

---

# La Grande Migrazione

Simulazione dell'attraversamento del fiume Mara da parte di una mandria di Gnu e interazione con i possibili predatori

---

Sistemi Complessi: Modelli e Simulazione

Mattia Pennati - 793375  
Mirko Rima - 793435



Università degli Studi di Milano - Bicocca  
Dipartimento di Informatica, Sistemistica e Comunicazione  
Anno Accademico 2018 - 2019

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>2</b>
1.1 Panoramica . . . . .	2
1.2 Obiettivi . . . . .	3
1.3 Ambiente di modellazione e simulazione . . . . .	3
1.4 Struttura del documento . . . . .	4
<b>2 Stato dell'arte</b>	<b>5</b>
2.1 Sistemi complessi . . . . .	5
2.2 Automi cellulari (CA) . . . . .	5
2.3 Agenti e sistemi multiagente . . . . .	6
2.3.1 Agenti . . . . .	6
2.3.2 Sistemi multiagente . . . . .	7
2.4 Ciclo di lavoro di una simulazione . . . . .	7
2.5 Boids - Flocking . . . . .	8
2.5.1 Separation . . . . .	9
2.5.2 Alignment . . . . .	9
2.5.3 Cohesion . . . . .	9
2.5.4 Ragioni dell'utilizzo . . . . .	9
2.6 Descrizione degli gnu . . . . .	10
2.6.1 Territorio . . . . .	10
2.6.2 Gnu migratori e non migratori . . . . .	13
2.6.3 Motivazioni dell'abbondanza di gnu nel Serengeti . . . . .	14
2.6.4 Composizione del branco . . . . .	15
2.6.5 Cause di morte . . . . .	16
2.7 Descrizione dei predatori . . . . .	18
2.7.1 Leoni . . . . .	18
2.7.1.1 Composizione del branco . . . . .	18
2.7.1.2 Cause di morte . . . . .	19
2.7.1.3 Caccia e comportamento della preda . . . . .	19

2.7.2	Coccodrilli . . . . .	21
2.7.3	Effetto confusione predatori . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Descrizione del Modello</b>	<b>24</b>
3.1	Ambiente di simulazione . . . . .	24
3.1.1	Zona del fiume . . . . .	24
3.1.2	Periodo Attraversamento . . . . .	26
3.1.3	Precipitazioni e dati sul fiume . . . . .	26
3.2	Agenti e ambiente . . . . .	30
3.2.1	Caratterizzazione gnu . . . . .	30
3.2.1.1	Numero del branco . . . . .	30
3.2.1.2	Zona e metodologia della partenza . . . . .	31
3.2.1.3	Dinamiche del branco e leadership . . . . .	31
3.2.1.4	Attraversamento del fiume . . . . .	33
3.2.1.5	Zona oltre al fiume e arrivo . . . . .	34
3.2.1.6	Risposta alla predazione . . . . .	35
3.2.1.7	Parametri di simulazione per gli gnu . . . . .	35
3.2.2	Caratterizzazione leoni . . . . .	37
3.2.2.1	Tecnica di predazione e risposta delle prede . . . . .	37
3.2.2.2	Numero leoni . . . . .	40
3.2.2.3	Parametri di simulazione per i leoni . . . . .	40
3.2.3	Caratterizzazione coccodrilli . . . . .	41
3.3	Caratterizzazione dei parametri globali dell'ambiente . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Simulazioni</b>	<b>43</b>
4.1	Test 1: Replicazione di singoli attraversamenti . . . . .	43
4.2	Test 2: Simulazione di singoli attraversamenti . . . . .	46
4.3	Test 3: Branco unico vs sotto-branchi in relazione al fiume . . . . .	47
4.4	Test 4: Branco unico vs sotto-branchi in relazione ai leoni . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>53</b>
5.1	Aspetti positivi . . . . .	53
5.2	Aspetti negativi . . . . .	53
5.3	Sviluppi futuri . . . . .	54
5.4	Considerazioni finali . . . . .	54
	<b>Bibliografia</b>	<b>56</b>
	<b>A Listato del codice</b>	<b>60</b>

# **Abstract**

In questo lavoro verrà presentato un modello di simulazione del comportamento di una mandria di Gnu in uno dei momenti fondamentali del loro moto migratorio, ovvero l'attraversamento del fiume Mara, al confine fra Tanzania e Kenya.

Si analizzeranno le dinamiche del branco, i relativi movimenti e le interazioni tra gli individui.

Inoltre verrà condotto un ulteriore studio riguardante l'interazione della mandria con i loro maggiori predatori naturali, i leoni.

Si sfrutteranno Automi Cellulari e Agenti Autonomi per definire un modello che possa permettere maggiori analisi per il problema di riferimento.

Data la scarsità dei dati disponibili e la difficoltà del problema in questione il lavoro svolto rappresenta solamente un discreto primo approccio e può essere considerato una base di partenza per interessanti sviluppi futuri.

# 1. Introduzione

## 1.1 Panoramica

Ogni anno, all'inizio della stagione secca (maggio, giugno) [1], circa 1,3 milioni di gnu, a cui si aggiungono centinaia di migliaia di zebre, gazzelle di Thomson e impala [2, 3, 4, 5], si preparano ad una lunga marcia che li porterà dalla Tanzania al Kenya, dando vita a uno spettacolo dalle gigantesche proporzioni, considerata come una delle nuove sette meraviglie del mondo naturale [1, 2]. Analogamente, all'inizio della stagione umida (novembre), ripartiranno in direzione Tanzania, completando quello che può essere considerato sia un ciclo di movimento [6] (Fig. 1.1) che un ciclo di vita e di comportamento (Fig. 1.2). Questa migrazione, che si ripete quasi uguale annualmente [7], è una delle più grandi migrazioni animali ed inizia quando i nutrienti iniziano a scarseggiare. Ciò porta ad un viaggio lungo circa 1500 km [8] alla ricerca di cibo e acqua potabile che comporta diverse insidie come, ad esempio, la distanza da percorrere, la presenza di predatori, le condizioni climatiche e molto altro.

Una delle difficoltà maggiori è forse rappresentata dall'attraversamento di fiumi: forti correnti, coccodrilli e predatori, come i leoni, pronti ad aspettarli ben consci di avere una buona probabilità di caccia. La zona che comporta le maggiori difficoltà risulta quindi quella in cui la mandria di gnu attraversa il fiume Mara, sancendo il passaggio dal Parco Nazionale del Serengeti (Tanzania) alla Riserva del Masai Mara (Kenya).

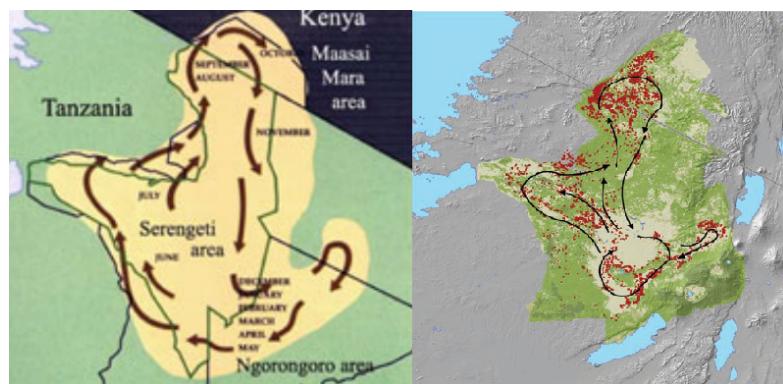
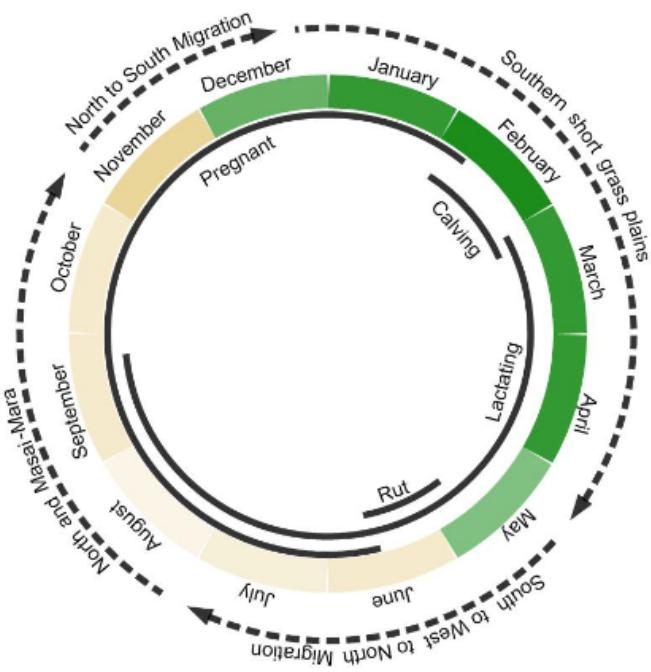


Figura 1.1: Ciclo completo rappresentante le tratte migratorie degli gnu durante l'anno.



**Figura 1.2:** Il ciclo di vita di un gnu migratore del Serengeti.

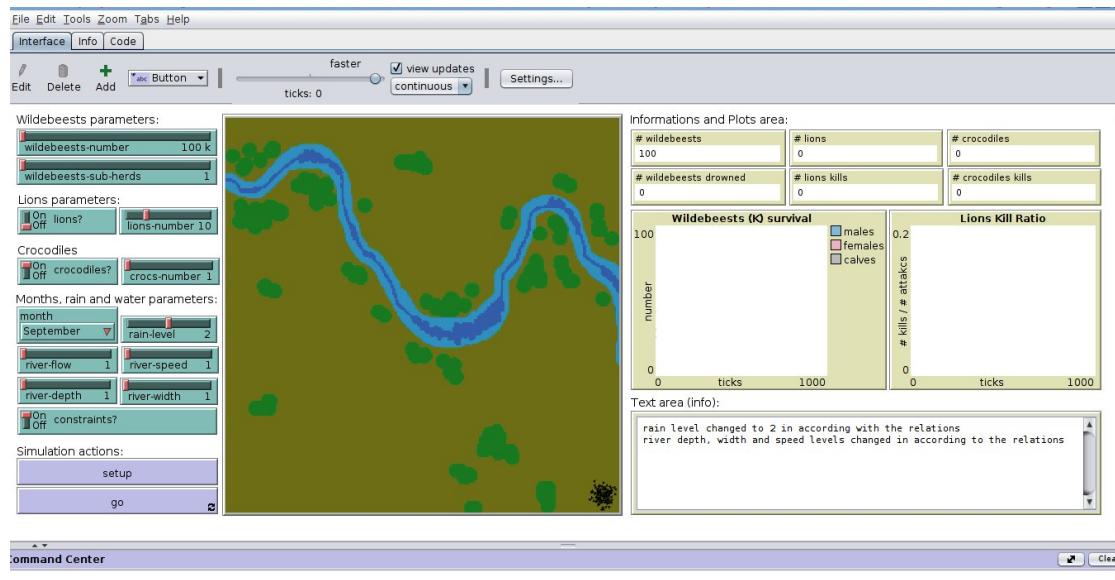
## 1.2 Obiettivi

Per questo progetto, data la vastità del problema di riferimento, ci si pone come obiettivo quello di simulare l’attraversamento del fiume Mara da parte di una mandria di gnu. In particolare si andranno a studiare le dinamiche di aggregazione del gruppo, le dinamiche di leadership e di movimento durante la traversata del fiume. Un ulteriore fattore di analisi sarà la caccia e i movimenti causati dall’effetto confusione sui predatori.

Si andrà inoltre ad osservare come la suddivisione del branco in vari gruppi, più o meno numerosi, e diverse condizioni climatiche possano influenzare la riuscita dell’attraversamento del fiume e le interazioni con i predatori.

## 1.3 Ambiente di modellazione e simulazione

Come ambiente di sviluppo e simulazione si è scelto di utilizzare NetLogo [9] in quanto è provvisto di un linguaggio di programmazione ad alto livello che non richiede una difficoltà elevata nella comprensione e nell’intuitività. È stato scelto NetLogo soprattutto per la visualizzazione in tempo reale degli eventi, con la possibilità di modifiche a diverse caratteristiche, che permettevano una buona comprensione del problema del caso di studio.



**Figura 1.3:** Vista dell'ambiente di simulazione in Netlogo.

## 1.4 Struttura del documento

Il documento è suddiviso nei seguenti capitoli:

- **Stato dell'arte:** sarà presentato il materiale e il contesto su cui ci si è basati per il caso di studio. Inoltre verrà data una breve introduzione su temi riguardanti sistemi complessi e la realtà che si cercherà di modellare, fornendo le basi che hanno portato allo sviluppo di questo progetto.
- **Descrizione del modello:** sarà presentata la progettazione e l'implementazione del modello, con le relative specifiche dell'ambiente, degli agenti e delle loro interazioni.
- **Simulazioni:** sarà riportata una analisi delle simulazioni svolte con i risultati previsti e attesi nell'esperimento dell'attraversata del fiume Mara e nell'interazione con i possibili predatori.
- **Conclusioni:** si discuterà delle considerazioni conclusive e dei possibili sviluppi futuri.
- **Listato del codice:** appendice dove sarà presente il codice commentato e la cartella per scaricare l'intero progetto.

## 2. Stato dell'arte

### 2.1 Sistemi complessi

Un sistema complesso è un sistema in cui esistono relazioni causa-effetto spesso comprensibili in retrospettiva, non necessariamente facilmente riproducibili e predicibili. Esso è tipicamente composto da una o più parti che possono evolversi e adattarsi ai cambiamenti dell'ambiente. Alcuni esempi di sistemi complessi sono organismi viventi (volo degli uccelli, diffusione di un virus, ecc.) o organizzazioni umane.

In generale questa categoria presenta una dinamica tipicamente non lineare e si presta, fino a un certo punto, ad analisi tramite simulazione.

Attraverso uno studio approfondito della realtà considerata è possibile osservare le "possibili" evoluzioni del sistema per cercare di comprenderlo meglio.

Nello specifico, il caso in analisi risulta un sistema complesso per diversi motivi. Esso infatti presenta una molteplicità di individui che si auto-organizzano per compiere un obiettivo comune, prevede differenti interazioni, differenti scenari e differenti adattamenti ai cambiamenti dell'ambiente o alle azioni degli individui considerati.

### 2.2 Automi cellulari (CA)

Il concetto di automa cellulare fu in origine sviluppato da Stanislaw Ulam e da John von Neumann negli anni quaranta e consiste in un modello matematico, per la precisione in un sistema dinamico discreto, per descrivere l'evoluzione di un sistema complesso lasciando che la complessità emerga dall'interazione di semplici individui che seguono semplici regole. Un automa cellulare (CA) consiste in una griglia costituita da celle, di una qualsiasi dimensione finita, in cui ogni porzione limitata di spazio deve contenere solo un numero finito di celle.

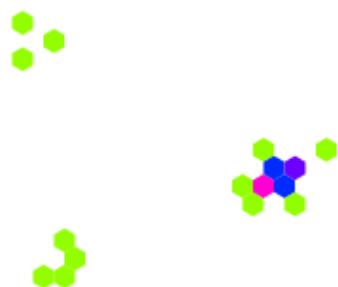
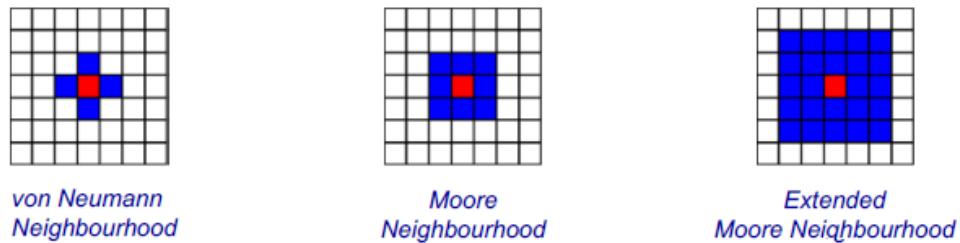


Figura 2.1: Esempio di automa cellulare.

Ciascuna di queste celle può assumere un insieme finito di stati (ad esempio, "vivo" o "morto", un colore, una forma, un valore booleano 1-0 ecc.).

Per ogni cella si definisce un vicinato, cioè l'insieme delle celle considerabili "vicine" alla cella data. Esistono diversi tipi di vicinato come, ad esempio, quello di Von Neumann o quello Moore (Fig. 2.2).



**Figura 2.2:** Esempi di vari vicinati esistenti.

Ad un certo tempo  $t = 0$  si assegna ad ogni cella un determinato stato, che prende il nome di stato iniziale dell'automa cellulare. Dopo un tempo prefissato ogni cella cambierà stato contemporaneamente a tutte le altre, secondo una regola fissata (che varia a seconda dell'automa cellulare preso in considerazione). Il modo in cui cambia stato una cella dipende solamente dal proprio stato attuale e dagli stati delle celle "vicine".

I CA possono avere diverse configurazioni e la loro forma non è necessariamente quadrata, ma può assumere anche forme triangolari, esagonali ecc.

## 2.3 Agenti e sistemi multiagente

### 2.3.1 Agenti

Un agente si riferisce a una singola entità in un modello di simulazione, caratterizzata dal fatto di essere, almeno parzialmente, autonoma.

Nella modellazione di comportamenti di un gruppo di individui un agente risulta quindi un'unità nel gruppo come, ad esempio, un singolo uccello in uno stormo o un singolo gnu in un branco.

Nelle simulazioni gli agenti sono rappresentati da due vettori: posizione e velocità. Pertanto vengono considerati come puntiformi nonostante possano avere una differente rappresentazione grafica. Di default, in NetLogo, hanno la forma di un triangolo isoscele. La posizione sarà quindi riferita al centro e la direzione del vettore velocità sarà adiacente al segmento che collega il centro dell'agente alla "punta" del triangolo. Questi agenti hanno un vicinato rappresentato nella figura a seguire (Fig. 2.3)

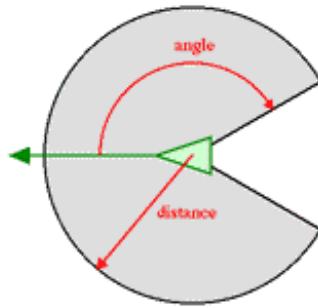


Figura 2.3: Esempio di vicinato per un agente.

### 2.3.2 Sistemi multiagente

Un sistema multi-agente è un insieme di agenti situati in un certo ambiente, come una griglia di simulazione, che interagiscono tra loro mediante una opportuna organizzazione. Essi vengono utilizzati per simulare diverse realtà del mondo naturale come cellule, una colonia di animali oppure realtà sociali come un gruppo o una comunità. Un sistema multi-agente consente di esplorare nuove procedure, regole decisionali, flussi di informazioni, senza influenzare il sistema reale, permettendo inoltre di conoscere più a fondo il sistema in cui si opera. La rappresentazione di un sistema multi agente produce un output comprensibile anche da chi non conosce approfonditamente le dinamiche del sistema oggetto di studio.

Un qualsiasi sistema può essere rappresentato in maniera piuttosto realistica tramite sistemi multi-agente modificando opportunamente i parametri che caratterizzano gli agenti o differenziando gli agenti stessi.

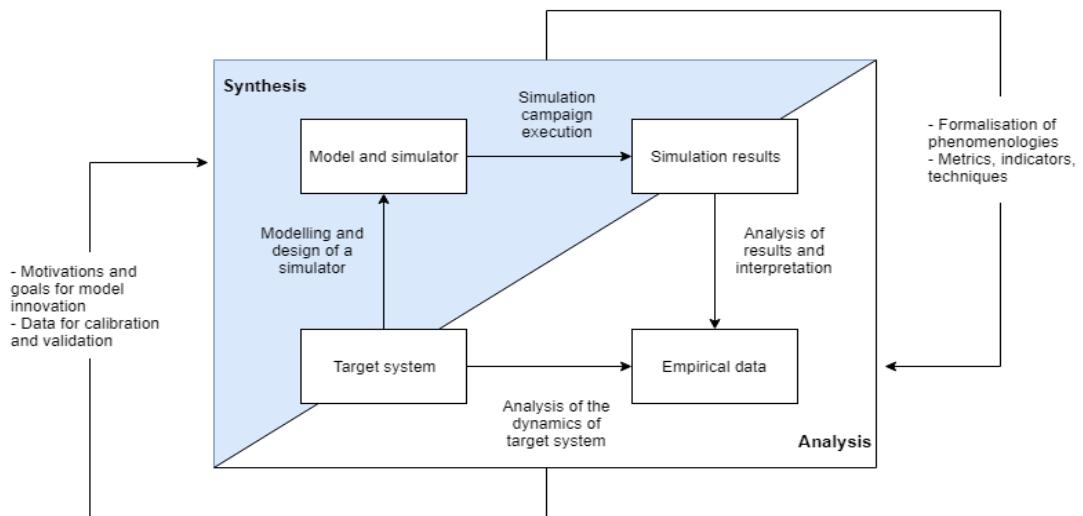
## 2.4 Ciclo di lavoro di una simulazione

Per la corretta modellazione e simulazione di un sistema complesso ci si attiene al ciclo di sviluppo riportato in Fig. 2.4

In una visione semplicistica bisogna:

- definire un modello concettuale per il mondo a cui si fa riferimento;
- verificarne la correttezza e convertirlo in un modello software;
- eseguire una fase di validazione, cioè portare il modello sviluppato ad una simulazione corretta del problema analizzato;
- eventualmente, riadattare il modello e rieseguire il ciclo fino ad un risultato ritenuto soddisfacente.

Si osserva come non sia sempre possibile portare a compimento la fase di validazione, poichè non è certo che si disponga di sufficienti dati e di riscontri attendibili. Si tenga anche conto di come nessun modello di simulazione possa coprire tutti gli scenari possibili. Quindi in un campo complesso come la migrazione degli gnu, che prevede interazioni interne al gruppo e con i predatori, si è cercato di validare ciò che i dati a nostra disposizione hanno permesso, concentrandosi quindi sugli attraversamenti del fiume nelle diverse condizioni registrate.



**Figura 2.4:** Schema del ciclo di vita di una simulazione.

## 2.5 Boids - Flocking

Un metodo comunemente usato per simulare il movimento di gruppi di animali, chiamato "flocking" [10] in questo contesto, è il modello Boids ideato da Craig Reynolds nel 1987 [11]. Il suo modello rappresentò il primo algoritmo in grado di fornire simulazioni abbastanza realistiche di moti di stormi di uccelli, banchi di pesci o, più in generale, insiemi di animali che mostrino aggregazione. L'algoritmo definisce la cooperazione fra individui basandosi su tre semplici regole:

- Separation
- Alignment
- Cohesion

### 2.5.1 Separation

Un singolo agente che intende muoversi in un gruppo deve evitare le collisioni con altri agenti nelle vicinanze. Per questa ragione viene aggiunto un fattore di separazione, in modo tale da mantenere una certa distanza da ogni altro agente nel suo vicinato. Se esso troverà un altro agente troppo vicino a lui, cercherà di allontanarsi per evitare la collisione.

