

La caccia nel Serengeti

Simulazione computazionale della caccia di leoni e leonesse nel Serengeti
rispetto a un branco di gnu

Corso:

Sistemi Complessi:
Modelli e Simulazione

A cura di:

Marco Corbetta (886091)

Matteo Comi (886035)

Anno Accademico 2024-2025

Indice

1	Obiettivi dell'elaborato	1
1.1	Panoramica	1
1.2	Obiettivi	1
1.3	Ambiente di modellazione e simulazione	1
2	Stato dell'Arte	2
2.1	Sistemi Complessi	2
2.2	Automi cellulari (CA)	2
2.3	Agenti e sistemi multiagente	3
2.3.1	Agenti	3
2.3.2	Sistemi multiagente	3
2.4	Boids-Flocking	4
2.5	Descrizione degli gnu	4
2.5.1	Territorio	4
2.5.2	Motivazioni dell'abbondanza di gnu nel Serengeti	5
2.5.3	Cause di morte	6
2.6	Descrizione dei Predatori	7
2.6.1	Leoni	7
2.6.2	Leonesse	8
3	Descrizione del modello	10
3.1	Ambiente di Simulazione	10
3.1.1	Zona del Fiume	10
3.1.2	Condizioni osservate	11
3.2	Agenti e ambiente	11
3.2.1	Agenti della simulazione	11
3.2.2	Caratterizzazione gnu	12
3.2.3	Caratterizzazione Leoni	15
3.2.4	Caratterizzazione delle leonesse	17
4	Simulazioni	20
4.0.1	Caccia diurna con leone solitario in erba bassa	20
4.0.2	Caccia diurna con leone solitario in erba alta	21
4.0.3	Caccia notturna con leone solitario	21
4.0.4	Caccia diurna con gruppo di leonesse in erba bassa	23
4.0.5	Caccia diurna con gruppo di leonesse in erba alta	23
4.0.6	Caccia notturna con gruppo di leonesse	23
5	Conclusioni	25
	Bibliografia	26

1. Obiettivi dell'elaborato

1.1 Panoramica

Ogni anno, oltre un milione di gnu intraprendono la celebre Grande Migrazione nel Serengeti, attraversando vaste pianure in cerca di pascoli freschi e affrontando passaggi critici come l'attraversamento del fiume Mara [36]. Questi momenti di aggregazione diventano occasione preziosa per i predatori: leoni e leonesse sfruttano strategicamente la corrente del fiume, la vegetazione circostante e il caos creato dalla mandria per organizzare imboscate efficaci, concentrando i loro attacchi sugli individui più vulnerabili, isolati o indeboliti dal lungo viaggio. Le carcasse degli gnu non rappresentano soltanto una risorsa fondamentale per i carnivori, ma alimentano anche complessi ecosistemi acquatici, restituendo nutrienti vitali alle acque e sostenendo così la biodiversità dell'intera regione [2].

1.2 Obiettivi

Per questo progetto, l'obiettivo è simulare gli attacchi da parte di leoni e leonesse a un branco di gnu che si avvicina al fiume per abbeverarsi. In particolare, si andrà a studiare il tasso di successo in relazione al tipo di vegetazione presente e al momento della giornata, distinguendo tra giorno e notte.

1.3 Ambiente di modellazione e simulazione

Come ambiente di sviluppo e simulazione è stato scelto NetLogo [46], poiché offre un linguaggio di programmazione ad alto livello, semplice da comprendere e intuitivo da utilizzare. La scelta è ricaduta su NetLogo principalmente per la sua capacità di visualizzare in tempo reale gli eventi simulati e per la possibilità di modificare facilmente diversi parametri del sistema. Queste caratteristiche si sono rivelate particolarmente utili per analizzare e comprendere a fondo la dinamica del caso di studio (Fig: 1.1).

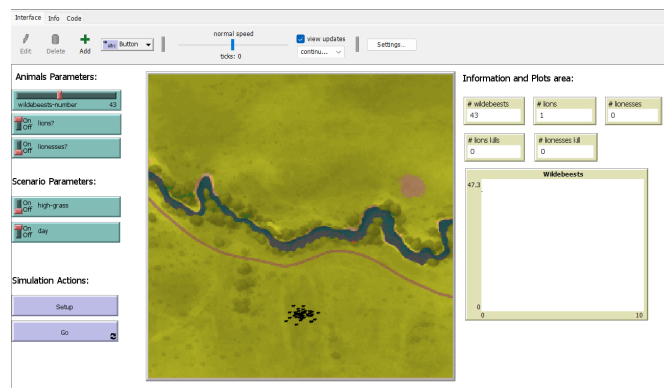


Figura 1.1: Ambiente di sviluppo Netlogo

2. Stato dell'Arte

2.1 Sistemi Complessi

Un sistema complesso è caratterizzato dalla presenza di molteplici elementi che interagiscono tra loro secondo relazioni causa-effetto non lineari, spesso comprensibili pienamente solo dopo che si sono verificate [7]. Tali interazioni non sono sempre facilmente prevedibili o replicabili, poiché influenzate da numerose variabili che evolvono dinamicamente nel tempo [12, 5].

I sistemi complessi sono tipicamente formati da componenti che possono adattarsi in modo autonomo ai cambiamenti ambientali, generando comportamenti emergenti e auto-organizzativi [7, 6].

Questi sistemi presentano una dinamica fortemente non lineare, per cui risulta particolarmente efficace lo studio mediante modelli di simulazione [6, 12, 5]. Attraverso la simulazione, infatti, è possibile esplorare diverse traiettorie evolutive e osservare come il sistema potrebbe reagire a specifiche condizioni ambientali o a interazioni tra i suoi elementi [5].

Il caso oggetto della presente analisi rappresenta un esempio significativo di sistema complesso, poiché è costituito da numerosi individui interconnessi che interagiscono continuamente, auto-organizzandosi per raggiungere uno scopo comune [7, 15]. Le molteplici interazioni, i diversi scenari possibili e l'adattamento continuo a variazioni ambientali o comportamentali rendono questo sistema particolarmente adatto a essere studiato tramite un approccio basato sulla simulazione [6, 5], offrendo così importanti opportunità per comprenderne a fondo il funzionamento.

2.2 Automi cellulari (CA)

Un automa cellulare (CA) è un modello matematico ideato originariamente da Stanislaw Ulam e John von Neumann negli anni Quaranta presso il Los Alamos National Laboratory [38, 24] per descrivere sistemi complessi come sistemi dinamici discreti. In questa definizione, la complessità emerge dall'interazione di entità molto semplici, ciascuna governata da poche regole locali.

Un CA è strutturato come una griglia di celle (bidimensionali o di altra dimensione finita), dove ogni cella occupa una singola posizione spaziale e assume uno stato scelto da un insieme finito – ad esempio “vivo/morto”, un colore, o un valore booleano [3]. Dopo una condizione iniziale a $t = 0$, tutte le celle aggiornano il proprio stato simultaneamente secondo una regola che dipende esclusivamente dal loro stato attuale e da quello delle celle vicine [3].

Ogni cella ha un vicinato, l'insieme delle celle rilevanti per il suo aggiornamento. I due schemi più noti sono:

- Vicinato di von Neumann: include le quattro celle ortogonalmente adiacenti (nord, sud, est, ovest) [40, 41].
- Vicinato di Moore: comprende le otto celle immediatamente circostanti, aggiungendo anche le diagonali [19].

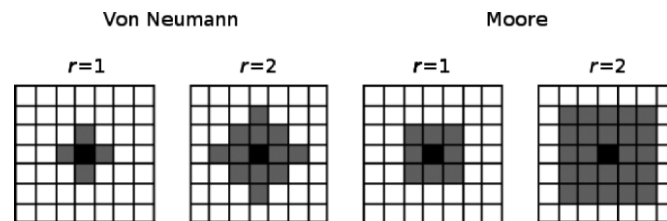


Figura 2.1: Vicinato di Von Neumann e Vicinato di Moore

2.3 Agenti e sistemi multiagente

2.3.1 Agenti

Un agente in un modello di simulazione rappresenta una singola entità autonoma, capace di prendere decisioni in modo indipendente. In simulazioni collettive, ogni agente equivale a un'unità di comportamento, ad esempio uno stormo di uccelli o un branco di gnu [16].

Nel contesto di molte simulazioni, gli agenti sono descritti da due vettori fondamentali: posizione e velocità, assumendo così una natura puntiforme, anche se possono essere visualizzati con forme diverse. In NetLogo, un agente tipo “turtle” ha come forma predefinita un triangolo isoscele, con la direzione della sua velocità allineata al vertice del triangolo [34, 23].

La posizione dell'agente corrisponde al centro geometrico del triangolo, mentre il vettore velocità punta verso la “punta”, indicandone l'orientamento. Ogni agente interagisce con altri attraverso il concetto di vicinato spaziale, che consente di identificare le unità vicine rilevanti per le regole di comportamento locali [1, 16].

In questo progetto, gli agenti che rappresentano gli gnu sono stati visualizzati utilizzando la forma predefinita “cow”, mentre quelli che rappresentano i leoni sono stati modellati tramite una forma personalizzata denominata “lion”, aggiunta alla libreria di NetLogo tramite l'editor delle forme.

2.3.2 Sistemi multiagente

Un sistema multi-agente (MAS) è composto da diversi agenti autonomi inseriti in un ambiente specifico (per esempio, una griglia di simulazione), nei quali interagiscono in modo strutturato per ottenere risultati collettivi [47, 17]. Questi modelli trovano applicazione in ambiti naturali, come reti di cellule o colonie animali, oltre che in contesti sociali quali gruppi o comunità umane [4].

