

Università degli Studi di Milano-Bicocca

Dipartimento di Informatica, Sistemistica e Comunicazione (DISCo)

Corso di Laurea Magistrale



Simulazione ad agenti della risposta di cervi e orsi agli incendi boschivi

Filippo Besana (879205) | Luca Colombo (885900)

Anno Accademico 2024/2025

Indice

Introduzione	1
1 Dominio	3
1.1 Foreste miste temperate	3
1.2 Fauna	4
1.2.1 Orsi	4
1.2.2 Cervi	5
1.2.3 Confronto	6
2 Scenario e Obiettivi	9
3 Modello	10
3.1 Ambiente	10
3.1.1 Componenti	10
3.1.2 Interfaccia utente: comandi e parametri	12
3.1.3 Monitoraggio in tempo reale	14
4 Funzionamento del programma	16
4.1 Architettura generale	16
4.2 Fasi di inizializzazione	16
4.3 Ciclo di simulazione	17
4.4 Dinamica del fuoco	18
4.4.1 Ignizione iniziale	18
4.4.2 Propagazione per contatto	18
4.4.3 Scintille e fronti secondari	18
4.4.4 Ciclo di vita del tronco	18
4.5 Comportamento degli orsi	19
4.6 Comportamento dei cervi	19

4.7	Contatore di esposizione al calore	20
4.8	Parametri di controllo principali	21
4.9	Indicatori e raccolta dati	21
5	Risultati	23
5.1	Presentazione dei risultati	24
5.2	Discussione complessiva dei risultati	27
5.3	Analisi approfondite	29
5.3.1	Simulazioni con più focolai	29
	Conclusioni	32
	Limiti e Sviluppi Futuri	33

Elenco delle figure

1.1	Un esemplare di orso di fronte ad un incendio forestale.	5
1.2	Due cervi che si rifugiano in un corso d'acqua per sfuggire alle fiamme durante un grande incendio.	6
3.1	Fuoco	10
3.2	Terreno bruciato	10
3.3	Cervo	11
3.4	Orso	11
3.5	Quercia	11
3.6	Pino	11
3.7	Schermata dove è possibile inizializzare l'ambiente e selezionare i parametri	12
3.8	Schermata dove è possibile monitorare la simulazione in corso in tempo reale tramite monitor e grafici	15

Elenco delle tabelle

1.1	Parametri di percezione e locomozione per orsi e cervi in risposta agli incendi forestali	7
4.1	Sintesi dei parametri più rilevanti	21
5.1	Parametri fissi della simulazione	24
5.2	Risultati ottenuti con seed pari a 1, North-wind-speed, East-wind-speed e numero di focolai mutevole.	25
5.3	Risultati ottenuti con seed pari a 2, North-wind-speed, East-wind-speed e numero di focolai mutevole.	26
5.4	Risultati ottenuti con seed pari a 3, North-wind-speed, East-wind-speed e numero di focolai mutevole.	26
5.5	Risultati ottenuti con seed pari a 4, North-wind-speed, East-wind-speed e numero di focolai mutevole.	27
5.6	Risultati ottenuti con seed e numero di focolai mutevole.	30

Introduzione

Nel corso degli ultimi decenni, in particolare negli ultimi anni, abbiamo registrato un aumento piuttosto significativo nel numero di incendi forestali, i quali erano inizialmente degli avvenimenti piuttosto rari, ora invece sono decisamente più frequenti, questo anche a causa del riscaldamento globale.

Abbiamo potuto constatare inoltre, come la durata delle stagioni degli incendi e del fuoco si sia allungata di circa il 20% tra il 1979 e il 2013 [1]. In particolare, in Italia, gli incendi hanno mietuto una superficie superiore a 500 km² [2].

Secondo il programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP), la frequenza degli incendi potrebbe crescere del 14% entro il 2030, del 30% entro il 2050, con la possibilità, seppur remota, di raggiungere il 50% a fine secolo.[3].

Per quanto concerne le conseguenze relative agli incendi, queste sono discretamente dannose, in primo luogo abbiamo ovviamente una perdita di vegetazione oltre ad una vasta combustione di anidride carbonica. Gli incendi hanno un enorme impatto anche per quanto riguarda la fauna selvatica, un incendio rappresenta infatti una grave minaccia in quanto devasta l'habitat all'interno del quale le diverse specie si riproducono e reperiscono del cibo.

Perciò, la fauna ha una complessa interazione con i roghi e la loro propagazione, soprattutto quando si tratta del sistema di allerta e di fuga proprio di ciascuna specie animale. Queste peculiarità rendono un ambiente caratterizzato da una ampia foresta, popolata da diverse specie, all'interno della quale scoppiano uno o più focolai un sistema complesso. Lo scoppio del fuoco e la sua propagazione dipendente da fattori come temperatura o vento influenzano il comportamento dei diversi animali. Un'ulteriore difficoltà nel monitorare e comprendere a fondo ambienti di questo tipo è strettamente legata all'accesso piuttosto limitato di dati affidabili. Questa carenza rende complicato monitorare e analizzare sistemi complessi di questo tipo.

Sebbene gli incendi vengano spesso analizzati dal punto di vista della perdita di biomassa vegetale, è altrettanto importante — e ancora poco studiato — comprendere come

la fauna selvatica reagisca all'avanzare del fronte di fiamma. In letteratura è noto che la maggior parte dei vertebrati adotta strategie di fuga specifiche, variabili per percezione del pericolo, velocità e scelta dei rifugi; di conseguenza, il tasso di mortalità diretta (animali uccisi da fiamme o calore) nelle specie di grossa taglia rimane generalmente basso. Tuttavia, in presenza di accensioni multiple o di propagazione accelerata dal vento, anche gli animali altamente mobili possono trovarsi intrappolati. Su queste basi si fonda il presente progetto: tramite un modello agent-based simuleremo il comportamento di orsi e cervi in una foresta temperata sotto diversi scenari d'incendio, per capire in quali condizioni le loro strategie di fuga garantiscano la sopravvivenza e in quali, invece, falliscano.

1. Dominio

Il dominio applicativo all'interno del quale ci inseriamo è quello di un sistema complesso comprendente di diversi agenti: il fuoco agisce come una forza di disturbo, il clima (vento, temperatura) ne modula la propagazione e l'intensità, la fauna reagisce a questo con delle specifiche strategie di fuga volte al mettersi al riparo dagli incendi. Per comprendere nel modo più efficace le diverse interazioni presenti all'interno del sistema occorrono degli strumenti utili al fine di integrare i diversi dati climatici, forestali e faunistici, in modo da poter comprendere e simulare efficacemente degli scenari che combinino l'innescò di uno o più focolai con lo scopo ultimo di osservare il comportamento degli animali.

1.1 Foreste miste temperate

Le foreste miste temperate sono costituite da un mosaico di latifoglie decidue (p. es. querce *Quercus spp.*) e conifere sempreverdi (p. es. *Pinus spp.*). L'eterogeneità del combustibile (lettiera di aghi che facilita fuochi radenti vs. strato di foglie più umido) genera fronti di fiamma irregolari con velocità di propagazione tipiche di 3–12 m/s [4, 5]. In queste foreste vive ~ 70% dei mammiferi terrestri di taglia medio-grande dell'emisfero boreale [6], fra cui orsi e cervi.

La foresta che andiamo a trattare all'interno del nostro ambiente è per l'appunto una mista temperata all'interno della quale avremo delle querce (latifoglie), queste hanno una corteccia abbastanza spessa, hanno una resistenza media-bassa verso il fuoco; abbiamo anche dei pini (conifere sempreverdi), dotati di una corteccia suberosa, sono generalmente meno resistenti al fuoco rispetto alle querce.

Il tappeto di aghi delle conifere asciuga in fretta ma propaga i fuochi radenti, invece lo strato di foglie delle latifoglie trattiene l'umidità, e man mano che si decompone è utile a creare una certa discontinuità di carburante. Questo, in passato era utile a favorire degli incendi frequenti che però non distruggevano completamente la foresta, tuttavia negli ultimi due secoli questo ciclo è stato interrotto da una deforestazione sempre più intensa.

1.2 Fauna

Le foreste miste temperate sono popolate da diverse specie animali, noi ci siamo concentrati in modo particolare sugli orsi e sui cervi.

1.2.1 Orsi

Gli orsi temperati sono animali *solitari* con home-range di decine–centinaia di km²[7]. Grazie a un olfatto estremamente sviluppato percepiscono il fumo a oltre 1 km [8] e avviano precocemente una fuga calma. Se le fiamme si avvicinano a < 150 m accelerano fino a ≈ 40 km/h per brevi tratti [9]. Prediligono come rifugio corsi d’acqua, radure già percorse dal fuoco e versanti rocciosi; la mortalità diretta registrata nei grandi roghi di Yellowstone (1988) fu $< 1\%$ [10, 11].