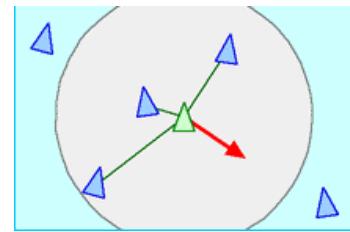


Figura 2.5: Separation.

### 2.5.2 Alignment

Tutti gli agenti che compongono un gruppo viaggiano nella stessa direzione degli agenti vicini, o cercano perlomeno di avvicinarsi a questa direzione. Per ottenere questo effetto viene aggiunta una regola di allineamento. Essa permetterà ad un agente di mantenere gradualmente l'orientamento tale da allinearsi con la direzione generale dei suoi vicini. La direzione generale risulta la media di tutti i vettori di direzione degli agenti appartenenti al vicinato.

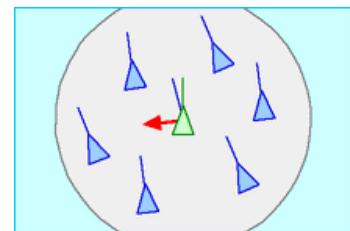


Figura 2.6: Alignment.

### 2.5.3 Cohesion

Un agente singolo deve attenersi il più possibile al gruppo e per garantire ciò viene aggiunto un fattore di coesione. Tramite esso un agente si sposterà quindi verso la posizione media dei suoi vicini. Nello specifico, quando altri agenti vengono trovati nel vicinato, l'agente tenterà di spostarsi verso la posizione media degli altri.

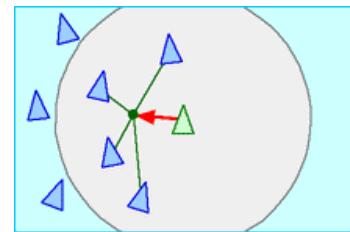


Figura 2.7: Cohesion.

### 2.5.4 Ragioni dell'utilizzo

Il flocking è un comportamento riscontrato spesso in natura tra diversi gruppi di animali cooperanti, come stormi, banchi, greggi, ecc.

Uno dei fini principali di questo comportamento è quello di porre la collettività prima dell'individualità nel tentativo di confondere i predatori. Tramite aggregazione e cooperazione ogni singolo animale trascorre meno tempo vigilando per identificare possibili predatori in quanto risultano minacciati solo i membri del gruppo posti ai margini. Ciò si traduce quasi sempre in una maggiore sopravvivenza sia per l'individuo che, soprattutto, per il gruppo.

Questo modello di movimenti di aggregazione fornisce, nei casi per cui è stato ideato, altri aspetti positivi come la riduzione della resistenza al vento (stormi di uccelli) o all'acqua (banchi di pesci) per gli animali posizionati alla fine del gruppo.

In conclusione lo scopo principale di questa tecnica effettivamente osservabile in natura è "la protezione contro i predatori". Gruppi di animali più compatti riscontrano numericamente meno attacchi rispetto a gruppi di animali liberi [12, 13].

Questo comportamento è ben adattabile anche alle mandrie di ungulati che si attengono a tale tecnica per evitare i predatori, facilitare la ricerca di cibo e per aumentare le probabilità di sopravvivenza nella traversata del fiume [14, 15].

Queste motivazioni ci hanno portato ad utilizzare il modello descritto per replicare il comportamento della madria, poichè ritenuto simile ai comportamenti già studiati per pesci e volatili [16]. Un'ulteriore conferma della bontà dell'utilizzo dei boids nel caso della nostra simulazione è dato dalla Disney che, per realizzare la famosa "carica degli gnu" su Mufasa nel cartone animato "Il re leone", ha utilizzato il suddetto modello per la caratterizzazione dei movimenti della mandria [17]. Il loro studio è stato computazionalmente molto oneroso [18] e ha avuto un alto grado di difficoltà richiedendo, per realizzare il movimento esatto, due anni di lavoro per appena 2 minuti e mezzo di scena.

## 2.6 Descrizione degli gnu

### 2.6.1 Territorio

Lo gnu o gnu striato (*Connochaetes taurinus*) è un ungulato di grossa taglia diffuso in Africa meridionale e orientale che, per motivi alimentari (ricerca di erba da forare), predilige grandi pianure come habitat. La popolazione di gnu più vasta al mondo si trova nella regione del Serengeti (compresa tra il Kenya e la Tanzania), in cui si contano oltre un milione di esemplari (circa 1.300.000 migranti e 200.000 sedentari [8, 19, 20]). Per questa ragione si è deciso di prendere in analisi la suddetta regione, mostrata nell'immagine seguente (Fig. 2.8).

Le condizioni climatiche della zona del Serengeti vengono solitamente divise in varie stagioni a causa delle piogge e del periodo dell'anno [21, 19]. Principalmente si identificano due stagioni e altrettanti periodi di transizione fra di esse:

- **Wet Season:** da Gennaio ad Aprile
- **Dry Season:** da Luglio a Ottobre

Durante ognuno di questi periodi il branco di gnu migratori occupa una determinata zona, pressochè uguale di anno in anno, come mostrato in Fig. 2.9 [8].

Gli gnu migratori tendono infatti a seguire in maniera ciclica le piogge in modo tale da poter avere sempre a disposizione acqua e cibo il più nutriente possibile durante tutto l'anno [1, 21, 22]. Una rappresentazione della rotta migratoria la si ha in Fig. 2.10.



Figura 2.8: Zona del Serengeti.

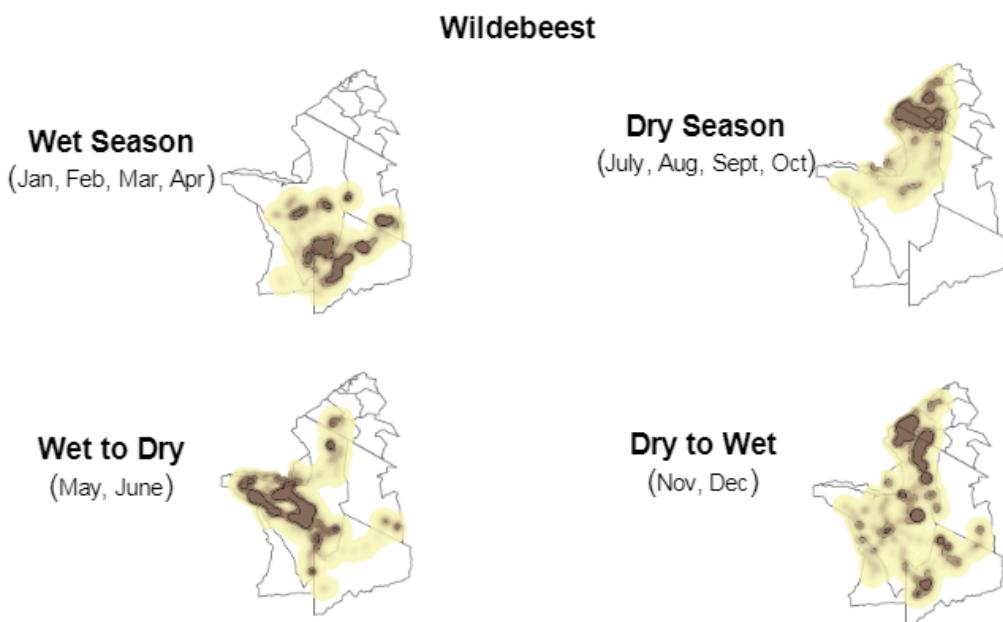


Figura 2.9: Posizione degli gnu durante le stagioni nel Serengeti.

Il branco migra percorrendo circa 1500 km in un anno, con una media fra i 4 e i 7 km al giorno, alla ricerca di acqua e erba fra i 3 e i 10 cm, la loro preferita. Il giro del Serengeti-Mara avrebbe una lunghezza di 650 km, ma viene allungato dalla ricerca appunto di buoni punti per pascolare.

Gli gnu si ritrovano all'inizio della stagione delle piogge, a Maggio, e abbandonano, prima che l'erba termini di crescere, le zone del sud, dopo aver superato il periodo di concezione dei vitelli (Dicembre-Marzo, con la maggior parte delle nascite concentrata nel solo mese di Febbraio). Tutto questo si verifica per continuare a ricercare un tipo di pascolo che permetta erba di media lunghezza e ricca di sodio in modo da non dover integrare la propria alimentazione con altro.

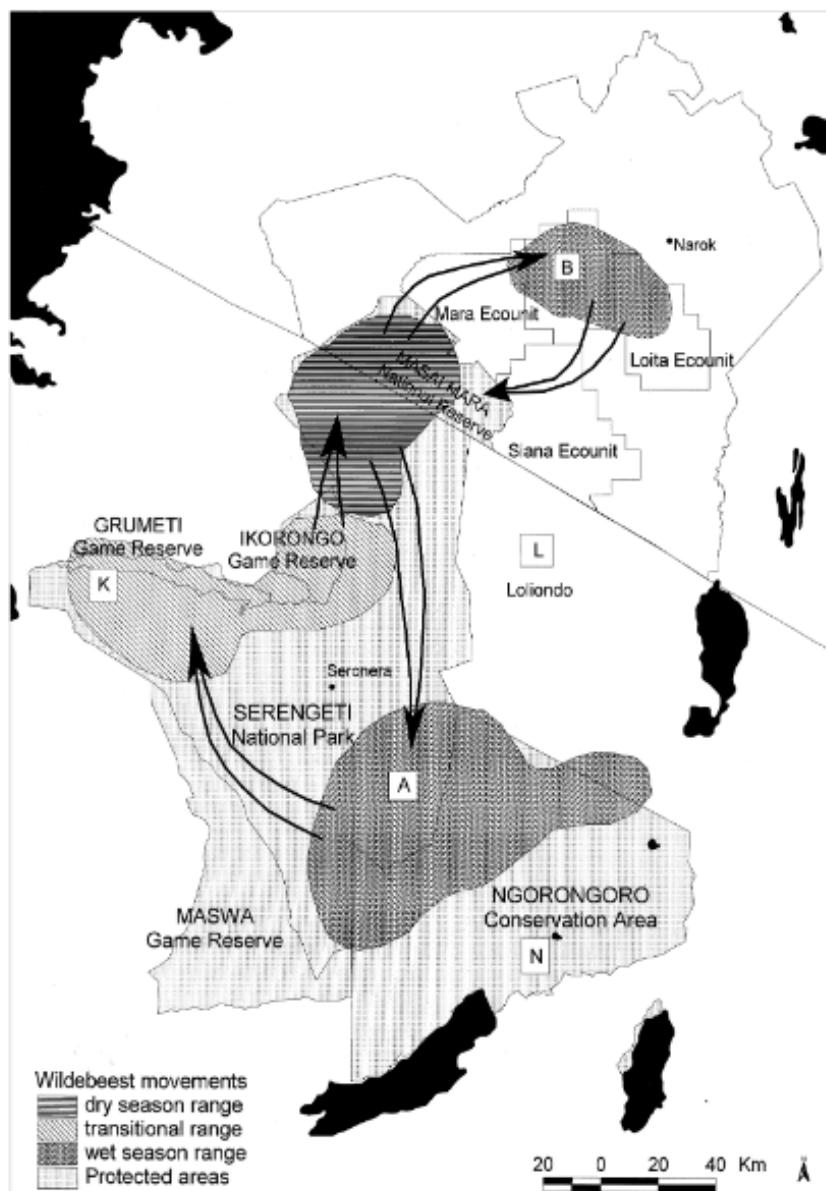


Figura 2.10: Movimenti Migratori.

### 2.6.2 Gnu migratori e non migratori

Si sono registrati dei grandi aumenti nella popolazione di gnu negli ultimi decenni, passando da una popolazione di circa 200.000 esemplari nel 1960 ad avvicinarsi al milione e mezzo negli anni 2000.

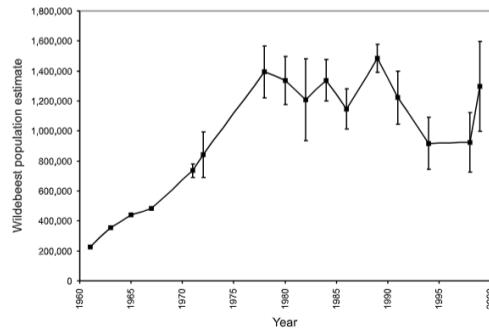


Figura 2.11: Crescita della popolazione di gnu negli dal 1960 al 2000 [21].

E' bene però considerare che non tutti gli gnu della regione del Serengeti migrano. Esiste infatti una piccola parte, 200.000 esemplari su un totale di circa 1.5 milioni, che risulta sedentaria (Fig. 2.12).

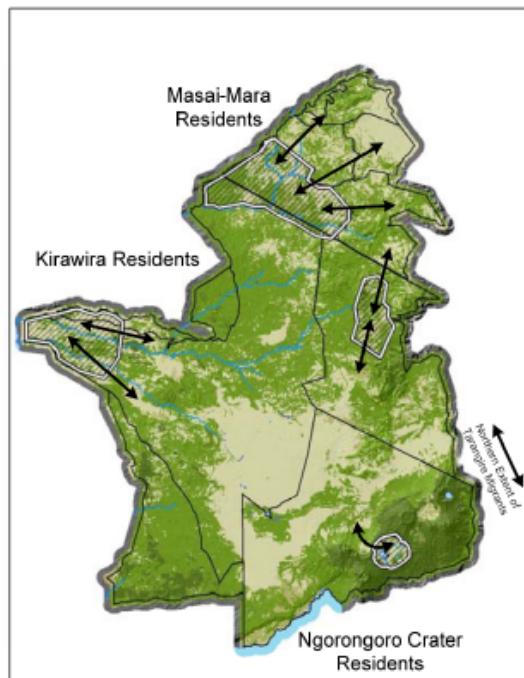
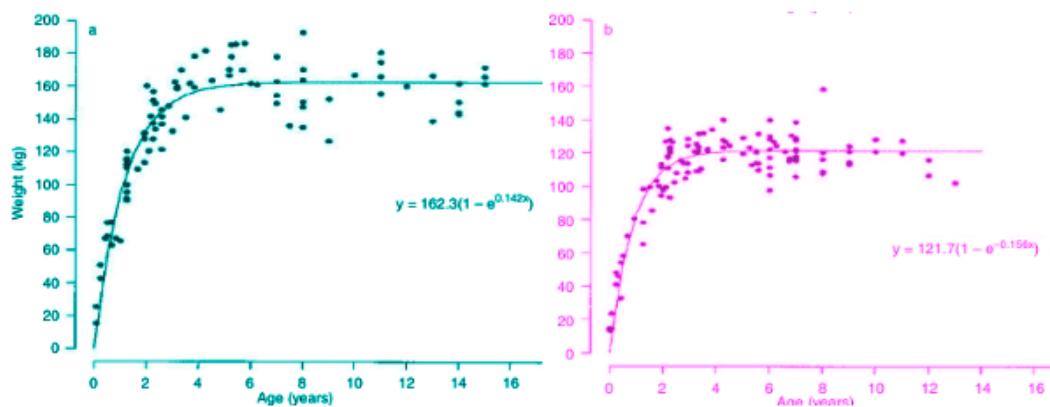


Figura 2.12: Zone degli gnu residenti.

Queste popolazioni non residenti, delle quali ne esistono 4 differenti tipologie, si differenziano con gli gnu migratori per dimensioni e peso. Essi hanno infatti una dimensione significativamente maggiore. Le dimensioni medie del corpo maschile e femminile per i migranti del Serengeti sono  $160 \pm 13,4$  kg e  $120 \pm 10,5$  kg (Fig. 2.13), mentre i residenti possono arrivare ad esemplari fino a  $192 \pm 16$  kg e  $145 \pm 9,5$  kg [21] rispettivamente.

Inoltre le due popolazioni si differenziano anche per il periodo della riproduzione e della nascita dei vitelli, in quanto il periodo di nascite tende ad essere anticipato e meno sincronizzato rispetto agli gnu migratori.



**Figura 2.13:** Distribuzione del peso della popolazione maschile/femminile di gnu migratori [8].

### 2.6.3 Motivazioni dell'abbondanza di gnu nel Serengeti

Perché gli gnu sono così abbondanti nel Serengeti? Ci sono aspetti specifici della biologia degli gnu che sono unici e danno loro un vantaggio competitivo rispetto ad altre specie che spiega in parte la loro abbondanza. Questi attributi biologici includono: nascita sincrona dei vitelli che coincide con l'abbondanza stagionale di cibo e alla lontananza della comunità dei predatori e una forte selezione per erbe con ottime caratteristiche su cui hanno i più alti tassi di assunzione. Tuttavia, questi fattori da soli non sono sufficienti a motivarne l'abbondanza perché ci si aspetterebbe di vedere densità simili di gnu anche in altri ecosistemi, ma ciò non accade.

L'ecosistema del Serengeti ha un elevato grado di fertilità del suolo e di precipitazioni che crea aree eccezionalmente grandi di erba di alta qualità. Pertanto, aspetti specifici della dieta e della riproduzione degli gnu, combinati con la loro capacità di muoversi su lunghe distanze, consentono agli gnu migratori di avere qualità nel cibo consumato e di sfuggire alla regolazione mediante predazione. Questa combinazione permette inoltre agli gnu di dominare l'ecosistema oltre la capacità di qualsiasi altra specie corrente.

In aggiunta a ciò, la grande densità degli gnu del Serengeti potrebbe facilitare la specie grazie ad un ciclo di feed-back positivo mantenendo grandi aree fortemente pascolate che stimolino ulteriormente l'aumento della produzione e la concentrazione di proteine nell'erba.

In conclusione, gli gnu sono fortemente abbondanti nel Serengeti perché l'ecosistema corrisponde perfettamente alle loro esigenze [21].



**Figura 2.14:** Immagine che raffigura un esemplare di gnu nella regione del Serengeti.

#### 2.6.4 Composizione del branco

Un branco di gnu può essere suddiviso a seconda del sesso e dell'età degli esemplari. Le stime della numerosità di ogni categoria le si ottengono da un campione di 134.000 gnu (considerabili un branco). Oltre ad evidenziare un rapporto di circa 1 maschio ogni 2 femmine negli esemplari adulti, nel dettaglio un branco viene considerato così divisibile [7]:

- 29.000 vitelli e piccoli tra gli 1-2 anni → 22%
- 68.000 gnu adulte femmine → 50,5%
- 37.000 gnu adulti maschi → 27,5%



**Figura 2.15:** Immagine raffigurante un branco di gnu in movimento.

### 2.6.5 Cause di morte

Esistono diverse cause di morte per gli gnu che vanno da cause naturali o relative alla predazione, che sono tra le più rilevanti, fino a quelle per annegamento, che sono invece il nucleo di questo studio.

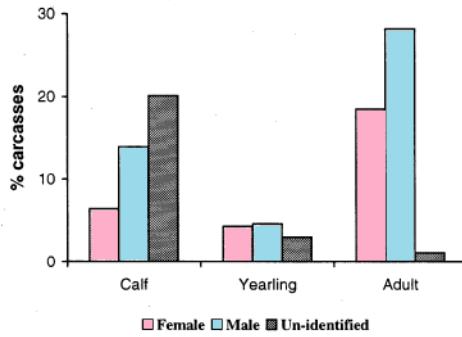
Dai dati reperiti non si è ottenuto un numero totale di morti, che verrà stimato successivamente, ma si hanno a disposizione diversi rapporti fra le cause di morte e le caratteristiche delle vittime dalle osservazioni di Mduma [7].

Per quanto riguarda l'età circa il 50% delle morti totali risultano vitelli o elementi sotto i 2 anni e la restante parte esemplari adulti.

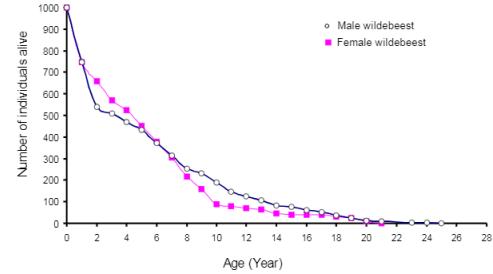
Rapportandosi con il sesso invece si osserva come la mortalità nei maschi adulti risulti significativamente maggiore rispetto a quella dei componenti femminili del branco. Una panoramica generale delle morti a seconda dell'età in rapporto al sesso è data dalla Fig. 2.16, mentre nella Fig. 2.17 vengono mostrate delle indicazioni sulla vita media degli gnu per quanto riguarda gli esemplari maschio e femmina.

La suddivisione che più risulta interessante per questo lavoro è però quella relativa alle cause di morte. Si è osservato come la maggior parte delle morti, circa il 74%, sia dovuta a cause non relative alla predazione, una buona parte, il 24% sia invece dovuta ai predatori (leoni: 8.1%, iene: 7.3%, ghepardi: 0.8%, altri predatori: 8%) e la parte restante a cause miste. La suddivisione per età nelle varie categorie riportate è analizzabile in Fig. 2.18.

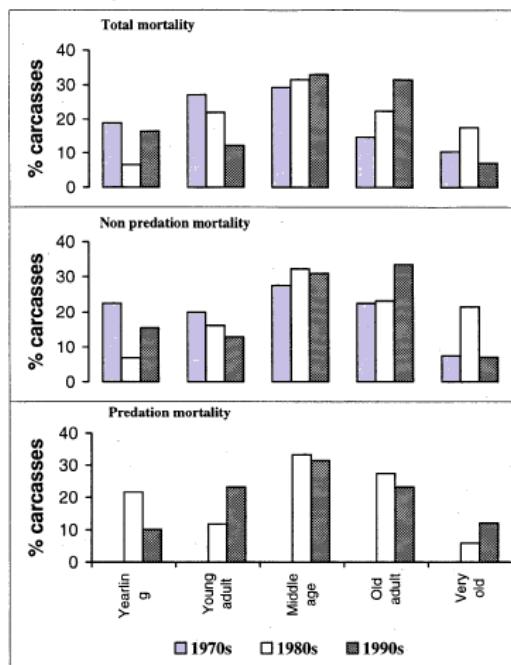
Ulteriori osservazioni sulle cause di morte e sulle caratteristiche delle vittime le si sono ottenute da un campione di 113 esemplari e sono riportate in Fig. 2.19



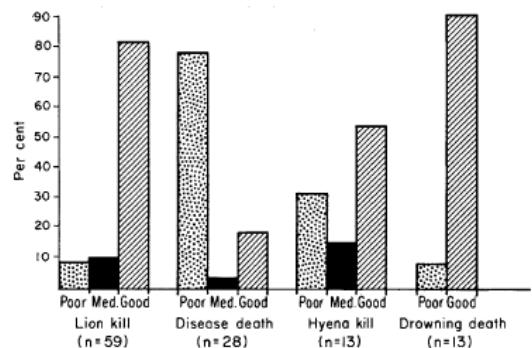
**Figura 2.16:** Percentuale di carcasse divise tra esemplari maschi ed esemplari femmina [7].



