	11
3.4.1 Soppressione delle fiamme	11
3.4.2 Riduzione dello Spread Component	12
4 Simulazione	13
4.1 Primo test	13
4.2 Secondo test	14
4.3 Terzo test	15
4.4 Quarto test	16
4.5 Quinto test	18
5 Caso di studio: August Complex Fire	19
5.1 August Complex Fire	19
5.2 Dati utilizzati	19
5.2.1 Spread Component	19
5.2.2 Altitudine	20
5.2.3 Burned Area	21
5.2.4 Vento	21
5.2.5 Pioggia	22
5.3 Starter point	22
5.4 Tuning dei parametri	25
5.5 Analisi dei risultati	25
6 Conclusioni e possibili sviluppi futuri	27
Bibliografia	28

Elenco delle figure

1	Una panoramica sulle differenti tipologie di modelli.	5
2	Modalità di propagazione nel modello di Karafyllidis et Thanailakis	7
3	Modalità di propagazione nel modello di Encinas	8
4	Simulazione del primo caso di test.	13
5	Simulazione del secondo caso di test.	14
6	Piano inclinato di 45° utilizzato nella seconda simulazione.	15
7	Mappa della pioggia utilizzata nel terzo e quinto caso di test.	15
8	Simulazione del terzo caso di test.	16
9	Mappa dello Spread Component non omogeneo.	17
10	Simulazione del quarto caso di test.	17
11	Simulazione del quinto caso di test.	18
12	Area coinvolta nella simulazione dell'August Complex	20
13	La mappa di elevazione dell'August Complex	21
14	La burned area dell'August Complex.	22
15	Immagine della griglia 250x250 dell'automa cellulare.	23
16	Perimetro degli incendi al 21-08-2020	24
17	Evoluzione dell'incendio dell'August Complex al passare del tempo	25
18	Immagine della simulazione allo step 38.	26

1 Introduzione

Gli incendi forestali hanno da sempre causato innumerevoli ed ingenti danni. Ogni anno gli incendi bruciano tra i 6 e 14 milioni di ettari di foreste. Dal rapporto del Sistema Europeo di Informazione sugli Incendi Boschivi (EFFIS), risulta che nel 2020 in Italia, rispetto all'anno precedente, il numero e le superfici interessate dagli incendi boschivi sono aumentati rispettivamente del 12% e del 38%. Allo stesso modo è aumentata la superficie media per incendio con un incremento tra i 9 e gli 11 ettari. Gli incendi hanno un impatto molto forte dal punto di vista ecologico: interi ecosistemi, dove vivono specie rare di vita vegetale e animale, sono completamente stati spazzati via. Essi hanno anche un impatto dal punto di vista socio-economico: interi villaggi e infrastrutture, poste ai margini delle foreste, sono stati danneggiati, causando innumerevoli disagi e, nei casi peggiori, anche la perdita di vite umane.

1.1 Possibili soluzioni

È quindi abbastanza evidente che è necessario trovare delle soluzioni efficaci per trattare e arginare il fenomeno. Le possibili soluzioni sono di due tipi: preventive e operazionali. Nel primo caso si cerca di minimizzare la probabilità di un incendio, riorganizzando le risorse disponibili e costruendo delle zone anti-incendio. Nel secondo caso si adottano delle tecniche per cercare di contrastare la propagazione dell'incendio, quando questo si è già diffuso. Tali tecniche includono solitamente meccanismi di difesa ed evacuazione. In entrambi i casi può essere utile elaborare dei modelli matematici e delle simulazioni, che aiutino a predire come il fuoco si propagherà al passare del tempo. Tali modelli utilizzano dati quali: il tasso di propagazione; la morfologia del terreno; le condizioni atmosferiche e la presenza di vento.

1.2 Obiettivi del progetto

L'obiettivo di questo progetto è quello di elaborare un modello che sia in grado di predire come il fuoco si propaga al passare del tempo. Partendo da alcuni modelli noti in letteratura, verranno apportare delle modifiche e/o delle migliorie per cercare di ottenere dei modelli più precisi e sofisticati. Per la validazione verranno quindi sperimentali alcuni scenari ideali e infine un scenario reale.

2 Stato dell'arte

Un modello che deve effettuare una tale predizione deve considerare alcuni fattori ambientali esterni. Quelli che influenzano maggiormente la velocità di propagazione sono: il tipo di vegetazione e la sua densità, l'umidità, la direzione del vento e la sua velocità, la morfologia del terreno (inclinazioni e differenze d'altezza). Questo tema è stato trattato molto in letteratura. Sono stati infatti proposti numerosi modelli.

2.1 Tipologie di modelli

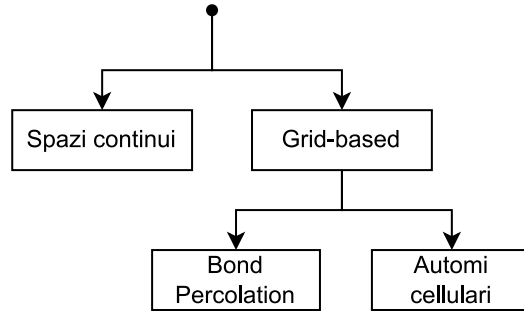


Figura 1 Una panoramica sulle differenti tipologie di modelli.

Uno dei pionieri del tema è Rothermel, che ha condotto numerosi esperimenti in laboratorio per identificare le equazioni che caratterizzano la massima velocità di propagazione del fuoco [12] [13]. Le equazioni di Rothermel sono state poi applicate successivamente in molti modelli che possono essere categorizzati principalmente in due tipologie. La prima si basa su spazi continui, dove si assume che il fronte di fuoco si propaghi secondo forme ellittiche. I risultati vengono ottenuti risolvendo un sistema di equazioni differenziali. La seconda tipologia si basa su una griglia. Quest'ultima può essere ulteriormente suddivisa in due sottocategorie. La prima è basata sul metodo *Bond-Percolation*, dove il fuoco si propaga da una cella ad un'altra secondo una specifica probabilità che viene stimata a posteriori, basandosi su dati storici. Anche se questi modelli possono riuscire a descrivere la forma dell'area bruciata in modo molto preciso, sono limitanti nel descrivere le diverse dinamiche di propagazione. La seconda sotto-categoria è basata su *automi cellulari*. Quest'ultimi in passato si sono rivelati molto efficaci nella simulazione di diversi fenomeni fisici. Si tratta di modelli dove lo spazio e il tempo sono discreti e le interazioni solo locali. Nonostante la loro semplicità, gli automi cellulari possono riuscire a predire complesse dinamiche macroscopiche, partendo da piccole regole che agiscono a livello microscopico.

2.2 Automi cellulari

Gli automi cellulari a due dimensioni sono sistemi dinamici in cui lo spazio e il tempo sono discreti. L'idea di base è quella di avere una griglia di celle, che interagiscono tra di loro localmente. Ogni cella assume un certo stato, che cambia ad ogni step attraverso una ben specifica *regola locale*. Tale regola può essere pensata come una funzione che prende in input lo stato della cella e dei suoi vicini allo step precedente, restituendo in output lo stato della cella centrale allo step successivo. Più formalmente un automa cellulare bidimensionale è definito da una tupla $A = (C, S, V, f)$ dove:

- $C = \{(i, j) \mid 0 \leq i \leq r - 1, 0 \leq j \leq s - 1\}$ è una griglia bidimensionale di $r \times s$ celle, ciascuna delle quali assume uno certo stato $a_{ij}^{(t)}$ al tempo t

- S è lo spazio degli stati, ovvero l'insieme di valori che lo stato di una cella può assumere. Esso può essere finito oppure infinito
- $V \subset \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ con $|V| = m$ è l'insieme ordinato degli indici, tale che il vicinato di ogni cella (i, j) è l'insieme $V_{ij} = \{(i + \alpha_1, j + \beta_1), \dots, (i + \alpha_m, j + \beta_m) \mid (\alpha_k, \beta_k) \in V\}$. Ad esempio il vicinato di Moore può essere espresso dall'insieme:

$$V_m = \{(-1, 1), (-1, 0), (-1, -1), (0, -1), (0, 0), (0, 1), (1, -1), (1, 0), (1, 1)\}$$

Nel caso particolare dei modelli trattati, è utile suddividere il vicinato in due gruppi: il primo costituito dalle celle vicine in diagonale, il secondo costituito dalle celle vicine adiacenti. L'insieme delle celle vicine in diagonale è:

$$V_M^{\text{diag}} = \{(-1, 1), (1, 1), (1, -1), (-1, -1)\}$$

L'insieme delle celle vicine adiacenti è:

$$V_M^{\text{adj}} = \{(-1, 0), (0, 1), (1, 0), (0, -1)\}$$

- f è la regola locale, che permette di aggiornare lo stato di ogni cella ad ogni step. Il nuovo stato è pari a $a_{ij}^{(t+1)} = f(a_{i+\alpha_1, j+\beta_1}^{(t)}, \dots, a_{i+\alpha_9, j+\beta_9}^{(t)})$

2.3 Panoramica dei modelli basati su automi cellulari

Sono stati proposti numerosi modelli basati su automi cellulari, alcuni dei quali estendono lavori precedenti, apportando alcune modifiche e miglioramenti. Uno dei primi modelli elaborati permette di predire la propagazione del fuoco sia in ambienti omogenei, sia non omogenei, con la possibilità di includere condizioni meteorologiche e topografia del terreno [10]. Tale lavoro è stato successivamente esteso da un ulteriore modello, che cerca di migliorare il fattore di propagazione verso le celle in diagonale [8]. Un'altra estensione dello stesso modello base suddivide il terreno in celle esagonali, anziché quadrate [9]. Quest'ultimo modello permette di ottenere delle stime ancora più precise, tuttavia richiede di effettuare un maggior numero di calcoli.