I sistemi multi-agente permettono di testare diverse strategie, regole decisionali e flussi informativi senza impattare sul sistema reale. Offrono inoltre la possibilità di comprendere meglio la struttura e le dinamiche interne grazie alle simulazioni controllate [17, 13].

Uno dei principali punti di forza dei MAS è la loro capacità di generare output interpretabili anche da chi non conosce a fondo le dinamiche sottostanti. Grazie a una modellazione modulare e parametrica, è possibile affinare la rappresentazione della realtà, rendendola sufficientemente accurata: basta modificare proprietà e comportamento degli agenti o introdurre tipi diversi nel modello [17, 9].

2.4 Boids-Flocking

Uno dei metodi più diffusi per simulare il comportamento collettivo di animali in movimento e utilizzato anche in questo progetto, noto come flocking [30], è il modello Boids, sviluppato da Craig Reynolds nel 1987 [28]. Questo modello fu il primo a generare simulazioni convincenti del moto coordinato di stormi di uccelli, banchi di pesci e, più in generale, di gruppi di animali che manifestano comportamenti di aggregazione.

L'algoritmo si basa sull'interazione locale tra gli individui, attraverso l'applicazione di tre semplici regole che regolano il comportamento di ciascun agente:

- Separation: evitare collisioni con i vicini più prossimi;
- Alignment: allineare la propria direzione di movimento con quella degli altri;
- Cohesion: avvicinarsi al centro del gruppo circostante.

È stato adottato questo metodo per impedire che gli gnu, muovendosi in branco, si sovrapponevano graficamente nella simulazione, dando l'impressione di un singolo individuo. Inoltre, era necessario che ogni gnu si dirigesse verso un punto diverso del fiume per abbeverarsi, in modo da riflettere un comportamento più realistico e, al tempo stesso, aumentare la probabilità di attivare la reazione del leone nascosto in agguato.

2.5 Descrizione degli gnu

2.5.1 Territorio

Lo gnu, o gnu striato (*Connochaetes taurinus*), è un ungulato di grandi dimensioni diffuso nell'Africa meridionale e orientale. Per motivi legati all'alimentazione, in particolare alla ricerca di erba da brucare, predilige come habitat le ampie pianure. La popolazione di gnu più numerosa al mondo si trova nella regione del Serengeti, situata tra il Kenya e la Tanzania, dove si contano oltre un milione di esemplari (circa 1.300.000 migratori e 200.000 stanziali [11]). Per questo motivo si è scelto di analizzare proprio tale area.

Le condizioni climatiche del Serengeti sono generalmente suddivise in diverse stagioni, determinate dalle precipitazioni e dal periodo dell'anno.

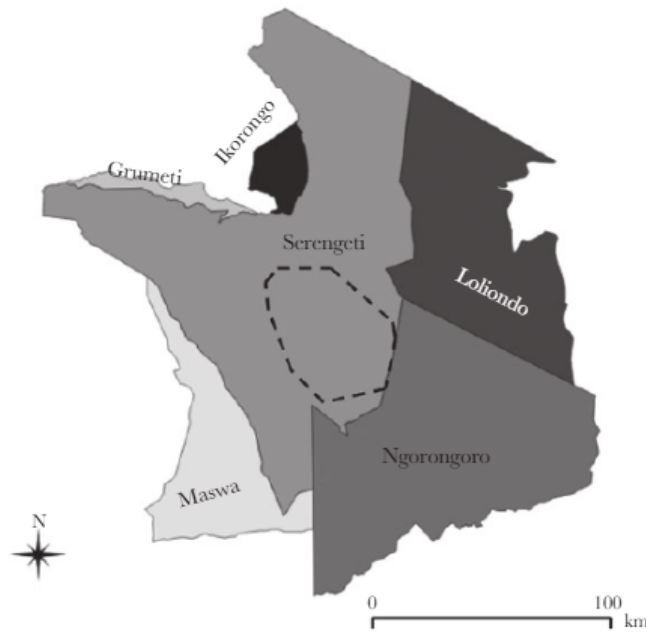


Figura 2.2: Mappa dell'area di studio

2.5.2 Motivazioni dell'abbondanza di gnu nel Serengeti

L'elevata abbondanza di gnu nel Serengeti è un fenomeno che può essere spiegato solo parzialmente attraverso alcune peculiarità biologiche della specie, che conferiscono un vantaggio competitivo rispetto ad altri erbivori. Tra questi fattori si annoverano la nascita sincrona dei vitelli, che avviene in concomitanza con i periodi di massima disponibilità stagionale di cibo e in aree relativamente lontane dalle concentrazioni di predatori, nonché una spiccata selettività alimentare orientata verso erbe di alta qualità, su cui gli gnu mostrano i più elevati tassi di assunzione. Tuttavia, tali caratteristiche non bastano a giustificare da sole la straordinaria densità della specie, poiché ci si aspetterebbe di osservare popolazioni simili anche in altri ecosistemi africani, cosa che non si verifica.

Un elemento chiave risiede nelle specifiche condizioni ecologiche del Serengeti, dove l'elevata fertilità del suolo e le abbondanti precipitazioni contribuiscono alla formazione di vastissime aree ricoperte da erba altamente nutriente. In questo contesto, la combinazione tra la dieta specializzata e le strategie riproduttive degli gnu, unite alla loro notevole capacità di compiere lunghi spostamenti, consente agli individui migratori di accedere costantemente a pascoli di qualità, riducendo al contempo l'impatto della predazione.

Inoltre, l'elevata densità di popolazione potrebbe favorire un meccanismo di retroazione positiva (feedback positivo), attraverso il quale il pascolamento intensivo stimola un'ulteriore crescita delle piante e una maggiore concentrazione proteica nell'erba, migliorando così la qualità del foraggio disponibile.

In sintesi, l'abbondanza degli gnu nel Serengeti è il risultato di un'interazione favorevole tra le caratteristiche ecologiche dell'ambiente e le specifiche adattative della specie, rendendo tale ecosistema particolarmente idoneo alle loro esigenze [14].

2.5.3 Cause di morte

Esistono numerose cause di mortalità per gli gnu, che spaziano da fattori naturali e predatori. Sebbene non sia disponibile un dato complessivo sul numero di decessi, è possibile stimarne l'entità partendo dai rapporti tra cause di morte e caratteristiche delle vittime, desunti dalle osservazioni di Mduma [18].

Per quanto riguarda la distribuzione per età, circa il 50 % dei decessi riguarda vitelli o individui di età inferiore ai due anni, mentre la restante metà interessa esemplari adulti. Analizzando invece la mortalità in relazione al sesso, emerge una prevalenza significativa di decessi tra i maschi adulti rispetto alle femmine.

Tuttavia, la classificazione più rilevante per il presente lavoro riguarda la distribuzione per causa di morte (Fig: 2.3). Dai dati analizzati risulta che circa il 74% delle morti non è imputabile alla predazione. Il restante 24% è invece attribuibile a predatori, con le seguenti percentuali: leoni (8,1%), iene (7,3%), ghepardi (0,8%) e altri predatori (8%). Una minima parte è riconducibile a cause miste.

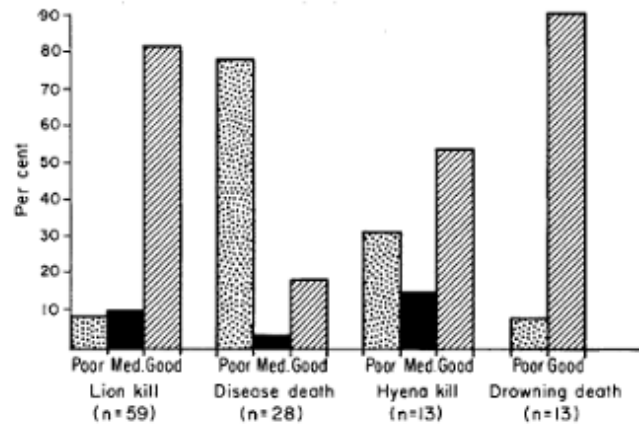


Figura 2.3: Percentuale e causa di morte di un campione di gnu di 113 esemplari [32]

2.6 Descrizione dei Predatori

La predazione gioca un ruolo fondamentale nella regolazione delle dinamiche delle popolazioni animali. Nel Serengeti, tra i numerosi predatori presenti, spiccano in particolare i leoni e le leonesse che prediligono cacciare soprattutto lungo le sponde del fiume, dove possono sfruttare la vegetazione e l'effetto sorpresa [8].

2.6.1 Leoni

Nel Serengeti, i leoni possono essere suddivisi in due principali categorie comportamentali:

- Residenti, che stazionano stabilmente all'interno di un'area geografica relativamente ristretta, dove possono restare per un anno o anche per tutta la vita;
- Nomadi, che si spostano su vaste porzioni di territorio, spesso seguendo le rotte migratorie delle prede.

Queste due condizioni non sono fisse né mutualmente esclusive: un leone nomade può stabilirsi in un territorio diventando residente, così come un residente può abbandonare la propria area e assumere un comportamento nomade in risposta a cambiamenti ambientali o sociali [32].

Dispersione dei leoni

Il Serengeti ospita la più densa popolazione di leoni al mondo, stimata oggi in circa 3 000–4 000 individui disposti in oltre 250-300 branchi su un'area di 30 000 km² [37]. All'interno di questa metapopolazione, una quota significativa (soprattutto maschi subadulti) attraversa una fase nomadica di dispersione, durante la quale lascia il branco natale alla ricerca di un territorio o di un branco da conquistare.