**Figura 2.17:** Distribuzione delle morti della popolazione maschile/femminile di gnu per età [8].



**Figura 2.18:** Percentuale di carcasse divise per numero di morti totali - non per predazione - per predazione nel 1970/1980/1990 [7].



**Figura 2.19:** Percentuale e causa di morte di un campione di gnu di 113 esemplari [23].

Ad analisi dei dati completata si evince come il numero di morti non per predazione, ovvero le morti per annegamento o per cause naturali, è così suddiviso tra i differenti membri a livello di età del branco [7]:

- Vitelli = 13%
- Adulti = 74%
- Anziani = 13%

Si osserva come, incredibilmente, i vitelli occupino una percentuale minima, probabilmente per la protezione fornita dal branco. Infatti la posizione interna al branco durante la migrazione e il fatto gli esemplari femmina proteggano i loro piccoli incidono positivamente sulla percentuale di morte di questi ultimi [8, 24].

## 2.7 Descrizione dei predatori

La predazione ha una grande influenza sulla dinamica delle popolazioni animali. Nel Serengeti sono presenti numerosi predatori, tra cui spiccano leoni e coccodrilli. I primi sono i responsabili della caccia nei dintorni del fiume della nostra zona di interesse, i secondi prediligono attacchi durante l'attraversamento del fiume stesso.

### 2.7.1 Leoni

I leoni del Serengeti si racchiudono in due categorie fondamentali:

- i residenti, che rimangono un anno o più o, in alcuni casi, la loro intera vita, all'interno di un'area limitata;
- i nomadi, che vagano ampiamente, spesso seguendo i movimenti delle mandrie migratorie;

Queste categorie non si escludono a vicenda, un nomade può diventare residente e viceversa [23].

#### 2.7.1.1 Composizione del branco

Nell'uso popolare qualsiasi aggregazione di due o più leoni è un branco. Un branco in questo rapporto indica in particolare le leonesse residenti con i loro cuccioli, così come i maschi che frequentano, che condividono un'area di caccia e che ci interagiscono pacificamente. In tutto il Serengeti sono stati conteggiati circa 3.123 leoni, in 778 gruppi e singolarmente, c'erano 177 individui solitari, 203 gruppi con 2 individui, 103 gruppi con 3, 63 gruppi con 4, 42 gruppi con 5, 30 gruppi con 6, e così via fino a un gruppo con 25. La dimensione media del gruppo è 4 elementi. Un branco medio comprende comprende da 2 a 4 maschi adulti, diverse femmine adulte e un numero di cuccioli [23]. Nella zona limitrofa al Mara si calcolano circa che 300-400 leoni erano nella zona precedente al fiume e 250-300 nella seconda parte.



**Figura 2.20:** Esemplari di leone nel parco del Serengeti.

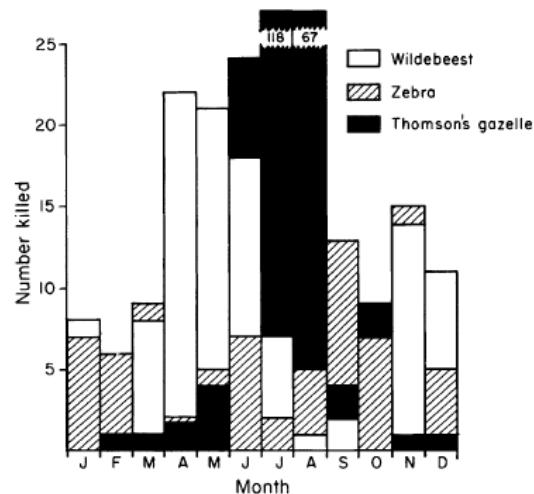
### 2.7.1.2 Cause di morte

La maggior parte dei leoni muore di malattia, fame, abbandono, vecchiaia o in seguito a contatti violenti con la propria o altra specie. Si conta che un campione di 22 leoni adulti è morto per le seguenti cause [23]:

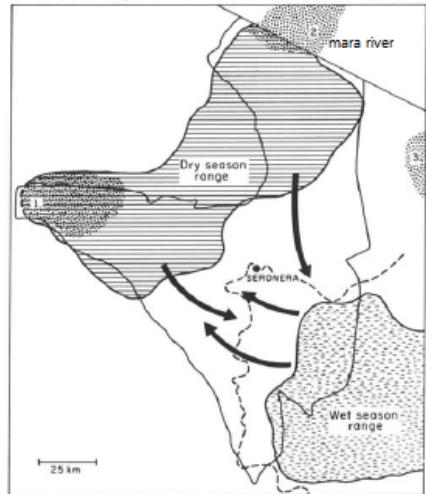
- intrappolati o morti a causa di armi da fuoco → 9 (41%)
- malattia → 4 (18%)
- lottando con altri leoni → 5 (23%)
- feriti da una preda → 2 (9%)
- vecchiaia → 2 (9%)

### 2.7.1.3 Caccia e comportamento della preda

La popolazione di prede è costituita da specie migratrici, semi migratorie o residenti. Fra le prede preferite del leone si trovano gli gnu che, durante luglio-ottobre, ovvero durante la fase dell'attraversamento, aumentano notevolmente l'abbondanza di possibili vittime per il felino. La scelta dei leoni ricade spesso sugli gnu migratori [25], come si evince in Fig. 2.21, che vengono aspettati nelle zone di interesse a seguito del loro arrivo a luglio [26, 27] (Fig. 2.22). I predatori seguono infatti i movimenti migratori per cercare di avere maggiori opportunità di caccia, anche se, per quanto riguarda gli gnu, i leoni risultano leggermente diffidenti nell'attaccarli da soli viste le grandi dimensioni di questi mammiferi.



**Figura 2.21:** Numero di morti per mese causati dai leoni.



**Figura 2.22:** Principali zone di caccia dovute al fatto di seguire i movimenti migratori degli gnu.

Il successo o il fallimento di una caccia dipende tanto dalla risposta della preda al leone quanto dal comportamento del felino stesso. Mentre un leone è ben dotato di artigli e denti per afferrare e uccidere la preda, manca di velocità se non nello scatto sul breve periodo. Gli gnu, ad esempio, possono correre per svariati chilometri a 80km/h, vitelli compresi, che possono raggiungere la stessa velocità del resto della mandria poco dopo la nascita [28]. Un leone invece può quasi raggiungere una velocità simile, grazie alla sua maggiore accelerazione, ma non per tratti maggiori di qualche centinaia di metri.

Fintanto che i leoni risultano visibili ai loro bersagli, le prede si comportano in modo straordinariamente disinvolto. I leoni a riposo vengono infatti generalmente ignorati. La risposta della preda ai leoni in movimento dipende dalla vicinanza di quest'ultimo, dall'improvvisa apparenza, dalla velocità di movimento, dal numero e dalla direzione di avvicinamento. Quando uno o più leoni camminano semplicemente, le varie specie rispondono in modo simile. Se il felino si ferma o si gira nella loro direzione, gli animali girano, fuggono a pochi metri solo per fermarsi e guardare ancora una volta, mantenendo un buon livello di vigilanza. La distanza tra il leone e la preda in tali situazioni è in genere tra 40 e 60 m, rendendo ovvio come quest'ultima si senta immune all'attacco. Agendo in questo modo gli animali mantengono il leone in vista e a debita distanza, un comportamento utile in risposta a un predatore che risulta tanto più pericoloso quanto più è nascosto.

A loro volta i leoni riconoscono i loro limiti e raramente si abbandonano a futili attacchi, soprattutto in presenza di grandi quantità di mammiferi [23].

### 2.7.2 Coccodrilli

Nelle zone del Serengeti è presente il coccodrillo del Nilo. Questo rettile ha una lunghezza di circa 4 m per un maschio adulto e circa 2,5 - 3,5 m per una femmina adulta, con un peso compreso tra i 220 e i 550 kg.



**Figura 2.23:** Esemplari di coccodrillo intento a afferrare uno gnu durante l'attraversata del fiume Mara.

I coccodrilli del Nilo (*Crocodylus niloticus*) sono un altro potenziale consumatore di gnu e le alte densità di coccodrilli adulti nei siti di attraversamento del fiume sono una notevole causa di mortalità individuale. Tuttavia i coccodrilli hanno un tasso metabolico relativamente basso e diventano facilmente sazi, portando ad alimentazione intermittente. Durante il periodo di attraversamento si stima che la maggior parte dei coccodrilli nel fiume raggiunga la zona degli annegamenti di massa e che essi consumino più o meno 150 gnu (circa il 2% degli gnu affogati) durante l'intero periodo della migrazione nella regione del Mara. Questo consumo include sia gli animali uccisi durante gli incroci, sia le carcasse disponibili dopo gli annegamenti di massa [29].

A livello numerico nel fiume Mara si stimano circa 0.33 coccodrilli per km (Fig. 2.24) [30]. Si può però notare dalla tabella 2.1 che negli anni il numero di coccodrilli è in diminuzione. La ragione potrebbe essere il non riscire a prendere abbastanza cibo, poiché per loro non è facile riuscire a catturare gli gnu durante l'attraversamento del fiume Mara [2].

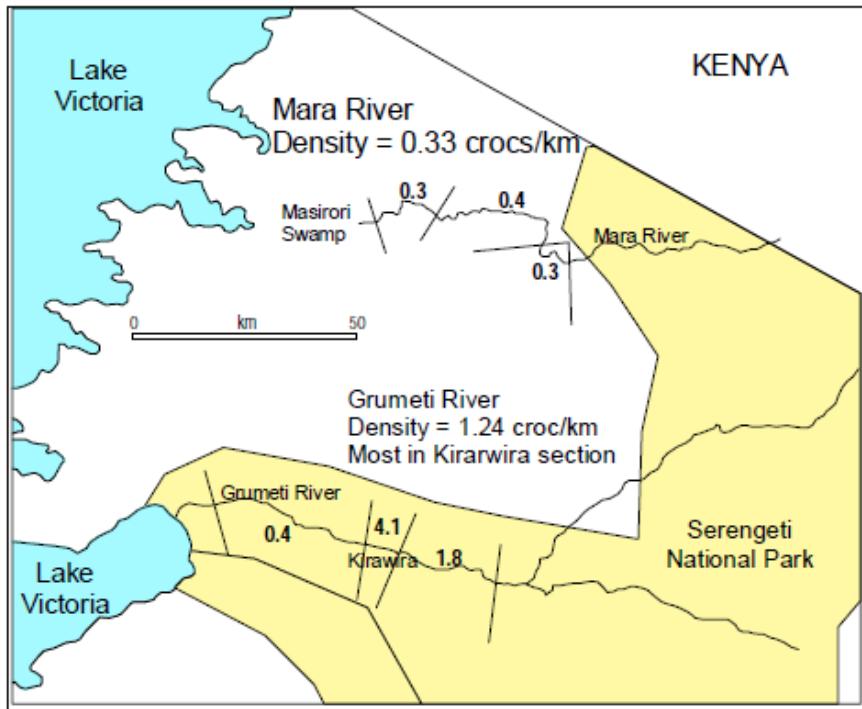


Figura 2.24: Densità di coccodrilli per chilometro nel fiume Mara.

Mara River	1990	1996	1999
Density crocs/km	0.88	0.62	0.33

Tabella 2.1: Densità osservata di coccodrilli per km nel fiume Mara in diverse annate.

### 2.7.3 Effetto confusione predatori

L'effetto confusione descrive il fenomeno della diminuzione del successo dell'attacco dei predatori con l'aumento delle dimensioni del gruppo di prede. Questa scoperta è stata dedotta da diversi suggerimenti precedenti ottenuti dallo studio di stormi di uccelli, che hanno comportamenti anti-predatori, e, più in generale, suggerisce come l'aumento attivo della densità nei gruppi di animali in risposta alla predazione possa aumentare l'efficacia dell'effetto di confusione [31].

L'aggregazione è un comportamento comune in molti animali e può portare a numerosi vantaggi per i membri del gruppo [32]. Infatti la composizione di gruppi permette una maggiore vigilanza e effetti di diluizione [33], risultando una buona difesa dai predatori. Inoltre, all'aumentare della dimensione del gruppo di prede alcuni predatori vedono calare drasticamente il loro tasso di successo in relazione al numero di attacchi [2, 21, 34]. È stato suggerito come ciò si verifichi a causa della maggiore difficoltà nella fase di targeting della preda [35], ovvero nel tentativo di rintracciare tra molti un

singolo elemento considerato più debole degli altri. Analogamente si è quindi dedotto come l'aumento della densità del gruppo massimizzi l'effetto confusione garantendo un'ottima risposta al comportamento dei predatori. Viene infatti osservata, a parità di predatori, una netta diminuzione del numero di prede cacciate all'aumentare della dimensione del branco.

La dimensione del branco influenza, oltre al tasso di successo, il tempo di caccia dei partecipanti: i predatori sono più veloci nell'attaccare bersagli in branchi maggiormente sparsi. In conclusione, seguendo la definizione di Krause & Ruxton [36]: " L'effetto confusione descrive il ridotto rapporto attacco-uccisione sperimentato da un predatore derivante dall'incapacità di individuare e attaccare le prede individuali ". Alcuni ricercatori hanno definito l'effetto di confusione in modo più ampio e hanno incluso anche casi in cui il predatore lancia meno attacchi a causa della minore aspettativa di successo [37].

Nei predatori visivi come i leoni [35], la confusione è ancora più evidente ed è correlata al grado di agilità delle prede. Nel caso specifico in esame, si possono notare notevoli differenze di velocità tra i leoni e gli gnu, come mostrato di seguito:

- Velocità degli gnu: 22 m/s
- Accellerazione degli gnu: 5.6 m/s<sup>2</sup>
- Massima velocità di attacco del leone: 16 m/s;
- Massima accellerazione del leone: 9.5 m/s<sup>2</sup>

Come si osserva i leoni risultano più lenti nella corsa rispetto agli gnu, ma possono vantare quasi il doppio dell'accellerazione, fattore che gli fornisce un vantaggio tale da permettere la caccia.

# 3. Descrizione del Modello

## 3.1 Ambiente di simulazione

### 3.1.1 Zona del fiume

Nella regione compresa fra il Serengeti e il Masai Mara sono presenti diversi corsi d'acqua, come riportato in Fig. 3.1, il cui attraversamento rappresenta un ostacolo alla migrazione del branco [38].

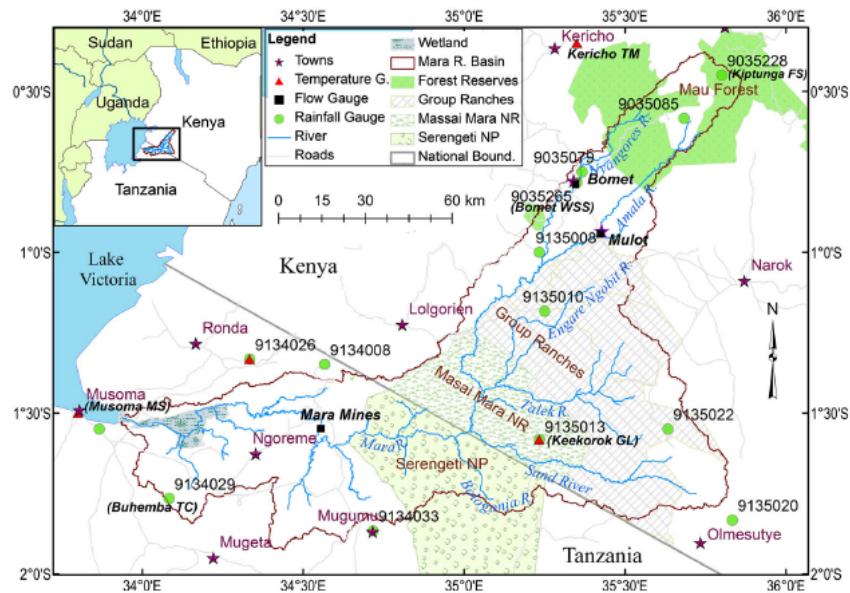
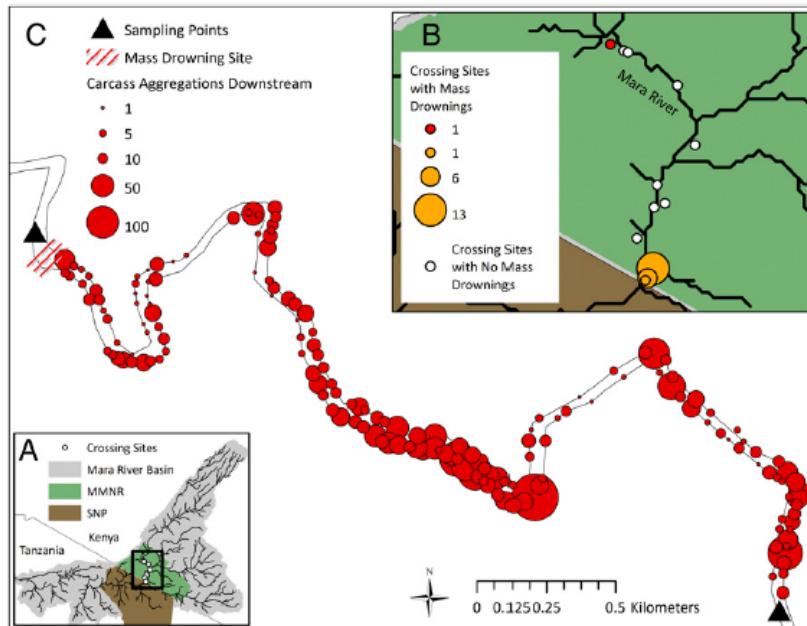


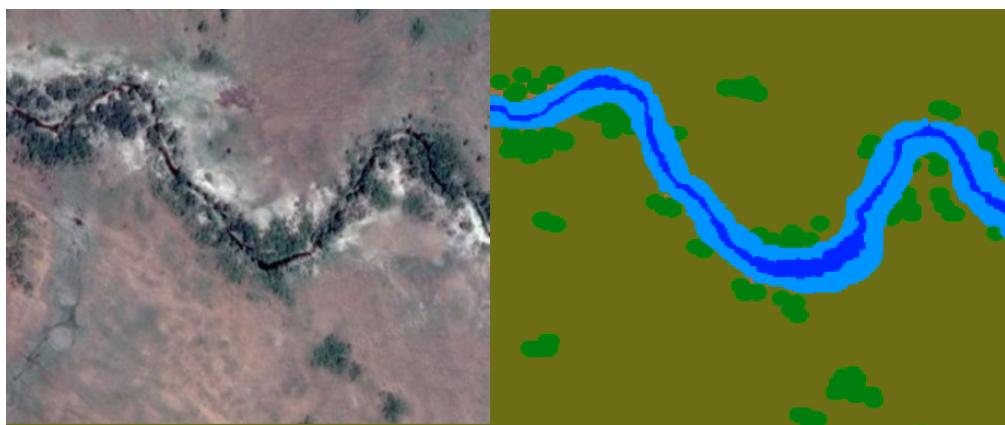
Figura 3.1: Maggiori corsi d'acqua nella regione del Serengeti e del Masai Mara [39].

In questo studio ci si è focalizzati nell'attraversamento di uno specifico corso d'acqua, il fiume Mara, e, ancora più in particolare, della sua zona descritta nell'immagine Fig. 3.3. La scelta è ricaduta su di essa poichè risulta la sezione del fiume con il maggiore passaggio di gnu e, quindi, la zona nella quale si registra la stragrande maggioranza degli annegamenti di massa [29].



**Figura 3.2:** Parte del fiume con le relative zone di annegamento.

Le morti totali per annegamento nell'intera migrazione sono circa  $6000 \pm 3000$  e risultano quasi completamente concentrate in questa zona [29, 40]. Per queste ragioni si è considerato come scenario principale questa parte di territorio e si è assunto che rappresenti, per il momento, l'unico punto di attraversamento selezionato dagli gnu. Si sceglie quindi di rappresentare nel modo più fedele possibile questa sezione del fiume in NetLogo, come illustrato in Fig. 3.3. Si terrà conto anche del fatto che il flusso del fiume nel nostro scenario vada da destra verso sinistra (dal punto più alto, la sorgente, al punto più basso).

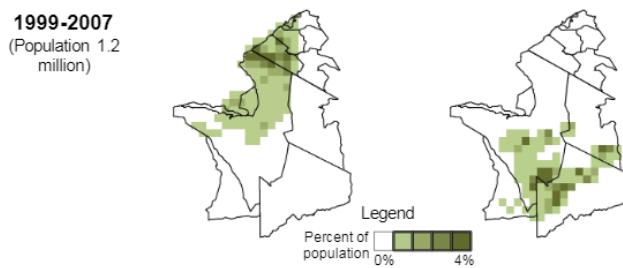


**Figura 3.3:** Confronto tra visione satellitare della sezione del fiume in esame e trasposizione in NetLogo.

### 3.1.2 Periodo Attraversamento

Il periodo di attraversamento considerato va da Giugno ad Ottobre, poichè ci si soffrema sui periodi di attraversamento maggiore, nella stagione secca, e sui possibili casi limite. Si verifica qualche attraversamento sporadico ed isolato anche in altri mesi, ma la bassa frequenza e la scarsa numerosità dei branchi che provano la traversata ci ha portato a non includere questi mesi come parte del caso di studio [1, 39, 41].

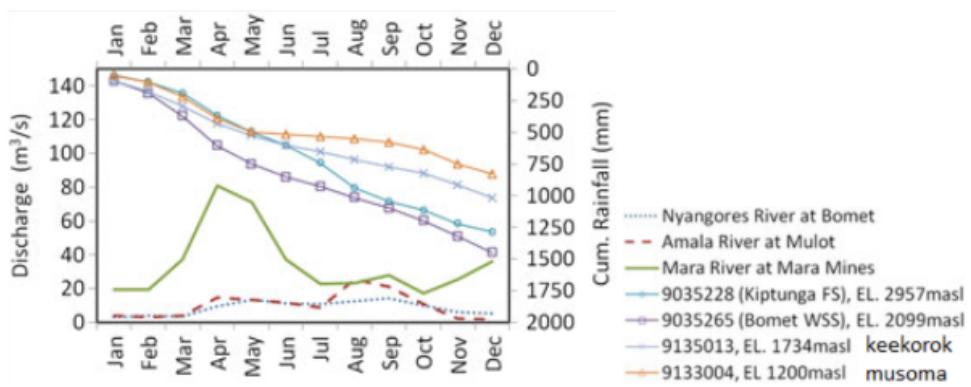
Si considera un numero di gnu in analisi di massimo di 1 milione di individui poichè è il numero registrato nella zona in esame durante i periodi analizzati (Fig. 3.4).