2.4 Il modello Karafyllidis et Thanailakis

In [10] Karafyllidis et Thanailakis propongono un modello basato su automi cellulari. L'idea di base è considerare un'area forestale come una griglia di celle quadrate di lunghezza L . Lo stato di una cella (i, j) al tempo t è definito come:

$$a_{ij}^{(t)} = \frac{\text{porzione di area bruciata della cella (i,j)}}{\text{area totale della cella (i,j)}}$$

Quindi lo spazio degli stati è $S = \{i \in \mathbb{R} \mid 0 \leq i \leq 1\}$, dove:

- $a_{ij}^{(t)} = 0$ se la cella non è bruciata
- $0 < a_{ij}^{(t)} < 1$ se la cella è parzialmente bruciata
- $a_{ij}^{(t)} = 1$ se la cella è completamente bruciata

Ogni cella (i, j) possiede tre parametri:

- il *rate of spread* R_{ij} misurato in m/s . Indica la velocità di propagazione del fuoco. Se $R_{ij} = 0$ allora una certa cella non può bruciare.
- la velocità del vento W_{ij} misurata in m/s

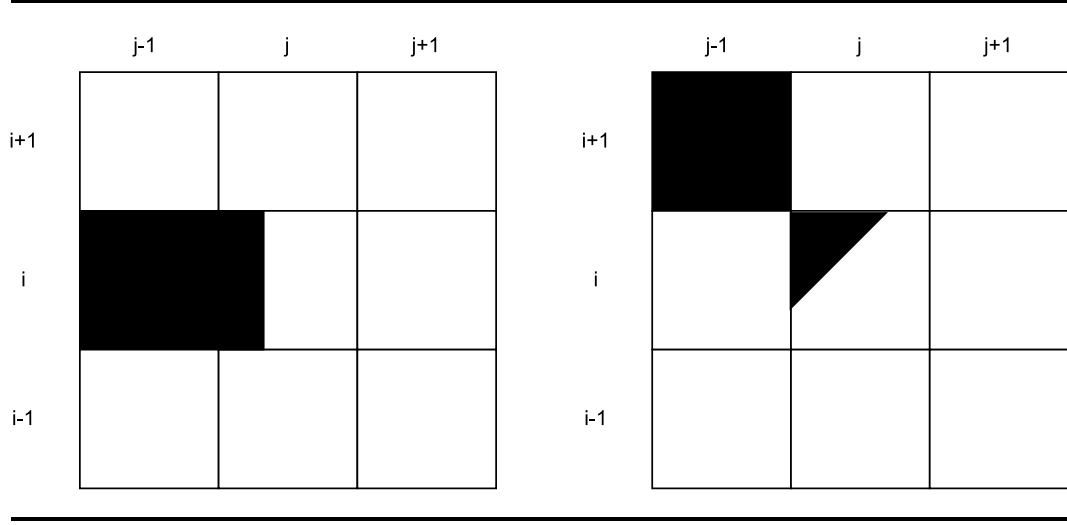


Figura 2 Illustrazione delle modalità di propagazione del fuoco nel modello di Karafyllidis et Thanailakis. A sinistra viene mostrata la propagazione del fuoco da una cella adiacente. A destra viene mostrata la propagazione del fuoco da una cella vicina in diagonale.

- l'altezza H_{ij} misurata in m

Il rate of spread influenza il tempo necessario per bruciare completamente una cella (i, j) , infatti:

- se la sola cella bruciata nel vicinato è una cella adiacente, allora il tempo necessario per bruciare la cella centrale è pari a L/R_{ij}
- se la sola cella bruciata nel vicinato è una cella diagonale, allora il tempo necessario per bruciare la cella centrale è pari a $\sqrt{2} \cdot L/R_{ij}$

Se si considera un time step pari a $t = L/R$ dove $R = \max\{R_{ij}, 0 \leq i \leq r-1, 0 \leq j \leq s-1\}$, allora ad ogni step viene bruciata interamente una cella vicina adiacente e solo parzialmente una cella vicina in diagonale. In tale lasso di tempo, la percentuale di area bruciata in una cella diagonale è pari a:

$$a_{ij}^{(t+1)} = \frac{L^2 - [(\sqrt{2} - 1)L]^2}{L^2} = 1 - (\sqrt{2} - 1)^2 \approx 0.83$$

La regola locale è definita attraverso una funzione lineare, in cui lo stato della cella (i, j) al tempo $t + 1$ dipende linearmente dallo stato della cella stessa e dagli stati delle celle vicine al tempo t :

$$a_{ij}^{(t+1)} = a_{ij}^{(t)} + \sum_{(\alpha, \beta) \in V_M^{\text{adj}}} a_{i+\alpha, j+\beta}^{(t)} + 0.83 \sum_{(\alpha, \beta) \in V_M^{\text{diag}}} a_{i+\alpha, j+\beta}^{(t)}$$

L'effetto del vento sulla cella (i, j) viene definito attraverso una matrice W_{ij} di dimensione 3×3 :

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} w_{i+1, j-1} & w_{i+1, j} & w_{i+1, j+1} \\ w_{i, j-1} & 1 & w_{i, j+1} \\ w_{i-1, j-1} & w_{i-1, j} & w_{i-1, j+1} \end{pmatrix}$$

tale che $w_{i+\alpha, j+\beta} = 1$ se non c'è nessun vento che soffia su (i, j) . Se ad esempio il vento soffia da ovest verso est, i coefficienti $w_{i+1, j-1}, w_{i, j-1}, w_{i-1, j-1}$ sono più grandi degli altri. La regola locale può quindi essere modificata per tenere in conto di questi fattori:

$$a_{ij}^{(t+1)} = a_{ij}^{(t)} + \sum_{(\alpha, \beta) \in V_M^{\text{adj}}} w_{i+\alpha, j+\beta} \cdot a_{i+\alpha, j+\beta}^{(t)} + 0.83 \sum_{(\alpha, \beta) \in V_M^{\text{diag}}} w_{i+\alpha, j+\beta} \cdot a_{i+\alpha, j+\beta}^{(t)}$$

L'effetto dell'altezza sulla cella (i,j) viene definito attraverso una matrice H_{ij} di dimensione 3×3 :

$$H_{ij} = \begin{pmatrix} h_{i+1,j-1} & h_{i+1,j} & h_{i+1,j+1} \\ h_{i,j-1} & 1 & h_{i,j+1} \\ h_{i-1,j-1} & h_{i-1,j} & h_{i-1,j+1} \end{pmatrix}$$

tale che $h_{i+\alpha,j+\beta} = \phi(H_{ij} - H_{i+\alpha,j+\beta})$, dove ϕ è solitamente una funzione lineare. Incorporando nell'equazione precedente anche questa componente, si ottiene la regola locale generale:

$$a_{ij}^{(t+1)} = a_{ij}^{(t)} + \sum_{(\alpha,\beta) \in V_M^{\text{adj}}} h_{i+\alpha,j+\beta} \cdot w_{i+\alpha,j+\beta} \cdot a_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)} + 0.83 \sum_{(\alpha,\beta) \in V_M^{\text{diag}}} h_{i+\alpha,j+\beta} \cdot w_{i+\alpha,j+\beta} \cdot a_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)}$$

2.5 Il modello Encinas

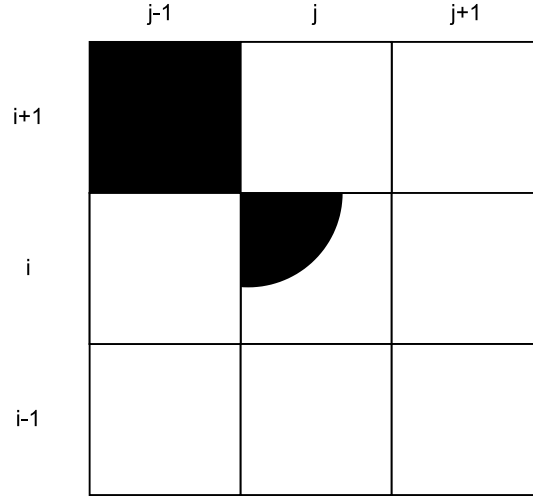


Figura 3 Illustrazione della modalità di propagazione del fuoco da una cella diagonale nel modello di Encinas.

In [8] viene introdotta una modifica al modello precedente al fine di rendere la simulazione più realistica e precisa. In particolare viene proposto un fronte di fuoco che si propaga in diagonale in modo circolare, anziché lineare come nel lavoro precedente. Il fattore di propagazione verso una cella diagonale diventa quindi più accurato. In questo caso:

- se la sola cella bruciata nel vicinato è una cella adiacente, allora dopo un time step, l'area bruciata di (i, j) è pari a $R_{ij}L^2/R$
- se la sola cella bruciata nel vicinato è una cella diagonale, allora dopo un time step, l'area bruciata di (i, j) è pari a $\pi R_{ij}^2L^2/(4R^2)$

La nuova regola locale è quindi:

$$a_{ij}^{(t+1)} = \frac{R_{ij}}{R} \cdot a_{ij}^{(t)} + \sum_{(\alpha,\beta) \in V_M^{\text{adj}}} h_{i+\alpha,j+\beta} \cdot w_{i+\alpha,j+\beta} \cdot \frac{R_{i+\alpha,j+\beta}}{R} \cdot a_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)} + \sum_{(\alpha,\beta) \in V_M^{\text{diag}}} h_{i+\alpha,j+\beta} \cdot w_{i+\alpha,j+\beta} \cdot \frac{\pi R_{i+\alpha,j+\beta}^2}{4R^2} \cdot a_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)}$$

Infine, viene proposta l'applicazione di una funzione di discretizzazione g per rendere finito lo spazio degli stati. Tale funzione restituisce 0 se lo stato è compreso tra 0 e 1, altrimenti restituisce 1.