Gli orsi vivono principalmente in foreste miste temperate, generalmente tendono ad evitare il fuoco attivo spostandosi fuori dalla sua portata, ma senza precipitazione. Gli orsi percepiscono un possibile incendio sia visivamente che grazie al loro olfatto, riescono infatti a fiutarlo da lontano e ciò gli permette di iniziare la fuga prima dell’arrivo delle fiamme; inoltre, quando possibile, gli orsi tendono a non abbandonare completamente l’area ma ad aggirarsi nei dintorni fino a quando il focolaio non si spegne.



Figura 1.1: Un esemplare di orso di fronte ad un incendio forestale.

Possiamo dire che gli orsi adottano una strategia di allontanamento graduale. Nel momento in cui però, si presentassero dei fuochi 'improvvisi' l'orso è in grado di accelerare per mettersi al sicuro raggiungendo anche la velocità di 40 km/h su brevi distanze, anche se, come detto, la maggior parte degli spostamenti avviene con calma, gli orsi abbandonano l'area prima che diventi pericolosità. Proprio per i motivi esposti la mortalità diretta da un incendio è molto bassa per questa specie, è un avvenimento più che sporadico. Per quanto concerne la modalità di fuga, gli orsi scappano via principalmente sul terreno allontanandosi a piedi dalle fiamme, se necessario sono anche in grado di nuotare, la strategia più osservata nel comportamento degli orsi è quella di fuggire dall'area incendiata per poi eventualmente tornarci in un secondo momento, adottando la via libera più vicina.

1.2.2 Cervi

I cervidi formano branchi matrilineari di 4–15 individui. Rilevano fumo e crepitii a 250 m [12]; finché il fronte resta oltre ~ 100 m trottano a 5 m/s, ma a distanze < 100 m scattano a 16.5 m/s (60 km/h), velocità ≥ 5 volte la propagazione media del fuoco [4]. Rifugi privilegiati sono corsi d'acqua e radure già bruciate. Nei roghi del 1988 la mortalità diretta di wapiti e mule deer fu $< 2\%$ [10]. Molti cervi rientrarono nell'area bruciata entro poche

ore-giorni, attratti dai germogli pionieri [13]. I cervi che vivono all'interno delle foreste miste temperate riescono a reagire reattivamente a delle situazioni in cui si palesa un incendio, questo è possibile grazie alla loro spiccata velocità e alla loro mobilità, i cervi cercano di fuggire correndo via terra verso le zone non ancora raggiunte dalle fiamme. Sono raramente vittime delle fiamme proprio grazie alla loro rapidità che gli permette di spostarsi in fretta lontano dal fuoco, raggiungono una velocità di 60km/h. I cervi sono dotati di un buon olfatto che assieme alla vista gli permette di accorgersi prontamente di un eventuale focolaio. Sono in grado di immergersi nei corsi d'acqua per proteggersi dal calore delle fiamme, di fatto utilizzano l'acqua come una barriera naturale, quest'ultima infatti tende a rallentare l'incendio offrendo agli animali un rifugio temporaneo.



Figura 1.2: Due cervi che si rifugiano in un corso d'acqua per sfuggire alle fiamme durante un grande incendio.

In mancanza d'acqua i cervi scelgono per lo più zone già bruciate o radure come vie di fuga, il loro scopo è quello di mettersi in salvo il prima possibile.

1.2.3 Confronto

Per quanto abbiamo potuto osservare il comportamento degli orsi e quello dei cervi nei casi di incendio risulta per alcuni tratti simile, tuttavia i due presentano alcune importanti

differenze, soprattutto per quanto concerne la rapidità della fuga e la reattività nel diagnosticare una potenziale situazione di pericolo. Gli orsi si accorgono dell'incendio ad una distanza maggiore rispetto ai cervi ed iniziano perciò una fuga lenta, i cervi invece entrano in uno stato di allerta ad una distanza più ravvicinata, per poi operare una vera e propria fuga veloce quando l'incendio si avvicina. I cervi raggiungono una velocità massima nel caso in cui il fuoco si avvicinasse a circa un centinaio di metri, per quanto riguarda gli orsi, questi scappano velocemente solo nel caso in cui il fuoco sia molto vicino (nell'ordine delle centinaia di metri). Entrambe le specie scelgono la via più veloce per fuggire, sfruttano però in modo diverso eventuali fiumi e laghi, gli orsi li usano per fuggire mentre i cervi per proteggersi, entrambe le specie riescono con molta efficacia a scappare dalle fiamme.

In particolare, di seguito mostreremo una tabella utile per comprendere nel modo migliore le differenze e le somiglianze tra i comportamenti delle specie prese in analisi.

Parametro	Orsi	Cervi	Note
Raggio con cui l'anima- le si accorge dell'incen- dio	1 kilometro	500 metri	L'orso reagisce ad una distanza di circa 1 km mentre il cervo reagisce a 500 m
Raggio con cui l'anima- le si sente in pericolo e scappa	150 metri	250 metri e 100 metri	Gli orsi raggiungono la loro velocità mas- sima nel momento in cui le fiamme si av- vicinano troppe, i cervi invece aumentano progressivamente la loro velocità nel caso in cui le fiamme si avvicinino eccessivamente
Comportamento nel ca- so di allerta incendio	Inizia a scappare ad una velocità di 6km/h	Fiuta il pericolo ma non si muove nel- l'immediato	L'orso inizia subito a portarsi in una area sicura mentre il cervo attende
Comportamento nel ca- so in cui le fiamme si av- vicinassero	Scappa raggiun- gendo una velocità di 40km/h	Scappa raggiun- gendo una velocità di 30km/h fino ad una velocità massima di 60km/h	Quando le fiamme si avvicinano gli orsi cor- rono raggiungendo una velocità di 40km/h, i cervi iniziano a scappare ad una velocità di 30km/h, nel caso in cui le fiamme si av- vicinassero (sotto i 100 metri) raggiungono una velocità di 60km/h

Tabella 1.1: Parametri di percezione e locomozione per orsi e cervi in risposta agli incendi forestali

Gli orsi reagiscono con anticipo (rilevazione ~ 1 km), allontanandosi inizialmente a

bassa velocità; i cervi intercettano il pericolo più tardi ma compensano con sprint rapidi. Entrambi sfruttano acqua e radure come vie di fuga, limitando la mortalità diretta: meta-analisi recenti stimano un tasso globale di decessi vertebrati da incendio intorno al 3 % [14]. Queste differenze funzionali devono essere incorporate nei modelli agent-based per simulare correttamente la dinamica di fuga e la sopravvivenza faunistica in scenari di incendio. In entrambi i casi la mortalità diretta è marginale, grazie alla notevole capacità motoria e alla scelta oculata dei percorsi.

2. Scenario e Obiettivi

Il presente lavoro nasce con l'intento di indagare come orsi e cervi reagiscano all'avanzare di un incendio forestale e di stabilire, in funzione dell'evoluzione delle fiamme, se le loro strategie di fuga risultino adatte ed efficienti. Per farlo abbiamo ricostruito in NetLogo una foresta mista temperata, popolata da querce e pini, nella quale è possibile innescare uno o più focolai. Il modello riproduce in modo esplicito la propagazione del fuoco — governata da distanza tra gli alberi, forza e direzione del vento, umidità e temperatura — così da offrirci un ambiente di simulazione affidabile.

Sebbene una parte sostanziale del progetto riguardi la corretta rappresentazione degli incendi, il nostro interesse principale è verificare la reazione degli animali a diversi scenari di pericolo. In particolare ci poniamo tre domande:

Adeguatezza del comportamento: dato un fronte di fuoco in evoluzione, le scelte prese da orsi e cervi (attivazione della fuga, direzione, velocità) sono coerenti con le conoscenze etologiche? In altre parole, “funzionano” davvero dentro un incendio realistico?

Confronto tra le specie: a parità di condizioni iniziali, quale delle due specie mostra la maggiore probabilità di sopravvivenza? È più vantaggioso l'allerta precoce e il passo costante dell'orso, o la partenza tardiva ma lo sprint del cervo?

Sensibilità allo scenario: l'efficacia dei comportamenti cambia al variare di fattori cruciali come il numero di focolai, la presenza o meno di vento e la sua direzione? Vogliamo identificare le configurazioni in cui una data strategia diventa critica o, al contrario, superflua.

Per rispondere a queste domande eseguiremo serie di simulazioni che combinano un diverso numero di fronti (uno, tre, cinque) con cinque condizioni di vento (nord-est, nord-ovest, sud-est, sud-ovest, assente), ripetendo il tutto con semi pseudo-casuali differenti. I risultati — mortalità, rotte di fuga, tempi di estinzione dell'incendio — saranno poi analizzati comparativamente per quantificare quali tratti comportamentali si rivelino più efficaci in ciascuno scenario e per valutare la robustezza delle strategie adottate dalle due specie.

3. Modello

In questo capitolo presenteremo tutte le caratteristiche del modello che abbiamo stilato e adottato.

3.1 Ambiente

Il simulatore prevede un ambiente quadrato di dimensione 41 x 41 che corrisponde ad una superficie di 16 km², all'interno dell'ambiente abbiamo diverse patch contenenti principalmente alberi ed animali, la loro posizione è stabilita da un seed, un parametro che ci consente di creare foreste diverse e che ha dei punti in cui i fuochi verranno appiccati.