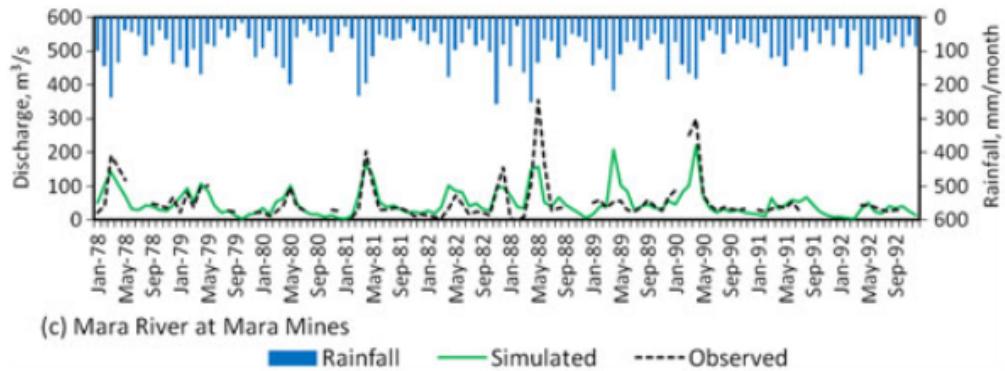
**Figura 3.4:** Concentrazione di gnu per zona e periodo dell’anno. A sinistra è riportata la concentrazione nel mezzo della stagione secca, mentre a destra nel mezzo della stagione umida.)

### 3.1.3 Precipitazioni e dati sul fiume

Per la modellazione del fiume, delle sue dimensioni e della sua portata, è risultato fondamentale uno studio sulle precipitazioni nella zona in esame che sarà presentato in questa sezione. Prima di tutto si è osservato l’andamento nelle piogge nei diversi mesi (prendendo in considerazione i mesi da Giugno ad Ottobre) nella zona del Mara River (Fig. 3.5), andando poi a confrontarli con l’andamento delle precipitazioni durante il corso degli anni nella medesima zona tra il 1978 e il 1992 (Fig. 3.6).

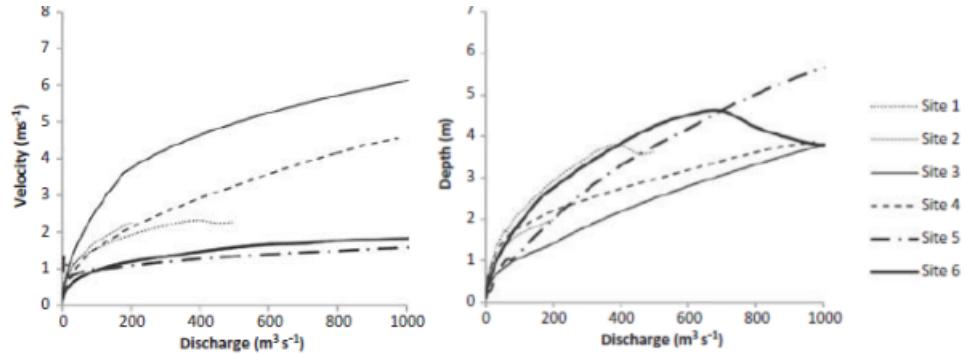


**Figura 3.5:** Andamento nei mesi delle precipitazioni nella zona del Mara [39, 42].

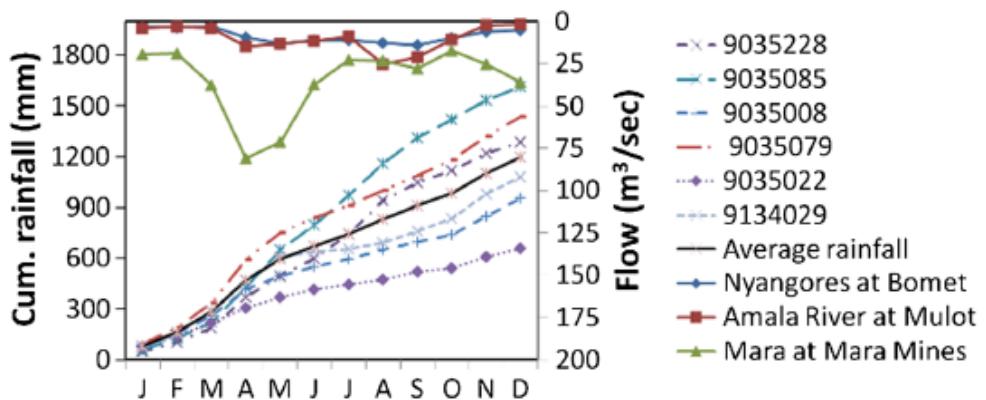


**Figura 3.6:** Andamento delle precipitazioni nella zona del Mara dal 1978 al 1992 [42].

Ottenuta la quantità mensile di piogge, espressa in mm, si è andato a calcolare, mediante le relazioni espresse dai grafici riportati in Fig. 3.7 e in Fig. 3.8, la velocità, la profondità e il flusso del fiume [38].



**Figura 3.7:** Velocità e profondità del fiume Mara rispetto alle precipitazioni.



**Figura 3.8:** Flusso del fiume Mara rispetto alle precipitazioni.

Sia per le piogge che per il flusso del fiume si è trovata conferma anche in diverse altre raccolte di dati. In Fig. 3.9, per esempio, si illustrano flusso medio e flusso massimo nei periodi selezionati.

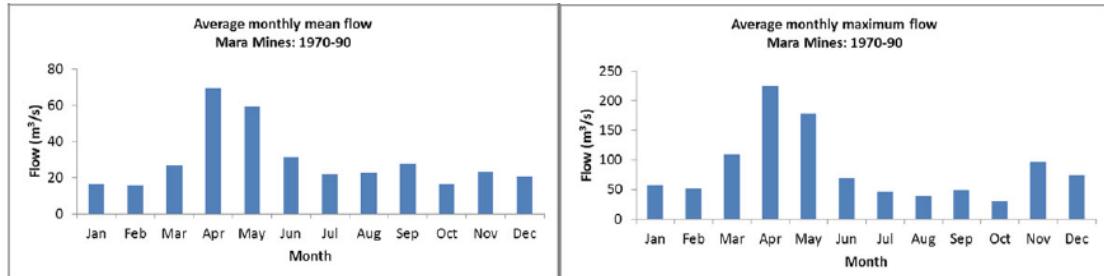


Figura 3.9: Flusso medio e massimo del fiume Mara dal 1970 al 1990 [43].

Per quanto riguarda la profondità invece, il massimo raggiungibile dal fiume Mara è una profondità di 8m, periodi con acqua superiore ai 2 metri possono persistere per 90 giorni, mentre con acqua superiore a 4 metri per 3 giorni.

Questo ha portato a considerazioni che hanno condotto a una struttura a differenti livelli di profondità (con profondità maggiori nel mezzo del corso d'acqua) dipendenti dal mese considerato e dalle differenti condizioni climatiche registrate nell'ultimo mese. Discorso analogo può essere fatto per la larghezza, per la quale si identificheranno 3 categorie partendo dai seguenti dati [44]:

- Larghezza minima: 28.9 m
- Larghezza media: 48.9 - 51.3
- Larghezza massima: 131 m

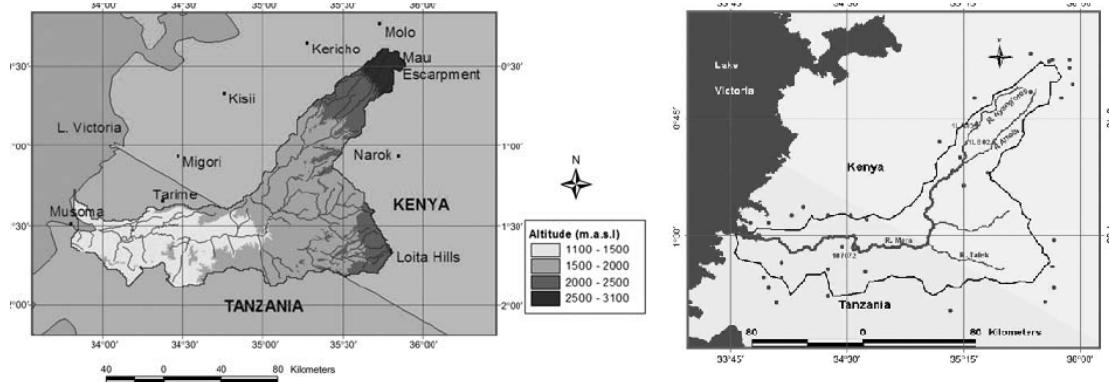
Come precedentemente anticipato, basandosi sulle quantità di pioggia, si possono identificare due (bimodali) principali periodi, che vanno a motivare parzialmente la scelta del periodo di attraversamento da parte della mandria di gnu:

- Marzo/Aprile - Giugno → Longer Rain
- Ottobre/Novembre - Dicembre → Shorter Rain

Una motivazione relativa invece alla scelta della rotta migratoria va ricercata nel rapporto fra altitudine (maggiore verso il Kenya) e piovosità (Fig. 3.10). Si identificano 3 zone principali del fiume a cui si associa un valore medio di piovosità [41]:

- Zona alta del fiume (Kenya) → 1000 - 1750 mm
- Zona media del fiume → 900 - 1000 mm
- Zona bassa del fiume (Tanzania) → 300 - 850 mm

Gli gnu infatti migrano per ricercare un clima il più ideale possibile, una maggiore disponibilità di acqua e una buona quantità di pioggia, la quale gioca un ruolo fondamentale.



**Figura 3.10:** Altitudine nelle varie zone del fiume Mara [41].

Da queste analisi si sono compilate le tabelle sottostanti (Fig 3.11, 3.12) per i mesi considerati papabili per un attraversamento (Giugno-Ottobre) andando a caratterizzare tramite opportune proporzioni i parametri necessari allo studio, discretizzandoli per ottenere livelli e dipendenze per la simulazione in NetLogo.

FIUME											
MESI	PIOGGIE	FLUSSO STANDARD	FLUSSO MASSIMO	VELOCITÀ STANDARD	VELOCITÀ MASSIMA	PROFONDITÀ IDRAULICA	PROF. IDR. MASSIMA	PROFONDITÀ CENTRO	PR. CENTRO MASSIMA	LARGHEZZA	LARGHEZZA MASSIMA
Giugno	100mm	37 m³/s	125 m³/s	1.35 m/s	1.9 m/s	1.4 m	2 m	6 m	8.4 m	97 m	136 m
Luglio	30 mm	24 m³/s	50 m³/s	1.25 m/s	1.4 m/s	1.1 m	1.4 m	5.5 m	6.1 m	90 m	100 m
Agosto	60 mm	27 m³/s	60 m³/s	1.3 m/s	1.5 m/s	1.2 m	1.5 m	5.7 m	6.6 m	93 m	108 m
Settembre	80 mm	30 m³/s	85 m³/s	1.3 m/s	1.6 m/s	1.3 m	1.8 m	5.7 m	7 m	93 m	130 m
Ottobre	50 mm	26 m³/s	57 m³/s	1.28 m/s	1.45 m/s	1.15 m	1.45 m	5.6 m	6.4 m	92 m	104 m

**Figura 3.11:** Tabella valori.

LIVELLI									
PIOGGIA		FLUSSO		VELOCITÀ		PROFONDITÀ		LARGHEZZA	
INTERVALLO	LIVELLO	INTERVALLO	LIVELLO	INTERVALLO	LIVELLO	INTERVALLO	LIVELLO	INTERVALLO	LIVELLO
< 40 mm	1	< 30 m³/s	1	< 1.35 m/s	1	< 6 m	1	< 95 m	1
40-80 mm	2	30 - 60 m³/s	2	1.35 - 1.6 m/s	2	6-7 m	2	95-110 m	2
> 80 mm	3	60 - 90 m³/s	3	> 1.6 m/s	3	> 7 m	3	> 110 m	3
		> 90 m³/s	4						

**Figura 3.12:** Livelli.

Dopo l'analisi dei dati a disposizione, si modelleranno le variabili identificate tramite le dipendenze descritte dalla tabella e dal diagramma di flusso a seguire (Fig. 3.13, Fig. 3.14). Queste dipendenze creeranno dei vincoli che permetteranno di simulare le corrette condizioni (attenendosi ai valori storici medi) per ogni mese di interesse, garan-

tendo di non simulare situazioni altamente poco probabili. Sarà comunque consentito non considerare i vincoli e scegliere manualmente le condizioni ambientali per effettuare la simulazione, fornendo quindi la possibilità di analizzare il comportamento del branco di gnu anche in situazioni mai registrate, ma nei limiti del possibile.

DIPENDENZE STANDARD (mese → pioggia; pioggia → flusso; flusso → [velocità, profondità, larghezza])							
mese	pioggia	pioggia	flusso	flusso	velocità	profondità	larghezza
giugno	3	1	1	1	1	1	1
luglio	1	2	2 (o 1 o 3)	2	2 (o 1)	2 (o 1)	2 (o 1)
agosto	2	3	2 (o 3 o 4)	3	2	2	3
settembre	2			4	3	3	3
ottobre	2						

Figura 3.13: Dipendenze.

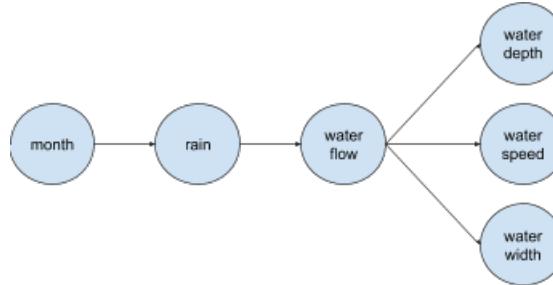


Figura 3.14: Dipendenze fra i parametri della simulazione relativi a piogge e fiume.

## 3.2 Agenti e ambiente

Gli agenti utilizzati per la nostra simulazione sono di 3 categorie ben distinte:

- Gnu
- Leoni
- Coccodrilli

Ognuna di queste tipologie è caratterizzata da particolari peculiarità e comportamenti che saranno descritti in seguito.

### 3.2.1 Caratterizzazione gnu

#### 3.2.1.1 Numero del branco

Sarà presente la possibilità di selezionare un numero variabile in un intervallo compreso da 100 a 1000 agenti (con incrementi previsti in gruppi da 100) che saranno

rappresentati in NetLogo con il colore nero. Si è decisa questa numerosità poichè, per questioni computazionali, è stato necessario adottare una proporzione in scala 1:1000. Risultava infatti proibitivo riuscire a considerare un maggior numero di agenti senza rendere la complessità computazionale tale da portare ad una simulazione stentata e poco fluida.

Il numero di agenti selezionato è in accordo con i dati a disposizione che identificano in 100.000 e 1.000.000 i limiti entro i quali si può osservare un attraversamento.

Con il fine di permettere la simulazione di un qualsiasi attraversamento verrà fornita la possibilità di scegliere la numerosità di partenza del branco e di suddividerlo in un numero di sotto-branchi compreso fra 1 e 3. Ogni singolo sotto-gruppo sarà considerato come un branco indipendente dagli altri e ogni concetto spiegato nelle sezioni a seguire sarà applicabile ad ognuno di essi.

### 3.2.1.2 Zona e metodologia della partenza

Gli gnu partiranno dall'angolo in basso a destra della griglia di simulazione, poiché, come si può notare dalla cartina 3.2, essa rappresenta la zona in cui gli gnu tentano i maggiori attraversamenti e, conseguentemente, anche la zona in cui si registra la grande maggioranza degli annegamenti di massa.

Per questo studio, per semplificare la situazione, la locazione di partenza del branco sarà sempre nella medesima zona, ma uno dei principali sviluppi futuri consisterà appunto nel permettere un diverso punto di partenza, così come un diverso punto di approccio al fiume e un diverso punto di arrivo. A questo si dovrà aggiungere una differente caratterizzazione del numero di morti per annegamento in base al punto di approccio del fiume scelto.

Gli gnu potranno partire in diversi gruppi separati l'uno dall'altro, raggiungendo le rive del fiume in momenti diversi tra loro anche se con una certa regolarità. Si può notare come nella creazione gli agenti non siano troppo distanti tra loro, anche se ancora abbastanza sparsi. Questo è dato dal fatto che nella zona del fiume considerata è già iniziata una fase di avvicinamento della mandria. Per simulare meglio una mandria già in movimento si genereranno ad intervalli regolari sotto-gruppi di agenti distribuendoli normalmente nell'angolo considerato, in modo da rappresentare un accenno di aggregamento già inizialmente.

### 3.2.1.3 Dinamiche del branco e leadership

Gli gnu, come anticipato nella sezione 2.6.4, vengono implementati come divisi con le corrette proporzioni a seconda del sesso, maschi/femmine e dell'età, adulti e vitelli.

Poco dopo la partenza, il branco inizia una fase di aggregazione modellata seguendo il modello dei Boids descritto nella sezione 2.5. Gli gnu tendono ad avvicinarsi tra loro per cercare di formare una fila abbastanza larga in modo tale da creare uno "scudo" protettivo contro i predatori e diminuire le perdite nell'attraversamento del fiume.

Oltre all'aggregazione seguendo i parametri di allineamento, coesione e separazione cercando di emulare i comportamenti reali del branco si è condotto uno studio sulle velocità della mandria nei vari momenti rappresentati dalla simulazione. Inizialmente gli gnu procedono a velocità "di crociera" fino all'arrivo sulle rive del fiume dove i primi arrivati si fermano, in attesa della scelta di uno o più leader per iniziare l'attraversamento, mentre gli individui nelle retrovie continuano ad avanzare più lentamente, producendo come effetto quello di ammassarsi sulla sponda del fiume. Si è infatti osservato come diverse volte gli gnu migrino verso un fiume da 1 km di distanza, la lunga colonna di animali colpisce il fiume in una corsa e, se il terrapieno è ripido e l'acqua profonda, gli animali improvvisamente risultano rallentati mentre quelli nelle retrovie continuano a spingere in avanti fino a quando il fiume si trasforma in una massa di animali (Fig. 3.15) [23].



**Figura 3.15:** Gnu ammassati nei presi del fiume Mara [8].

Ad attraversamento del fiume completato, gli esemplari riprenderanno a marciare come una mandria, con qualche piccola differenza rispetto alla zone antecedente al fiume [8]. Per replicare questi comportamenti si modificheranno dinamicamente i parametri del modello dei Boids.

Gli esemplari che per primi sfidano le acque del fiume, come precedentemente anticipato, sono detti "leader". Essi sono gnu di sesso maschile e sono caratterizzati da un tasso di morte più elevata, poiché meno prudenti e più temerari rispetto alle femmine che tendono a badare più alla loro incolumità e a quella dei loro vitelli [45, 8]. I maschi infatti sono leader naturali e compongono l'avanguardia delle file migratorie [46], ma in un branco di gnu un reale capo non è previsto. Infatti, quando la mandria arriva in prossimità del fiume si arresta aspettando qualche coraggioso che assuma le responsabilità date dalla leadership e si butti, dando il via all'attraversamento. Queste analisi hanno portato all'implementazione di un metodo che permettesse di scegliere un numero di leader compreso tra un range abbastanza basso (1 e 5) scelto in modo casuale tra i primi esemplari maschi di ogni sotto-branco che si approcciano alle rive del fiume [8], come indicato in Fig. 3.16.



**Figura 3.16:** Rappresentazione in NetLogo dei leader del branco, in rosso.

#### 3.2.1.4 Attraversamento del fiume

Una volta che i primi esemplari hanno sfidato le acque del fiume il resto della mandria, seguendo l'esempio dei leader, inizia l'attraversamento, anche se è giusto indicare come una volta compiuto il coraggioso gesto, lo status di leader non venga più riconosciuto in quanto la mandria continua il proprio percorso indipendentemente dal singolo individuo.

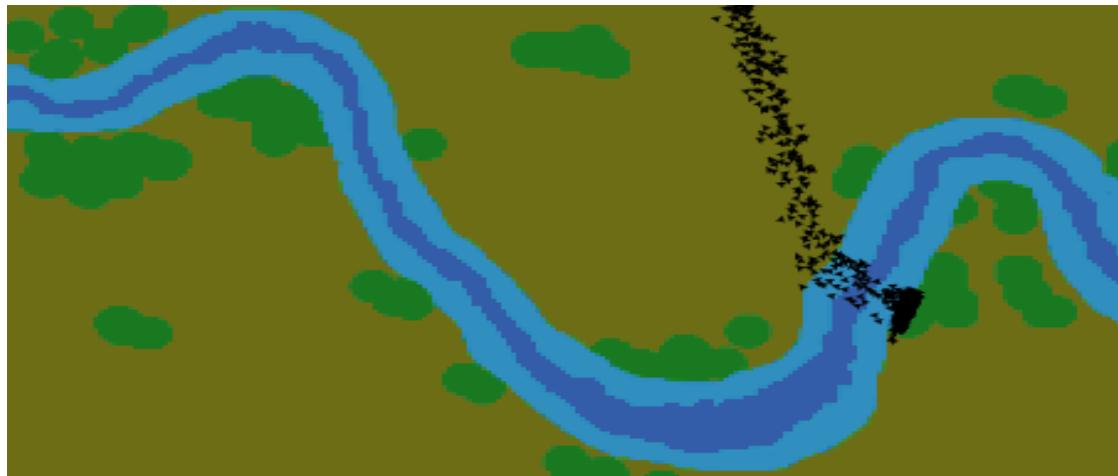
Durante il successivo attraversamento gli animali tendono a separarsi in un diverso numero di file in acqua (Fig. 3.17).

Ciò è causato dalla divisione che si crea nel seguire i diversi leader, dal flusso del fiume che li sposta e dal tentativo di non ammassarsi troppo in acqua, rendendosi più difficile l'attraversamento.