2.6 Il modello Alexandridis

Un altro modello basato su automi cellulari è quello proposto in [1]. Anche in questo viene utilizzata una griglia bidimensionale per tassellare il piano. Ogni cella è quadrata ed è caratterizzata da un stato che può valere:

- 1, se la cella non può bruciare
- 2, se la cella non è ancora bruciata
- 3, se la cella sta bruciando
- 4, se la cella è stata interamente bruciata

Ad ogni time step, vengono applicate le seguenti regole:

- se lo stato al tempo t è 1, allora lo stato al tempo $t + 1$ rimane 1
- se lo stato al tempo t è 3, allora lo stato al tempo $t + 1$ diventa 4
- se lo stato al tempo t è 4, allora lo stato al tempo $t + 1$ rimane 4
- se lo stato al tempo t è 3, allora lo stato delle celle vicine al tempo $t + 1$ diventerà 3 con una certa probabilità p_{burn}

La probabilità di propagazione del fuoco è una funzione di vari parametri quali: il tipo di vegetazione e la sua densità; la velocità e la direzione del vento; l'altitudine del suolo; l'*effetto spotting*, ovvero il fenomeno per il quale alcuni materiali brucianti come piccoli ramoscelli, vengono trasportati dal vento, incendiando aree non adiacenti al fronte di fuoco. Viene calcolata come:

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

dove:

- p_h denota la probabilità costante che una cella adiacente ad una che sta bruciando, inizi a bruciare nello step successivo
- $p_{\text{den}}, p_{\text{veg}}, p_w, p_s$ sono le probabilità di propagazione che dipendono rispettivamente dalla densità della vegetazione, dal suo tipo, dalla velocità del vento e dallo slope (differenza tra le altezze)

L'effetto del vento p_w viene calcolato come $p_w = e^{c_1 \cdot V + c_2 \cdot V \cdot (\cos \theta - 1)}$, dove c_1 e c_2 sono costanti da determinare e θ è l'angolo tra la direzione di propagazione e la direzione del vento. L'effetto delle altitudini p_s viene calcolato come $p_s = e^{\alpha \theta_s}$ dove $\theta_s = \arctan \frac{E_1 - E_2}{l}$ per le celle adiacenti e $\theta_s = \arctan \frac{E_1 - E_2}{l\sqrt{2}}$ per le celle diagonali

3 Descrizione del modello

Il modello proposto consiste in un'estensione di [8] con l'utilizzo delle componenti di altitudine e vento calcolate come in [1]. È stata inoltre aggiunta la possibilità di avere folate di vento e pioggia. È stata invece scartata l'idea di utilizzare celle esagonali come in [9] dato che, pur avendo una maggior precisione, avrebbe comportato un eccessivo aumento del costo computazionale richiesto.

3.1 Regola locale

La regola locale del nostro modello è la seguente:

$$a_{ij}^{(t+1)} = \left(\frac{R_{ij}}{R} \cdot a_{ij}^{(t)} \cdot sr_{i,j}^{(t)} + adj_{i,j}^{(t)} + diag_{i,j}^{(t)} \right) \cdot p_{i,j}^{(t)}$$

$$adj_{i,j}^{(t)} = \sum_{(\alpha,\beta) \in V_M^{\text{adj}}} h_{i+\alpha,j+\beta} \cdot w_{i+\alpha,j+\beta} \cdot \frac{R_{i+\alpha,j+\beta}}{R} \cdot sr_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)} \cdot a_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)}$$

$$diag_{i,j}^{(t)} = \sum_{(\alpha,\beta) \in V_M^{\text{diag}}} h_{i+\alpha,j+\beta} \cdot w_{i+\alpha,j+\beta} \cdot \frac{\pi R_{i+\alpha,j+\beta}^2}{4R^2} \cdot sr_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)} \cdot a_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)}$$

dove:

- $adj_{i,j}^{(t)}$ e $diag_{i,j}^{(t)}$ sono le componenti derivanti dalle celle adiacenti e diagonali
- $sr_{i,j}^{(t)}$ e $p_{i,j}^{(t)}$ sono componenti legate alla pioggia che verranno descritte in seguito

3.2 Componente altitudine

In caso di incendi che si sviluppino su un piano inclinato le fiamme si propagheranno maggiormente nella direzione di salita del piano. In discesa, invece, si avrà una propagazione minore rispetto al caso di assenza d'inclinazione. La componente $h_{i+\alpha,j+\beta}$, legata al dislivello tra la posizione (i,j) e $(i+\alpha,j+\beta)$, è calcolata sfruttando l'equazione proposta in [1]:

$$h_{i+\alpha,j+\beta} = e^{\delta\theta_s}$$

dove:

- E_1 è l'altitudine (in metri) in posizione $(i+\alpha,j+\beta)$ ed E_2 è quella in posizione (i,j)
- $\theta_s = \arctan(\frac{E_2-E_1}{l})$ nel caso di celle adiacenti
- $\theta_s = \arctan(\frac{E_2-E_1}{l\sqrt{2}})$ nel caso di celle diagonali
- δ è semplicemente un parametro per effettuare tuning del modello

Abbiamo provato a definire ulteriori funzioni per calcolare la componente d'altitudine, come ad esempio una basata sulla differenza di altezze:

$$h_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{se } E_2 - E_1 \leq -50 \vee E_2 - E_1 \geq +50 \\ 2 - \left(\frac{E_2-E_1}{20.71} + 1 \right)^2 & \text{se } E_2 - E_1 < 0 \\ 1 - \frac{E_2-E_1}{50} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Tuttavia queste hanno generato scarsi risultati rispetto a quella proposta in [1]. Per tanto quest'ultima verrà utilizzata nelle simulazioni successive.

3.3 Componente vento

La presenza del vento aumenta la velocità di diffusione delle fiamme per i fronti dell'incendio che seguono la stessa direzione. Per quanto riguarda i fronti contrari, essi avranno una possibilità di propagazione minore. Anche per la componente $w_{i+\alpha, j+\beta}$, legata al vento, è stata utilizzata l'equazione definita in [1]. Rispetto a [8] questa soluzione presenta alcuni vantaggi:

- la possibilità di usare valori continui per la direzione del vento
- la possibilità di tenere in conto l'angolo tra la direzione di avanzamento del fuoco e la direzione del vento.

L'equazione è la seguente:

$$w_{i+\alpha, j+\beta} = e^{c_1 \cdot V} f_t$$

$$f_t = e^{V \cdot c_2 \cdot (\cos \theta - 1)}$$

dove:

- c_1 e c_2 rappresentano parametri di tuning
- V è la velocità (in m/s) del vento
- θ è l'angolo tra la direzione del fuoco e quella del vento. La direzione del fuoco è stata calcolata in base alle celle incendiate adiacenti

È stata inoltre aggiunta una possibilità (pari al 10%) che la velocità del vento V sia sostituita dalla velocità di folata, generalmente maggiore.

3.4 Componente pioggia

La letteratura riguardante l'effetto della pioggia sugli incendi descrive, nella maggior parte dei casi, l'impatto che le piogge annuali possono avere sullo spread component. Tuttavia l'articolo [11], che sperimenta l'effetto della pioggia su incendi di torba, riporta che la quantità di pioggia richiesta per avere un effetto significativo (ovvero non evaporare all'istante) è di 4 mm/h. Lo stesso articolo afferma che per gli incendi di torba è richiesto almeno il 50% di acqua in più rispetto ad incendi boschivi. Abbiamo quindi preso come riferimento il valore di 2 mm/h. In [6] è stato fatto uno studio dell'effetto della pioggia sulla propagazione degli incendi. Come accennato in precedenza, sono state definite due componenti legate alla pioggia:

- l'effetto di soppressione sulle fiamme $p_{i,j}^{(t)}$
- la temporanea riduzione dello spread component $sr_{i,j}^{(t)}$ dovuta al bagnarsi del terreno e della vegetazione

3.4.1 Soppressione delle fiamme

La componente attiva di soppressione delle fiamme è definita come:

$$p_{i,j}^{(t)} = \begin{cases} 1 & \text{se } \leq 2 \\ 0.2 & \text{se } P_{i,j}^{(t)} \geq 35 \\ 1 - (0.0242424242424 \cdot P_{i,j}^{(t)}) - 0.04848484848 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

dove $P_{i,j}^{(t)}$ è la quantità di pioggia nella cella in posizione (i, j) al tempo t . La pioggia ha la possibilità di ridurre l'effetto delle fiamma (fino all'80%) ma non può spegnere completamente l'incendio.

3.4.2 Riduzione dello Spread Component

È stata anche creata una componente che riduce lo spread component del terreno bagnato dalla pioggia:

$$sr_{i,j}^{(t)} = \begin{cases} sr_{i,j}^{(t-1)} \cdot 0.5, & \text{se } P_{i,j}^{(t)} = 0 \\ 0.2, & \text{se } P_{i,j}^{(t)} \geq 66 \\ 1 - (0.012 \cdot P_{i,j}^{(t)}), & \text{altrimenti} \end{cases}$$

dove $P_{i,j}^{(t)}$ è sempre la quantità di pioggia nella cella in posizione (i, j) al tempo t . Nel caso in cui una cella abbia smesso di piovere, ad ogni step la componente di spread reduction verrà dimezzata simulando l'asciugarsi del terreno.

4 Simulazione

Per effettuare una prima validazione del modello, verranno presi in considerazione scenari di test ideali, alcuni dei quali sono già stati utilizzati da [10] e [8]. Dopo aver dato prova della bontà del modello in tali scenari, nella prossima sezione verrà simulato un incendio realmente accaduto. Il nostro modello, il modello Karafyllidis e il modello Encinas sono stati implementati utilizzando il framework Mesa e il linguaggio Python. Nelle immagini riportate di seguito verrà usata la seguente notazione:

- le celle colorate in nero sono quelle bruciate completamente. Esse hanno uno stato pari ad 1
- le celle colorate in rosso sono quelle bruciate parzialmente. Esse hanno uno stato maggiore di 0 e minore di 1

4.1 Primo test

Il primo caso di test affrontato è quello in cui lo Spread Component è costante (ovvero si ha la stessa velocità di propagazione su tutta la mappa), l'incendio si propaga in un ambiente piatto e privo di elevazioni ed infine si ha assenza sia di vento che di pioggia. Come prevedibile l'incendio si sviluppa omogeneamente sul piano. La forma quadrata con