Uno studio di lungo periodo (1974-2012) nella parte centrale del parco ha registrato 471 coalizioni di maschi nomadi, pari a 796 individui: in media circa 20 maschi nomadi all'anno attraversano l'area di studio, sebbene il flusso sia diminuito negli ultimi decenni a causa della pressione antropica ai confini del parco [27]. Il rapporto tra maschi nomadi e totali varia di anno in anno, ma si aggira intorno al 16-17 % della popolazione maschile in età riproduttiva.

Caccia dei leoni

La popolazione delle prede nel Serengeti è composta da specie residenti, semi-migratorie e migratorie. Tra le prede predilette dai leoni figurano in particolare gli gnu che, durante il periodo compreso tra luglio e ottobre (fase corrispondente all'attraversamento dei fiumi) determinano un notevole incremento della disponibilità di potenziali vittime per i predatori.

I leoni mostrano una marcata preferenza per gli gnu migratori [35], come evidenziato anche in Fig. 2.4. Questi vengono spesso attesi in aree strategiche lungo le loro rotte di migrazione, in particolare in corrispondenza del loro arrivo a luglio [25, 22].

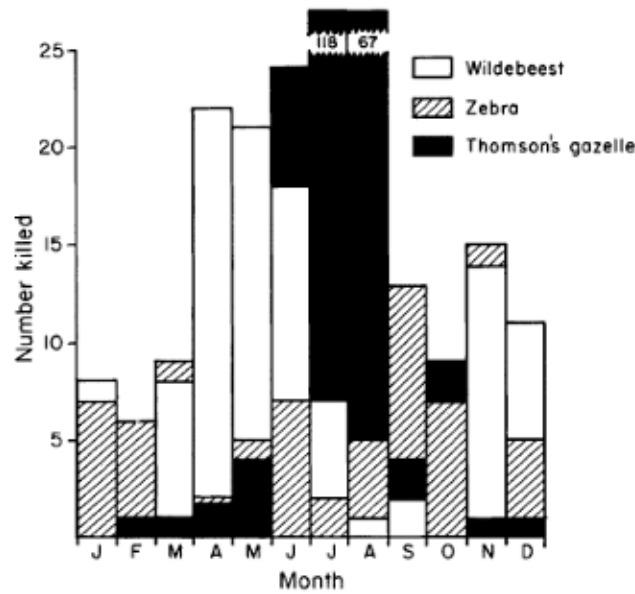


Figura 2.4: Numero di morti per mese causati dai leoni

I predatori tendono quindi a seguire i movimenti stagionali delle mandrie per massimizzare le opportunità di caccia. Tuttavia, nel caso specifico degli gnu, i leoni, soprattutto quando isolati, mostrano una certa cautela nell’attaccarli a causa della loro stazza e della potenziale pericolosità nel confronto diretto. L’esito di una caccia dipende sia dalla reazione della preda sia dalla strategia del leone. Sebbene dotato di artigli e denti letali, il leone è veloce solo su brevi distanze: può compiere rapidi scatti ma non sostenere corse lunghe, a differenza degli gnu che, anche da cuccioli, raggiungono velocità fino a 80 km/h [44].

Finché è visibile, il leone viene spesso ignorato dalle prede, che mantengono la calma e un certo grado di vigilanza. La risposta degli erbivori dipende da distanza, numero di predatori e direzione di avvicinamento. Se il leone si ferma o li osserva, gli animali tendono ad allontanarsi di poco, mantenendo il contatto visivo.

Tassi di successo delle battute di caccia

I leoni, a loro volta, conoscono i propri limiti e raramente attaccano se non vi è una reale possibilità di successo, soprattutto quando le prede sono numerose. I dati ci dicono che i leoni in attacchi solitari hanno una percentuale di successo che va dall’ **11 al 29%**, in base al tipo di vegetazione [32]. Di notte gli attacchi sono più prolifici portando a percentuali stimate intorno al **30%** [10].

2.6.2 Leonesse

Le leonesse del Serengeti si distinguono per una marcata fedeltà al branco natale e al territorio in cui sono nate, rimanendo residenti nella stessa area per gran parte della loro vita, a differenza dei maschi che spesso assumono comportamenti nomadi [26, 20].

Inoltre, sviluppano legami sociali stabili con le altre femmine del gruppo, che si sono dimostrati determinanti per la loro sopravvivenza e il successo riproduttivo [39].

Le leonesse collaborano anche nella difesa del territorio e nella caccia, sfruttando strategie coordinate e cure cooperative verso i cuccioli [42].

Caccia delle leonesse

Le femmine sono il motore predatorio dei branchi: lo 75 %-80 % delle uccisioni è opera delle leonesse, mentre i maschi adulti si concentrano soprattutto sulla difesa dei cuccioli e del territorio.

Durante gli inseguimenti cooperativi le leonesse formano squadre di 2-6 individui che si dispongono in ruoli differenziati (“wings”, “centres”) per aggirare o spingere la preda verso l’agguato [32].

L’efficacia di queste strategie è evidente nei tassi di successo: sulle 1 300 cacce registrate dallo studio di lungo periodo nel Serengeti, le battute diurne guidate da un’unica leonessa si concludono positivamente solo nel 17–19 % dei casi, ma di notte la percentuale per i cacciatori solitari sale fino a circa 30 %, valore analogo a quello dei piccoli gruppi femminili. Le battute collettive (2 leonesse) restano comunque le più redditizie, superando abitualmente il 30 % di riuscita grazie al coordinamento degli attacchi laterali e all’accerchiamento delle prede più grandi come gnu e zebre.

La scelta delle specie bersaglio segue l’offerta stagionale: tra luglio e ottobre, quando le mandrie di gnu migratori attraversano i fiumi settentrionali, le leonesse si appostano lungo corridoi di passaggio e aumentano la frequenza degli agguati notturni, sfruttando l’oscurità e l’alta densità di ungulati per massimizzare le opportunità di predazione. In anni di scarsa copertura erbosa, invece, le cacce si spostano verso habitat con maggiore vegetazione che consenta avvicinamenti più discreti.

Tassi di successo delle battute di caccia

Come detto prima, i rilevamenti a lungo termine del *Serengeti Lion Project* (oltre 1 300 tentativi di predazione) mostrano che i gruppi di 2–6 leonesse portano a termine con successo circa il **30 %** degli attacchi alle gnu, contro il 17–19 % delle femmine solitarie. Gli attacchi possono essere di due tipi: imboscata e inseguimento.

- **Imboscata:** nelle cacce di gruppo la riuscita sale al **38 %** e oltre il 70 % delle uccisioni avviene con questa modalità [33].
- **Inseguimento:** l’esito positivo scende al 13–15 %; quando la preda viene comunque raggiunta nella “rush window” finale, la probabilità di abbattimento per gnu adulti oscilla fra il **26 e il 32 %**.

Nelle ore di buio la copertura visiva ridotta incrementa l’efficienza complessiva: le stime del *Lion Project* riportano un tasso medio di **35 %** per i gruppi (con imboscate intorno al 40 % e inseguimenti che raddoppiano a 20–25 %) [10]. Analisi spaziali successive confermano che, proprio di notte, le leonesse scelgono micro-habitat con scarpate, affioramenti rocciosi o erba alta per massimizzare la “catchability” della preda.

3. Descrizione del modello

3.1 Ambiente di Simulazione

In questo studio si è scelto di simulare la fase di caccia dei leoni agli gnu nel Serengeti, con particolare attenzione al momento in cui gli gnu si radunano lungo il fiume Grumeti per abbeverarsi, prima di affrontare la traversata. A tal fine è stato sviluppato un ambiente di simulazione in NetLogo in grado di rappresentare in modo realistico questa dinamica cruciale dell'ecosistema (Fig: 3.2).

3.1.1 Zona del Fiume

Nel Serengeti scorrono diversi corsi d'acqua, tra cui il fiume Grumeti, come mostrato nella figura 3.1. Ci siamo concentrati sul fiume Grumeti in quanto rappresenta uno dei principali corsi d'acqua nella "Western Corridor" del Serengeti, giocando un ruolo cruciale durante la Grande Migrazione: migliaia di gnu vi si fermano fra maggio e agosto per dissetarsi e affrontare la pericolosa traversata[43] (Fig:3.3, 3.4).



Figura 3.1: Fiume Grumeti visto dall'alto

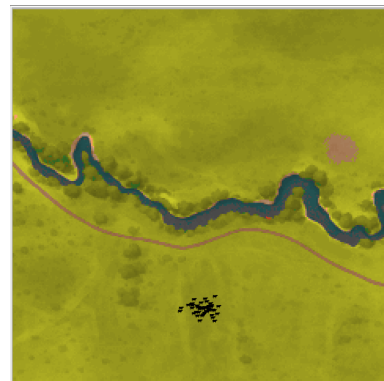


Figura 3.2: Fiume Grumeti visto dalla simulazione



Figura 3.3: Gnu che bevono sulle sponde del fiume Grumeti.