**Figura 3.17:** Branco di gnu suddiviso in più file durante l'attraversamento del fiume.

Gli agenti saranno modellati in modo tale da seguire il comportamento descritto e tentare la traversata suddividensosi, grosso modo, in varie file (Fig. 3.18). Tramite i parametri relativi alle caratteristiche del fiume, il flusso stesso e la velocità dell'acqua causeranno una maggiore deviazione del loro percorso nel fiume, simulando un attraversamento più impervio. Lo spostamento risulta maggiore se non sono presenti vicini sul lato sinistro dell'agente stesso. Considerando il flusso del fiume come diretto da destra verso sinistra la presenza di altri agenti sulla sinitra forma infatti una sorta di barriera che diminuisce la deviazione inflitta dall'acqua sulla traiettoria ideale. Se uno gnu si troverà infatti da solo, o senza un adeguato numero di vicini alla propria sinistra, verrà deviato maggiormente e rischierà, dopo un determinato intervallo temporale, di morire per affogamento, poiché non riuscirà a completare l'attraversamento del fiume. Si osserva come uno gnu possa annegare solo in un'acqua abbastanza profonda (caratterizzata dal blu più scuro). Questo porta a considerare come assunzione principale per questa fase il fatto che uno gnu anneghi principalmente per "solitudine", ovvero per un intervallo di tempo lontano dal resto del branco troppo elevato.



**Figura 3.18:** Riproduzione in NetLogo dell'attraversamento del fiume. Si può notare l'ammassamento sulle rive, la composizione di diverse file durante il passaggio e il tentativo di ricomporre una mandria compatta dopo la traversata.

### 3.2.1.5 Zona oltre al fiume e arrivo

Il branco, dopo aver superato il fiume, si troverà in una condizione di aggregazione minore rispetto a prima della traversata. Per questo motivo gli animali cercheranno di riaggredarsi aumentando la loro coesione. Di questa azione è però osservabile solo la fase iniziale in cui il gruppo tenta di ricompattarsi, la griglia di simulazione rappresenta infatti una zona delimitata e l'aggregazione finale si completerebbe nella sua forma ideale oltre la zona raffigurata. Gli agenti puntano singolarmente una qualsiasi zona al limite superiore della mappa, oltre al fiume, ma tenderanno tramite l'aggregazione, ad

arrivare quasi sempre nello stesso punto di arrivo comune all'intero branco. Una volta giunti nella parte di confine con la mappa passeranno allo stato di arresto, scomparendo dalla simulazione per non influenzare inutilmente la complessità computazionale del programma.

### 3.2.1.6 Risposta alla predazione

Gli gnu sono animali che, per natura, vigilano per accorgersi di possibili predatori, ma, quando migrano e si trovano nella mandria, il loro grado di vigilanza si abbassa notevolmente poiché tendono a sentirsi più protetti proprio per i benefici dati dall'aggregazione. Questo è dato dalla prioritizzazione dell'obiettivo comune del seguire il resto del gruppo a scapito della sopravvivenza del singolo e dall'effetto confusione generato sui predatori descritto nel Capitolo 2.7.3 [47].

Come anticipato nel Capitolo 2 gli agenti che rappresentano gli gnu, se minacciati da un predatore (cioè se si troveranno a una breve distanza da un predatore e avranno pochi vicini), proveranno a fuggire tentando un manovra evasiva per poi tentare di ricongiungersi appena possibile alla mandria. Si passerà quindi a una situazione di "sotto-attacco" in cui lo gnu designato proverà la fuga e in caso essa si riveli non abbastanza efficace sarà catturato e ucciso dal leone. Successivamente, in caso la fuga dia i risultati sperati, si avrà una fase di rientro in cui l'agente tenterà di reinserirsi nel branco.

Per rappresentare la tecnica di fuga degli gnu abbiamo deciso di prendere ispirazione dal paper del 1999 di Reynolds [48]. Abbiamo quindi cercato di emulare il comportamento di "pursuit" e "evasion", azioni che estendono il modello di base dei Boids, mostrata in Fig. 3.19, per rappresentare la fuga e il ricongiungimento dello gnu al gruppo.

**Pursuit** (Inseguimento): allineare radialmente il vettore di velocità verso la posizione prevista di un bersaglio in movimento in un certo futuro.

**Evasion** (Evasione): allineare radialmente il vettore di velocità lontano dalla posizione prevista di un bersaglio in movimento in un certo futuro.

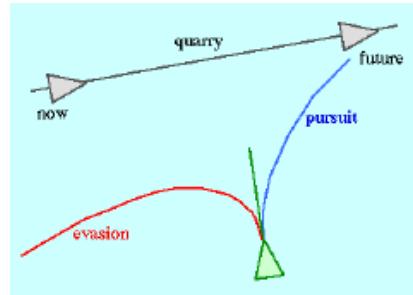


Figura 3.19: Pursuit e Evasion.

### 3.2.1.7 Parametri di simulazione per gli gnu

In questa sezione si riportano in formato schematico tutti gli aspetti implementativi degli agenti corrispondenti agli gnu. Si illustrano quindi le variabili utilizzate, i possibili stati in cui un agente si può trovare, le transizioni fra di essi e il significato dei diversi colori con cui saranno rappresentati durante la simulazione.

Si osserva come nella scelta delle variabili non si considerino una vita, un'energia o un quantitativo di fame per ogni esemplare. Questo è dovuto al fatto che si assumano la relazione con il branco e una base probabilistica come unici fattori ad influenzare la sopravvivenza degli gnu.

Variabile	Descrizione	Variabile	Descrizione
sex	Sesso dell'esemplare (maschio, femmina o vitello)	nearest-neighbor	L'esemplare a lui più vicino (parametro di Boids)
target	Il punto di arrivo a priori prescelto da ogni esemplare prima di seguire la mandria	status	Stato in cui si trova l'esemplare, ne motiva i movimenti
waitforleadership	Tempo trascorso nell'attesa della scelta dei leader	crossing?	Esemplare che sta compiendo o meno l'attraversamento
leadership?	Esemplare leader o non leader	timealone	Tempo trascorso "da solo" da ogni esemplare in acqua
flockmates	Vicinato per aggregazione (parametro di Boids)	firstimeattacked?	Esemplare che si sente attaccato per la prima volta o meno

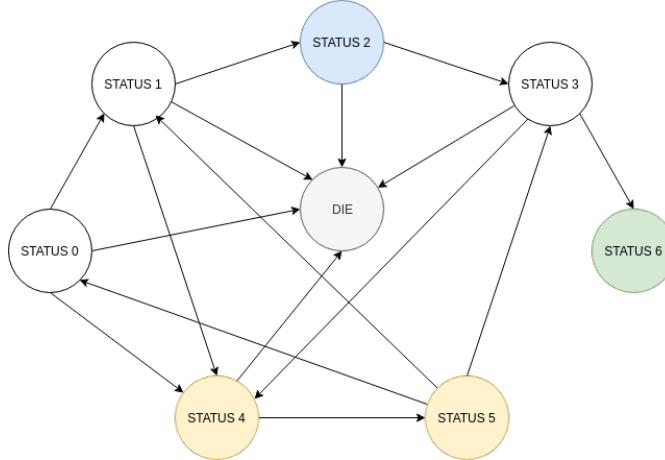
**Tabella 3.1:** Variabili appartenenti ad un agente gnu.

Stato	Descrizione	Comportamento
0	Stato di partenza, antecedente all'arrivo al fiume	L'agente si muove secondo il modello dei boids attenendosi il più possibile alla mandria
1	Arrivo alle rive del fiume	L'agente, se già sulle rive del fiume, aspetta fino a che lui o qualche agente maschio decida di diventare leader, altrimenti continua a muoversi seguendo il modello dei boids, ma più lentamente, spargendosi e ammassandosi sulle rive del fiume
2	Attraversamento del fiume	L'agente, se l'acqua non è troppo affollata, procede alla traversata seguendo il modello dei boids, tendendo ad allinearsi maggiormente, altrimenti aspetta che il fiume sia meno affollato
3	Oltre al fiume	L'agente continua a muoversi attraverso il modello dei boids, ma, a differenza dello stato 0, tende a disperdersi maggiormente
4	Evasion, fuga da un attacco di un leone	L'agente si stacca dal branco e, con un andamento leggermente più veloce, tenta di scappare all'attacco del leone
5	Pursuit, rientro in branco a fuga riuscita	L'agente interessato punta un elemento del branco e cerca di rientrare nel branco con un andamento leggermente più veloce del branco
6	Stato finale	L'agente ha terminato la sua simulazione e diventa <i>hidden</i>

**Tabella 3.2:** Descrizione dei possibili stati di un agente gnu.

Colore	Descrizione	Colore	Descrizione
nero	Gnu in branco	verde	Gnu in evasion
rosso	Gnu leader	blu	Gnu in pursuit

**Tabella 3.3:** Colori con cui vengono rappresentati gli agenti Gnu durante la simulazione.



**Figura 3.20:** Diagramma delle possibili transizioni di stato di un agente gnu. In azzurro è riportato lo stato relativo all’attraversamento del fiume, in verde lo stato finale, in giallo gli stati relativi alla relazione con la predazione e in grigio l’ipotetico stato di morte.

### 3.2.2 Caratterizzazione leoni

#### 3.2.2.1 Tecnica di predazione e risposta delle prede

Si è cercato di riprodurre la tecnica di caccia del leone, anticipata vagamente nella sezione 2.7.1.3 e descritta più approfonditamente a seguire, schematizzandola in modo da ottenere il comportamento più semplice possibile cercando di cogliere comunque gli aspetti principali. Ci si baserà fortemente sulle descrizioni fornite da Schaller [23] e riassunte di seguito.

Gli gnu solitamente pascolano in sotto-branchi più sparsi, motivando l’idea comune di appostamento e imboscata per quanto riguardi il leone. Quest’ultimo infatti approccia prede da molto lontano, anche a 2 km di distanza, si avvicina lentamente cercando di non farsi vedere e prepara imboscate dalla distanza di circa 100 m.

Nei momenti cruciali della migrazione però gli ungulati tendono a comporre mandrie più compatte appunto per rispondere alla predazione, obbligando il felino ad una strategia di attacco leggermente diversa. A differenza delle altre prede, quando gli gnu attraversano il fiume, per più giorni e in diversi momenti possono recarsi allo stesso punto motivando il fatto che i predatori si raggruppino per attenderli, intravedendo una maggiore possibilità di caccia. Le prede a riposo spendono diverso tempo a vigilare, accorgendosi dell’odore dei leoni e reagendo di conseguenza. Que-

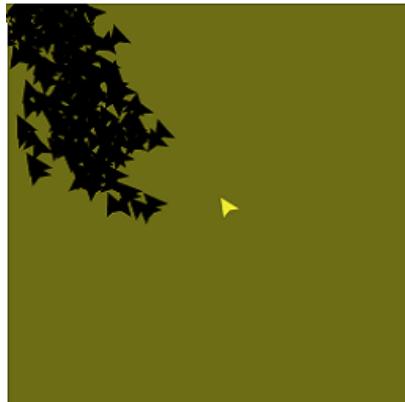
sto comportamento non accade però quando sono concentrate sulla migrazione, dove prioritizzano il seguire la mandria alla difesa dai predatori, abbassando notevolmente il tasso di vigilanza. Le motivazioni di questo atteggiamento sono da ricercare nei concetti di sopravvivenza del branco e al vantaggio dato dall'aggregazione.

Per le ragioni sopracitate il leone rinuncia ad una fase vera e propria di "stalking" in cui cerca di non farsi notare dalla preda nel tentativo di preparare un'imboscata. Sarebbe infatti inutile sperare che nemmeno un individuo della mandria di gnu si accorga della loro presenza, così come risulterebbe poco efficace dato il costante movimento ad alta velocità delle prede. Il "re della savana" avrà quindi un comportamento meno pignolo e cercherà semplicemente di portarsi a una distanza tale da permettergli l'identificazione di un'esemplare ritenuto attaccabile. Se la distanza si attesta attorno alla decina di metri l'elevata accelerazione renderà difficile, se non quasi impossibile, la fuga della preda prescelta. Dalla controparte il leone può mantenere una tale velocità solo per poche centinaia di metri e la sua velocità di crociera non è paragonabile a quella degli gnu. In caso di fallimento di un attacco il felino tende ad allontanarsi per evitare pericoli inutili.

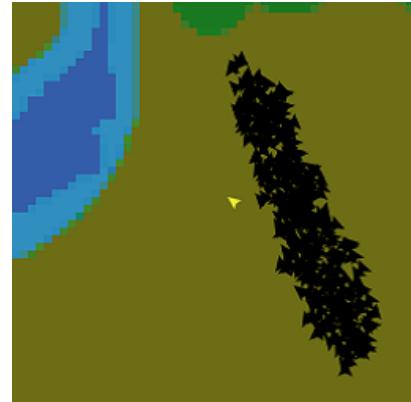
Si osserva come, tendenzialmente, i leoni caccino maggiormente gnu maschi, data la loro maggior vulnerabilità per il ruolo che ricoprono, ovvero quello di difendere il branco. Inoltre è abbastanza evidente come durante la fase di targeting l'obiettivo principale risulti quello dell'identificazione di una preda considerata più debole rispetto al resto del branco. Per la scala utilizzata nella simulazione e per semplicità si decide però di non modellare le condizioni degli gnu e di rimuovere quindi questa possibile scelta per il leone, che si limiterà a valutare la solitudine di un'ipotetica preda.

Dopo le dovute considerazioni appena effettuate si descrivono a seguire i movimenti di un singolo esemplare per come verranno implementati, tenendo conto che ogni altro leone emulerà lo stesso comportamento. Il felino inizialmente vaga alla ricerca di un gruppo di gnu, una volta individuato inizierà una fase di avvicinamento. Raggiunta una buona distanza resterà in attesa e osserverà la mandria con l'obiettivo di identificare uno gnu abbastanza isolato (con pochi vicini), da considerare come preda prescelta, poiché un numero troppo elevato di esemplari accanto alla preda scelta renderebbe inefficace l'attacco e rappresenterebbe inoltre un serio pericolo per la sopravvivenza del leone stesso. Individuata la preda il felino tenterà un'imboscata scattando a massima velocità nella direzione dell'animale selezionato come possibile preda. Quest'ultima proverà la fuga seguendo i movimenti descritti nella sezione 3.2.1.6 e, in caso non riuscisse a distanziare abbastanza il leone, allora verrà catturata e uccisa dal felino che, successivamente, si considererà sazio e terminerà il suo ruolo nella simulazione, allontanandosi lentamente.

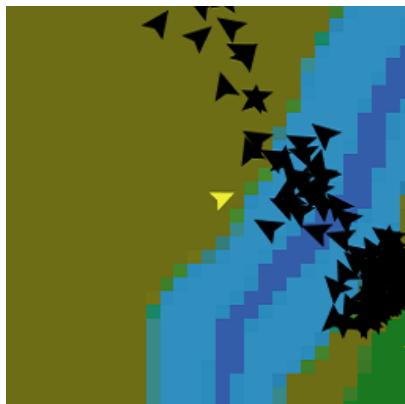
Nella pagina a seguire si riportano alcune schermate dell'ambiente di simulazione che mostrano alcune delle principali fasi dell'interazione fra i leoni e gli gnu.



**Figura 3.21:** Leone in avvicinamento alla mandria di gnu nel tentativo di cacciare.



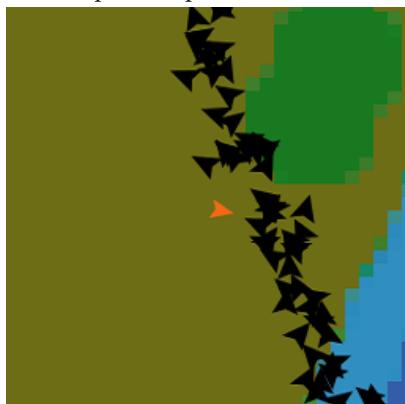
**Figura 3.22:** Leone in allontanamento dalla mandria di gnu dopo un targeting fallito.



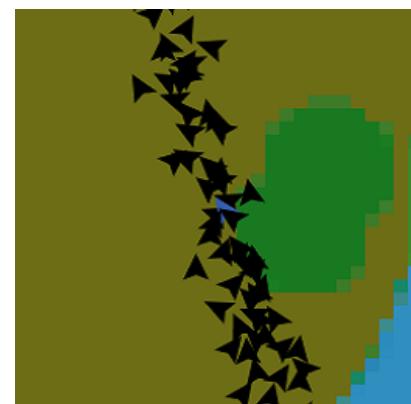
**Figura 3.23:** Leone sulle rive del fiume in attesa di una possibile ipotetica preda.



**Figura 3.24:** Leone all'attacco e gnu in Fuga (rappresentati in verde).



**Figura 3.25:** Leone sazio (rappresentato in arancione) prima di allontanarsi dalla zona.



**Figura 3.26:** Gnu che è riuscito nella fuga (riportato in blu) che si re-inserisce nel branco.

### 3.2.2.2 Numero leoni

La regione del Masai Mara ha una superficie di circa  $320 \text{ km}^2$  e, durante la stagione della migrazione, contiene, come anticipato nell'apposita sezione (Sezione 2.7.1.1), circa 600-700 leoni. Nel caso di studi, che copre una zona di fiume lunga poco più di 5 km, il numero di leoni dovrebbe essere più o meno di 10 unità, ma, in realtà, risulta essere di circa 100 unità. E' noto infatti che i leoni si raggruppino in prossimità del fiume seguendo la migrazione per aumentare le probabilità di una caccia favorevole, giustificando quindi l'elevato numero considerato. Un'ulteriore conferma è contenuta nei dati raccolti da Fryxell [49], il quale ha stimato un numero di leoni pari a circa 200 su 1 milione di gnu nell'area del Serengeti/Masai Mara interessata dalla migrazione. Tramite queste considerazioni si decide di stimare quindi un range fra i 50 e i 250 esemplari di leone nella zona considerata, ma, per necessità di elaborazione, verranno creati in una scala 1:10. Si considera un numero medio di circa 10-15 leoni, con un intervallo consentito di 5:25. Il massimo ed il minimo, 25 e 5, sono da considerarsi casi limite, verificabili solo in determinate situazioni particolari.

Nella simulazione sarà comunque consentito di non avvalersi della presenza dei leoni, disabilitandoli, per concentrarsi, magari, sul solo comportamento degli gnu in relazione alla traversata da compiere.

### 3.2.2.3 Parametri di simulazione per i leoni

In questa sezione si riportano in formato schematico tutti gli aspetti implementativi degli agenti corrispondenti ai leoni. Si illustrano quindi le variabili utilizzate, i possibili stati in cui un agente si può trovare, le transizioni fra di essi e il significato dei diversi colori con cui saranno rappresentati durante la simulazione.

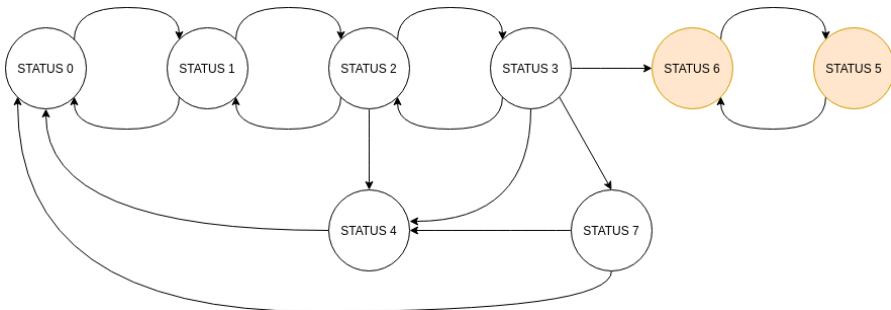
Si osserva come nella scelta delle variabili non si considerino una vita, un'energia, un quantitativo di fame, un sesso o altri fattori probabilmente importanti per ogni esemplare. Questo è dovuto al fatto che l'implementazione dei leoni venga semplificata al massimo in questo studio per la scarsa complessità computazionale a disposizione e per concentrarsi sull'aspetto ritenuto principale, ovvero la relazione fra la loro esistenza e il branco di gnu.

Per quanto riguarda i possibili stati non viene invece rappresentato uno stato corrispondente alla morte dell'agente. Questo perchè, nonostante sia un caso previsto (causa il 9% delle morti totali di un leone), è raramente verificabile e non centrale per gli obiettivi prefissati. Un agente leone può comunque morire se, fallendo un attacco, si dovesse ritrovare al centro della mandria di gnu, venendo quindi letteralmente "investito".

Variabile	Descrizione
status	Stato in cui si trova l'esemplare, ne motiva movimenti e comportamenti
waitingtime	Tempo speso a distanza di attacco in attesa di compiere un'imboscata
accelerationtime	Tempo per il quale l'esemplare sfrutta la propria accelerazione

**Tabella 3.4:** Variabili appartenenti ad un agente leone.

Stato	Descrizione	Comportamento
0	Stato di partenza	L'agente si muove casualmente e lentamente
1	Avvistamento mandria	L'agente si avvicina lentamente, ma non troppo, alla mandria per preparare successivamente un'imboscata
2	Targeting	L'agente si ferma ad una determinata distanza dalla mandria e cerca di identificare una possibile preda, ovvero uno gnu abbastanza solo. Se la trova inizia l'imboscata.
3	Imboscata	L'agente usa la sua massima accelerazione per tentare di cacciare la preda identificata
4	Fuga	L'agente, sentendosi minacciato dalla presenza di una mandria troppo compatta, si allontana per poi tornare alla caccia
5	Fuga da sazio	L'agente, sentendosi minacciato dalla presenza di una mandria troppo compatta, si allontana, ma non torna poi alla caccia
6	Sazio	L'agente ha ucciso una preda e si allontana lentamente (semplificazione, si assume che non necessiti di tempo per mangiarla)
7	Attacco fallito	L'agente, dopo aver fallito un attacco, si allontana per riprovare successivamente

**Tabella 3.5:** Descrizione dei possibili stati di un agente leone.**Figura 3.27:** Diagramma delle possibili transizioni di stato di un agente leone. In arancione sono riportati gli stati in cui il felino si considera sazio. Questo sarà anche l'unico colore, oltre al giallo di default, utilizzato nella simulazione, per differenziare chi ha già cacciato rispetto a chi ancora non ci è riuscito.

### 3.2.3 Caratterizzazione coccodrilli

Per questa simulazione, data la bassa incidenza che ha la presenza di coccodrilli sul numero totale di gnu morti (2% delle morti totali per annegamento, come riportato nella sezione 2.7.2) e dato il fatto che, momentaneamente, questi ultimi siano considerati, per semplicità, come morti per annegamento si decide di non implementare un agente che rappresenti i coccodrilli.

La motivazione che porta a questa scelta è da ricercare nell'incremento della complessità computazionale in relazione al contenuto informativo del modello di simulazione. In assenza di ulteriori dati o informazioni che permettano una modellazione significativa delle relazioni tra coccodrilli e gnu si decide di rimandare la progettazione e l'implementazione ad una fase futura di questo studio.