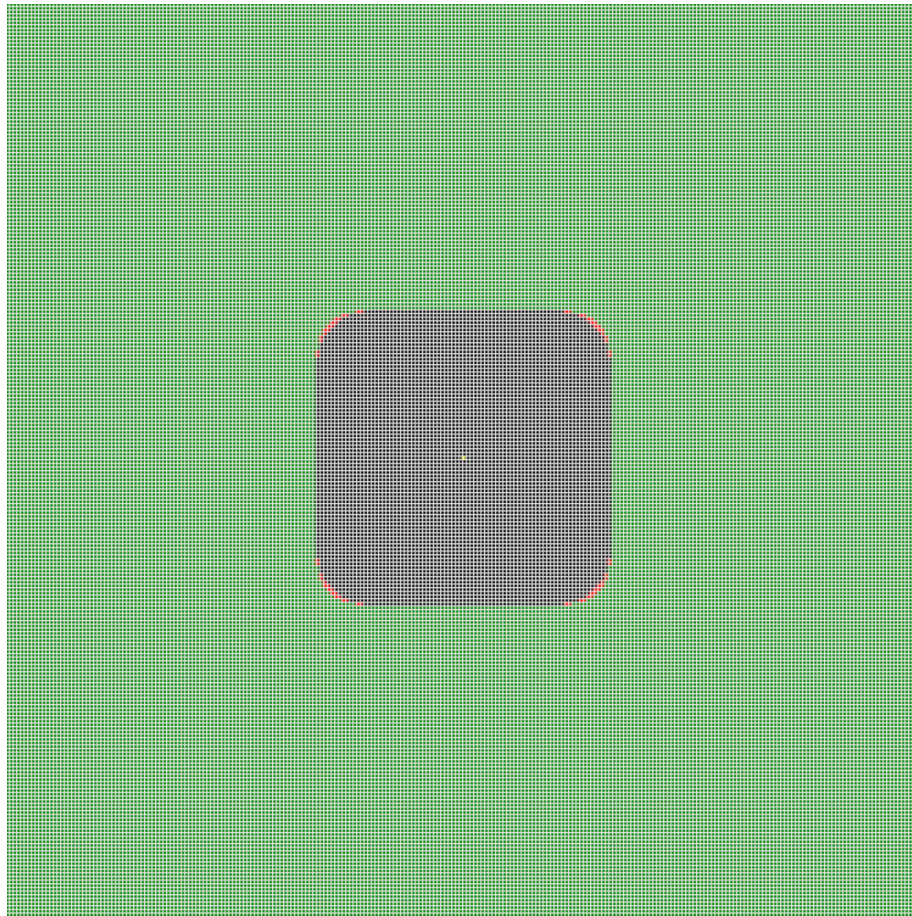


Figura 4 Simulazione del primo caso di test.

angoli arrotondati deriva dal fatto che il fuoco si propaga più velocemente tra celle adiacenti rispetto a quelle diagonali. Nella realtà in fuoco si propagherebbe in modo circolare, tuttavia la discretizzazione dello spazio comporta questo fenomeno, come osservato anche in [8].

4.2 Secondo test

Il secondo caso di test prevede l'utilizzo di Spread Component omogeneo, un piano inclinato di 45° (che sale verso destra) ed un vento di 5 km/h da Sud verso Nord. Come si può osservare dalla Figura 5 l'incendio si propaga più velocemente in alto a destra, poiché a favore di vento e in salita.

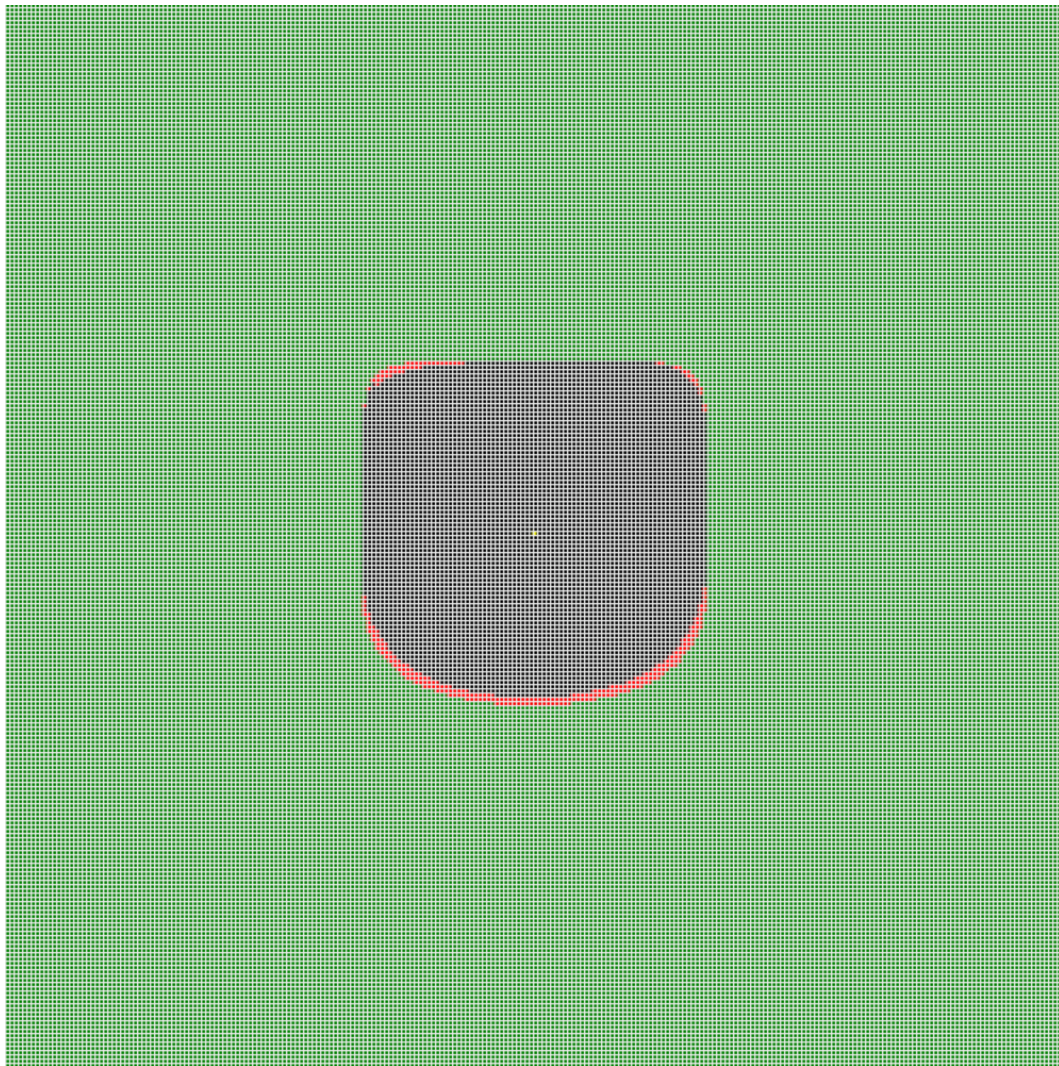


Figura 5 Simulazione del secondo caso di test.

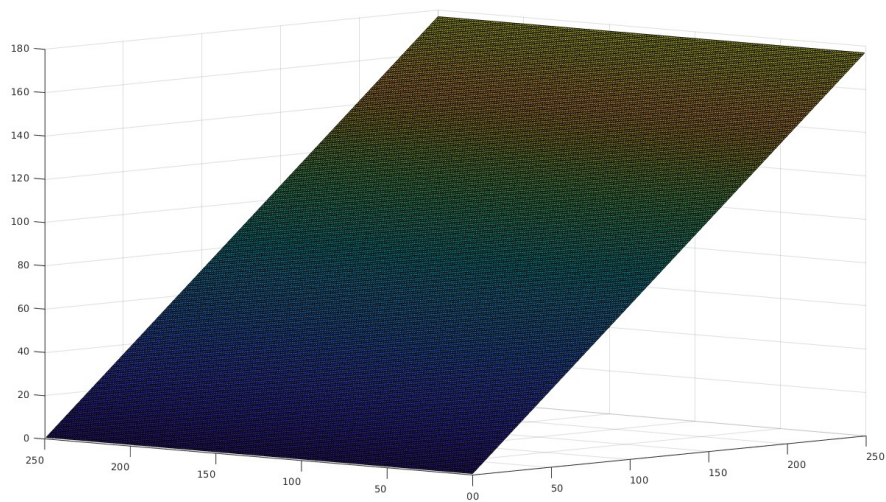


Figura 6 Piano inclinato di 45° utilizzato nella seconda simulazione.

4.3 Terzo test

Nel terzo caso di test viene mantenuto lo Spread Component omogeneo e viene aggiunta la pioggia. Sono assenti vento ed inclinazione del piano. È stato deciso di assegnare una pioggia di 10 mm/h, 30 mm/h e 0 mm/h come mostrato in Figura 7. In Figura 8 si può notare che l'incendio fatica a propagarsi in caso di forte pioggia, mentre con pioggia ridotta si avrà una riduzione della velocità di propagazione.

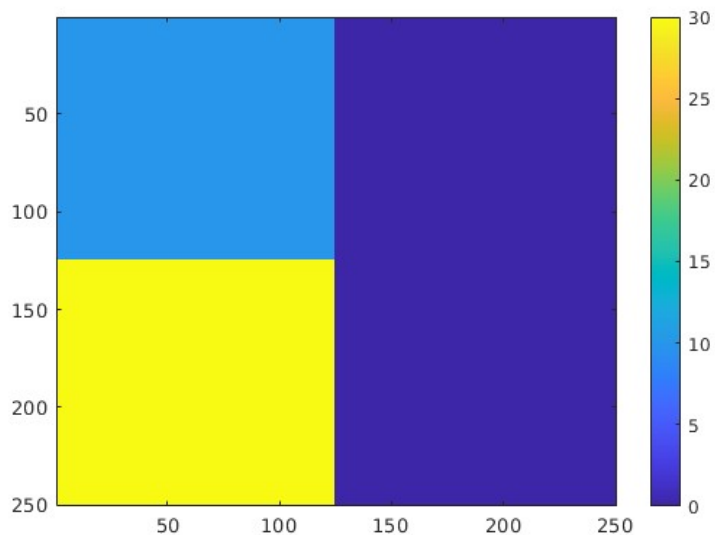


Figura 7 Mappa della pioggia utilizzata nel terzo e quinto caso di test.