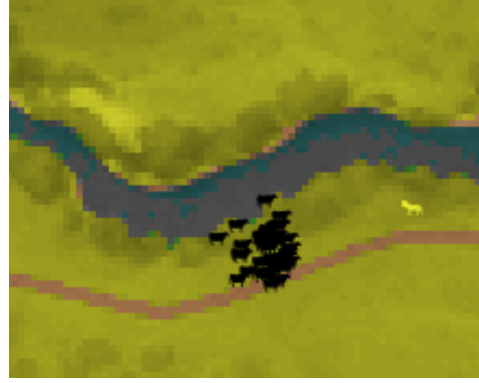
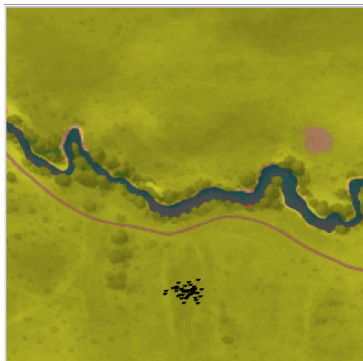


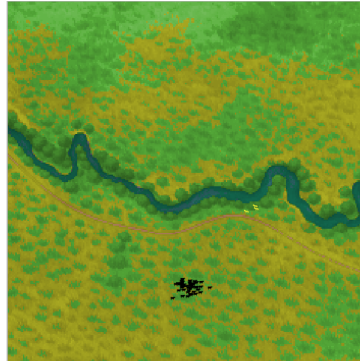
Figura 3.4: Gnu che bevono sulle sponde del fiume Grumeti nella simulazione.

3.1.2 Condizioni osservate

Per il nostro studio sono stati considerati tre diversi scenari ambientali in cui si verificano gli attacchi dei predatori al branco di gnu: ambiente diurno con erba bassa, ambiente diurno con erba alta e ambiente notturno.



Giorno – Erba bassa



Giorno – Erba alta



Notte

Figura 3.5: Rappresentazione dei tre biomi considerati nello studio

3.2 Agenti e ambiente

3.2.1 Agenti della simulazione

Gli agenti utilizzati per la nostra simulazione appartengono a tre categorie ben distinte:

- **Gnu**
- **Leoni**
- **Leonesse**

Ciascuna di queste tipologie è caratterizzata da specifiche peculiarità e comportamenti, che verranno descritti nei paragrafi successivi.

3.2.2 Caratterizzazione gnu

Numero del branco

Sarà prevista la possibilità di selezionare un numero variabile di gnu compreso tra 20 e 100 unità. Tali agenti verranno rappresentati in ambiente NetLogo utilizzando la forma predefinita "cow" e colorati di nero. La simulazione si concentra sulla rappresentazione di un branco non migratorio, ovvero una configurazione stanziale tipica della stagione sedentaria, in cui il numero di individui rispecchia approssimativamente i valori compresi nell'intervallo indicato [35].

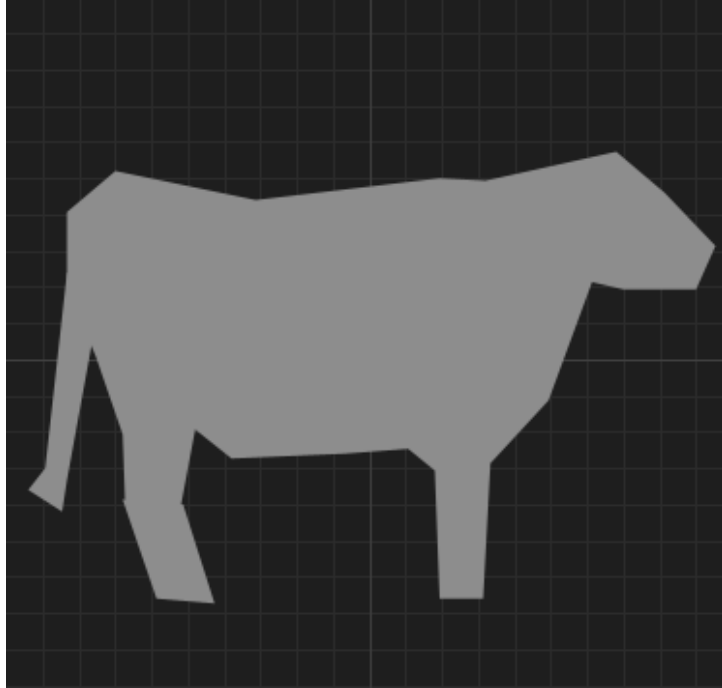


Figura 3.6: Agente che rappresenta lo gnu

Zona di partenza

Gli gnu avranno come punto di partenza una zona situata nella parte centrale e inferiore della griglia di simulazione con lo scopo poi di raggiungere il fiume per abbeverarsi.



Figura 3.7: Generazione degli gnu

Partenza verso il fiume

Una volta generati all'interno dell'area iniziale definita nella parte inferiore centrale della griglia di simulazione, gli gnu avviano il proprio movimento dirigendosi progressivamente verso il fiume. In questa fase, gli individui iniziano a raggrupparsi, dando origine a un comportamento collettivo di aggregazione. Tale dinamica è modellata secondo il principio del modello dei Boids, illustrato in precedenza, che permette di simulare in modo realistico le interazioni locali tra agenti e l'emergere di una coesione di gruppo.

Durante questa fase, ogni gnu rispetta le distanze minime per evitare sovrapposizioni e mantiene un passo coerente con quello del branco. Il risultato è uno spostamento compatto e coordinato, che riflette il comportamento tipico di un branco reale.

Abbeveraggio

Una volta giunti al fiume gli gnu si fermano per abbeverarsi, facendo dei piccoli movimenti per simulare la dinamicità del branco come mostrato in Fig. 3.4.

Risposta alla predazione

Se minacciati da un predatore, ossia quando si trovano a breve distanza da un predatore, gli gnu tenteranno una manovra evasiva per fuggire e ricongiungersi al più presto alla mandria. Questo determina l'ingresso in una fase definita "sotto attacco", in cui l'individuo designato cercherà di mettersi in salvo. Qualora la fuga non risulti sufficientemente efficace, lo gnu verrà catturato e ucciso dal predatore. In caso contrario, se la manovra evasiva avrà successo, seguirà una fase di rientro in cui l'agente tenterà di reintegrarsi nel branco.

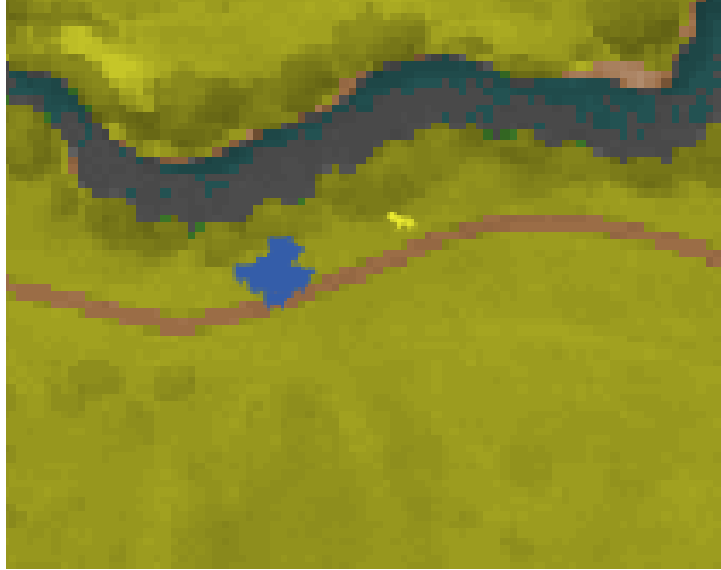


Figura 3.8: Fuga degli gnu

Stati di simulazione degli gnu

Il comportamento degli gnu è modellato tramite un automa a stati finiti, che descrive le diverse fasi di movimento e reazione al predatore. La Figura 3.9 mostra la sequenza degli stati e le possibili transizioni.

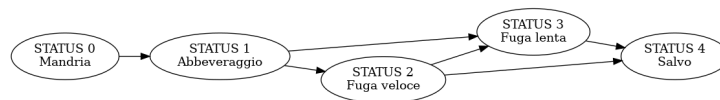


Figura 3.9: Stati degli gnu

Di seguito si fornisce una descrizione sintetica dei singoli stati:

- **STATUS 0 – Mandria:** lo gnu segue il comportamento collettivo della mandria, muovendosi verso nord in direzione del fiume.
- **STATUS 1 – Abbeveraggio:** una volta raggiunta la riva, lo gnu si muove lungo il bordo del fiume, simulando la fase di abbeveraggio. In questo stato è particolarmente vulnerabile.
- **STATUS 2 – Fuga veloce:** lo gnu percepisce un predatore molto vicino e reagisce con uno scatto rapido nel tentativo di fuggire immediatamente.
- **STATUS 3 – Fuga lenta:** se il pericolo non è imminente, lo gnu si allontana a un'andatura più contenuta rispetto allo scatto.
- **STATUS 4 – Salvo:** lo gnu ha raggiunto una distanza di sicurezza dal predatore e può considerarsi fuori pericolo.

3.2.3 Caratterizzazione Leoni

Numero dei Leoni

Abbiamo scelto di modellare il comportamento di caccia dei leoni simulando un singolo esemplare maschio che agisce in solitaria. Tale decisione si fonda su osservazioni etologiche secondo cui, in natura, i leoni maschi tendono più frequentemente a cacciare da soli piuttosto che in gruppo. Mentre le leonesse collaborano spesso in branco per aumentare l'efficacia predatoria, i maschi adottano strategie più individuali, legate alla necessità di sopravvivere autonomamente, specialmente durante fasi di nomadismo o quando non appartengono a un branco stabile [31].