3.1.1 Componenti

Per quanto riguarda i diversi elementi che caratterizzano l'ambiente ognuno di essi viene rappresentato graficamente in modo diverso in modo che sia facilmente riconoscibile.



Figura 3.1: Fuoco

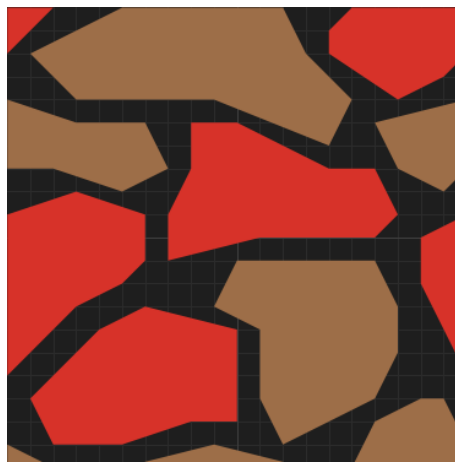


Figura 3.2: Terreno bruciato

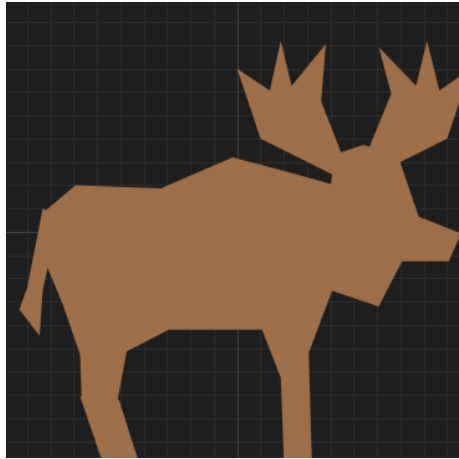


Figura 3.3: Cervo

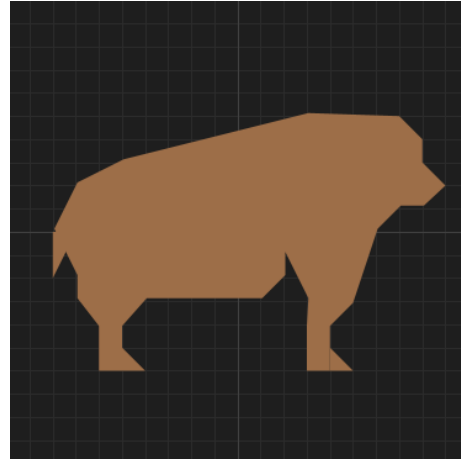


Figura 3.4: Orso

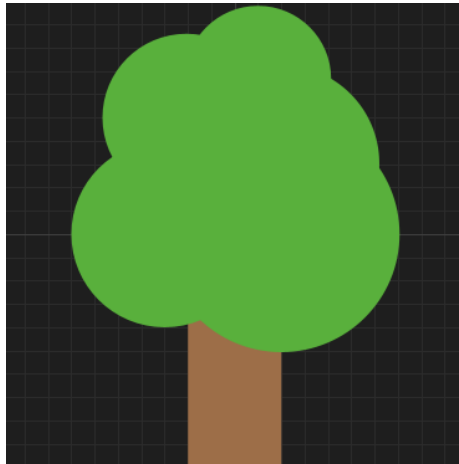


Figura 3.5: Quercia

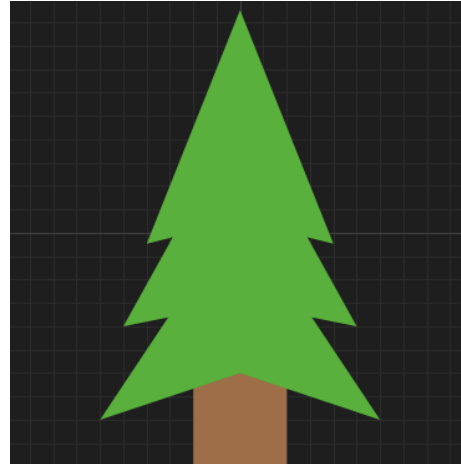


Figura 3.6: Pino

Tra i componenti possiamo trovare:

- Il fuoco, questo sarà osservabile nel momento in cui ha luogo un focolaio, inoltre nel progetto è prevista la possibilità che un albero in fiamme generi delle scintille e che queste possano propagare l'incendio verso altri alberi, anche queste scintille hanno la forma del fuoco.
- Il terreno bruciato, che sarà osservabile nel momento in cui un albero sarà completamente bruciato.
- I cervi, popolano la foresta e il loro obiettivo è quello di mettersi al riparo dagli incendi.

- Gli orsi, così come i cervi, cercano di scappare dalle fiamme.
- Le querce, sono una delle due tipologie di alberi che possiamo trovare all'interno della nostra foresta, possono prendere fuoco, bruciare e propagare l'incendio.
- I pini, possono prendere fuoco, bruciano più velocemente rispetto alle querce, anch'essi possono propagare il fuoco.
- Abbiamo inoltre previsto delle tombe, utili a segnalare la morte di cervi ed orsi.

3.1.2 Interfaccia utente: comandi e parametri

Per quanto riguarda l'inizializzazione dell'ambiente, utile per poi effettuare delle simulazioni, abbiamo svariate possibilità.

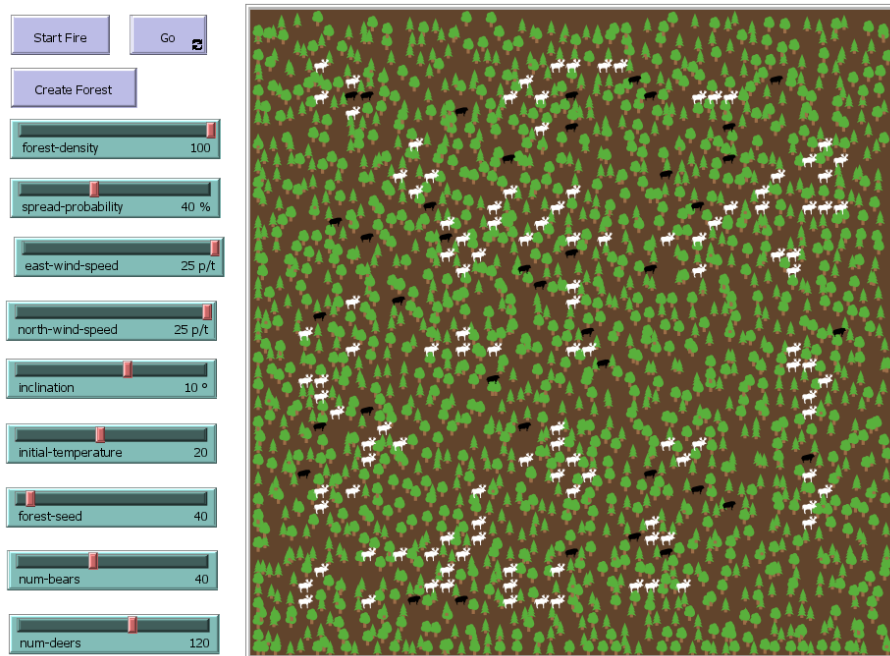


Figura 3.7: Schermata dove è possibile inizializzare l'ambiente e selezionare i parametri

Il modello *ForestaAnimale.nlogo* viene pilotato interamente dai widget mostrati in Fig. 3.7. Essi si dividono in due categorie principali: *bottoni di controllo* (azioni discrete) e *slider* (parametri continui).

Bottoni

- **Create Forest:** ripulisce la griglia, semina gli alberi in funzione di `forest-density` e `forest-seed`, quindi crea gli agenti animali secondo `num-bears` e `num-mooses`.
- **Start Fire:** innesca uno (o più) focolai portando le corrispondenti patch dallo stato `TREE` a `FIRE`.
- **Go:** avvia (o mette in pausa) il ciclo `go`. Ad ogni tick vengono aggiornati: propagazione delle fiamme, movimento degli animali, contatori globali (area bruciata, CO_2 emessa, sopravvivenza fauna).

Slider

- `forest-density [%]`: frazione di patch occupate da alberi alla creazione.
- `spread-probability [%]`: probabilità base che un albero adiacente a un `FIRE` prenda fuoco (prima dei correttivi per vento e pendenza).
- `east-wind-speed [p/t]`: componente est-ovest del vento (negativa = verso est); influisce sulla direzione di propagazione.
- `north-wind-speed [p/t]`: componente nord-sud del vento (positiva = verso nord).
- `inclination [°]`: pendenza media del versante; un valore alto accelera il fronte a monte e lo rallenta a valle.
- `initial-temperature [°C]`: temperatura di partenza, proxy dell'umidità del combustibile.
- `forest-seed`: seme RNG che garantisce la ripetibilità della disposizione di alberi e radure.
- `num-bears`: numero iniziale di orsi distribuiti in nuclei famigliari.
- `num-mooses`: numero iniziale di alci (o cervi) che popolano le radure.