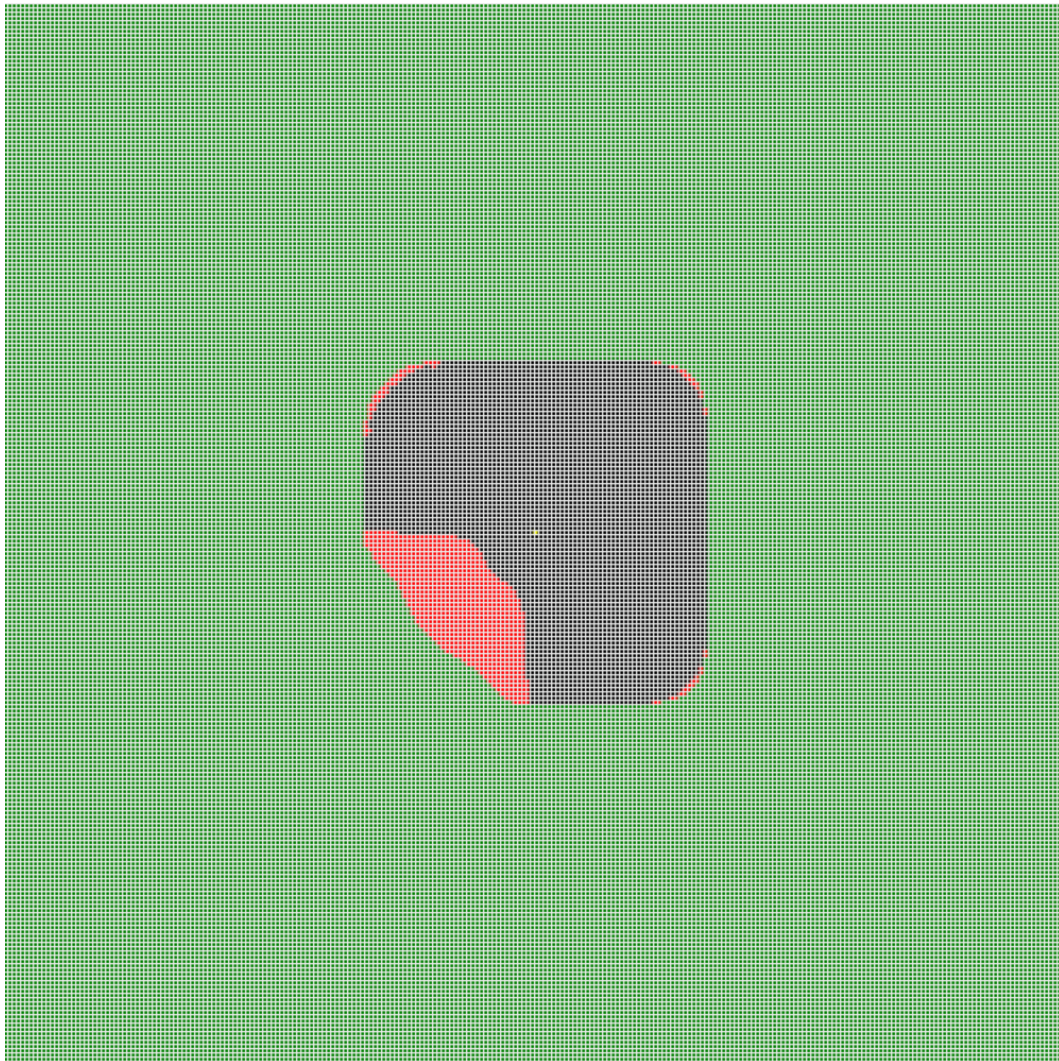


Figura 8 Simulazione del terzo caso di test.

4.4 Quarto test

Il quarto caso di test prevede di utilizzare uno Spread Component non omogeneo con i valori 1, 3 e 4.5 posizionati come nella Figura 9. Sono assenti vento, pioggia e piano inclinato. La Figura 10, come prevedibile, mostra che l'avanzamento dell'incendio è maggiore all'aumentare dello Spread Component. Infatti il quadrante in basso a destra è quello che vede una più grande estensione dell'incendio.

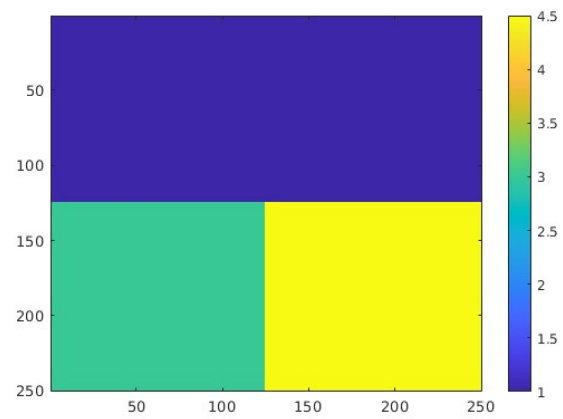


Figura 9 Mappa dello Spread Component non omogeneo.

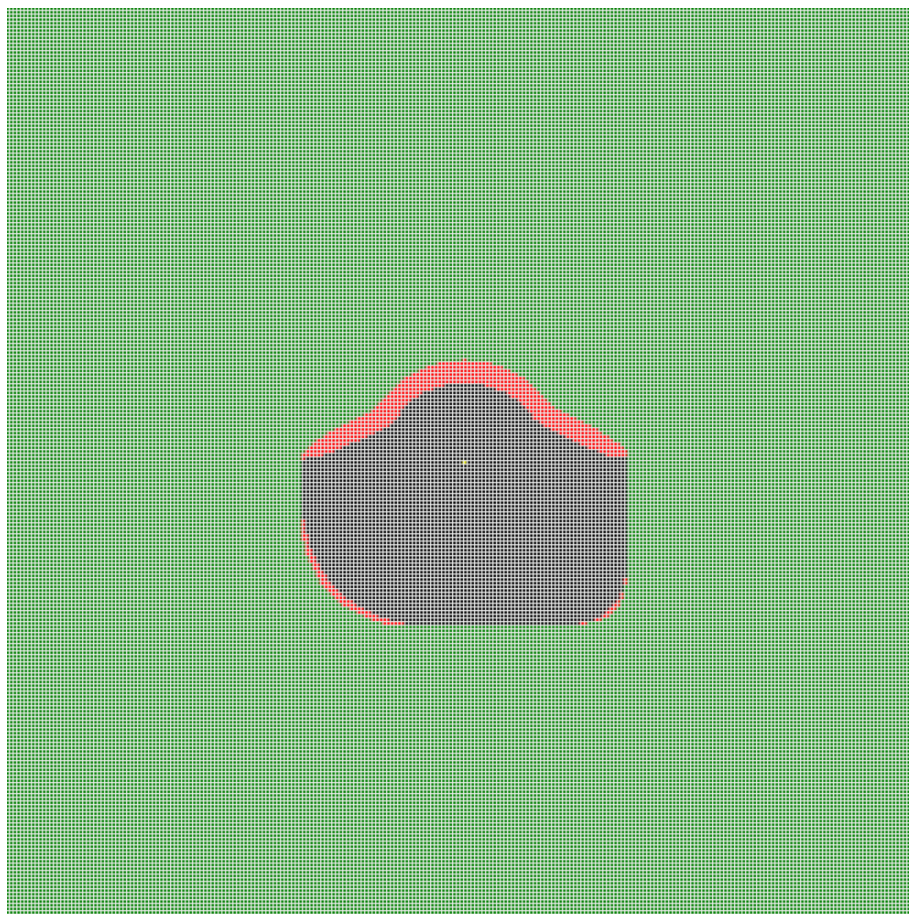


Figura 10 Simulazione del quarto caso di test.

4.5 Quinto test

L'ultimo caso di test vede lo studio della presenza di pioggia, come in Figura 7 in un ambiente con Spread Component non omogeneo, come riportato in Figura 9. Anche in questo caso in assenza di vento ed inclinazione. Il risultato della simulazione mostrato in Figura 11

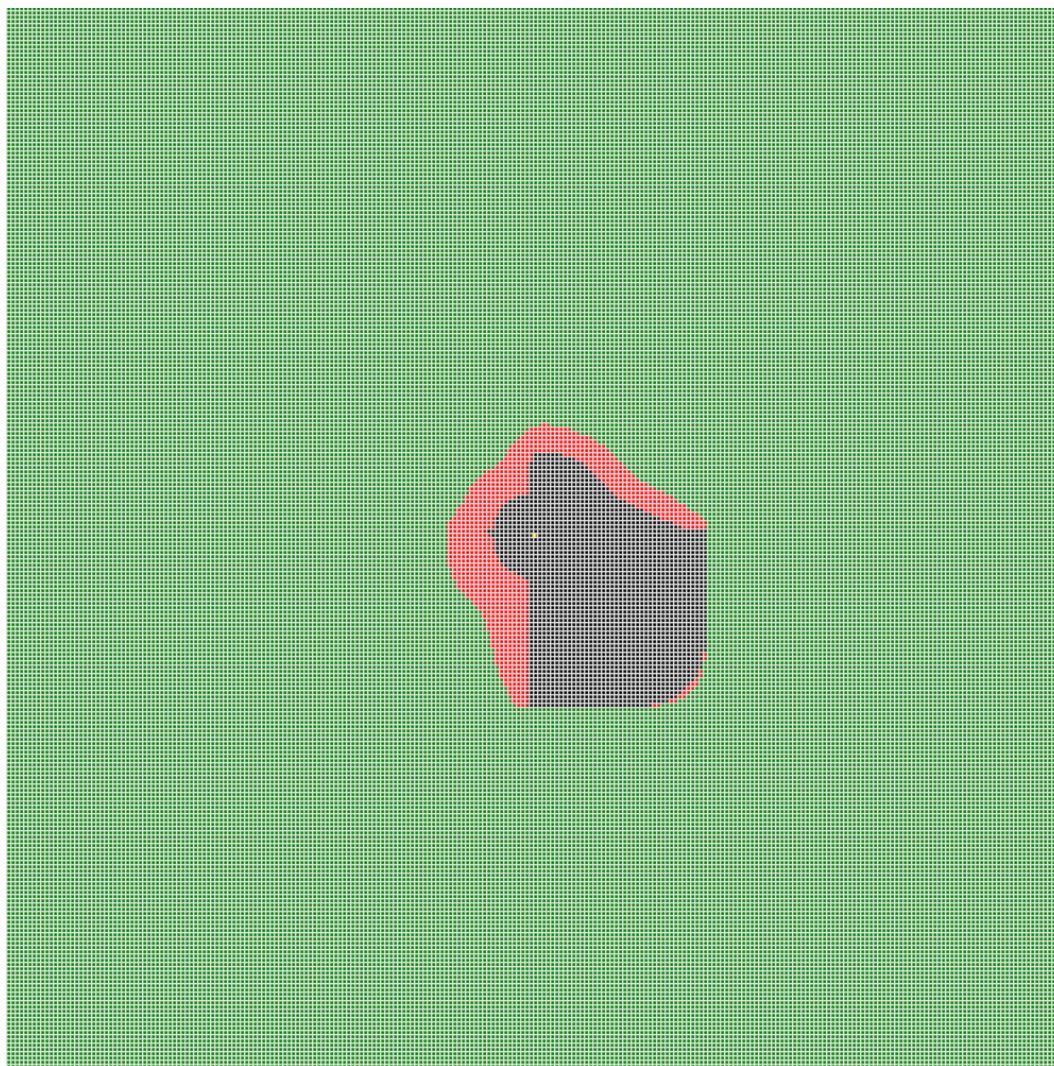


Figura 11 Simulazione del quinto caso di test.