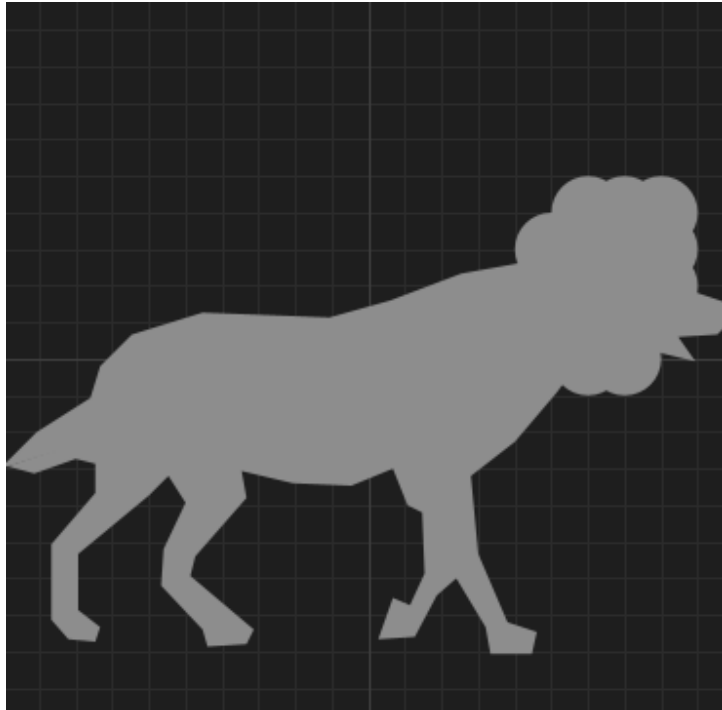


Figura 3.10: Agente che rappresenta il leone

Tecnica di Predazione

Si è scelto di simulare la tecnica di caccia di un singolo leone maschio, come anticipato nella sezione 3.2.3, basandosi sulle osservazioni di George Schaller [31]. In natura, i leoni maschi tendono spesso a cacciare da soli, soprattutto quando non fanno parte stabile di un branco. Gli gnu, solitamente distribuiti in sotto-branchi sparsi, favoriscono un comportamento di appostamento e imboscata: il leone si avvicina lentamente anche da 2 km di distanza e attacca da circa 100 metri.

Durante le fasi di abbeveramento, gli gnu abbassano il livello di vigilanza, concentrandosi sulla coesione del gruppo e offrendo quindi un'opportunità di caccia. In tali condizioni, il leone rinuncia alla fase di stalking prolungato e si limita a osservare la mandria per individuare esemplari isolati, più vulnerabili.

Per aumentare l'efficacia dell'agguato nella simulazione, si è deciso di far partire il leone già posizionato nei pressi della riva del fiume, luogo strategico dove gli gnu sono soliti transitare durante l'attraversamento. Questa scelta è coerente con quanto osservato nel comportamento naturale: diversi studi indicano che i leoni tendono ad appostarsi nei

pressi dei corsi d'acqua durante la stagione secca, attendendo il passaggio delle mandrie migratorie [21], [29].

Una volta scelta la preda, il leone si avvicina per poi scattare a massima velocità: se riesce a raggiungerla nel breve tratto iniziale, l'attacco ha successo; in caso contrario, si ritira per evitare rischi inutili. Generalmente, vengono presi di mira i maschi di gnu, più esposti per via del loro ruolo protettivo. Tuttavia, per semplicità, nella simulazione non si modellano le condizioni fisiche della preda: il leone valuta solo la distanza dagli altri esemplari. Dopo un attacco riuscito, il predatore si considera sazio e abbandona la simulazione.



Figura 3.11: Inizio simulazione, il leone è appostato al fiume in attesa che gli gnu vadano a bere

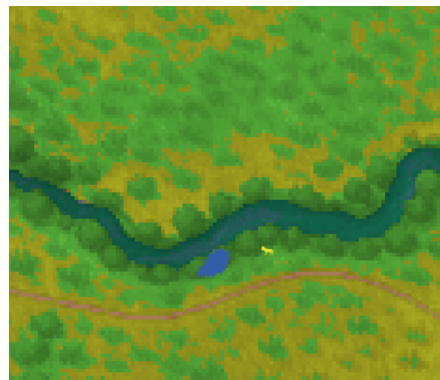


Figura 3.12: Il leone diventa giallo e inizia l'agguato, gli gnu si accorgono del leone e vanno dalla parte opposta, diventano blu

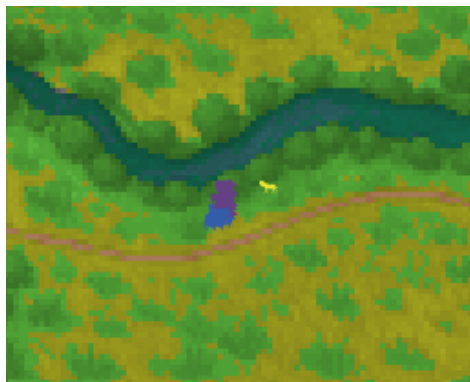


Figura 3.13: Il leone fa uno scatto per aggredire la preda, gli gnu diventano viola e scattano anche loro

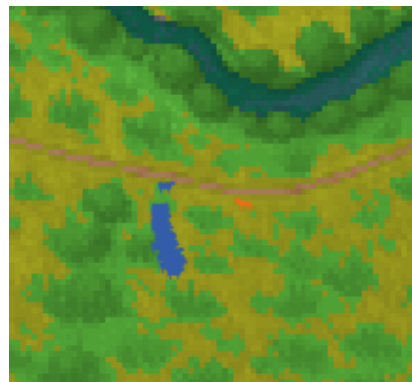


Figura 3.14: Il leone ha cacciato con successo una preda, diventa arancio e termina l'inseguimento

Stati di Simulazione per i Leoni

In questa sezione vengono riportati in formato schematico tutti gli aspetti implementativi relativi agli agenti corrispondenti ai leoni. Si illustrano i possibili stati in cui un agente può trovarsi, le transizioni tra tali stati e il significato dei diversi colori con cui verranno rappresentati durante la simulazione.

L'implementazione è stata volutamente semplificata per concentrare l'attenzione sull'aspetto ritenuto principale dello studio: la relazione tra il comportamento di caccia dei leoni e la presenza del branco di gnu. I diversi stati e transizioni descrivono il ciclo di

vita dell'agente leone all'interno della simulazione, dalla fase di ricerca della preda fino all'attacco e all'eventuale successo.

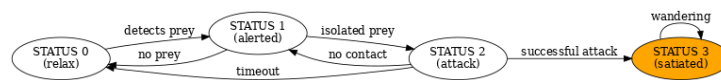


Figura 3.15: Stati possibili del leone

- Status **Relax** (0): In questo stato iniziale il leone si muove casualmente nell'ambiente, effettuando piccole rotazioni e brevi spostamenti in avanti. Rappresenta la fase in cui il predatore non ha ancora rilevato alcuna preda nelle vicinanze. Se un gnu in stato attivo entra nel raggio di rilevamento, il leone passa allo stato successivo.
- Status **Alerted** (1): Il leone ha avvistato una potenziale preda e comincia ad avvicinarsi, orientandosi nella sua direzione. Continua ad analizzare l'ambiente circostante alla ricerca di uno gnu isolato (con meno di 3 vicini entro 2 passi), considerato più vulnerabile. Se tale condizione è soddisfatta, il leone transita allo stato di attacco. In caso contrario, oppure se la preda scompare dal raggio visivo, torna allo stato di relax.
- Status **Attack** (2): Il leone inizia l'attacco vero e proprio, muovendosi rapidamente verso la preda selezionata. La velocità è inizialmente elevata, ma rallenta progressivamente in base al tempo trascorso, simulando l'affaticamento. Se riesce ad avvicinarsi a meno di un'unità di distanza dalla preda, la cattura e la elimina dalla simulazione, entrando nello stato "satiated". Se l'attacco fallisce per troppo tempo, o se la preda si allontana, torna allo stato di relax o di allerta.
- Status **Satied** (3): Dopo una caccia riuscita, il leone entra in uno stato di sazietà. Riduce la velocità di movimento e viene rappresentato con il colore arancione nella simulazione. In questa fase il leone non effettua ulteriori tentativi di caccia e si limita a vagare in modo casuale. Questo stato rappresenta il termine del ciclo comportamentale per quell'agente.

3.2.4 Caratterizzazione delle leonesse

Numero delle leonesse

Come citato nel capitolo 2, le leonesse girano in gruppi composti da 2-6 individui. Per questo motivo nella simulazione abbiamo optato per generarne uno da 3 leonesse. La patch utilizzata è la medesima del leone mostrata in Fig. 3.10

Tecnica di predazione

Come per il leone, le leonesse partono già da posizionate nei pressi della riva del fiume. Il comportamento è simile a quello descritto per il leone con la differenza che le leonesse sono in 3 e puntano tutte la stessa preda.