Flusso operativo ideale

- 1) Impostare gli *slider* secondo lo scenario da testare, variando di norma *un solo parametro alla volta* per analisi di sensibilità.
- 2) Premere **Create Forest** per generare la configurazione iniziale.
- 3) Premere **Start Fire** per accendere i focolai di partenza.
- 4) Premere **Go** per far evolvere la simulazione; facoltativamente modificare vento o umidità in corso d'opera per simulare un cambiamento meteo.

- 5) Arrestare **Go** quando le fiamme si estinguono e annotare gli indicatori di output (superficie bruciata, fauna sopravvissuta) ai fini del confronto fra scenari.

3.1.3 Monitoraggio in tempo reale

Oltre ai controlli descritti in precedenza, l'interfaccia di *ForestaAnimali* comprende una serie di *monitor* (NetLogo widgets di sola lettura) e di grafici che consentono di valutare l'andamento della simulazione senza dover ispezionare il codice o i log.

Monitor faunistici

- **Orsi Morti** – contatore incrementato ogni volta che un agente bear viene raggiunto dalle fiamme (STATE = FIRE) o rimane intrappolato in patch ASH senza vie di fuga.
- **Orsi Sopravvissuti** – numero di orsi che, alla fine della simulazione, risultano vivi e all'interno dei confini del mondo (*proxy* di una sopravvivenza ecologicamente valida).
- **Orsi Rimanenti** – differenza dinamica fra popolazione iniziale e morti al tick corrente; permette di seguire la curva di mortalità in tempo reale.
- **Cervi Morti, Cervi Sopravvissuti, Cervi Rimanenti** – omologhi per il breed moose/deer. Confrontare i due insiemi di monitor evidenzia come la diversa velocità di fuga o il diverso comportamento alimentare influenzino la resilienza di ciascuna specie.

Monitor ecosistemici (Nel layout completo, visibili sotto la finestra mondo.)

- **Surface Burned %** – quota di patch passate allo stato ASH; misura diretta dell'intensità dell'evento.
- **Ticks Elapsed** – cronometro interno che facilita il confronto di scenari con velocità di propagazione diverse.

Grafici

- *Fauna vs. Tempo* – due linee (orsi, cervi) che mostrano il numero di individui vivi a ogni tick; utile per identificare picchi di mortalità correlati a raffiche di vento o aumenti di temperatura.

- *Area bruciata vs. Tempo* – curva sigmoide tipica: la pendenza del tratto centrale è un indicatore sintetico della rapidità di propagazione.

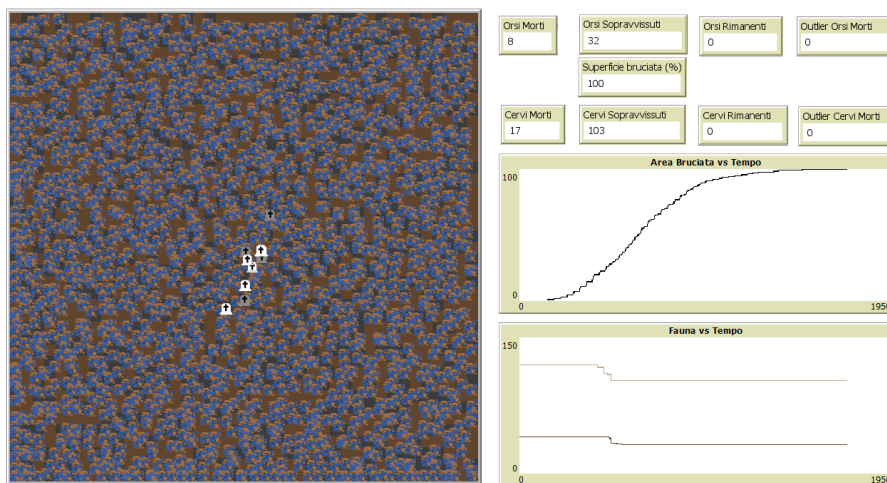


Figura 3.8: Schermata dove è possibile monitorare la simulazione in corso in tempo reale tramite monitor e grafici

Ciclo di lettura consigliato

- 1) Durante l'esecuzione osservare *Surface Burned %*: un brusco aumento indica la formazione di un *crown fire*.
- 2) Se la mortalità di una specie supera il 50 %, mettere in pausa la simulazione e analizzare la mappa per localizzare i corridoi di fuga mancanti.
- 3) A fine run annotare le percentuali di sopravvivenza; ripetere con parametri diversi (venti, pendenza, densità) per compilare la tabella comparativa degli scenari.

In sintesi, i monitor forniscono un *cruscotto* minimalista ma sufficiente a seguire lo stato di salute della foresta e delle due specie chiave senza interrompere il flusso di simulazione; i grafici offrono invece una visione diacronica, indispensabile per calibrare interventi di prevenzione e per validare le ipotesi sui regimi di fuoco.

4. Funzionamento del programma

Il capitolo descrive il flusso di esecuzione del simulatore, i ruoli degli agenti e i meccanismi con cui il fuoco si propaga e gli animali reagiscono. L'implementazione è stata realizzata in NetLogo; i riferimenti a variabili, procedure e *breed* sono riportati in typewriter per facilitarne il collegamento diretto con il codice fornito all'interno del repository.

4.1 Architettura generale

L'ambiente è modellato come una griglia quadrata 41×41 (patches), centrata nell'origine del piano cartesiano. Su di essa sono presenti cinque classi di agenti:

- **Alberi** (trees) — quercia e pino hanno parametri di combustione diversi (burning-speed, spark-probability).
- **Scintille** (sparks) — particelle di fuoco trasportate dal vento, responsabili di accensioni secondarie.
- **Fiamme** (fires) — agenti decorativi che rappresentano le fiamme attive su un albero.
- **Orsi** (bears) — agenti singoli, ciascuno con uno stato interno a 5 livelli.
- **Cervi** (mooses) — agenti sociali organizzati in branchi, con dinamiche di coesione, separazione e leadership.

Ogni patch mantiene inoltre due campi scalari altitude e temperature che influenzano, rispettivamente, la probabilità di propagazione verso l'alto lungo il pendio e la percezione del calore da parte degli animali.

4.2 Fasi di inizializzazione

Terreno e altitudine La funzione import-background carica la texture del suolo (terra.png) e assegna a ogni patch un'altitudine lineare (Equazione 4.1), crescente verso est:

$$\text{altitude}(x) = 0.1x + 5 \tag{4.1}$$

Generazione della foresta La procedura `create-forest` esegue:

- 1) pulizia completa del mondo e inizializzazione dei parametri globali,
- 2) semina casuale degli alberi con densità controllata da `forest-density`; ogni patch selezionata richiama `plant-tree`, che sceglie casualmente tra quercia (`oak-tree`) e pino (`pine-tree`) e ne istanzia le proprietà di combustione;
- 3) posizionamento non sovrapposto degli orsi (`num-bears`) nell'area centrale $|x|, |y| \leq 17$;
- 4) suddivisione del numero totale di cervi (`num-mooses`) in branchi di taglia 3–4, assegnazione dell'identificativo di branco (`group-id`). A tutti i cervi inizialmente viene inizializzato il parametro `isLeader = false`.

Alla fine dell'inizializzazione il contatore dei tempi discreti (`ticks`) è azzerato con `reset-ticks`.

4.3 Ciclo di simulazione

La procedura `go` rappresenta il *tick* del modello (1); viene interrotta quando non esistono più sparks né hot-trees (alberi in fiamme o ancora caldi).

Algorithm 1 Sequenza logica di `go`

- 1: **if** not any? (`turtle-set hot-trees sparks`) **then stop**
 - 2: **end if**
 - 3: Aggiorna ogni albero caldo: propagazione locale (`spread-fire`) e possibile generazione di una scintilla.
 - 4: Avanza le scintille verso la destinazione calcolata in base al vento (`spark-final-cor`).
 - 5: Aggiorna la vita residua delle fiamme decorative (`fires`).
 - 6: Incrementa il raffreddamento dei tronchi bruciati (`fade-embers, cool-burnt-trees`).
 - 7: Esegue i sottocicli animali: `go-bears` e `go-mooses`.
 - 8: `tick` (incrementa il contatore globale).
-

4.4 Dinamica del fuoco

4.4.1 Ignizione iniziale

L'accensione avviene tramite `start-fire`: viene scelto casualmente un albero verde finché non si ottiene almeno una `fire`, quindi il generatore di numeri casuali è re-inizializzato (`random-seed new-seed`) per evitare correlazioni negli eventi successivi.

4.4.2 Propagazione per contatto

Ogni albero in fiamme valuta i vicini (`neighbors`) con la procedura `spread-fire`:

$$P_{\text{base}} \xrightarrow{\text{vento}} P_{\text{vento}} \xrightarrow{\text{temperatura}} P_{\text{temp}} \xrightarrow{\text{pendenza}} P_{\text{finale}} \in [0, 100] \quad (4.2)$$

dove: – il vento modifica la probabilità in funzione dell'angolo fra direzione del fronte e dominante (`north/east-wind-speed`); – la temperatura media delle patch vicine aumenta esponenzialmente il rischio $(\ln(\text{mean} + 1))^2$; – la differenza di quota penalizza o incentiva la propagazione a valle/monte, sfruttando la tangente dell'inclinazione.