A scopo illustrativo si riporta comunque una stima del numero di coccodrilli presenti nella zona del fiume considerata per la simulazione. In condizioni normali, come descritto nella sezione 2.7.2, si ha una densità di questi rettili di circa 0.33 per km [30]. Attenendosi alla lunghezza del tratto del fiume rappresentato e al fatto che, come nel caso dei leoni, aumentino la loro presenza per il passaggio della migrazione, sarà presente un numero medio di circa 5/10 coccodrilli. Si prefissa quindi un ipotetico intervallo fra 0 e 15 esemplari, dove 0 e 15 rappresentano due casi limite raramente osservabili.

### 3.3 Caratterizzazione dei parametri globali dell'ambiente

In questa sezione si riportano gli aspetti generali dell'ambiente di simulazione, come le variabili globali. Oltre ai parametri già descritti per modellare condizioni climatiche, presenza e numerosità degli agenti, già precedentemente spiegati, si hanno infatti delle variabili utili all'esecuzione del modello, riportate nella tabella a seguire.

Variabile	Descrizione
wildebeestseatenbylions	Numero di Gnu mangiati dai leoni
wildebeestseatenbycrocs	Numero di Gnu mangiati dai coccodrilli (per sviluppi futuri)
wildebeestsdrowned	Numero di Gnu annegati
cont	Variabile per contare il numero di sotto-branchi fino a raggiungere la numerosità totale del branco
crowding?	Variabile che indica se sia o meno il momento di ammassarsi sulle rive del fiume
firstleader?	Variabile che indica se si è già scelto o meno un primo leader nel branco
approachpoint	Punto di approccio del fiume per la traversata
lionsattacks	Numero di attacchi compiuti dai leoni

**Tabella 3.6:** Variabili globali del sistema.

# 4. Simulazioni

In questa sezione, dopo aver studiato e progettato il nostro ambiente di simulazione, saranno effettuati alcuni test per verificare o smentire alcune ipotesi pervenute durante l'analisi del nostro caso di studi.

I test che effettueremo saranno i seguenti:

1. Replicazione di singoli attraversamenti per cui si dispone di dati tramite osservazioni dirette
2. Simulazione di singoli attraversamenti per i quali non si dispone di dati
3. Effetto dell'attraversamento in un unico branco a confronto con l'attraversamento in sotto-branchi
4. Effetto di un unico branco rispetto a più sotto-branchi nel rapporto con i leoni

I test elencati saranno esaustivamente spiegati nelle seguenti sezioni, dove si mostreranno i risultati di tali analisi e le motivazioni che ci hanno portato ad effettuarli.

Inoltre si cercherà, dove possibile, di validare le simulazioni. Questo sarà possibile solo in maniera sommaria poichè i dati a nostra disposizione non sono molti e per avere una conferma precisa ne servirebbe un numero nettamente superiore.

Si osserva che per i test relativi agli attraversamenti, per motivi computazionali, non si considera la presenza di leoni e coccodrilli. Si ricorda come questi ultimi, data la marginalità della loro incidenza sul numero di morti e dato il fatto che si concentrino principalmente sulle carcasse, siano momentaneamente esclusi da ogni tipo di implementazione, rimandando un'analisi più approfondita al momento in cui si disporrà di un maggior numero di dati.

## 4.1 Test 1: Replicazione di singoli attraversamenti

Avendo a disposizione dati di alcuni singoli attraversamenti, si proverà a replicarli cercando, una volta modellato l'ambiente, di avere un riscontro sul numero di morti registrate. Nel materiale supplementare dell'analisi di Subalusky [29] si presentano 3 singoli attraversamenti nel fiume Mara in alcuni periodi dell'anno e in determinate

condizioni climatiche (ottenute tramite i registri storici del sito [worldweatheronline](#)). I dati non sono esaurienti, manca ad esempio la numerosità del branco, ma tramite alcune stime, assunzioni ed analisi si è completato un quadro generale per poter portare ad una simulazione con un buon livello di precisione. Gli attraversamenti che si cercheranno di replicare sono i 3 seguenti:

1. attraversamento 1: 04/07/2011
2. attraversamento 2: 05/11/2012
3. attraversamento 3: 25/09/2013

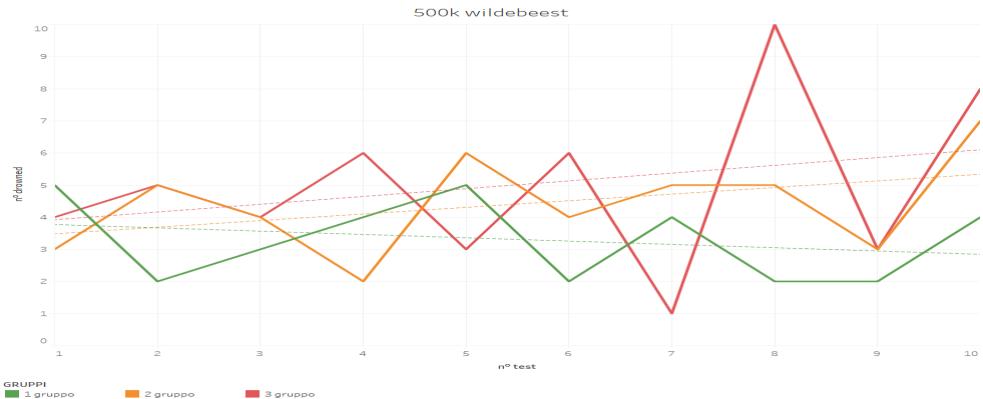
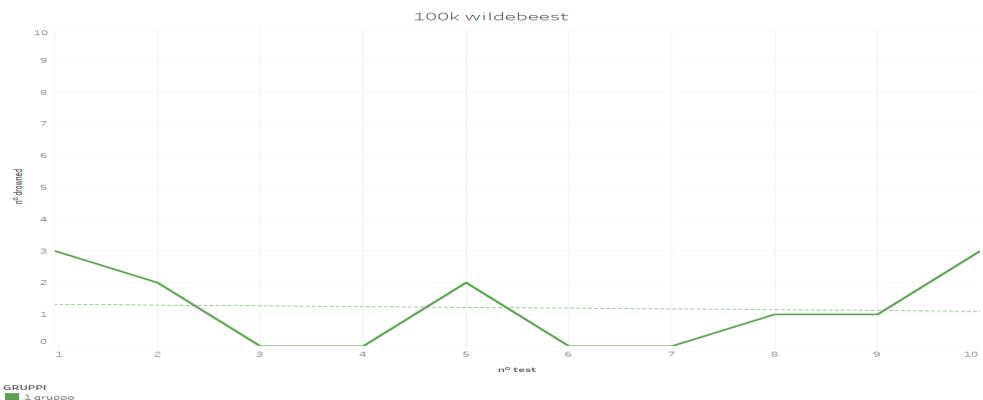
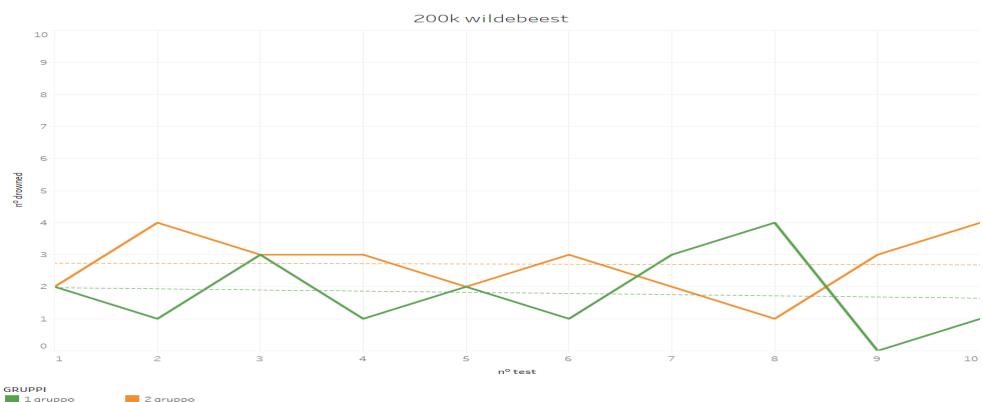
Si ricorda che i sotto-branchi possibili possono essere minimo di 100K gnu, come assunzione, poichè è molto difficile registrare branchi di spostamento con un numero inferiore, in cui oltretutto si sia documentata l'attraversata del fiume Mara. Dopo un'analisi delle piogge e, conseguentemente, anche delle condizioni del fiume, dove i numeri mostrati possono essere compresi osservando la tabella Tab. 3.12, si sono effettuate le tre simulazioni. Nella tabella Tab. 4.1 si mostrano le condizioni simulate e i risultati ottenuti.

Traversata osservata	Condizioni					Numerosità stimata del branco	N° morti reali	N° morti simulate (K) con 1 gruppo	N° morti simulate (K) con 2 gruppi	N° morti simulate (K) con 3 gruppi
	rain level	river flow	river depth	river width	river speed					
1	3	3	2	3	2	500K	3380	3.4	4.4	5
2	3	4	3	3	3	100K	990	1.2	NULL	NULL
3	3	3	3	3	3	200K	1610	1.8	2.7	NULL

**Tabella 4.1:** Replicazione degli attraversamenti singoli di cui si dispone dei dati tramite simulazione. Si osserva come i risultati simulati siano in scala 1:1000 e come, considerando sottogruppi di dimensione fissa di 100K, non per tutte le osservazioni è stato possibile una suddivisione in sotto-branchi.

Dai risultati si può notare come il numero di gnu morti durante l'attraversamento sia pressochè simile, se non uguale, al numero di morti simulate dal nostro modello. Si può quindi affermare un buon funzionamento del nostro ambiente di simulazione sotto questo punto di vista, poichè siamo riusciti a validare la nostra simulazione con i reali dati ottenuti dai documenti studiati. Inoltre ipotizziamo che i gruppi che abbiano tentato l'attraversate nei 3 diversi periodi, fossero probabilmente un unico branco, poichè altrimenti il numero di morti sarebbe stato più elevato.

Saranno mostrati in seguito l'analisi dei 10 test effettuati per ognuno dei diversi attraversamenti, con il relativo numero di morti e con le linee di tendenza dei vari sotto-branchi, dove possibile.

**Figura 4.1:** Attraversamento 1.**Figura 4.2:** Attraversamento 2.**Figura 4.3:** Attraversamento 3.

## 4.2 Test 2: Simulazione di singoli attraversamenti

Dalle nostre analisi siamo riusciti ad ottenere solamente alcuni dati riguardanti certe condizioni climatiche e del fiume, per questa ragione abbiamo voluto simulare determinate situazioni a noi mancanti. Si ipotizzeranno quindi i due test seguenti:

1. attraversamento nelle migliori condizioni (tutti i parametri a 1)
2. attraversamento in condizioni intermedie (tutti i parametri a 2)

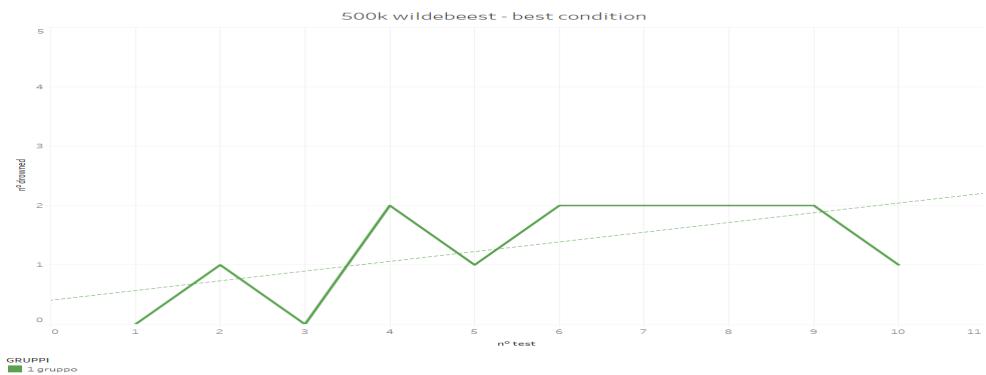
I test saranno effettuati con un numero medio del branco, quindi 500k gnu, effettuando 10 prove per ogni singolo test e mostrando i dati nella tabella Tab. 4.2. Non sono stati effettuati test nelle condizioni peggiori, perchè un'analisi più dettagliata per tali situazioni è riportata nella prossima sezione. Inoltre i test della sezione precedente sono inerenti a situazioni climatiche raffiguranti scenari di condizioni molto negative.

Test	rain-level	river-flow	river-depth	river-width	river-speed	Numerosità branco	N° morti stimate	N° morti simulate (K)
1	1	1	1	1	1	500K	1250-1500	1.3
2	2	2	2	2	2	500K	2500-2750	2.8

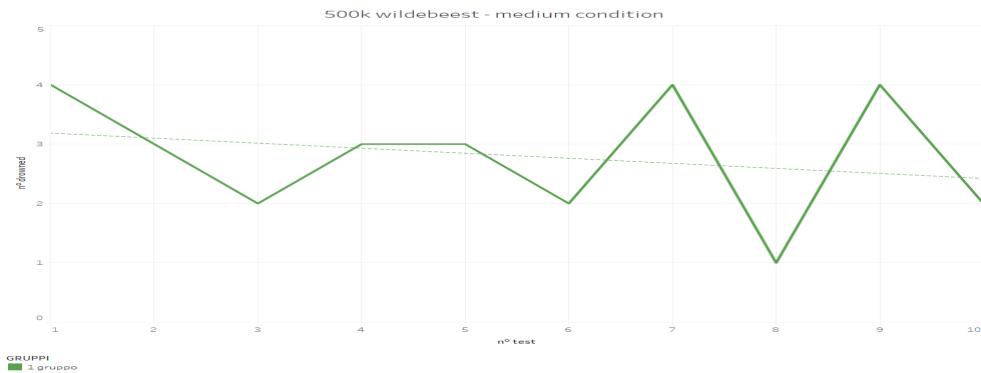
**Tabella 4.2:** Simulazione di 2 attraversamenti per cui non si dispone dei dati e confronto con le stime relative a quelle situazioni.

In mancanza di dati abbiamo, precedentemente alle simulazioni, stimato dalle informazioni in nostro possesso la numerosità del branco e un numero di morti durante l'attraversata del fiume. Dai risultati si può notare come il numero di gnu affogati sia pressochè simile al numero di morti simulate dal nostro modello.

Saranno mostrate in seguito le analisi dei 10 test effettuati per ognuno dei diversi attraversamenti, con il relativo numero di morti e con le linee di tendenza.



**Figura 4.4:** Attraversamento condizioni migliori.



**Figura 4.5:** Attraversamento condizioni intermedie.

### 4.3 Test 3: Branco unico vs sotto-branchi in relazione al fiume

Tramite questo test ci si è concentrati sulle condizioni peggiori possibili mai registrate per un attraversamento durante i periodi presi in analisi. Si è deciso di testare varie numerosità del branco (300k, 600k, 900k) in relazione ad un diverso numero di sotto-branchi (1, 2, 3) cercando di rifiutare o accettare l'ipotesi che un branco unico porti ad un numero di morti minore rispetto a diversi sotto-branchi.

Sono in seguito riportati i risultati delle nostre simulazioni considerando i valori di:

- rain level: 3
- river flow: 4
- river depth: 3
- river width: 3
- river speed: 3

Si può notare dai risultati ottenuti (Tab. 4.3) che l'ipotesi dai noi supposta si sia rivelata corretta. Infatti il nostro modello ha confermato il fatto che un branco unito durante l'attraversamento porti ad un numero inferiore di morti rispetto a diverse divisioni della mandria, confermando la potenzialità dell'aggregamento nel mondo animale. Questo nella natura è confermato dal comportamento degli gnu che, viaggiando uniti e compatti, diminuiscono il rischio di essere trascinati via dalla corrente durante l'attraversamento [29]. Inoltre si nota come il numero medio di morti sia coerente con i dati a disposizione e con le stime effettuate, fornendo quindi un'ulteriore validazione della bontà del modello per quanto riguarda l'attraversamento.

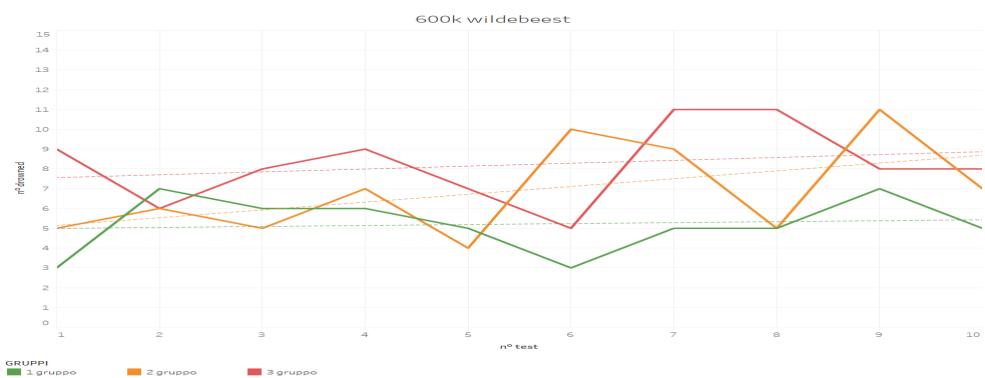
Saranno mostrate in seguito le analisi dei 10 test effettuati per ognuno dei diversi attraversamenti, con il relativo numero di morti e con le linee di tendenza per i relativi sotto-gruppi.

Numerosità del branco (K)	N° sotto-gruppi	N° morti (K)
900	1	7
	2	8.9
	3	10.6
600	1	5.2
	2	6.9
	3	8.2
300	1	2.7
	2	3.6
	3	4.1

**Tabella 4.3:** Confronto fra il numero medio di morti in 10 simulazioni nelle peggior condizioni climatiche al variare della numerosità totale del branco e del numero di sotto-gruppi. Si osserva come la numerosità del branco ed il numero di morti siano in scala 1:1000.



**Figura 4.6:** Attraversamento condizioni peggiori 900k.



**Figura 4.7:** Attraversamento condizioni peggiori 600k.

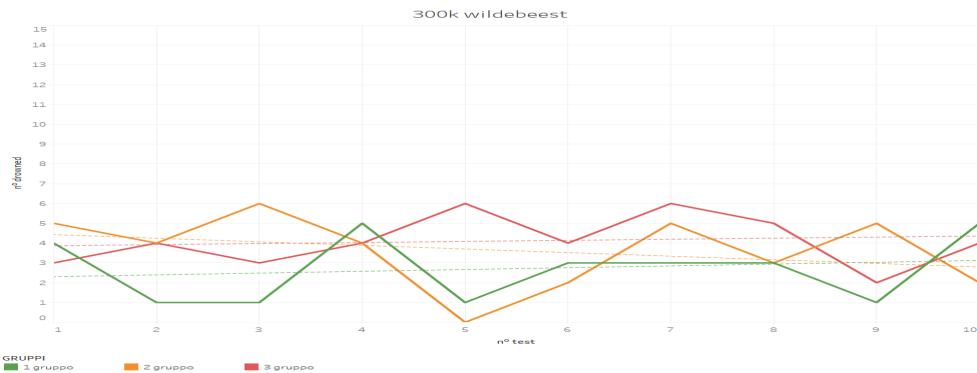


Figura 4.8: Attraversamento condizioni peggiori 300k

## 4.4 Test 4: Branco unico vs sotto-branchi in relazione ai leoni

Con quest'ultimo test si intende analizzare la relazione esistente fra numero di leoni, numerosità del branco e numero di sotto-gruppi.

Si osserva come, in assenza di dati che permettano validazione, i numeri di morti per predazione non sono da ritenere affidabili. Inoltre lo scopo principale, per il momento, dell'implementazione dei leoni è quello di un'analisi dei loro movimenti principali e del rapporto con la composizione del branco di gnu che si pongono come possibili prede per permettere uno studio iniziale dell'effetto confusione.

Per le motivazioni sopracitate si decide quindi di considerare come valore di osservazione principale il tasso di successo di un attacco di un leone espresso come:

$$\frac{\# \text{ATTACCHI RIUSCITI}}{\# \text{ATTACCHI TOTALI} (\text{volte nelle quali un leone entra nello stato 3})}$$

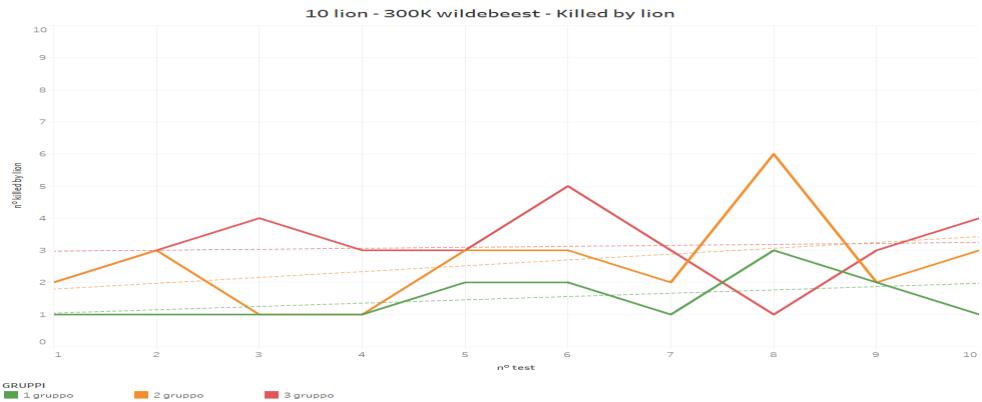
Nelle pagine a seguire si riportano, sia in formato tabellare che graficamente, i risultati dettagliati dell'esecuzione del test.

Nonostante i risultati mostrati non permettano di confermare appieno l'ipotesi che una maggiore compattezza del branco renda più difficile la caccia da parte dei leoni si può comunque notare una tendenza crescente nel tasso di successo al crescere del numero di sotto-branchi presenti. Questo evidenzia comunque il ruolo dell'effetto confusione e suggerisce una maggiore analisi futura a riguardo.

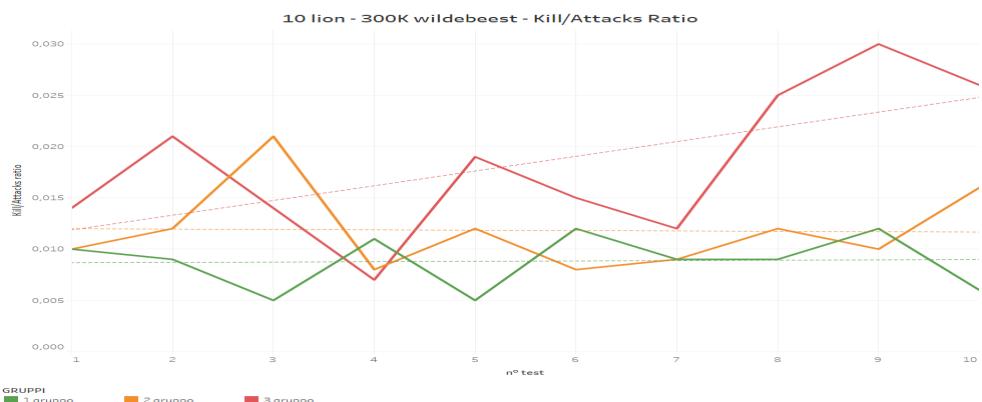
Una maggiore conferma del rapporto tra sparsità del gruppo e numero di attacchi conclusi con successo da parte del "re della savana" la si trova nel fatto che la stragrande maggioranza delle morti avvengono nel tratto di griglia relativa alla parte successiva all'attraversamento del fiume, dove gli gnu risultano meno compatti e più sparpagliati.