conferma la tendenza dell'incendio a propagarsi verso Spread Component maggiori. La forte pioggia nel quadrante inferiore a sinistra (30 mm/h) unita ad un valore di SC pari 3 mostra un comportamento simile al quadrante superiore di sinistra dove si ha una pioggia più debole (10 mm/h) ed un SC inferiore (valore 1). È confermata quindi la capacità della pioggia di ridurre la propagazione dell'incendio, sia come effetto di soppressione delle fiamme che di riduzione dello Spread Component.

5 Caso di studio: August Complex Fire

Per verificare la bontà del modello presentato abbiamo deciso di simulare l'evolvere di un incendio realmente accaduto. Per lo scopo è stato scelto l'August Complex Fire, iniziato in California nell'agosto 2020.

5.1 August Complex Fire

L'August Complex Fire fu un enorme incendio originatosi a causa di fulmini avvenuti tra il 16 ed il 17 agosto del 2020 che crearono fino a 38 incendi di cui il più grande chiamato Doe Fire. L'incendio fu definitivamente contenuto il 12 novembre 2020 dopo aver bruciato un'area di 1,032,648 acri [3]. Lo studio di questo incendio è interessante per i seguenti motivi:

- si ha la congiunzione di più incendi originariamente distinti
- è presente una grande estensione in tempo e spazio
- si tratta di una zona geografica a forte rischio incendio e quindi c'è un interesse nell'utilizzare il modello per la previsione del comportamento di nuovi incendi

5.2 Dati utilizzati

I dati necessari per compiere la simulazione sono:

- dati riguardanti lo Spread Component (SC)
- dati riguardanti l'altitudine
- dati riguardanti il vento e le precipitazioni
- mappa dell'area bruciata utile a compiere una comparazione con quella ottenuta dal modello

L'area d'interesse della simulazione è di circa 33049 km² delimitata dalle coordinate:

*(39.033333,-124.033333),
(39.033333,-122.133333333),
(40.8666667,-122.133333333),
(40.8666667,-124.0333333).*

5.2.1 Spread Component

Lo Spread Component è un indice di velocità di diffusione dell'incendio facente parte dello standard americano NFDRS (National Fire Danger Rating System). Tiene in considerazione la capacità di combustione del terreno e le proprietà delle particelle del combustibile. È un indice senza unità di misura, tuttavia nella maggior parte dei casi può essere approssimato con la velocità di propagazione del fuoco misurata in feet/min. I dati riguardanti lo Spread Component sono stati ottenuti dalla piattaforma Copernicus [7] che permette di scaricare un dataset prodotto dall'ECMWF (European Center Medium Weather Forecast), riguardante il rischio d'incendio boschivo. I dati vengono aggiornati ogni 4 anni e gli ultimi disponibili (al momento) risalgono al 2018. I dati sono stati processati nel seguente modo:

1. estrazione dei dati riguardante l'area d'interesse
2. conversione da feet/minuto a metri/secondo
3. ridimensionamento ad una matrice 250x250 usando l'interpolazione bicubica

È necessario sottolineare che la bassa risoluzione spaziale di questo dataset ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) non permette di avere una mappa dello Spread Component molto ricca. Tuttavia è stato comunque utilizzato, poiché è l'unica risorsa reperibile in rete. Un'altra possibilità è quella di calcolare manualmente lo spread component a partire da alcuni dati sulla vegetazione.

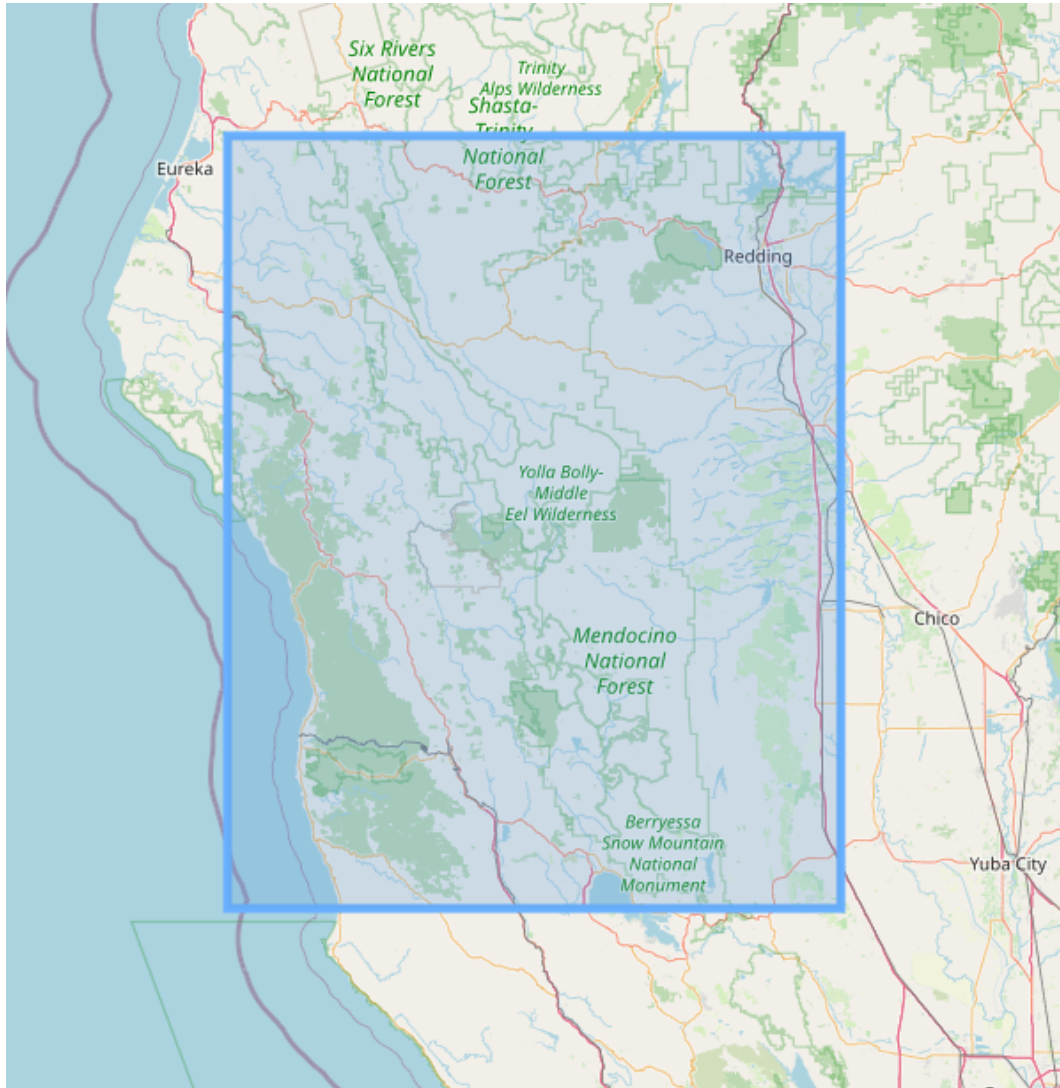


Figura 12 Area d'interesse della simulazione, nel nord California.

5.2.2 Altitudine

I dati sull'elevazione del terreno sono stati ottenuti dalla piattaforma AppEEARS [2] sviluppata dalla NASA. Essa offre il dataset NASADEM (NASA Digital Elevation Model). I dati sono in metri sopra il livello del mare e con risoluzione di 30 metri. A differenza di Copernicus, AppEEARS permette di scaricare i dati associati ad un'area geografica (codificati in un file GeoJSON). Anche in questo caso la matrice dei dati è stata ridimensionata a 250x250 tramite interpolazione bicubica.