4.4.3 Scintille e fronti secondari

Se un albero non ancora completamente bruciato (`color < brown`) supera la soglia di probabilità `spark-probability` e sono trascorsi almeno `spark-frequency tick` dall'ultima scintilla, viene creata una `spark`. La destinazione della scintilla deriva dalla velocità del vento dimezzata e clippata ai bordi del mondo (`spark-final-cor`). Quando una scintilla raggiunge il punto previsto (`errore < 0.1 patch`) invoca `ignite` sulla patch corrente.

4.4.4 Ciclo di vita del tronco

L'albero attraversa tre fasi:

1) **Verde** — stato iniziale, suscettibile alla propagazione. 2) **In fiamme** — colore sfuma dal verde al rosso; il `burning-speed` differenzia querce (0.1) e pini (0.3). 3) **Bruciato**

caldo — una volta esaurito il canale cromatico, l'albero è marcato come *is-burnt* e la patch circostante riceve calore; dopo 200 tick il reporter *cool-burnt-trees* lo classifica *freddo* (*is-cooled*).

Il reporter *hot-trees* restituisce l'unione degli alberi ancora in fiamme e di quelli bruciati ma non raffreddati, costituendo la fonte di pericolo per la fauna.

4.5 Comportamento degli orsi

Ogni orso mantiene lo stato stato (0–4) L'algoritmo *go-bears* implementa la sequenza di stati illustrata di seguito, in base alla vicinanza dal fuoco:

Relax (0) camminata casuale (0.006 patch/tick); transizione a *Fuga* se un fronte viene avvistato entro 20 patch.

Fuga cauta (1) movimento guidato da *escape-bears* e velocità doppia; ritorno a *Relax* quando il fuoco è fuori raggio (24 patch).

Fuga veloce (2) velocità 0.04 patch/tick; transizione a *Panico* se il fuoco è a meno di 2 patch.

Panico (3) corsa a 0.075 patch/tick; morte istantanea se tocca fiamme vive; retrocessione a fuga veloce quando la distanza torna accettabile.

Morto (4) l'agente diventa una *tomba* di colore grigio.

La funzione *escape-bears* somma due componenti: *repulsione da fuoco* (peso $1/d^2$) e *repulsione minima tra animali* (peso *sep-bear-g*).

4.6 Comportamento dei cervi

I cervi estendono la logica precedente aggiungendo:

- **Struttura sociale** — ogni branco condivide l'id *group-id*; il leader è eletto da *update-moose-leaders* come membro più vicino al fronte. Il leader può cambiare se un altro cervo del gruppo si avvicina di più al fuoco rispetto al leader (differenza > 2 patch rispetto al leader attuale).

- **Sincronizzazione degli stati** — `sync-moose-group-states` garantisce che nessun membro resti in uno stato meno “allarmato” del massimo raggiunto nel branco durante il tick.
- **Doppio comportamento** leader/follower — il leader segue `escape-moose`, mentre i follower applicano `update-moose-not-leader`, che combina coesione, separazione e allineamento a distanza ideale 1 patch.

Gli stati sono: *Relax* (0), *Alert* (1), *Fuga* (2), *Panico* (3), *Morto* (4) con soglie di attivazione più basse rispetto agli orsi, rispecchiando la maggiore reattività dei cervi.

L’accelerazione massima è di 0.1 patch/tick in panico, circa il doppio di quella usata nella fuga ordinaria.

Per orsi e cervi, tutti i parametri numerici impiegati nel modello derivano dai dati della Tabella 1.1, opportunamente convertiti in tick/s.

4.7 Contatore di esposizione al calore

Sia gli orsi (bears) sia i cervi (mooses) mantengono un contatore interno `ticks_near_hot` $\in [0, 150]$ che misura, tick per tick, la permanenza in prossimità di fonti di calore pericolose.

- **Incremento.** Il contatore aumenta di 1 ogni volta che l’animale si trova a) entro 1 patch da un albero in fiamme (`burning-trees`) o b) sopra un tronco bruciato ma non ancora raffreddato (`warm-trees`). Se nessuna delle due condizioni è vera, il valore decresce gradualmente (al massimo di 1 per tick) finché non torna a 0.
- **Soglia di reazione.** Raggiunta la soglia `near-hot-threshold`, l’animale considera pericoloso *anche* il terreno ancora caldo, e passa a stati di fuga più intensi
- **Conseguenza estrema.** Se il contatore raggiunge il valore massimo di 150 tick, l’animale muore per esposizione prolungata al calore (`stato` = 4) e viene sostituito dal simbolo di tomba.

Questa logica consente di modellare un *effetto accumulo*: la reazione non dipende solo dalla distanza istantanea dal fuoco, ma anche dal tempo di esposizione, riproducendo il fatto che suoli bruciati restano pericolosi anche dopo lo spegnimento delle fiamme.

4.8 Parametri di controllo principali

Nome	Ruolo	Valore predef.
spark-frequency	Tick minimi tra scintille dallo stesso albero	300
near-hot-threshold	Tick sopra cui l'animale scappa anche dal calore	50
safe-hot-threshold	Tick sotto cui l'animale si calma	20
dead-hot-threshold	Tick per cui un animale muore	150
burning-speed	Velocità di combustione quercia/pino	0.1 / 0.3
spark-probability	Probabilità di scintilla quercia/pino	0.05 / 0.15
cooled-threshold	Tick sopra cui il terreno bruciato si raffredda	200
coesione-g	Forza di attrazione al centro branco	0.012
separazione-g	Repulsione minima tra cervi	0.02
sep-bear-g	Repulsione minima tra orsi	0.03
outlier-ticks	Tick limite per considerare la morte un outlier	70

Tabella 4.1: Sintesi dei parametri più rilevanti

4.9 Indicatori e raccolta dati

Il modello espone reporter per *orsi morti*, *orsi sopravvissuti*, *cervi morti*, *cervi sopravvissuti* e per il numero corrente di alberi *in fiamme* o *caldi*. Tali metriche vengono campionate via BehaviorSpace per le analisi quantitative presentate nei capitoli successivi.

Conclusioni operative

Il simulatore integra in un unico ciclo discrete-time la dinamica fisica del fuoco con la complessità etologica di due specie animali, utilizzando regole locali di percezione e decisione. Grazie alla modularità delle procedure (go, escape-*, fade-embers ecc.) è possibile estendere agevolmente il modello, ad esempio introducendo nuove specie, tipi di

vegetazione o sistemi di allarme acustico senza compromettere il flusso base illustrato in questo capitolo.

5. Risultati

Dopo aver percorso l'intero arco progettuale — dalle ipotesi teoriche iniziali alla realizzazione di un modello *agent-based* che simula l'interazione fra fuoco, paesaggio e fauna nelle foreste miste temperate — siamo pronti ad avviare la fase conclusiva del lavoro. Il modello riproduce la propagazione degli incendi in funzione di vento, topografia e tipologia di combustibile, e integra comportamenti differenziati di orsi e cervi calibrati sui dati di letteratura. Ora il progetto entra in una tappa decisiva di **sintesi** e **validazione**, con l'obiettivo di trasformare i risultati numerici in indicazioni operative per la gestione degli ecosistemi.

- 1) **Validazione quantitativa.** Confronteremo la mortalità con i dati osservati (ad es. incendi di Yellowstone 1988, Sierra Nevada 2020) per assicurarci che gli output del modello rientrino negli intervalli riportati dalla letteratura.
- 2) **Analisi di sensibilità.** Identificheremo i parametri chiave (velocità del fronte data dalla numerosità dei focolai, vento, densità arborea) che influenzano maggiormente gli esiti.
- 3) **Confronto tra le specie.** Confronto tra le strategie di fuga e i tassi di mortalità delle specie animali prese in esame.
- 4) **Comunicazione dei risultati.** Tradurremo le evidenze in una narrativa comprensibile a ricercatori, gestori forestali e decisori politici, definendo criteri di «foresta resiliente» dal punto di vista della grande fauna.

Questa sezione finale non sarà quindi un semplice bilancio, ma fungerà da *ponte* tra simulazione e applicazione concreta. Concluderemo discutendo i punti di forza del modello, i suoi limiti attuali e le possibili estensioni: integrazione di nuove specie, scenari climatici futuri. In definitiva, trasformeremo i 16 km^2 di foresta virtuale del nostro NetLogo in una **roadmap** capace di ispirare azioni di pianificazione e conservazione su scala molto più ampia.

5.1 Presentazione dei risultati

All'interno di questa sezione andremo a presentare i risultati ottenuti in formato tabellare. Come specificato nel corso della relazione abbiamo diversi parametri da impostare prima di procedere con una simulazione, questi parametri sono stati suddivisi in parametri fissi e mutevoli.