Leoni (*10)	Gnu	Sotto-branchi	Gnu cacciati (*10)	Kill/Attacks ratio
10	300K	1	1.5	0.009
10	300K	2	2.6	0.012
10	300K	3	3.1	0.018
20	300K	1	3.9	0.01
20	300K	2	4.3	0.011
20	300K	3	5	0.012
10	600K	1	1.6	0.01
10	600K	2	3	0.014
10	600K	3	3.4	0.018
20	600K	1	4.2	0.012
20	600K	2	4.7	0.013
20	600K	3	6.9	0.016

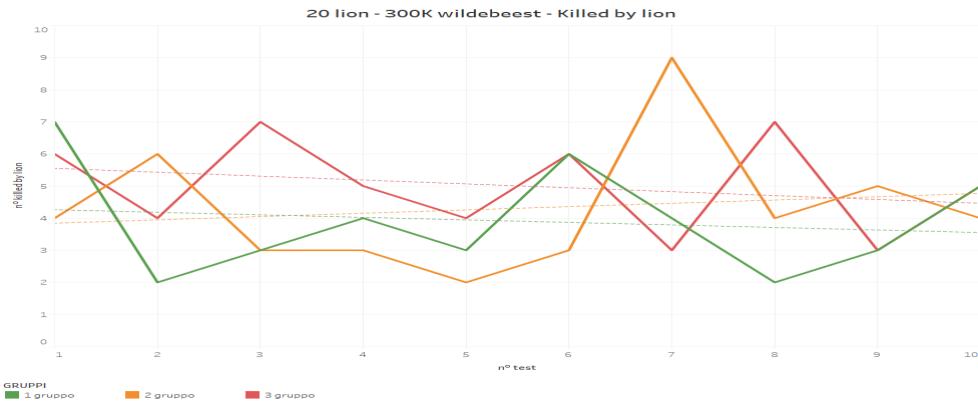
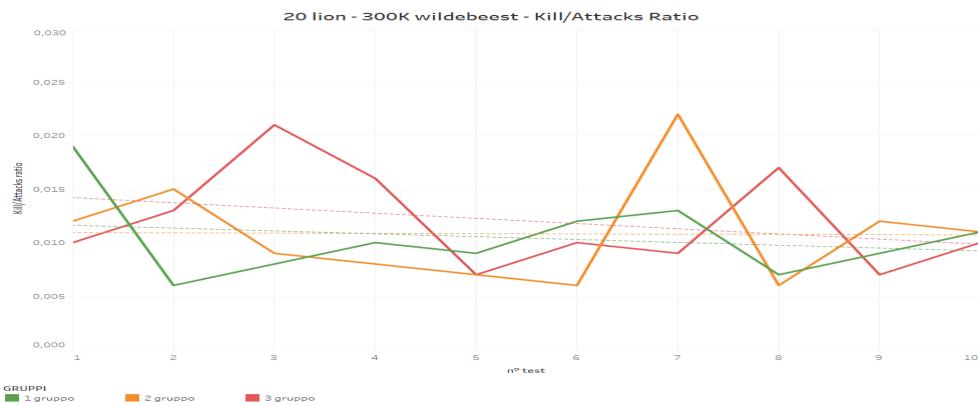
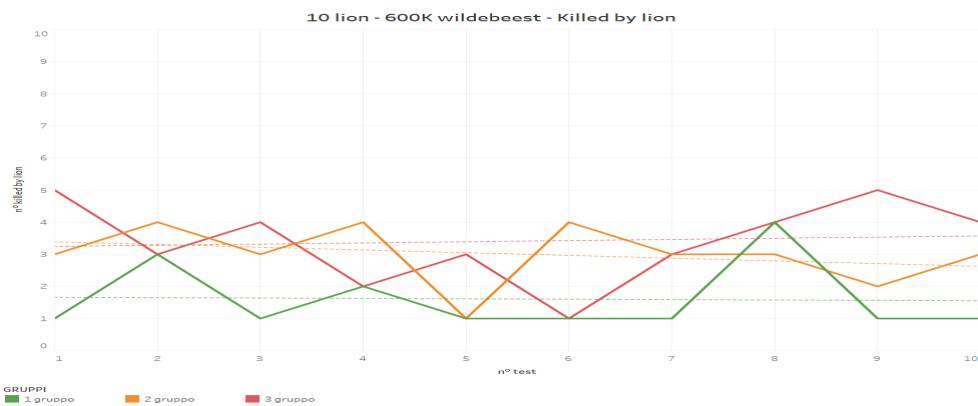
**Tabella 4.4:** Confronto fra il tasso di successo dell'attacco di un leone in relazione a diverse numerosità e diversi numeri di sotto-branchi di gnu presenti.

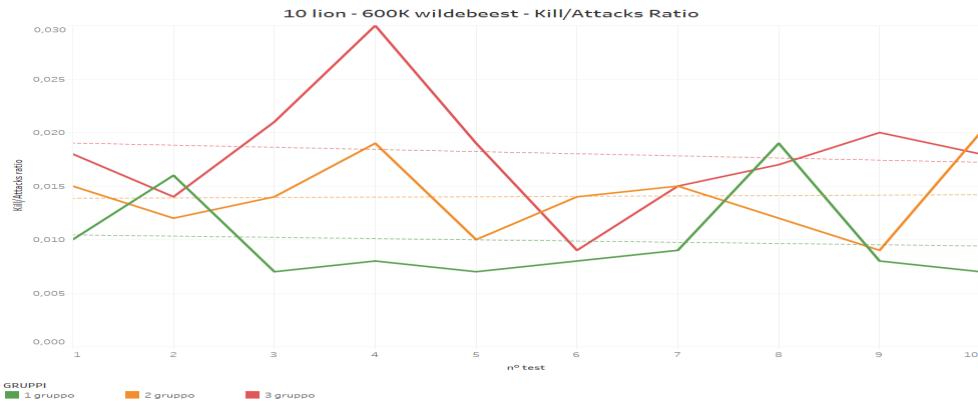


**Figura 4.9:** 10 leoni - 300K gnu - uccisioni dei leoni.



**Figura 4.10:** 10 leoni - 300K gnu - Tasso uccisioni/attacchi.

**Figura 4.11:** 20 leoni - 300K gnu - uccisioni dei leoni.**Figura 4.12:** 20 leoni - 300K gnu - Tasso uccisioni/attacchi.**Figura 4.13:** 10 leoni - 600K gnu - uccisioni dei leoni.

**Figura 4.14:** 10 leoni - 600K gnu - Tasso uccisioni/attacchi.**Figura 4.15:** 20 leoni - 600K gnu - uccisioni dei leoni.**Figura 4.16:** 20 leoni - 600K gnu - Tasso uccisioni/attacchi.

# 5. Conclusioni

A conclusione di questo lavoro si sono riscontrati sia fattori fortemente positivi che aspetti negativi su cui ci si potrà concentrare in futuro. In questa sezione si riportano tutte le considerazioni finali e si elencano i principali spunti futuri che potrebbero aggiungere valore alla simulazione implementata.

## 5.1 Aspetti positivi

Dai risultati delle simulazioni si evince che:

- Si è implementato un modello finale che permette di replicare in maniera attendibile i dati a disposizione, riuscendo a validare il lavoro svolto.
- Si possono confermare i vantaggi dati dall'aggregamento per quanto riguarda l'attraversamento del fiume, dimostrando come una maggiore frammentazione del branco porti ad un maggior numero di morti.
- Si può considerare corretta l'assunzione secondo la quale uno gnu muoia (per annegamento) a causa di un elevato tempo speso lontano dal gruppo.
- Si nota leggermente l'influenza dell'aggregazione anche nella generazione dell'effetto confusione nel rapporto con i leoni, anche se non si sono potuti validare i risultati per assenza di dati.
- Si conferma la possibilità dell'applicazione del modello dei Boids anche nel caso di una mandria di ungulati come gli gnu.

## 5.2 Aspetti negativi

Dai risultati delle simulazioni si evince che:

- Non si è riuscito ad analizzare le morti degli gnu in relazione alla loro suddivisione in maschi, femmine e vitelli. Questo è dovuto all'elevata complessità computazionale che non ha permesso di utilizzare un numero di agenti tale da studiare anche questo fattore. La scala di 1:1000 risulta infatti eccessiva.

- Per lo stesso motivo non si è riuscito ad implementare la presenza dei coccodrilli, la bassa incidenza non avrebbe infatti permesso di ottenere morti durante le simulazioni e, inoltre, l'assenza di dati a riguardo ha scoraggiato anche solo una progettazione semplicistica.
- Non si sono reperiti dati utili a una caratterizzazione maggiore del rapporto fra gnu e leoni nella zona considerata, non potendo quindi ritenere né affidabile né sensato il numero di morti per predazione. Ci si è infatti limitati ad una semplice caratterizzazione dei principali movimenti dei leoni e della risposta degli gnu.

### 5.3 Sviluppi futuri

Dall'analisi degli aspetti positivi e negativi ottenuti nelle varie simulazioni e da ciò che si è tralasciato momentaneamente per semplificare il lavoro svolto, si identificano i principali sviluppi futuri:

- Reperimento di maggiori dati per quanto riguardi singoli attraversamenti.
- Reperimento di maggiori dati per quanto riguardi l'interazione con leoni e coccodrilli nella zona selezionata.
- Implementazione di un fattore probabilistico, o di scelta, che permetta agli gnu di partire da qualsiasi punto della griglia e di terminare il loro viaggio in qualsiasi altro punto, attenendosi al numero di morti registrate in base al punto di approccio del fiume selezionato. Questo permetterebbe di ottenere una simulazione fortemente più realistica.
- Utilizzo di differenti strumenti di simulazione, o di una potenza computazionale maggiore, in modo da ridurre la scala utilizzata per la simulazione e permettere analisi maggiormente significative. In questo modo si potrebbero sia aggiungere i coccodrilli che affinare i fattori che guidano la sopravvivenza del branco.

### 5.4 Considerazioni finali

Nonostante la presenza di alcuni aspetti ancora da ultimare e l'elevato numero di sviluppi futuri che permettano di considerare il lavoro completo si è comunque ottenuto un modello che può essere ritenuto un'ottima base di partenza. Esso infatti risulta fortemente affidabile su diversi fattori, invitante su altri e non completo per alcuni.

La mancanza momentanea di maggiori studi o di modelli di simulazione per la situazione considerata danno ulteriore valore al lavoro svolto. Ogni precedente simulazione infatti si concentra sulla modellazione macroscopica dell'intera migrazione, probabilmente per la scarsità di dati utilizzabili per analisi più microscopiche.

L'ottenimento di un maggior numero di dati e le diverse considerazioni effettuate per

possibili approfondimenti futuri potrebbero permettere di ottenere un modello con buoni risultati. Esso potrebbe risultare utile per maggiori analisi sull'effetto confusione e per stimare la risposta del branco di gnu a situazioni climatiche raramente osservabili.

# Bibliografia

- [1] Suzanne Serneels e Eric F Lambin. "Impact of land-use changes on the wildebeest migration in the northern part of the Serengeti–Mara ecosystem". In: *Journal of Biogeography* 28.3 (2001), pp. 391–407.
- [2] Janeth James Ngana, Livingstone Serwadda Luboobi e Dmitry Kuznetsov. "Modelling the Migratory Population Dynamics of the Serengeti Ecosystem". In: *Applied and Computational Mathematics* 3.4 (2014), pp. 125–129.
- [3] Ricardo M Holdo, Robert D Holt e John M Fryxell. "Opposing rainfall and plant nutritional gradients best explain the wildebeest migration in the Serengeti". In: *The American Naturalist* 173.4 (2009), pp. 431–445.
- [4] Suryana Setiawan e Antonio Cerone. "Stochastic modelling of seasonal migration using rewriting systems with spatiality". In: *International Conference on Software Engineering and Formal Methods*. Springer. 2013, pp. 313–328.
- [5] Janeth James Ngana, Livingstone Serwadda Luboobi e Dmitry Kuznetsov. "Mathematical Model for the Population Dynamics of the Serengeti Ecosystem". In: *Applied and Computational Mathematics* 3.4 (2014), p. 171.
- [6] Randall B. Boone, Simon J. Thirgood e J. Grant C. Hopcraft. "Serengeti wildebeest migratory patterns modeled from rainfall and new vegetation growth". In: *Ecology* 87.8 (2006), pp. 1987–1994.
- [7] Simon Abia Raphael Mduma. "Serengeti wildebeest population dynamics : regulation, limitation and implications for harvesting". In: (1996).
- [8] Richard D. Estes. "The Gnu's World". In: (2014).
- [9] Uri Wilensky et al. "NetLogo". In: *Center for connected learning and computer-based modeling*. Northwestern University, 1999. URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- [10] 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)* (2014).
- [11] Craig W Reynolds. "Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model". In: *ACM SIGGRAPH computer graphics*. Vol. 21. 4. ACM. 1987, pp. 25–34.

- [12] TJ Pitcher, DA Green e AE Magurran. "Dicing with death: predator inspection behaviour in minnow shoals". In: *Journal of Fish Biology* 28.4 (1986), pp. 439–448.
- [13] Leif Nøttestad e Bjørn Erik Axelsen. "Herring schooling manoeuvres in response to killer whale attacks". In: *Canadian Journal of Zoology* 77.10 (1999), pp. 1540–1546.
- [14] Julia K Parrish e Leah Edelstein-Keshet. "Complexity, pattern, and evolutionary trade-offs in animal aggregation". In: *Science* 284.5411 (1999), pp. 99–101.
- [15] S-H Lee, HK Pak e T-S Chon. "Dynamics of prey-flock escaping behavior in response to predator's attack". In: *Journal of theoretical biology* 240.2 (2006), pp. 250–259.
- [16] Peter Jonsson e Lucas Ljungberg. *Flocking as a Hunting Mechanic: Predator vs. Prey Simulations*. 2017.
- [17] Chris Pallant. *Demystifying Disney: a history of Disney feature animation*. Bloomsbury Publishing USA, 2011, pp. 98–99.
- [18] Akila Lakshminarayanan e Brian Tran. "Animal Stampede Simulation". In: () .
- [19] Douglas E Musiega, Kazadi Sanga-Ngoie e Kaoru Fukuyama. "A framework for predicting and visualizing the East African wildebeest migration-route patterns in variable climatic conditions using geographic information system and remote sensing". In: *Ecological Research* 21.4 (2006), pp. 530–543.
- [20] Linda Pennycuick. "Movements of the migratory wildebeest population in the Serengeti area between 1960 and 1973". In: *African journal of Ecology* 13.1 (1975), pp. 65–87.
- [21] J. Grant C. Hopcraft et al. "Why are wildebeest the most abundant herbivore in the Serengeti". In: (2015).
- [22] Craig Packer et al. "Ecological change, group territoriality, and population dynamics in Serengeti lions". In: *Science* 307.5708 (2005), pp. 390–393.
- [23] George B Schaller. *The Serengeti lion: a study of predator-prey relations*. University of Chicago Press, 2009.
- [24] Richard D. Estes e Runhild K. Estes. "The Birth and Survival of Wildebeest Calves". In: *Ethology* 50.1 (2010), pp. 45–95.
- [25] ARE Sinclair, Simon Mduma e Justin S Brashares. "Patterns of predation in a diverse predator-prey system". In: *Nature* 425.6955 (2003), p. 288.
- [26] JO Ongutu e HT 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.

- [27] 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.
- [28] Colin J Pennycuick. "On the Running of the GNU (*Connochaetes Taurinus*) and other Animals". In: *The Journal of Experimental Biology* 63.3 (1975), pp. 775–799.
- [29] 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.
- [30] I Games e ELM Severre. "Tanzanian crocodile survey, October, 1999". In: *A Report to the Director of Wildlife* (1999).
- [31] Benedict G Hogan et al. "The confusion effect when attacking simulated three-dimensional starling flocks". In: *Royal Society Open Science* 4.1 (2017), p. 160564.
- [32] Julia K Parrish e Leah Edelstein-Keshet. "Complexity, pattern, and evolutionary trade-offs in animal aggregation". In: *Science* 284.5411 (1999), pp. 99–101.
- [33] Laurie Landeau e John Terborgh. "Oddity and the 'confusion effect' in predation". In: *Animal Behaviour* 34.5 (1986), pp. 1372–1380.
- [34] MGL Mills e TM Shenk. "Predator-prey relationships: The impact of lion predation on wildebeest and zebra populations". In: *Journal of Animal Ecology* (1992), pp. 693–702.
- [35] Jonathan M Jeschke e Ralph Tollrian. "Prey swarming: which predators become confused and why?" In: *Animal Behaviour* 74.3 (2007), pp. 387–393.
- [36] Jens Krause e Graeme D Ruxton. *Living in groups*. Oxford University Press, 2002.
- [37] Robert C Miller. "The significance of the gregarious habit". In: *Ecology* 3.2 (1922), pp. 122–126.
- [38] Shimelis Behailu Dessu e Assefa Mekonnen Melesse. "Impact and uncertainties of climate change on the hydrology of the Mara River basin, Kenya/Tanzania". In: *Hydrological Processes* 27.20 (2012), pp. 2973–2986.
- [39] Shimelis Behailu Dessu et al. "Assessment of water resources availability and demand in the Mara River Basin". In: *Catena* 115 (2014), pp. 104–114.
- [40] Elizabeth Pennisi. "Drowned wildebeest provide ecological feast". In: *Science* 356.6344 (2017), pp. 1217–1218.
- [41] Bancy M. Mati et al. "Impacts of Land-use/cover Changes on the Hydrology of the Transboundary Mara River, Kenya/Tanzania". In: *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 13.2 (2008), pp. 169–177.
- [42] Shimelis Behailu Dessu e Assefa M. Melesse. "Modelling the rainfall-runoff process of the Mara River basin using the Soil and Water Assessment Tool". In: *Hydrological Processes* 26.26 (2012), pp. 4038–4049.

- [43] Liya M. Mango et al. "Hydro-Meteorology and Water Budget of the Mara River Basin Under Land Use Change Scenarios". In: (2011), pp. 39–68.
- [44] Michael E. McClain et al. "Comparing flow regime, channel hydraulics, and biological communities to infer flow–ecology relationships in the Mara River of Kenya and Tanzania". In: *Hydrological Sciences Journal-journal Des Sciences Hydrologiques* 59 (2014), pp. 801–819.
- [45] Salvatore D. Capaldo e Charles R. Peters. "Skeletal inventories from wildebeest drownings at Lakes Masek and Ndutu in the Serengeti ecosystem of Tanzania". In: *Journal of Archaeological Science* 22.3 (1995), pp. 385–408.
- [46] Vishwesha Guttal e Iain D Couzin. "Social interactions, information use, and the evolution of collective migration". In: *Proceedings of the national academy of sciences* 107.37 (2010), pp. 16172–16177.
- [47] LTB Hunter e JD Skinner. "Vigilance behaviour in African ungulates: the role of predation pressure". In: *Behaviour* (1998), pp. 195–211.
- [48] Craig W Reynolds. "Steering behaviors for autonomous characters". In: *Game developers conference*. Vol. 1999. Citeseer. 1999, pp. 763–782.
- [49] John M. Fryxell, John Grever e A. R. E. Sinclair. "Why are Migratory Ungulates So Abundant". In: *The American Naturalist* 131.6 (1988), pp. 781–798.