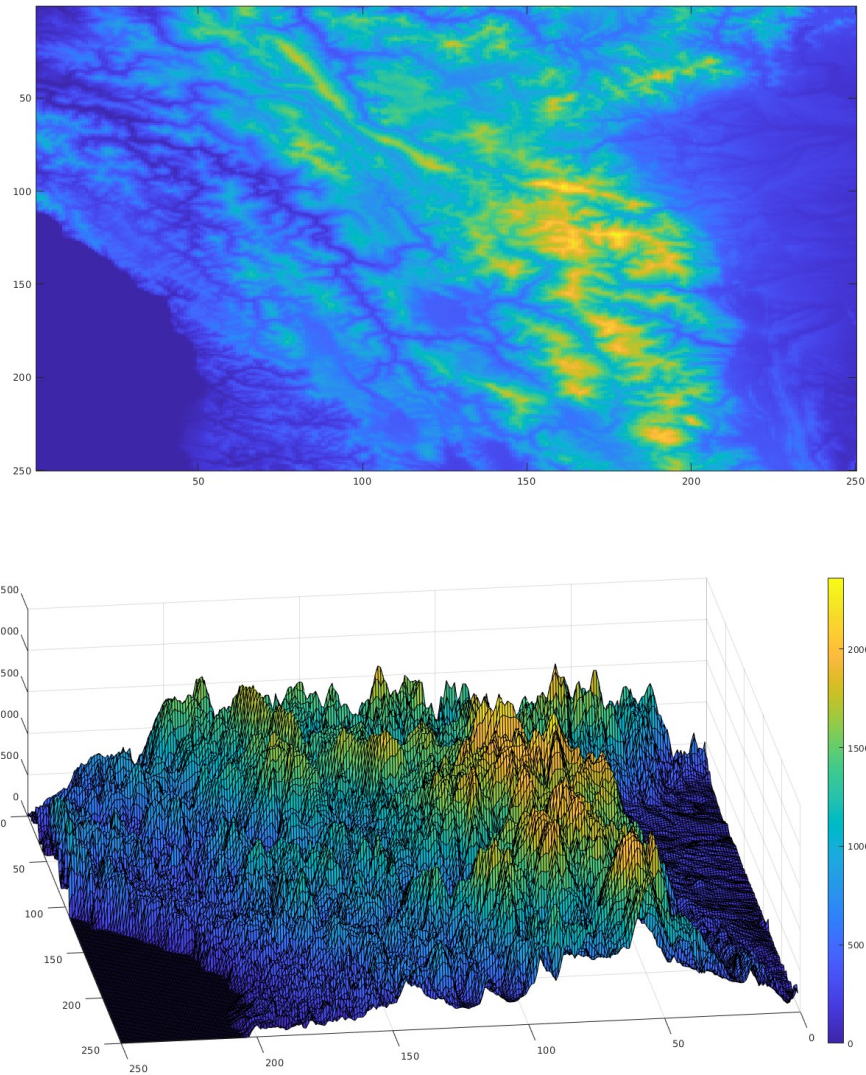


Figura 13 In alto la mappa di elevazione ottenuta da AppEEARS. In basso la sua rappresentazione tridimensionale.

5.2.3 Burned Area

Anche la mappa dell'area bruciata è stata ottenuta dalla piattaforma AppEEARS. I dati sono contenuti nel dataset MODIS Global Burned Area Product con risoluzione di 500m. È stato possibile creare una matrice binaria di dimensioni 250x250 utilizzabile come groundtruth (Figura 14).

5.2.4 Vento

I dati riguardanti il vento sono stati ottenuti dalla piattaforma *visualcrossing.com* che permettere di raccogliere, e scaricare, i dati ottenuti da stazioni meteo. Nel nostro caso la stazione meteo più vicina al luogo dell'incendio è quella di *Mendocino Pass*. Tra le varie

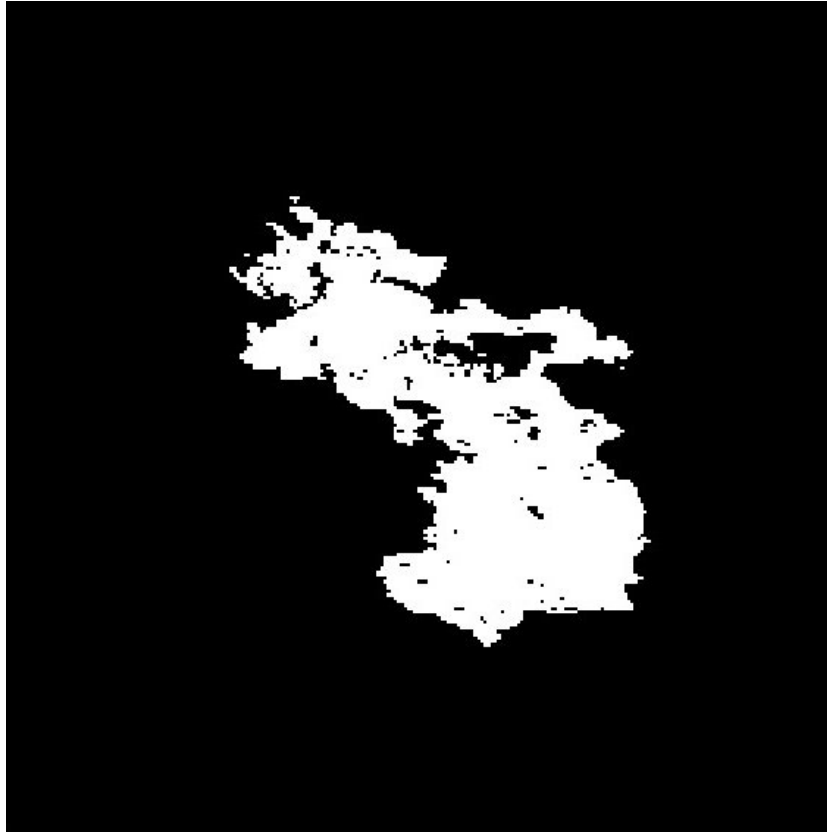


Figura 14 La burned area dell’August Complex.

tipologie di dati meteo ottenibili (come temperatura, umidità, etc) siamo interessati alla velocità del vento (km/h), direzione del vento (in gradi con lo 0 a nord e crescenti in senso orario) ed alla velocità delle folate di vento (km/h). I dati sono a cadenza giornaliera. Prima dell’utilizzo la velocità del vento viene convertita in m/s.

5.2.5 Pioggia

Anche i dati relativi alla pioggia sono stati scaricati da AppEEARS [2], in particolare è stato sfruttato il dataset DAYMET avente risoluzione di 1000m. Oltre la temperatura, esso contiene i dati relativi alle precipitazioni misurati in mm/giorno. Come i dati del vento, sono a cadenza giornaliera.

5.3 Starter point

Oltre alla qualità dei dati a disposizione, per riuscire ad effettuare una buona simulazione di un incendio è importante utilizzare i corretti punti di inizio dell’incendio. Per quanto riguarda l’August Complex Fire, essendo composto da più incendi, abbiamo utilizzato 4 punti iniziali. Per determinare la posizione dei quattro punti abbiamo utilizzato una mappa del perimetro dell’incendio al 22 agosto 2020 [4] (la prima disponibile). Sono stati scelti gli incendi Doe Fire, Hopkins Fire, Glade e Hulls Grave. Essendo Doe Fire di dimensione già elevate è stata utilizzata una posizione 35 miglia nord-ovest di Willows [5]. Nella griglia 250x250 gli starter point sono stati inizializzati a:

- Hopkins Fire (105, 170)
- Doe Fire (160, 102) con un cerchio di raggio 5
- Hulls Grave (145, 80)
- Glade (155, 130)

dove la cella (0,0) è quella più in basso a sinistra.

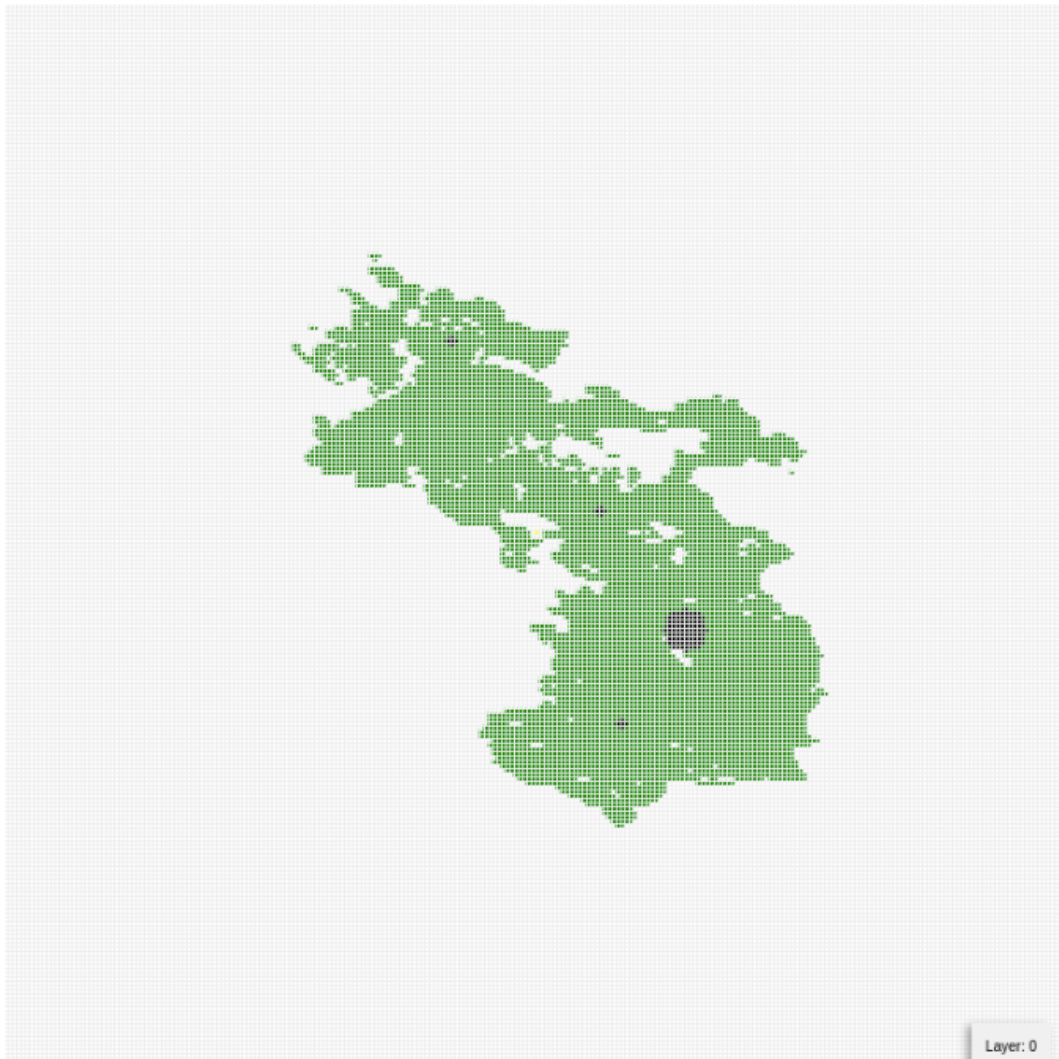
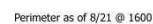


Figura 15 Immagine della griglia 250x250 dell'automa cellulare. In verde è disegnata la groundtruth dell'area bruciata, in nero sono riportati gli starter point dei vari incendi che compongono l'August Complex Fire.