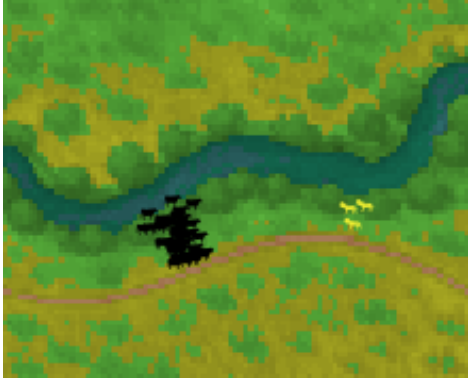


Figura 3.16: Inizio simulazione, le leonesse sono appostate al fiume in attesa che gli gnu vadano a bere

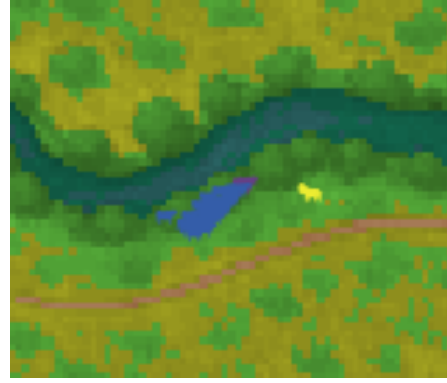


Figura 3.17: Le leonesse iniziano l'agguato, gli gnu si accorgono e vanno dalla parte opposta, diventano blu

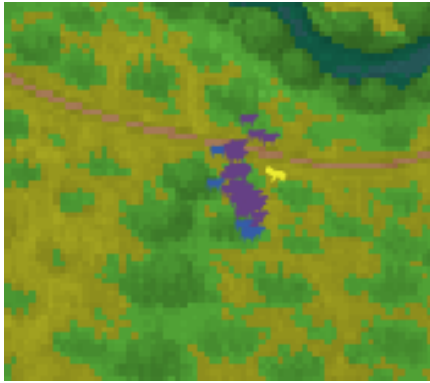


Figura 3.18: Le leonesse fanno uno scatto per aggredire la preda, gli gnu diventano viola e scattano anche loro

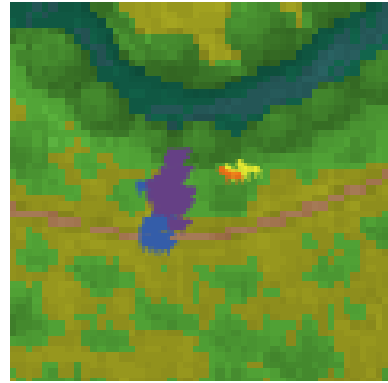


Figura 3.19: Le leonesse hanno cacciato con successo una preda, quella responsabile dell'uccisione diventa arancio e termina l'inseguimento

Stati di simulazione delle leonesse

In questa sezione riportiamo in formato scheletrico tutti gli stati possibili delle leonesse:

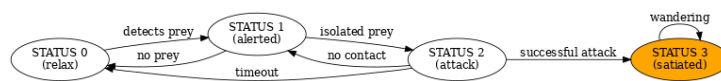


Figura 3.20: Stati possibili delle leonesse

Come si può osservare, gli stati comportamentali assunti dalle leonesse durante la simulazione corrispondono esattamente a quelli già descritti per i leoni. A differenza dei leoni, tuttavia, le leonesse operano in maniera coordinata: non agiscono individualmente o in modo indipendente, bensì come un gruppo coeso, seguendo la dinamica collettiva tipica della caccia cooperativa. Al momento dell'individuazione di una preda, una sola leonessa, la cosiddetta leader, selezionata in modo arbitrario tra gli agenti presenti, sceglie lo gnù da attaccare. Questo bersaglio viene quindi condiviso con tutte le altre leonesse.

Le transizioni di stati avvengono simultaneamente per tutte le unità coinvolte. Ciò riflette

un comportamento di caccia cooperativo, in cui l'efficacia dell'azione non dipende dal singolo individuo ma dall'efficienza del gruppo nel convergere sulla medesima preda.

Il meccanismo di aggiornamento collettivo degli stati e il puntamento unificato sullo stesso obiettivo rendono il comportamento delle leonesse il più fedele possibile alla realtà.

4. Simulazioni

In questa sezione, dopo aver studiato e progettato il comportamento predatorio dei leoni nel nostro ambiente di simulazione, saranno effettuati alcuni test volti a verificare l’impatto delle variabili ecologiche e sociali sul tasso di successo della caccia. Tali test derivano dall’analisi di dati ecologici raccolti nel Serengeti e in studi comparativi, che evidenziano come fattori quali luminosità, numero di predatori e copertura vegetale condizionino significativamente l’esito predatorio.

I test che effettueremo saranno i seguenti:

1. **Caccia diurna con leone solitario in erba bassa:** simulazione di un leone maschio che caccia individualmente, di giorno, in pianura aperta. Ci si aspetta un tasso di successo basso: **11%** [31].
2. **Caccia diurna con leone solitario in erba alta:** sfruttando la maggiore copertura offerta da erba alta, ci si attende un aumento del successo rispetto all’erba bassa, potenzialmente fino a **25–30%** [10].
3. **Caccia notturna con leone solitario:** simulazione con un singolo leone in condizioni di oscurità totale. Il tasso di successo previsto è superiore rispetto al giorno, intorno al **30%** [10].
4. **Caccia diurna con gruppo di leonesse in erba bassa:** simulazione cooperativa durante il giorno in pianura aperta. Le cacce collettive in condizioni subottimali tendono ad avere un tasso di successo medio-basso, circa **25-30%** [45].
5. **Caccia diurna con gruppo di leonesse in erba alta:** simulazione cooperativa in un ambiente con copertura vegetale significativa, durante il giorno. Sebbene le condizioni di luce riducano le probabilità rispetto alla notte, la cooperazione e l’erba alta migliorano comunque le chance rispetto alle pianure aperte. Il tasso di successo atteso è circa del **38%** [33].
6. **Caccia notturna con gruppo di leonesse:** leonesse in branco, di notte in pianura aperta. Il tasso di successo atteso è circa **40%** [10].

Queste simulazioni permetteranno di verificare se il comportamento emergente nel modello sia coerente con i dati ecologici raccolti sul campo.

4.0.1 Caccia diurna con leone solitario in erba bassa

Con questo test ci si pone l’obiettivo di simulare più attacchi di un leone solitario ad un branco di gnu in una condizione di vegetazione bassa, quindi gli gnu vedono prima il predatore e scappano prima, di conseguenza il tasso di successo sarà basso, circa **11%**. Per tutti i test descritti in questo lavoro è stato utilizzato lo strumento *BehaviorSpace* di NetLogo, che permette di eseguire molte simulazioni contemporaneamente. Per non ripeterci ogni volta, non lo specificheremo in ogni test, ma si intende che è sempre stato usato.

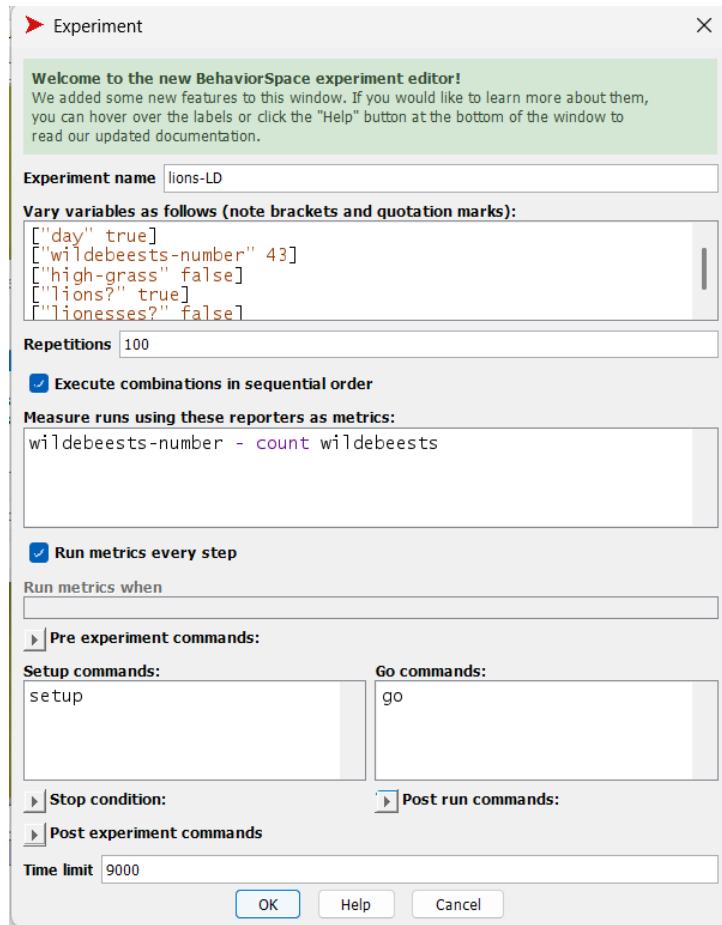


Figura 4.1: BehaviorSpace

Nella Fig. 4.1 si può vedere la struttura del *BehaviorSpace*, in particolare il risultato sarà un file excel contenente diversi dati, ma ciò che importa a noi è il tasso di successo degli attacchi, cioè wildebeests-number - count wildebeests, ovvero la differenza tra gli gnu originali e quelli rimasti a fine simulazione; se il risultato è 1 significa che l'attacco è andato a buon fine, 0 altrimenti. Come parametri abbiamo utilizzato un branco di gnu composto da 43 individui oltre ovviamente al fatto che sia giorno e ci sia l'erba bassa.

4.0.2 Caccia diurna con leone solitario in erba alta

Con questo test si intende simulare una serie di attacchi condotti da un leone solitario contro un branco di gnu in presenza di vegetazione alta. In tali condizioni, la visibilità risulta ridotta: gli gnu individuano il predatore con ritardo e di conseguenza reagiscono più tardi alla minaccia. Questo comporta un tasso di successo dell'attacco superiore rispetto a quello riscontrato in presenza di vegetazione bassa, stimabile intorno al **25–30%**.

4.0.3 Caccia notturna con leone solitario

Il test ha l'obiettivo di analizzare l'efficacia degli attacchi notturni da parte di un leone solitario ai danni di un branco di gnu. Durante la notte, la scarsa visibilità ritarda la reazione degli gnu, che riescono a individuare il predatore solo quando è ormai vicino. In questo scenario, il tasso di successo del leone risulta elevato e si aggira intorno al **30%**,

un valore comparabile a quello osservato negli attacchi diurni in presenza di vegetazione fitta.

Risultati dei test per il Leone

Come detto in precedenza il file excel ci fornisce molti dati sulle simulazioni, ma ciò che importa a noi è scritto nella voce *final* che rappresenta il risultato della simulazione.