Parametro	Valore	Motivazione sintetica
Spread probability	40 %	Rappresenta una “stagione secca media”.
Inclination	10°	Inclinazione moderata tipica di colline e bassa montagna.
Initial temperature	20 °C	Temperatura media temperata.
Orsi	40 individui [†]	2–3 orsi/km ² .
Cervi	120 individui	7–8 cervi/km ² .
Forest density	100 %	Elimina le variazioni dovute a radure/piste forestali.

Tabella 5.1: Parametri fissi della simulazione

[†]La densità media in natura è molto inferiore (mediamente meno di 1 orso/km², con un massimo documentato di 1.6 orsi/km²[15]), valori realistici avrebbero però generato frequenze percentuali troppo piccole, riducendo la robustezza del confronto statistico tra gli scenari.

Per quanto riguarda i parametri mutevoli questi sono caratterizzati dalla east-wind-speed, la north-wind-speed, il forest-seed assieme al numero di focolai; questi parametri verranno specificati all'interno delle tabelle e ci permetteranno di analizzare le diverse situazione allo scopo di confrontare i risultati ottenuti in un secondo momento. Riportiamo di seguito in diverse tabelle tutti i risultati ottenuti a seguito delle simulazioni effettuate.

In particolare, all'interno delle tabelle, sarà possibile osservare i risultati ottenuti con seed pari 1, 2, 3 e 4, direzione del vento variabile tra Nord-est, Nord-ovest, Sud-est, sud-ovest, situazioni in assenza di vento con 1, 3 o 5 focolai, in questo modo potremo osservare

⁰La densità media reale è inferiore (massimo 1,8 orsi/km²), ma valori più bassi avrebbero prodotto frequenze percentuali troppo piccole per un confronto statistico affidabile fra i diversi scenari.

il comportamento di cervi ed orsi di fronte a diverse situazioni e valutare le differenze tra le due specie.

Specifichiamo inoltre che i valori del vento corrispondono a:

- **Nord-Est:** Nort-wind-speed= 25 p/t, Est-wind-speed= 25 p/t.
- **Nord-Ovest:** Nort-wind-speed= 25 p/t, Est-wind-speed= -25 p/t.
- **Sud-Est:** Nort-wind-speed= -25 p/t, Est-wind-speed= 25 p/t.
- **Sud-Ovest:** Nort-wind-speed= -25 p/t, Est-wind-speed= -25 p/t.
- **Assenza di vento:** Nort-wind-speed= 0 p/t, Est-wind-speed= 0 p/t.

Direzione del vento	Numero focolai	Orsi sopravvissuti (%)	Orsi morti (%)	Outlier orsi (%)	Cervi sopravvissuti (%)	Cervi morti (%)	Outlier cervi (%)	Area bruciata (%)	Ticks
Nord-est	1	100	0	0	100	0	0	100	2053
Nord-ovest	1	100	0	0	100	0	0	100	2004
Sud-est	1	100	0	0	100	0	0	100	2160
Sud-ovest	1	100	0	0	100	0	0	100	2055
No vento	1	100	0	0	100	0	0	100	2038
Nord-est	3	100	0	0	99.17	0.83	0.83	100	2034
Nord-ovest	3	100	0	0	99.17	0.83	0.83	100	1960
Sud-est	3	100	0	0	99.17	0.83	0.83	100	2120
Sud-ovest	3	100	0	0	100	0	0	100	2126
No vento	3	100	0	0	100	0	0	100	2034
Nord-est	5	72.5	27.5	0	74.2	25.8	0	100	1651
Nord-ovest	5	72.5	27.5	0	71.7	28.3	0	100	1705
Sud-est	5	72.5	27.5	0	71.7	28.3	0	100	1666
Sud-ovest	5	72.5	27.5	0	75.9	24.1	0	100	1749
No vento	5	72.5	27.5	0	71.7	28.3	0	100	1728

Tabella 5.2: Risultati ottenuti con seed pari a 1, North-wind-speed, East-wind-speed e numero di focolai mutevole.

Direzione del vento	Numero focolai	Orsi sopravvissuti (%)	Orsi morti (%)	Outlier orsi (%)	Cervi sopravvissuti (%)	Cervi morti (%)	Outlier cervi (%)	Area bruciata (%)	Ticks
Nord-est	1	100	0	0	100	0	0	100	2551
Nord-ovest	1	100	0	0	100	0	0	100	2501
Sud-est	1	100	0	0	100	0	0	100	2491
Sud-ovest	1	100	0	0	100	0	0	100	2486
No vento	1	100	0	0	100	0	0	100	2490
Nord-est	3	100	0	0	100	0	0	100	2314
Nord-ovest	3	100	0	0	100	0	0	100	2185
Sud-est	3	100	0	0	100	0	0	100	2358
Sud-ovest	3	100	0	0	100	0	0	100	2314
No vento	3	100	0	0	100	0	0	100	2297
Nord-est	5	87.5	12.5	0	81.7	18.3	0	100	1672
Nord-ovest	5	87.5	12.5	0	81.7	18.3	0	100	1521
Sud-est	5	87.5	12.5	0	81.7	18.3	0	100	1714
Sud-ovest	5	87.5	12.5	0	81.7	18.3	0	100	1677
No vento	5	87.5	12.5	0	81.7	18.3	0	100	1653

Tabella 5.3: Risultati ottenuti con seed pari a 2, North-wind-speed, East-wind-speed e numero di focolai mutevole.

Direzione del vento	Numero focolai	Orsi sopravvissuti (%)	Orsi morti (%)	Outlier orsi (%)	Cervi sopravvissuti (%)	Cervi morti (%)	Outlier cervi (%)	Area bruciata (%)	Ticks
Nord-est	1	100	0	0	100	0	0	100	2053
Nord-ovest	1	100	0	0	100	0	0	100	2581
Sud-est	1	100	0	0	100	0	0	99.6	2554
Sud-ovest	1	100	0	0	100	0	0	99.6	2623
No vento	1	100	0	0	100	0	0	99.6	2544
Nord-est	3	100	0	0	100	0	0	99.6	1733
Nord-ovest	3	75	25	0	100	0	0	100	1796
Sud-est	3	100	0	0	100	0	0	99.6	1820
Sud-ovest	3	100	0	0	100	0	0	99.6	1857
No vento	3	100	0	0	100	0	0	99.6	1791
Nord-est	5	100	0	0	100	0	0	99.6	1622
Nord-ovest	5	85	15	0	99.17	0.83	0	100	1686
Sud-est	5	100	0	0	100	0	0	99.6	1622
Sud-ovest	5	100	0	0	100	0	0	99.6	1688
No vento	5	100	0	0	100	0	0	99.6	1621

Tabella 5.4: Risultati ottenuti con seed pari a 3, North-wind-speed, East-wind-speed e numero di focolai mutevole.

Direzione del vento	Numero focolai	Orsi sopravvissuti (%)	Orsi morti (%)	Outlier orsi (%)	Cervi sopravvissuti (%)	Cervi morti (%)	Outlier cervi (%)	Area bruciata (%)	Ticks
Nord-est	1	100	0	0	100	0	0	100	2155
Nord-ovest	1	100	0	0	100	0	0	100	2064
Sud-est	1	100	0	0	100	0	0	100	2208
Sud-ovest	1	100	0	0	100	0	0	100	2144
No vento	1	100	0	0	100	0	0	100	2136
Nord-est	3	100	0	0	100	0	0	100	1918
Nord-ovest	3	100	0	0	100	0	0	100	1880
Sud-est	3	100	0	0	100	0	0	100	1986
Sud-ovest	3	100	0	0	100	0	0	100	1911
No vento	3	100	0	0	100	0	0	100	1890
Nord-est	5	100	0	0	98.33	0	1.67	100	1923
Nord-ovest	5	100	0	0	98.33	0	1.67	100	1883
Sud-est	5	100	0	0	98.33	0	1.67	100	1934
Sud-ovest	5	100	0	0	98.33	0	1.67	100	1901
No vento	5	100	0	0	98.33	0	1.67	100	1893

Tabella 5.5: Risultati ottenuti con seed pari a 4, North-wind-speed, East-wind-speed e numero di focolai mutevole.

5.2 Discussione complessiva dei risultati

Le quattro tabelle 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, ottenute variando il *seed* (1–4), la direzione del vento e il numero di focolai iniziali (1, 3, 5), mettono in evidenza alcune regolarità marcate e differenze fra le due specie simulate. Nei sessanta scenari esplorati il modello conferma un messaggio di fondo molto netto: orsi e cervi, nonostante condividano la stessa foresta in fiamme, pagano un “pegno” diverso a seconda di quante scintille accendiamo e di quanto presto la complessità del fronte li circonda.

Numero di focolai come vera variabile critica: quando l’incendio parte da un solo focolaio gli animali hanno sempre il tempo di leggere la direzione del fronte e di aprirsi un corridoio di fuga: in tutti i venti casi la mortalità è rimasta a zero per entrambe le specie e la superficie bruciata ha comunque raggiunto il 100, segno che la sopravvivenza non dipende dall’aver trovato una “tasca” verde, ma dal fatto di essere usciti prima che le fiamme chiudessero l’ultima via di fuga.