AUGUST COMPLEX
CA-MNF-000753



24

5.4 Tuning dei parametri

Come visto nelle sezioni 3.2 e 3.3 sono presenti i parametri δ , $c1$, $c2$ che necessitano di un tuning per ottimizzare i risultati in questo particolare caso di studio. Per trovare i parametri migliori è stato usato un algoritmo di Grid Search sulle seguenti combinazioni:

- $\delta \in \{30, 45, 60, 75, 90\}$
- $c1 \in \{0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 0.5\}$
- $c2 \in \{0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 0.5\}$

Le metriche utilizzate sono state f1-measure, precision e recall. I valori scelti per i parametri sono $\delta = 45$, $c1 = 0.25$ e $c2 = 0.5$, ritenuti la miglior combinazione tra metriche e realistica. Allo step 38 della simulazione utilizzando questi valori sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- f1-measure = 0.7995;
- precision = 0.737;
- recall = 0.8735;

5.5 Analisi dei risultati

Come si può vedere in Figura 18, la simulazione dell'incendio offre una buona copertura rispetto all'area bruciata dall'August Complex Fire. Tuttavia si può notare che in alcuni casi, soprattutto nei bordi, l'area bruciata dalla simulazione eccede i dati empirici. Questo comportamento può essere attribuito al fatto che nella simulazione non è tenuto conto dell'intervento umano per arginare l'incendio. Inoltre la bassa risoluzione della mappa dello Spread Component e l'utilizzo dell'interpolazione bicubica per il ridimensionamento delle mappe (come elevazione e SC) possono avere contribuito ad ottenere un'area bruciata maggiore rispetto a quella reale. Infine, aver utilizzato i dati del vento relativi ad una sola stazione meteorologica ha sicuramente peggiorato la qualità della simulazione nelle aree più lontane dalla stazione.

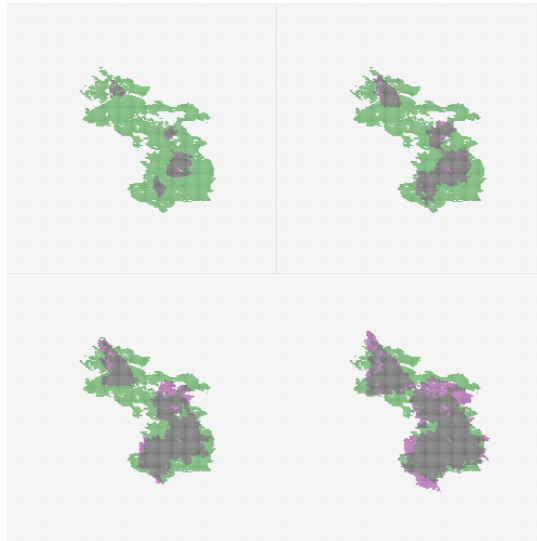


Figura 17 In alto a sinistra la configurazione dell'automa cellulare allo step 8, a destra allo step 16 ed in basso agli step 24 e 32.

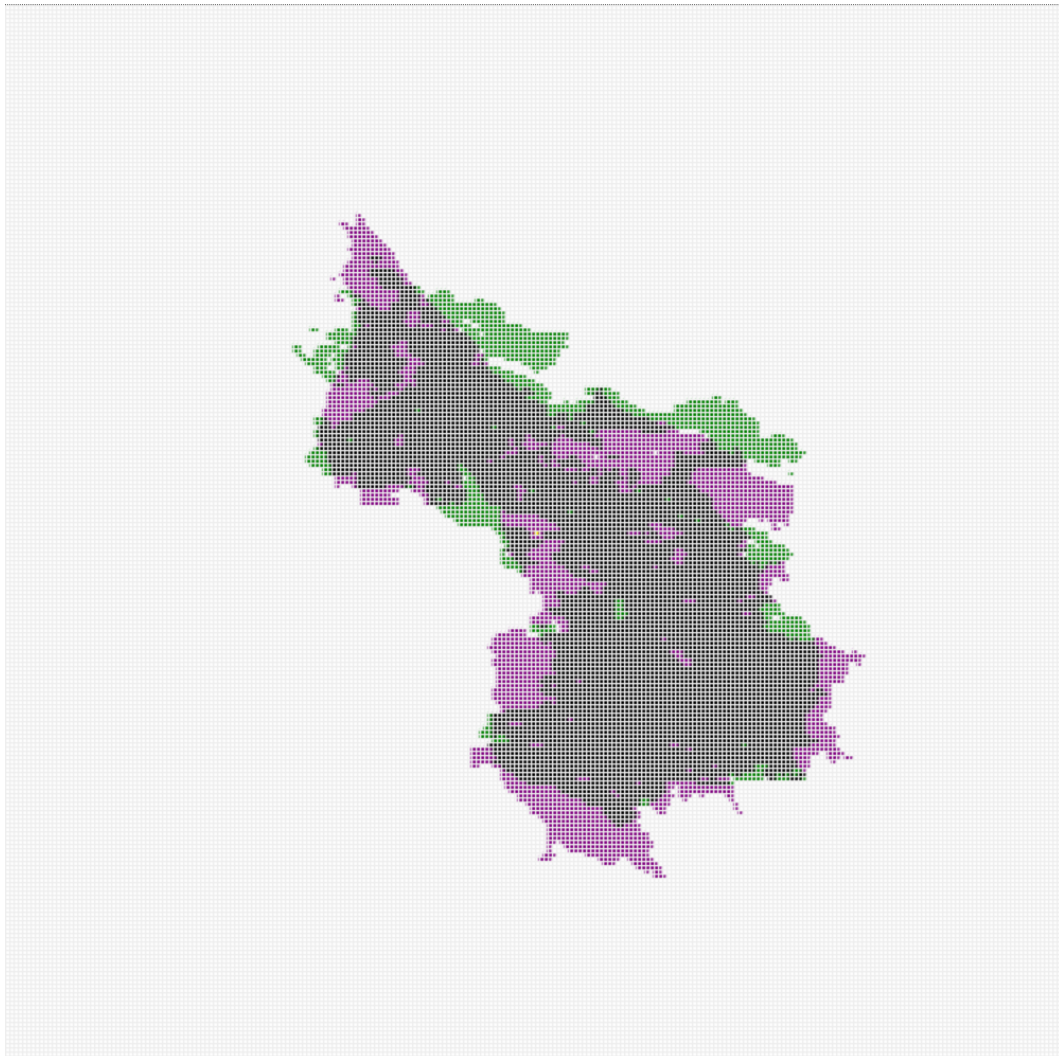


Figura 18 Immagine della simulazione allo step 38 con $\delta = 45$, $c1 = 0.25$ e $c2 = 0.5$. In nero l'area correttamente bruciata ed in viola l'area erroneamente bruciata.

6 Conclusioni e possibili sviluppi futuri

Il modello proposto mostra, a partire dalla letteratura pre-esistente, la possibilità di aggiungere la pioggia e le folate di vento nella simulazione di incendi tramite automi cellulari. I risultati ottenuti dai casi di test e dalla simulazione dell'August Complex Fire hanno prodotto buoni risultati. Al fine di migliorarli ed aumentare l'aderenza del modello alla realtà, potrebbero essere effettuate le seguenti modifiche e miglioramenti:

- un aumento del numero di celle e della loro risoluzione permetterebbe una simulazione più precisa, anche se più onerosa. Sarebbe quindi interessante risimulare il caso di studio con griglie da 500x500 oppure 1000x1000 (come in [1])
- l'utilizzo di algoritmi di ottimizzazione più avanzati porterebbe sicuramente ad un tuning migliore dei parametri. Ad esempio in [1] si fa uso dell'algoritmo iterativo Nelder-Mead
- considerare altri fattori come umidità e temperatura
- considerare la possibilità di incendi spontanei oppure dovuti a fenomeni di spotting (ovvero originati da detriti trasportati dal vento)

Bibliografia

- [1] A. Alexandridis et al. “A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990”. In: *Applied Mathematics and Computation* 204.1 (2008), pp. 191–201. ISSN: 0096-3003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.06.046>.
- [2] *Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples*. [Online; accessed 27-June-2022]. URL: <https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/>.
- [3] August Complex Fire. *August Complex Fire — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [Online; accessed 27-June-2022]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/August_Complex_fire.
- [4] *August Complex Perimeter Map 8-22-2020*. [Online; accessed 27-June-2022]. URL: <https://inciweb.nwcg.gov/incident/map/6983/143/>.
- [5] *August Lightning Fires Update – 5 p.m.* [Online; accessed 27-June-2022]. URL: https://inciweb.nwcg.gov/photos/CAMNF/2020-08-16-1732-Doe-Fire/related_files/pict20200716-201042-0.pdf.
- [6] Feng Chen et al. “The Influence of Precipitation and Consecutive Dry Days on Burned Areas in Yunnan Province, Southwestern China”. In: (mag. 2014). DOI: 10.1155/2014/748923.
- [7] *Fire danger indices historical data from the Copernicus Emergency Management Service*. [Online; accessed 27-June-2022]. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cems-fire-historical?tab=overview>.
- [8] A. Hernández Encinas et al. “Simulation of forest fire fronts using cellular automata”. In: *Advances in Engineering Software* 38.6 (2007). Advances in Numerical Methods for Environmental Engineering, pp. 372–378. ISSN: 0965-9978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.09.002>.
- [9] L. Hernández Encinas et al. “Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata”. In: *Applied Mathematical Modelling* 31.6 (2007), pp. 1213–1227. ISSN: 0307-904X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.04.001>.
- [10] Ioannis Karafyllidis e Adonios Thanailakis. “A model for predicting forest fire spreading using cellular automata”. In: *Ecological Modelling* 99.1 (1997), pp. 87–97. ISSN: 0304-3800. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(96\)01942-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(96)01942-4).
- [11] Shaorun Lin et al. “Can rain suppress smoldering peat fire?” In: *Science of The Total Environment* 727 (apr. 2020), p. 138468. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138468.
- [12] R. Rothermel. “A mathematical Model for predicting fire spread in wildland fuels”. In: *Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p.* (1972).
- [13] R. Rothermel. “How to predict the spread and intensity of forest and range fires”. In: *Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 161 p.* (1983). DOI: <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-143>.