[final], "9000", "0", "9000", "0", "9000", "0", "9000", "0", "9000", "0", "9000", "0", "9000", "0", "9000", "1"

Figura 4.2: Esempio di risultati nella voce *final*

Si può notare in figura un esempio dei primi risultati: il primo numero rappresenta i tick, il secondo il risultato della simulazione (1 = successo, 0 = fallimento). Applicando una formula che conta il numero di "1" presenti nella variabile *final*, abbiamo ottenuto che, su 100 simulazioni, la **caccia del leone solitario in erba bassa** ha avuto successo in **10 casi**, corrispondenti a una media pari a **0,10**. L'intervallo di confidenza al 95% risulta essere di $\pm 0,06$ il che indica che il tasso reale di successo, in queste condizioni, si colloca con buona probabilità nell'intervallo **[0,04 – 0,16]**. Questo risultato conferma la natura estremamente sfavorevole dello scenario (caccia diurna in erba bassa), in linea con quanto evidenziato nella letteratura.

Il numero totale di successi registrati per la **caccia diurna con leone solitario in erba alta** è pari a **27**, corrispondente a una media di **0,27**. L'intervallo di confidenza al 95% è di $\pm 0,09$, da cui si ottiene un intervallo stimato compreso tra **0,18** e **0,36**. Questo risultato evidenzia come la presenza di vegetazione alta fornisca una copertura sufficiente a migliorare sensibilmente l'efficacia della caccia anche durante il giorno, rendendo tale scenario più favorevole rispetto alla pianura aperta.

Il numero di successi rilevati per la **caccia notturna del leone solitario** è stato pari a **34**, corrispondente a una media di **0,34**. L'intervallo di confidenza al 95% calcolato è $\pm 0,09$, portando a un intervallo stimato compreso tra **0,25** e **0,43**. Questo risultato conferma l'evidenza riportata nella letteratura, secondo cui l'oscurità costituisce un vantaggio tattico per il leone, che riesce a portare a termine con maggiore successo gli attacchi predatori grazie alla ridotta visibilità delle prede. Per rendere più immediato il confronto tra i tre scenari simulati, è stato inoltre prodotto un **grafico a barre** in cui ciascuna colonna rappresenta la media del tasso di successo ottenuto su 100 simulazioni (Fig: 4.3).

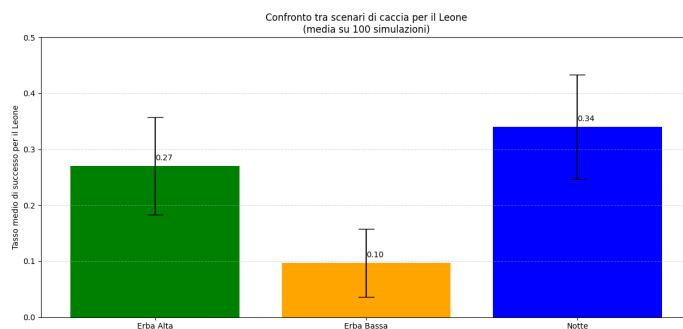


Figura 4.3: Confronto tra i tassi medi di successo del leone in tre scenari. Le barre verticali indicano l'intervallo di confidenza al 95%.

4.0.4 Caccia diurna con gruppo di leonesse in erba bassa

Il test ha l'obiettivo di valutare l'efficacia degli attacchi condotti, in condizioni diurne e su terreno a bassa copertura vegetale, da un gruppo di 3 leonesse contro un branco di gnu. In questo contesto, la visibilità è elevata e consente agli gnu di individuare i predatori con maggiore anticipo, aumentando le probabilità di fuga. La cooperazione tra le leonesse compensa in parte questo svantaggio, permettendo comunque un tasso di successo moderato, stimabile attorno al **25-30%**.

4.0.5 Caccia diurna con gruppo di leonesse in erba alta

Il test ha l'obiettivo di valutare l'efficacia degli attacchi condotti, in condizioni diurne e in presenza di vegetazione alta, da un gruppo di 3 leonesse contro un branco di gnu. La fitta copertura erbosa riduce la visibilità, ostacolando l'individuazione tempestiva dei predatori da parte degli gnu e favorendo un approccio più ravvicinato da parte delle leonesse. In questo scenario, il tasso di successo risulta piuttosto elevato, intorno al **38%**.

4.0.6 Caccia notturna con gruppo di leonesse

Il test ha l'obiettivo di valutare l'efficacia degli attacchi notturni condotti da un gruppo di 3 leonesse contro un branco di gnu. Durante la notte, la visibilità è limitata, il che riduce i tempi di reazione degli gnu e consente alle predatrici di avvicinarsi maggiormente prima di essere individuate. La caccia cooperativa, unita al favore delle condizioni ambientali, si traduce in un tasso di successo particolarmente elevato, stimabile intorno al **40%**.

Risultati dei test per le Leonesse

Applicando la stessa metodologia al gruppo di 3 leonesse, è stata analizzata la variabile *final* per ciascuno scenario simulato, considerando 100 iterazioni per ogni condizione.

Nel caso della **caccia diurna con gruppo di leonesse in erba bassa**, sono stati registrati **29 successi su 100 simulazioni**, corrispondenti a una media di **0,29**. L'intervallo di confidenza al 95% calcolato è $\pm 0,09$, con un intervallo stimato di successo compreso tra **0,20** e **0,38**. Questo risultato riflette uno scenario mediamente favorevole, dove la cooperazione tra le leonesse riesce in parte a compensare la maggiore visibilità delle prede su terreno aperto.

Per quanto riguarda la **caccia diurna in erba alta**, il numero totale di successi è pari a **33**, per una media di **0,33**. L'intervallo di confidenza al 95% pari a $\pm 0,09$, portando a un intervallo stimato compreso tra **0,24** e **0,43**. In questo caso, la presenza di vegetazione alta risulta determinante per il successo dell'attacco, in quanto consente alle leonesse di avvicinarsi più facilmente al branco di gnu prima di essere individuate. La combinazione tra cooperazione e copertura vegetale rende questo scenario sensibilmente più favorevole rispetto al precedente.

Infine, nella **caccia notturna con gruppo di leonesse**, i successi registrati sono stati **37 su 100**, corrispondenti a una media di **0,37**. L'intervallo di confidenza al 95% è $\pm 0,10$, da cui si ricava un intervallo stimato di successo tra **0,28** e **0,47**. Questo risultato è in linea con le aspettative teoriche: la scarsa visibilità notturna limita i tempi di reazione delle prede, mentre la collaborazione tra le leonesse consente attacchi più efficaci. Il contesto risulta quindi particolarmente favorevole dal punto di vista predatorio.

Anche in questo caso è stato inoltre prodotto un **grafico a barre** in cui ciascuna colonna rappresenta la media del tasso di successo ottenuto su 100 simulazioni (Fig: 4.4).

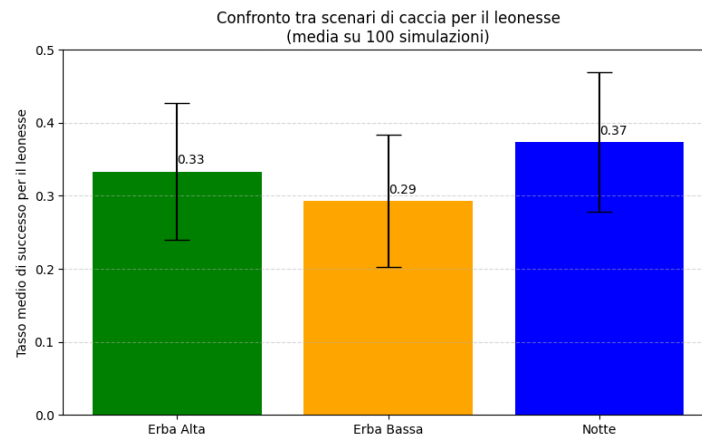


Figura 4.4: Confronto tra i tassi medi di successo delle Leonessa in tre scenari. Le barre verticali indicano l'intervallo di confidenza al 95%.

5. Conclusioni

I test condotti hanno permesso di analizzare in modo sistematico l'efficacia degli attacchi di predatori, singoli o in gruppo, nei pressi del fiume Grumeti nel Serengeti. Le simulazioni hanno messo in luce il ruolo cruciale della visibilità (influenzata dalla vegetazione e dalla luce) e della cooperazione tra leonesse nel determinare l'esito dell'attacco. In particolare, i tassi di successo ottenuti risultano coerenti con quanto riportato in letteratura: le condizioni di scarsa visibilità (erba alta o notte) favoriscono il predatore, mentre la caccia diurna in campo aperto penalizza l'approccio solitario. La caccia cooperativa, invece, mantiene una buona efficacia anche in condizioni meno favorevoli.

Nel complesso, i risultati delle simulazioni confermano la validità del modello e la sua capacità di riprodurre comportamenti realistici osservati in natura, offrendo uno strumento utile per l'esplorazione delle dinamiche predatore-preda in contesti ecologici variabili.

In futuro, il modello potrà essere esteso per includere ulteriori variabili ambientali e comportamentali. Un primo passo potrebbe essere l'introduzione di ostacoli naturali (rocce, alberi, rilievi) che influenzano le traiettorie di fuga e le strategie di caccia. Inoltre, si potrebbe differenziare ulteriormente il comportamento dei predatori in base all'età o all'esperienza. Dal lato delle prede, l'integrazione di meccanismi di allerta tra gnu o la formazione di strutture difensive più complesse potrebbe rendere il modello ancora più realistico.