Con tre focolai la situazione diventa più sfumata: la mortalità rimane quasi nulla ma compaiono episodi isolati in cui una congiunzione sfavorevole di vento e spawn iniziale

può intrappolare parte degli orsi (fino al 25 % di morti nel caso seed 3 con vento da nord-ovest, in grassetto nella tabella 5.3), mentre i cervi riescono comunque a scartare all'ultimo momento grazie alla loro accelerazione superiore.

La soglia critica scatta con cinque focolai: qui il fronte si chiude a tenaglia in pochi tick, riducendo lo spazio di manovra e costringendo gli animali a scegliere al primo colpo la direzione giusta. La mortalità media sale a circa 15–18 % per entrambe le specie, con punte del 27 % negli scenari più sfortunati del seed 1, e il fuoco si estingue più in fretta (1 600–1 900 tick contro i >2 400 tick degli incendi “semplici”) perché la foresta brucia quasi simultaneamente.

Gli orsi muoiono più (o prima) dei cervi: questo accade perché gli orsi hanno un raggio d'allerta doppio (1 km contro 500 m dei cervi) ma una soglia di fuga rapida pari a 40km/h (i riferimenti ai valori assunti sono consultabili all'interno della tabella 1.1 1.1) solo quando il fuoco è ad una distanza di 150 metri, mentre i cervi passano al galoppo già a 250m raggiungendo i 30km/h e possono spingersi fino a 60 km/h nei momenti critici ovvero quando le fiamme distano meno di 100m. Nelle configurazioni più congestionate questo trade-off penalizza gli orsi: percepiscono prima il pericolo, ma la loro partenza graduale li espone a essere tagliati fuori da fiamme che, con più inneschi, arrivano simultaneamente da più lati. I cervi, pur partendo tardi, guadagnano metri decisivi con lo sprint e riescono quindi a mettersi in salvo in modo più efficace di fronte a situazioni di questo tipo.

Effetto del vento: moderato ma non trascurabile: l'orientamento prevalente (± 25 p/t verso nord/est) non modifica la superficie bruciata – quasi sempre totale – ma sposta la “porta di uscita” rispetto alla posizione iniziale dei branchi. In presenza di molti focolai, il vento da nord-ovest è quello che più spesso chiude le strade agli orsi (tutti i casi di mortalità >15 % cadono sotto questa configurazione), mentre l'assenza di vento non garantisce maggiore sicurezza perché la propagazione resta radiale e simultanea.

Implicazioni gestionali: Nel modello, l'aumento della frammentazione iniziale del fuoco pesa più di qualunque altro fattore. In termini pratici, la prevenzione degli inneschi multipli (ad esempio con fasce parafuoco o spegnimento rapido dei primi focolai) riduce drasticamente il rischio per la megafauna. Poiché cervi e orsi reagiscono con logi-

che diverse, salvaguardare vie di fuga eterogenee aumenta la resilienza complessiva della comunità.

In sintesi, la simulazione ribadisce che la mortalità diretta resta un evento raro finché l'incendio si presenta come fronte unico; diventa significativa solo quando l'ignizione multipla velocizza il collasso delle vie di fuga. La diversa ecologia di fuga delle due specie spiega perché, negli scenari peggiori, gli orsi pagano per primi il prezzo della complessità del fronte, mentre i cervi mantengono un margine di sopravvivenza grazie alla velocità di punta.

5.3 Analisi approfondite

Dopo le prime simulazioni 'standard' abbiamo potuto notare che la maggior parte delle morti avviene nel momento in cui il numero di incendi aumenta, in particolare la situazione che tende a crearsi è quella per cui alcuni animali vengano circondati dalle fiamme non avendo alcuna via di fuga. Questo fenomeno è osservabile soprattutto per quanto riguarda gli orsi, i quali, iniziano a fuggire prima rispetto ai cervi ma hanno una velocità massima inferiore, perciò sono più soggetti a questa dinamica per cui rimangono intrappolati tra le fiamme. Abbiamo perciò deciso di indagare ulteriormente questo fenomeno provando ad utilizzare dei nuovi seed e variando il numero di focolai, al fine di comprendere meglio questo comportamento e verificare l'esistenza di eventuali pattern.

5.3.1 Simulazioni con più focolai

Queste simulazioni hanno lo scopo di indagare più a fondo alcuni comportamenti delle specie animali prese sotto osservazione, per realizzarle abbiamo impostato i seguenti parametri: 40 orsi, 120 cervi, il vento punta verso Nord-Est (NWS = 25 p/t e EWS = 25 p/t), spread probability pari al 40%, una inclination di 10 gradi, initial temperature di 20, numero di orsi pari a 40 e un numero di cervi pari a 120, la forest-density sarà sempre pari a 100. Abbiamo tuttavia variato i seed e il numero di focolai, in particolare abbiamo analizzato soprattutto situazioni che presentano un elevato numero di incendi simultanei.

Seed	Numero focolai	Orsi soprav- vissuti (%)	Orsi morti (%)	Outlier orsi (%)	Cervi soprav- vissuti (%)	Cervi morti (%)	Outlier cervi (%)	Area bruciata (%)	Ticks
6	6	100	0	0	99.17	0.83	0	100	1776
7	7	72.5	27.5	0	74.2	25.8	0	100	1637
8	6	87.5	12.5	0	100	0	0	100	1894
10	6	100	0	0	100	0	0	100	1586
12	7	97.5	2.5	0	100	0	0	100	1767
14	5	77.5	22.5	0	99.17	0.83	0	100	1700
16	6	60	40	0	74.4	26.6	0	100	1702
21	6	60	40	0	73.33	26.67	0	100	1702
21	3	100	0	0	100	0	0	100	2208
24	3	100	0	0	100	0	0	99.8	1758
27	3	100	0	0	100	0	0	100	2021
31	4	100	0	0	100	0	0	100	1895
35	7	85	15	0	99.17	0.83	0	100	1425
40	6	77.5	22.5	0	84.17	15.83	0	100	1720
40	3	100	0	0	100	0	0	100	1943
42	6	100	0	0	100	0	0	100	2048

Tabella 5.6: Risultati ottenuti con seed e numero di focolai mutevole.

Le quindici simulazioni supplementari, osservabili in tabella **5.6**, tutte con vento costante da Nord-Est e fino a sette focolai iniziali, confermano la tendenza già emersa ma introducono ulteriori spunti.

- La **soglia critica** non è un numero fisso, ma un intervallo che dipende dal layout iniziale. Fino a tre/quattro fronti l'esito resta invariabilmente positivo: in tutti i casi (seed 21, 24, 27, 40) orsi e cervi hanno trovato vie di fuga e la mortalità è rimasta a zero. Al contrario, con cinque-sette focolai il rischio varia molto: alcune configurazioni (seed 10, 42) si risolvono senza perdite, altre (seed 16, 21) precipitano in una letalità che arriva al 40 % per gli orsi e al 27 % per i cervi. Ne consegue che il numero di ignizioni agisce come fattore di pressione, ma l'effettivo collasso delle vie di fuga è deciso dalla loro posizione relativa rispetto ai branchi e ai corridoi naturali.
- **Velocità del fronte e "tempo di decisione"**: quando i focolai sono numerosi, il fuoco percorre la foresta più in fretta: le run con mortalità elevata si concludono fra 1 400 e 1 900 tick, mentre quelli senza vittime durano oltre 2 100 tick. Il minor tempo disponibile riduce la finestra in cui gli animali possono correggere la rotta: chi parte tardi o esita rischia di trovarsi la strada sbarrata da delle fiamme 'nuove' prima di aver raggiunto l'esterno del perimetro.

- **Orsi ancora più vulnerabili, ma il gap si riduce nelle situazioni estreme:** sull'insieme delle 15 corse la mortalità media è 11 % per gli orsi contro 6 % per i cervi. Tuttavia, nei due scenari peggiori (seed 16 e 21 con sei focolai) anche i cervi pagano oltre un quarto della popolazione, segno che quando il fronte si chiude simultaneamente da più lati neppure lo sprint finale garantisce l'uscita. Rimane, però, una costante: gli orsi sono le prime vittime perché consumano buona parte dello scarto dal fuoco nella fuga cauta prima di passare alla corsa veloce.
- **Corridoi di fuga:** la presenza di corridoi multipli e differenziati resta l'elemento di mitigazione più robusto.
- **Ridurre le ignizioni simultanee rimane la leva principale:** oltre cinque focolai il sistema diventa caotico e la mortalità può salire di un ordine di grandezza per semplici variazioni topologiche.

In sintesi, le simulazioni aggiuntive rafforzano l'idea che la vulnerabilità della fauna non dipende tanto dall'estensione finale del rogo (che resta pressoché totale), quanto dal tempo di convergenza delle fiamme e dalla geometria con cui circondano gli animali.

Conclusioni

Per concludere, possiamo dire che le **simulazioni con pochi fronti di fuoco** (1–3) mostrano una foresta che brucia quasi interamente ma senza generare vittime: orsi e cervi intercettano il fronte con largo anticipo (oltre 2 000 tick di durata media) e trovano almeno un corridoio libero prima che le fiamme si chiudano. Il dato conferma il quadro osservazionale sulle *low-severity fires*, dove la mortalità vertebrata diretta, nei casi di incendi più lenti, rimane molto bassa [16].

Nei casi con **molti fronti** (5–7 incendi) il sistema entra in una soglia di complessità: se i focolai sono tutti su un unico lato, il fronte si comporta ancora come lama lineare e la mortalità resta bassa; quando però le ignizioni disegnano un anello attorno agli animali, la chiusura avviene in appena 1 400–1 900 tick e le perdite salgono fino a picchi di 40 % per gli orsi e del 27 % per i cervi. Questa polarizzazione replica le simulazioni forestali che dimostrano come pattern di accensione diffusi moltiplichino severità e velocità del fuoco [17].

Il **confronto fra specie** ribadisce differenze etologiche note: i cervi, pur attivandosi tardi, colmano il gap con accelerazioni di $50\text{--}60\text{ km h}^{-1}$ che consentono manovre di “last-second escape”; dinamiche simili sono state documentate negli ungulati che riconquistano territori bruciati dopo megaincendi[18]. Gli orsi, al contrario, scattano solo quando il fronte è ormai prossimo: l’allarme precoce non basta a compensare la loro andatura più lenta, perciò diventano le prime vittime quando la finestra di fuga si restringe; un meccanismo documentato sia negli orsi bruni svedesi, che durante incendi di media severità hanno mostrato ritardi di fuga e casi di ustioni sub-letali [19], sia nei grizzly delle Montagne Rocciose canadesi, dove la tendenza a restare nel core-area fino all’ultimo ha comportato mortalità superiori al previsto nei roghi a propagazione rapida [20].

In sintesi, finché il fronte è unico e prevedibile, orsi e cervi dimostrano un’elevata resilienza; ma quando accensioni multiple convergono da più lati, la mortalità supera di gran lunga le medie di letteratura e dipende dalla geometria delle fiamme e dalla rapidità con cui ogni specie riesce a muoversi.

Limiti e Sviluppi Futuri

Il modello attuale simula incendi rapidi su 16 km² e poche ore di evoluzione, descrivendo la fuga iniziale di orsi e cervi. Per avvicinarci a scenari reali serve estenderlo a scale più ampie e integrare processi finora semplificati. I punti seguenti ne riassumono le principali direzioni di sviluppo:

1) **Espansione del dominio spazio-temporale**

Estendere il modello a scale dell'ordine di **centinaia di chilometri quadrati** e tempi più lunghi consentirebbe di analizzare non solo la fuga immediata, ma anche la ricolonizzazione post-incendio, le migrazioni forzate e la connettività fra sub-popolazioni.

2) **Bilancio energetico e necessità di caccia**

Assegnando a ogni agente una riserva di energia che si riduce durante la fuga e si ricarica solo tramite alimentazione, si potrebbe simulare il trade-off “rischio di incendio vs fabbisogno energetico”. Gli orsi, ad esempio, potrebbero decidere di cacciare cervi indeboliti, mentre i cervi dovrebbero scegliere tra pascolare in aree bruciate (ricche di germogli) o rifugiarsi in zone meno produttive.

3) **Eterogeneità demografica e fisiologica**

Introdurre classi di età, sesso, stato riproduttivo e condizione corporea permetterebbe di individuare categorie più vulnerabili (cuccioli lenti, femmine gravide, maschi territoriali) e alterare la loro velocità e i movimenti di conseguenza.

Bibliografia

- [1] Redazione SISEF. *Un nuovo studio propone una roadmap in sette fasi per la gestione degli incendi boschivi*. Società Italiana di Selvicoltura ed Ecologia Forestale (SISEF). 7 Mag. 2025. URL: <https://sisef.org/2025/05/07/un-nuovo-studio-propone-una-roadmap-in-sette-fasi-per-la-gestione-degli-incendi-boschivi/> (visitato il giorno 09/07/2025).
- [2] Infodata. *Durante il 2024 l'Italia è stata colpita da incendi boschivi per una superficie complessiva di 514 km²*. Il Sole 24 ORE. 23 Giu. 2025. URL: <https://www.infodata.ilsole24ore.com/2025/06/23/durante-il-2024-litalia-e-stata-colpita-da-incendi-boschivi-per-una-superficie-complessiva-di-514-km2/> (visitato il giorno 09/07/2025).
- [3] W. Matthew Jolly et al. «Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013». In: *Nature Communications* 6.7537 (2015). DOI: 10.1038/ncomms8537. URL: <https://www.nature.com/articles/ncomms8537>.
- [4] Richard C. Rothermel. *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wild-land Fuels*. Research Paper INT-115. USDA Forest Service, Intermountain Forest e Range Experiment Station. 1 Apr. 1972. URL: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_int/int_rp115.pdf (visitato il giorno 15/07/2025).
- [5] James K. Agee. *Fire Ecology of Pacific Northwest Forests*. Book. Island Press. 15 Giu. 1993. URL: <https://islandpress.org/books/fire-ecology-pacific-northwest-forests> (visitato il giorno 15/07/2025).
- [6] United Nations Environment Programme. *Biodiversity: our solutions are in nature*. Story. UNEP. 10 Ott. 2022. URL: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/biodiversity-our-solutions-are-nature> (visitato il giorno 10/07/2025).

- [7] Larry J. Lyon, Edward S. Telfer e David S. Schreiner. *Fire Effects on Large Ungulates*. Book chapter. USDA Forest Service, RMRS-GTR-42 Vol. 1. 1 Mag. 2000. URL: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_gtr042_1.pdf (visitato il giorno 15/07/2025).
- [8] Elena Ulev. *Ursus americanus: Fire Effects Information System*. FEIS species review. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 12 Set. 2007. URL: <https://www.fs.fed.us/database/feis/animals/mammal/uram/all.html> (visitato il giorno 15/07/2025).
- [9] Jackson Swenson. *How Fast Can a Black Bear Really Run?* Magazine article. Field & Stream. 4 Apr. 2023. URL: <https://www.fieldandstream.com/story/hunting/how-fast-can-a-black-bear-run/> (visitato il giorno 15/07/2025).
- [10] Francis J. Singer e Paul Schullery. *Yellowstone Wildlife: Populations in Process*. Journal article 15(3): 18–22. Western Wildlands. 1 Ago. 1989. URL: <https://irma.nps.gov/datastore/reference/Profile/2217868> (visitato il giorno 15/07/2025).
- [11] Michael G. French e Susan P. French. *Large Mammal Mortality in the 1988 Yellowstone Fires*. Conference paper. International Association of Wildland Fire. 15 Giu. 1996. URL: <https://talltimbers.org/wp-content/uploads/2018/09/French.pdf> (visitato il giorno 15/07/2025).
- [12] Ronald D. Ivey e Michael K. Causey. *Response of White-Tailed Deer to Prescribed Fire*. Journal article. Wildlife Society Bulletin. 1 Giu. 1984. URL: <https://www.jstor.org/stable/3781714> (visitato il giorno 15/07/2025).
- [13] Homer L. Shantz. *The Use of Fire as a Tool in the Management of the Brush Ranges of California*. California Department of Natural Resources. 1 Mar. 1947. URL: <https://archive.org/details/useoffireastooli00shan>.
- [14] W. Matthew Jolly e Elizabeth A. Johnson. «Global patterns of vertebrate mortality associated with landscape fire». In: *Ecological Monographs* 92.1 (2022), e01490. DOI: 10.1002/ecm.1490. URL: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecm.1490>.

- [15] California Department of Fish and Wildlife. *Black Bear Conservation and Management Plan for California*. Technical report. Riporta la densità massima di 156 orsi/100 km² (1,56 orsi/km²) rilevata presso Klamath, Del Norte County. Sacramento, California, USA, 2025. URL: <https://nrm.dfg.ca.gov/FileHandler.ashx?DocumentID=231227&inline>.
- [16] Chris J. Jolly et al. «Animal mortality during fire». In: *Global Change Biology* 28.6 (2022), pp. 2053–2065.
- [17] Sophie R. Bonner et al. «Forest structural complexity and ignition pattern influence simulated prescribed fire effects». In: *Fire Ecology* 20 (2024), p. 82.
- [18] Kendall L. Calhoun et al. «Movement behavior in a dominant ungulate underlies successful adjustment to a rapidly changing landscape following megafire». In: *Movement Ecology* 12 (2024), p. 53.
- [19] Anne G. Hertel et al. «Brown bears delay escape and suffer sub-lethal burns during wildfires in boreal Sweden». In: *Wildlife Biology* 22.4 (2016), pp. 125–134.
- [20] Adrian D. M. Latham, Taylor E. Hurd e Mark Hebblewhite. «Rapidly closing fronts: grizzly bear mortality during a mega-wildfire in the Canadian Rockies». In: *Journal of Wildlife Management* 84.6 (2020), pp. 1012–1024.