Bibliografia

- [1] *Agent-based model*. Wikipedia. Definition of agent-based models, position, state, neighborhoods. 2025 (cit. a p. 3).
- [2] Thomas Alerstam. «Conflicting evidence about long-distance animal navigation». In: *Science* 313.5788 (2006), pp. 791–794 (cit. a p. 1).
- [3] *Automa cellulare*. Wikipedia. Definizione, stati finiti, regole di transizione. 2025 (cit. a p. 2).
- [4] Eric Bonabeau. *Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems*. Vol. 99. suppl 3. National Academy of Sciences, 2002, pp. 7280–7287. DOI: 10.1073/pnas.082080899 (cit. a p. 3).
- [5] Matthew Brouillet e Georgi Yordanov Georgiev. «Modeling and Predicting Self-Organization in Dynamic Systems out of Thermodynamic Equilibrium: Part 1: Attractor, Mechanism and Power Law Scaling». In: *Processes* 12.12 (2024), p. 2937 (cit. a p. 2).
- [6] Matthew J Brouillet e Georgi Yordanov Georgiev. «Why and How do Complex Systems Self-Organize at All? Average Action Efficiency as a Predictor, Measure, Driver, and Mechanism of Self-Organization». In: *arXiv preprint arXiv:2408.10278* (2024) (cit. a p. 2).
- [7] Scott Camazine et al. «Self-organizing systems: what, how, and why?» In: *npj Complexity* 1.1 (2025), pp. 1–15. DOI: 10.1038/s44260-025-00031-5 (cit. a p. 2).
- [8] Andrew B Davies e Gregory P Asner. «Advances in animal ecology from 3D-LiDAR ecosystem mapping». In: *Trends in ecology & evolution* 29.12 (2014), pp. 681–691 (cit. a p. 7).
- [9] Joshua M. Epstein e Robert Axtell. «Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up». In: *Brookings Institution Press and MIT Press*. MIT Press, 1996. ISBN: 9780262550251 (cit. a p. 4).
- [10] Richard D. Estes. *The Behavior Guide to African Mammals: Including Hoofed Mammals, Carnivores, Primates*. Berkeley: University of California Press, 2012 (cit. alle pp. 8, 9, 20).
- [11] Richard D. Estes. *The Gnu's World*. University of California Press, 2014 (cit. a p. 4).
- [12] David Favis-Mortlock. «Non-Linear Dynamics, self-organization and cellular automata models». In: *Environmental modelling: Finding simplicity in complexity* (2013), pp. 45–67 (cit. a p. 2).
- [13] Nigel Gilbert e Klaus G. Troitzsch. *Simulation for the Social Scientist*. 2^a ed. Open University Press, 2005. ISBN: 9780335216000 (cit. a p. 3).
- [14] J. Grant C. Hopcraft et al. «Why are wildebeest the most abundant herbivore in the Serengeti». In: (2015) (cit. a p. 5).
- [15] J. A. Scott Kelso. *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press, 1995. ISBN: 9780262611310 (cit. a p. 2).
- [16] C. M. Macal e M. J. North. «Tutorial on agent-based modelling and simulation». In: *Journal of Simulation* 4 (2010), pp. 151–162. DOI: 10.1057/jos.2010.3 (cit. a p. 3).

- [17] Charles M. Macal e Michael J. North. «Tutorial on agent-based modeling and simulation». In: *Journal of Simulation* 4.3 (2010), pp. 151–162. DOI: 10.1057/jos.2010.3 (cit. alle pp. 3, 4).
- [18] Simon Abia Raphael Mduma. «Serengeti wildebeest population dynamics: regulation, limitation and implications for harvesting». Ph.D. thesis. University of British Columbia, 1996 (cit. a p. 6).
- [19] *Moore neighborhood*. Wikipedia. Descrizione del vicinato di Moore. 2025 (cit. a p. 3).
- [20] Anna Mosser e Craig Packer. «Group territoriality and the benefits of sociality in the African lion». In: *Animal Behaviour* 78.2 (2009), pp. 359–370. DOI: 10.1016/j.anbehav.2009.04.024 (cit. a p. 8).
- [21] Philip Muruthi et al. «Movement patterns and land use by lions in the Serengeti ecosystem». In: *Movement Ecology* 3 (1998), pp. 1–15. URL: <https://movementecologyjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40462-016-0082-9> (cit. a p. 16).
- [22] Douglas E. Musiega e Sanga-Ngoie Kazadi. «Simulating the East African wildebeest migration patterns using GIS and remote sensing». In: *African Journal of Ecology* 42.4 (2004), pp. 355–362 (cit. a p. 7).
- [23] *NetLogo Dictionary / Programming Guide*. NetLogo User Manual. Agents, turtles, patches, shapes, coordinates. 2023 (cit. a p. 3).
- [24] John von Neumann. «The General and Logical Theory of Automata». In: *Hixon Symposium*. Formalizzazione del primo automa cellulare per la replicazione autonoma. 1948 (cit. a p. 2).
- [25] J. O. Ogutu e H. T. Dublin. «Demography of lions in relation to prey and habitat in the Maasai Mara National Reserve, Kenya». In: *African Journal of Ecology* 40.2 (2002), pp. 120–129 (cit. a p. 7).
- [26] Craig Packer e Anne E. Pusey. «Cooperation and competition within coalitions of male lions: kin selection or game theory?» In: *Nature* 296.5859 (1982), pp. 740–742. DOI: 10.1038/296740a0 (cit. a p. 8).
- [27] ResearchGate. *ResearchGate: Network for Scientists*. <https://www.researchgate.net/>. Accessed: 2025-07-10. 2025 (cit. a p. 7).
- [28] Craig W Reynolds. «Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model». In: *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1987, pp. 25–34 (cit. a p. 4).
- [29] TravelWise Safari. *Predators While Wildebeest Crossing River*. Accessed: 2025-07-14. 2022. URL: <https://medium.com/@travelwisesafari/predators-while-wildebeest-crossing-river-2881690a3cbc> (cit. a p. 16).
- [30] Mohit Sajwan, Devashish Gosain e Sagarkumar Surani. «Flocking behaviour simulation: Explanation and enhancements in boid algorithm». In: *International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT)* 5.4 (2014), pp. 5278–5283 (cit. a p. 4).
- [31] George B. Schaller. *The Serengeti Lion: A Study of Predator-Prey Relations*. University of Chicago Press, 1972 (cit. alle pp. 15, 20).
- [32] George B. Schaller. *The Serengeti Lion: A Study of Predator-Prey Relations*. University of Chicago Press, 2009 (cit. alle pp. 6–9).
- [33] David Scheel e Craig Packer. «Group hunting behaviour of lions: a search for cooperation». In: *Animal Behaviour* 41.4 (1991), pp. 697–709. URL: https://www.cbs.umn.edu/sites/cbs.umn.edu/files/migrated-files/downloads/Group_

- hunting_behaviour_of_lions-a_search_for_cooperation.pdf?utm_source=chatgpt.com (cit. alle pp. 9, 20).
- [34] *Shapes And Colors In NetLogo*. NetLogo User Manual. Default turtle shapes and customization. 2025 (cit. a p. 3).
 - [35] A. R. E. Sinclair, Simon Mduma e Justin S. Brashares. «Patterns of predation in a diverse predator–prey system». In: *Nature* 425.6955 (2003), p. 288 (cit. alle pp. 7, 12).
 - [36] Amanda L Subalusky et al. «Annual mass drownings of the Serengeti wildebeest migration influence nutrient cycling and storage in the Mara River». In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114.29 (2017), pp. 7647–7652 (cit. a p. 1).
 - [37] Tanzania National Parks Authority. *Serengeti National Park*. https://www.tanzaniaparks.go.tz/national_parks/serengeti. Accessed: 2025-07-10. 2024 (cit. a p. 7).
 - [38] Stanislaw Ulam. «Origin of Cellular Automata». In: *Los Alamos Archives* (1940). Idea iniziale dello studio della crescita cristallina (cit. a p. 2).
 - [39] Kimberly L. VanderWaal, Anna Mosser e Craig Packer. «Social bonds predict survival in female lions». In: *Ecology Letters* 19.9 (2016), pp. 1099–1105. DOI: 10.1111/ele.12646 (cit. a p. 8).
 - [40] *Von Neumann neighborhood*. Wikipedia. Descrizione del vicinato di vonNeumann. 2020 (cit. a p. 3).
 - [41] *Von Neumann neighborhood*. Complexity Explorer Glossary. Definizione del vicinato ortogonale. 2025 (cit. a p. 3).
 - [42] Katherine L. Whitman e Craig Packer. *A review of social behavior in lions and its implications for management*. Working Paper 37. Wildlife Conservation Society, 2007 (cit. a p. 9).
 - [43] Wikipedia contributors. *Grumeti River*. https://en.wikipedia.org/wiki/Grumeti_River. Accessed: 2025-07-11. 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Grumeti_River (cit. a p. 10).
 - [44] Wikipedia contributors. *Wildebeest*. 2025. URL: %5Curl%7Bhttps://en.wikipedia.org/wiki/Wildebeest%7D (cit. a p. 8).
 - [45] BBC Wildlife. *Hunting success rates: how predators compare*. <https://www.discoverwildlife.com/animal-facts/mammals/hunting-success-rates-how-predators-compare>. <https://www.discoverwildlife.com/animal-facts/mammals/hunting-success-rates-how-predators-compare>. 2022 (cit. a p. 20).
 - [46] Uri Wilensky. *NetLogo*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning e Computer-Based Modeling, Northwestern University. 1999 (cit. a p. 1).
 - [47] Michael Wooldridge. *An Introduction to MultiAgent Systems*. 2^a ed. John Wiley & Sons, 2009. ISBN: 9780470519462 (cit. a p. 3).