# A. Listato del codice

In questa appendice sarà riportato il codice NetLogo del progetto, la cui directory completa è scaricabile al seguente link: [NetlogoCode](#), con i relativi commenti.

```
;----- Global definitions -----  
;Global variables:  
; - wildebeestseatenbylions: number of wildebeests eaten by lions  
; - wildebeestseatenbycrocs: number of wildebeests eaten by crocodiles  
; - wildebeestsdrowned: number of wildebeests drowned  
; - cont: variable to count the number of sub-heards until reaching the full herd size  
; - crowding?: is time to flocking crowding to the river banks while waiting for the leaders choice?  
; - firstleader?: is the wildebeest a hypotetic first leader?  
; - approachpoint: river approach point for the herd (first leader choose it)  
; - lionsattacks: number of lion's attacks  
globals [wildebeestseatenbylions wildebeestseatenbycrocs wildebeestsdrowned cont crowding? firstleader?  
approachpoint lionsattacks]  
;Define new turtle breed: Wildebeest, Lions and Crocodiles  
breed [wildebeests wildebeest] ;[plural singolar]  
breed [lions lion]  
breed [crocodiles crocodile]  
; Wildebeests-only characteristics:  
; - sex: 0-female, 1-male, 2-calfes  
; - target: their prior target before following each other  
; - waitforleadership: counter to force wildebeests to wait until some wildebeest choose to be leader  
; - leadership?: leader or not leader?  
; - flockmates, nearest-neighbor: flocking parameters  
; - status: movement status of the wildebeest:  
;     0 - before the river: flocking as a compact herd  
;     1 - near to the river: crowding on the river bank and wait for the leaders choice  
;     2 - crossing the river: flocking more slowly, forming a single row or a couple of rows  
;     3 - over the river: flocking spreading a bit more facing the target  
;     4 - lion alert --> evasion  
;     5 - lion no more a alert --> pursuit  
;     6 - stop status: job done --> set agent as hidden  
; - crossing?: is the wildebeest crossing the river?  
; - timealone: time alone in water  
; - firsttimeattacked?: is the first time (of each attack) that the wildebeest notice the predator?  
; Assumption: a wildebeest die if spend to much time alone (herd effect)  
wildebeests-own [sex target waitforleadership leadership? flockmates nearest-neighbor status crossing? timealone  
firsttimeattacked?]  
; Lions characteristics:  
; - status: movement status of the lion  
;     0 - relax status: lion walk random  
;     1 - alert status: lion notice wildebeests presence and slowly walk towards them to prepare an ambush  
;     2 - targeting status: lion at attack distance, wait for the right target to make an ambush  
;     3 - hunting status: lion choose the target and try the ambush  
;     4 - escape without hunting status: lion fails to choose the target, too much wildebeests in the zone,  
;         escape and then back to status 1 to try to catch again  
;     5 - satiated status escape: a lion that has already eaten a prey that have to escape from a big herd  
;     6 - satiated status: a lion that has already eaten a prey, slowly walk away cause it is sated  
;     7 - failed attack status: a lion that fails an attack, walk away or escape and prepare another attack  
; - waitingtime: time spent waiting for targeting a prey. If is too much give up and try again later  
; - accelerationtime: time spent accelerating. Lions can't hold high speed for long time  
; Assumption: a lion kill a single prey and then stop the hunt  
lions-own [status waitingtime accelerationtime]  
; Crocodiles characteristic:  
; - still not implemented  
;crocodiles-own [status]  
;
```

```

;----- Setup functions -----
; Functions to setup the environment (background and parameters)

; Setup the environment
to setup
  ; Remove old agents
  clear-all
  ; Global variables handler
  modify-vars
  ; Import right Mara river image (according with the global variables) and set it as background of the grid
  import-background
  ; Define wildebeests default area
  let patches-in-box patches with [pxcor > 100 and pycor < -100] ;100 -100
  ; Set number of initial sub-group (100k each subgroup) of wildebeests
  set cont 1
  ; Call to wildebeests generator with default area as parameter
  wildebeest-generator (patches-in-box)
  ; Set crowding? as initially false
  set crowding? false
  ; Set firstleader? as initially false
  set firstleader? true
  ; Call to lions generator
  lions-generator
  ; Call to crocodiles generator
  ;crocodiles-generator
  ; Reset ticks to start a new simulation
  reset-ticks
end

; Change global variables in according with the relations between them (look at the report)
to modify-vars
  ifelse constraints? [
    ; If constraints are on
    ; month --> rain
    if month = "June" [
      set rain-level 3 ;work only when someone click "setup"
      output-print "Rain_level_changed_to_3"
    ]
    if month = "July" [
      set rain-level 1 ;work only when someone click "setup"
      output-print "Rain_level_changed_to_1"
    ]
    if month = "August" [
      set rain-level 2 ;work only when someone click "setup"
      output-print "Rain_level_changed_to_2"
    ]
    if month = "September" [
      set rain-level 2 ;work only when someone click "setup"
      output-print "Rain_level_changed_to_2"
    ]
    if month = "October" [
      set rain-level 2 ;work only when someone click "setup"
      output-print "Rain_level_changed_to_2"
    ]
    ; rain --> river-flow
    if rain-level = 1 [
      set river-flow 1
      output-print "River_flow_level_changed_to_1"
    ]
    if rain-level = 2 and river-flow = 4 [ ;error
      set river-flow 2 ;or 1 or 3
      output-print "River_flow_level_can't_be_4_with_rain_level_2..River_flow_changed_to_2,_can_be_also_1_or_3"
    ]
    if rain-level = 3 and river-flow = 1 [
      set river-flow 2;
      output-print "River_flow_level_can't_be_1_with_rain_level_3..River_flow_changed_to_2,_can_be_also_3_or_4"
    ]
    ; flow --> [depth, width, speed]
    if river-flow = 1 [
      set river-depth 1
      set river-width 1
      set river-speed 1
      output-print "River_depth_width_and_speed_levels_changed"
    ]
    if river-flow = 2 and river-depth = 3 [ ;and (river-width = 3) and (river-speed = 3) [
      set river-depth 2 ;or 1
      output-print "River_depth_level_cann't_be_3_with_river_flow_level_2..River_depth_changed_to_2,_can_be_also_1"
    ]
  ]

```

```

if river-flow = 2 and river-width = 3 [
  set river-width 2 ;or 1
  output-print "River_width_level_cannot_be_3_with_river_flow_level_2..River_width_changed_to_2,_can_be_also_1"
]
if river-flow = 2 and river-speed = 3 [
  set river-speed 2 ;or 1
  output-print "River_speed_level_cannot_be_3_with_river_flow_level_2..River_speed_changed_to_2,_can_be_also_1"
]
if river-flow = 3 [
  set river-depth 2
  set river-width 3
  set river-speed 2
  output-print "River_depth,_width_and_speed_levels_changed"
]
if river-flow = 4 [
  set river-depth 3
  set river-width 3
  set river-speed 3
  output-print "River_depth,_width_and_speed_levels_changed"
]
;
; else, if constraints are off, check only width and depth
output-print "Constraints off: only width and depth checked"
if river-width = 1 and river-depth != 1 and river-depth != 2 [
  set river-depth 2
  output-print "River_depth_changed_in_according_with_river-width"
]
if river-width = 2 and river-depth != 1 and river-depth != 2 [
  set river-depth 2
  output-print "River_depth_changed_in_according_with_river-width"
]
if river-width = 3 and river-depth != 2 and river-depth != 3 [
  set river-depth 3
  output-print "River_depth_changed_in_according_with_river-width"
]
]
end

; Choose the right background in according to river-width and river-depth
to import-background
import-pcolors "img/marariver11.png"
if river-width = 1 and river-depth = 2 [
  import-pcolors "img/marariver12.png"
]
if river-width = 2 and river-depth = 1 [
  import-pcolors "img/marariver21.png"
]
if river-width = 2 and river-depth = 2 [
  import-pcolors "img/marariver22.png"
]
if river-width = 3 and river-depth = 2 [
  import-pcolors "img/marariver32.png"
]
if river-width = 3 and river-depth = 3 [
  import-pcolors "img/marariver33.png"
]
end
;----- Turtles' creation -----
; Functions to create all the agents of the simulation

; Generate wildebeest and distribute them normally in the bottom-right corner
to wildebeest-generator [box]
; Default shape for wildebeests agent
set-default-shape wildebeests "default"
; Number of wildebeests
let pop 100
let ys [ pycor ] of box
let xs [ pxcor ] of box
let min-x min xs
let min-y min ys
let max-x max xs
let max-y max ys
let mid-x mean list min-x max-x
let mid-y mean list min-y max-y
let w max-x - min-x
let h max-y - min-y

```

```

; Create "pop" wildebeests
create-wildebeests pop [
  loop [
    ; Default characteristics and parameters
    set size 2.5
    set color black
    set status 0
    ; Choose the sex in according with the sex probability distribution in a wildebeests herd
    let prob random 100.0
    ifelse prob <= 22 [
      ; calves (22%)
      set sex 2
    ] [
      ifelse prob > 22 and prob <= 49.5 [ ;49.5 = 22 + 27.5
        ; male (27.5%)
        set sex 1
      ] [
        ; female (50.5%)
        set sex 0
      ]
    ]
    set waitforleadership 0
    ; Default leadership value --> no default leaders, choosen at the crossing moment
    set leadership? false
    set crossing? false
    set timealone 0
    set firsttimeattacked? true
    set flockmates no-turtles
    ; Set normally distributed position in the default area
    ; OBS: normal cause replicate better a herd than a uniform
    let x random-normal mid-x (w / 6)
    if x > max-x [ set x max-x ]
    if x < min-x [ set x min-x ]
    set xcor x
    let y random-normal mid-y (h / 6)
    if y > max-y [ set y max-y ]
    if y < min-y [ set y min-y ]
    set ycor y
    if not any? other turtles-here [ stop ]
  ]
  ; Center in patch
  move-to patch-here
]
end

;Generate lion agents
;OBS: Generate at least X distance from the wildebeest herd and not on-water
to lions-generator
  ; Default shape
  set-default-shape lions "default"
  if lions? [
    ; if lions? is true (lions presence true) create them
    ask n-of lions-number patches with [on-water? = false and count wildebeests in-radius 30 < 1 and pxcor > -50] [
      sprout-lions 1 [
        ; Default characteristics and parameters value
        set size 2
        set color yellow
        set status 0
        set accelerationtime 0
        set waitingtime 0
        ; if too much near to the water move the lion away
        if (count patches with [on-water?] in-radius 5 > 0) [
          move-to one-of patches with [count patches with [on-water? = false] in-radius 5 = 0]
        ]
      ]
    ]
  ]
end

; Generate crocodile agents [NOT YET IMPLEMENTED]
;to crocodiles-generator
;set-default-shape crocodiles "default"
;let numcrocodiles 0
;if crocodiles?[
;  set numcrocodiles crocs-number
;]
;ask n-of numcrocodiles (patches with [on-water?]) [
;  sprout-crocodiles 1 [
;    set size 3.5
;
```

```

;      set color lime
;  ]
;]
;end
;----- Go functions -----
; Functions to handle simulation tick by tick

; Ticks function --> "main"
to go
  ; Create the herd (with sub-herds if existent)
  if wildebeests-number = 100 [
    set wildebeests-sub-herds 1
  ]
  if wildebeests-number = 200 and wildebeests-sub-herds = 3 [
    set wildebeests-sub-herds 2
  ]
  let sub-herds-size 0 ;all wildebeests in a single herd
  let lastsubherdsbigger? false
  ; Compute sub-herds size with known number of sub-herds
  if wildebeests-sub-herds > 1 [
    set sub-herds-size (wildebeests-number / wildebeests-sub-herds)
    if sub-herds-size mod 100 != 0 and sub-herds-size + 50 < ((ceiling (sub-herds-size / 100)) * 100) [
      ; last sub-herds has to be bigger then the others
      set lastsubherdsbigger? true
    ]
    if sub-herds-size mod 100 != 0 [
      ; Round to next hundred
      set sub-herds-size ((round (sub-herds-size / 100)) * 100)
    ]
  ]
  ; Call to create-herd function
  create-herd (sub-herds-size) (lastsubherdsbigger?)
  ; If no turtles alive stop the simulation
  if not any? turtles [ stop ]
  ; Call to go function for wildebeests
  go-wildebeests
  ; Call to go function for wildebeests
  go-lions
  tick
end

; Function to create the herd of wildebeests. Creates as many sub-herds as wildebeests-sub-herds value
; Herd: all the wildebeests
; Group: group of 100k widlebeests
; - create more group of 100k to simulate a herd already in movement
; Sub-Herd: 1 or more group of wildebeests
; - in each sub-herd group generated every 100 ticks
; - each sub-herd is generated every 200 ticks
to create-herd [sub-herds-size last-sub-herds-bigger?]
  ifelse wildebeests-sub-herds = 1 [
    ; if a single herd
    let num 100 ;num: ticks between each group
    if ticks > 0 and ticks mod num = 0 and cont < wildebeests-number / 100 [
      let patches-in-box patches with [pxcor > 100 and pycor < -100 ]
      ; Call to wildebeests group generator function
      wildebeest-generator patches-in-box
      set cont cont + 1
    ]
    ; else (more sub-herds)
    let new-sub-herds? false
    if (cont * 100) mod sub-herds-size = 0 [
      set new-sub-herds? true
    ]
    let num 100 ;100 ticks between each group
    ; Time for a new-sub-herds?
    if new-sub-herds? [
      set num 2000 + (sub-herds-size * 4);
    ]
    if last-sub-herds-bigger? [
      if (cont * 100) + sub-herds-size >= wildebeests-number [
        set num 100
      ]
    ]
    if ticks > 0 and ticks mod num = 0 and cont < wildebeests-number / 100 [
      let patches-in-box patches with [pxcor > 100 and pycor < -100 ]
    ]
  ]

```

```

wildebeest-generator patches-in-box
  set cont cont + 1
]
end

; Go function for the wildebeests
to go-wildebeests [
  ask wildebeests [
    ifelse status != 6 [
      ; if not hidden (job done status)
      if status != 4 [
        ; if not in evasion face a random target (over the river)
        set target patch (random-int-between -80 120) 120
        face target
      ]
      ; Evasive wildebeest that change to status 3 cause finish to cross the river and forget to be in status 4
      if color = green [
        set status 4
      ]
      ; Wildebeest in pursuit that change to status 3 cause finish to cross the river and forget to be in status 5
      if color = blue [
        set status 5
      ]
      ; Set number of leaders (can be more then 1, but not too much, cause when wildebeests are in the water
      ; the ones on the banks simply follow the herd and not the leaders anymore)
      let number-of-leaders random-int-between 1 5
      ; 0) Default Status: 0 – before arriving at the river banks
      ; 1) Check if Status is 1
      let closetowater? (count patches in-radius 3 with [on-water?] > 0 and status = 0)
      if closetowater? [
        set status 1
      ]
      ; 2) Check if Status is 2
      if on-water? [
        set status 2
      ]
      ; 3) Check if Status is 3
      if (on-water? = false) and crossing? [
        set status 3
        set crossing? false
      ]
      ; 4) Check if status is 4
      ; OBS: lions attack a wildebeest from radius 12, but wildebeest see it only in radius 10
      ; why? wildebeests, that are usually vigilant, are less vigilant if they're migrating
      if (count lions with [status = 3] in-radius 10 > 0 and count wildebeests in-radius 2 < 2) [
        set status 4
      ]
      ; 5) Check if status is 6
      if ycor > 118 [
        set status 6
      ]
      ;Status 0: normal flocking before the river banks
      if status = 0 [
        ifelse crowding? [
          ; if crowding? flocking crowding and spreading on the river banks
          ; OBS: this is the case when some wildebeests are already on the river banks and the others no
          to-flock 10 10 0 0 ;min-sep, sep, ali, coh
          ifelse [distance myself] of approachpoint < 10 [
            fd 0.02
          ][
            ifelse [distance myself] of approachpoint < 20 [
              fd 0.04
            ][
              ifelse [distance myself] of approachpoint < 30 [
                fd 0.06
              ][
                ifelse [distance myself] of approachpoint < 40 [
                  fd 0.08
                ][
                  to-flock 1 2 5 4 ; flock as status 0
                  fd 0.1
                ]
              ]
            ]
          ]
        ]
        ; if not, default flocking, quite compact herd in march
        to-flock 1 2 5 4 ;min-sep, sep, ali, coh
      ]
    ]
  ]
]

```

```

        fd 0.1
    ]
; Status 1: near the river bank, wait for the leaders to start the crossing
if status = 1 [
    if firstleader? [
        ; if the wildebeest is a hypothetic first leader
        set crowding? true ; false - default flocking, true - crowding (for the wildebeests with status 0)
        set approachpoint patch-here
        set firstleader? false
        stop
    ]
    ifelse count wildebeests with [ leadership? ] <= number-of-leaders [
        set waitforleadership (waitforleadership + 1)
        if waitforleadership >= 50 and sex = 1 [
            ; Wait enough --> choose to be leader (if the wildebest is male)
            set leadership? true
            set color red
            ; Set next status --> time to cross the river
            set status 2
        ]
    ][
        ; else, so if there are already enough leaders, if on-water? set status to 2
        set status 2
    ]
]
; Status 2: crossing the river, tryi to swim in one or more rows
; OBS: wildebeests wait until they have enough space to jump and start to swim,
;       only a little fraction of the herd swim at any time
if status = 2 [
    if on-water? [
        set crossing? true
    ]
    ; Set max-density dependent to river width and wildebeests sub-herds numerosity
    let max-density 0
    let sub-herds ((round ((wildebeests-number / wildebeests-sub-herds) / 100)) * 100)
    if river-width = 1 [
        if sub-herds < 201 [
            set max-density 30
        ]
        if sub-herds < 401 and sub-herds > 200 [
            set max-density 35
        ]
        if sub-herds < 601 and sub-herds > 400 [
            set max-density 40
        ]
        if sub-herds < 801 and sub-herds > 600 [
            set max-density 45
        ]
        if sub-herds > 800 [
            set max-density 50
        ]
    ]
    if river-width = 2 [
        if sub-herds < 201 [
            set max-density 40
        ]
        if sub-herds < 401 and sub-herds > 200 [
            set max-density 45
        ]
        if sub-herds < 601 and sub-herds > 400 [
            set max-density 50
        ]
        if sub-herds < 801 and sub-herds > 600 [
            set max-density 55
        ]
        if sub-herds > 800 [
            set max-density 60
        ]
    ]
    if river-width = 3 [
        if sub-herds < 201 [
            set max-density 50
        ]
        if sub-herds < 401 and sub-herds > 200 [
            set max-density 55
        ]
        if sub-herds < 601 and sub-herds > 400 [
            set max-density 60
        ]
    ]
]
```

```

        ]
        if sub-herds < 801 and sub-herds > 600 [
            set max-density 65
        ]
        if sub-herds > 800 [
            set max-density 70
        ]
    ]
ifelse (count wildebeests with [status = 2 and on-water?]) < max-density [
; If there aren't enough wildebeests already in the water jump and join the herd
; Flocking in row/rows
to-flock 0.25 1 6 1.5 ;min-sep, sep, ali, coh
; Count neighbors on the left side (water flux from right to left)
ifelse count [turtles-on patch-set (list patch-at 1 0 patch-at -1 0 patch-at -1 -1)] of self < 1 [
; if alone --> suffer more from water flux and speed --> divert max
    left (random-int-between 20 30) * ((river-speed + river-flow + 2) / 4)
] [
    ifelse count [turtles-on patch-set (list patch-at 1 0 patch-at -1 0 patch-at -1 -1)] of self < 2 [
; if not enough neighbors on the left --> divert to the left more then the others
        left (random-int-between 10 20) * ((river-speed + river-flow + 2) / 4)
    ] [
; if in the herd, divert only a bit
        left (random-int-between 5 10) * ((river-speed + river-flow + 2) / 4)
    ]
]
ifelse sex = 2 or sex = 1 [
; Calves and adult females (swim slower then males and more quiet)
    fd 0.05
] [
; Adult males (faster and braver then calves and women)
    fd 0.06
]
]
; If there are already enough wildebeests in the water
if on-water? [
; If the wildebeest is already in water continues to swim
to-flock 0.25 1 6 1.5
; Count neighbors on the left side (water flux from right to left)
ifelse count [turtles-on patch-set (list patch-at 1 0 patch-at -1 0 patch-at -1 -1)] of self < 1 [
    left (random-int-between 20 30) * ((river-speed + river-flow + 2) / 4)
][
    ifelse count [turtles-on patch-set (list patch-at 1 0 patch-at -1 0 patch-at -1 -1)] of self < 2 [
        left (random-int-between 10 20) * ((river-speed + river-flow + 2) / 4)
    ][
        left (random-int-between 5 10) * ((river-speed + river-flow + 2) / 4)
    ]
]
ifelse sex = 2 or sex = 1 [
    fd 0.05
] [
    fd 0.06
]
];
; If not yet in the water -->
; do nothing and wait until enough wildebeests complete the crossing to jump in the river
]
; Status 3: over the river, flocking spreading a bit facing the end of the grid
if status = 3 [
to-flock 3 5 1 1
fd 0.1
; if status 3 and no more wildebeests in water --> a full sub-herd/the full herd has crossed the river
if count wildebeests with [on-water?] = 0 and count wildebeests with [status = 1] = 0[
ask wildebeests [
; no more leaders
    set leadership? false
]
; set parameters as default for the next sub-herd
set crowding? false
set firstleader? true
]
]
; Status 4: predation --> evasion
if status = 4 [
set color green
; escape
ifelse firsttimeattacked? [
; escape to the right
ifelse count [turtles-on patch-set (list patch-at 1 0 patch-at -1 0 patch-at -1 -1)] of self > 1 [

```

```

    face patch 120 120
    fd 0.12
  ]
  ;escape to the left
  face patch -120 120
  fd 0.12
]
set firsttimeattacked? false
]
set heading (heading + random-int-between -10 10)
fd 0.12
]
; if no more hungry lions near to you --> pursuit until reach again the herd
if count lions with [status != 5] in-radius 10 < 1 [
  ; pursuit mode
  set status 5
  set firsttimeattacked? true
]
; Status 5: pursuit mode
if status = 5 [
  ; come back to the herd
  set color blue
  let the-herd (one-of wildebeests with [count wildebeests in-radius 2 > 2] in-radius 50)
  face the-herd
  ; if about to catch up with the herd, don't pass the leader, only pull even with it
  ifelse distance the-herd > 1 [
    fd 0.12
  ]
  [
    move-to the-herd
    set color black
    ; Back to the status of the herd
    set status [status] of the-herd
  ]
]
; Handle wildebeests life
; ASSUMPTION: wildebeests drown cause they spend to much time alone in depth water
if count other wildebeests in-radius 3.5 < 1 and on-depth-water? and timealone < 15 [
  set timealone (timealone + 1)
]
if timealone >= 15 [
  set wildebeestsdrowned wildebeestsdrowned + 1
  ; When no energy --> die
  die
]
[
  ; Stop status: job done!
  set hidden? true
]
]
end

; Go function for lions
to go-lions
  ask lions [
    ; Assumption: no lions on water
    if count patches in-radius 5 with [on-water?] > 0 [
      ; If close to water change directory
      fd -0.2
      set heading (heading + (random-int-between -10 10))
      fd 0.1
    ]
    if on-water? [
      move-to one-of (patches with [on-water? = false])
      set heading (heading + (random-int-between -150 -210))
      fd 0.1
    ]
    ; Status 0: relax, random walk before a alert
    if status = 0 [
      rt random-int-between -10 10
      fd 0.03
      ; Check for a possible alert
      let possiblewildebeest one-of wildebeests in-radius 50
      if possiblewildebeest != nobody [
        ; if alert
        face possiblewildebeest
        set status 1
      ]
    ]
  ]

```

```

; Status 1: alerted, face the possible prey and slowly try to get near to it/them
; OBS: not a real ambush, cause when wildebeests migrate they're too much and they also ignore more predators
if status = 1 [
  let possiblewildebeest one-of wildebeests in-radius 50
  ; If alert is real
  ifelse possiblewildebeest != nobody [
    face possiblewildebeest
    fd 0.05
    ; Prey targeting: check for a probable prey
    let probablewildebeest one-of (wildebeests with [count wildebeests in-radius 2 < 3]) in-radius 12
    if probablewildebeest != nobody [
      face probablewildebeest
      set status 2
    ]
    if count wildebeests in-radius 3 > 3 [
      ; escape
      rt 180
      set status 4
    ]
  ]
  ; false alert
  set status 0
]
; Status 2: targeting mode, near to one or more target prey, wait until try to attack
if status = 2 [
  ; try to attack (if exist a real target: wildebeest in radius 5 with only 1 neighbor)
  let prey one-of (wildebeests with [count wildebeests in-radius 2 < 2]) in-radius 12
  ifelse prey != nobody [
    ; Approach the target if is enough alone
    face prey
    fd 0.15
    set status 3
  ]
  ; Wait for attack
  set waitingtime waitingtime + 1
  let prey2 one-of wildebeests in-radius 5
  if prey2 = nobody [
    ; Prey no more killable --> wrong targeting
    set status 1
  ]
  if waitingtime > 100 [
    ; Impossible targeting, give up for the moment
    set status 1
    set waitingtime 0
  ]
  if count wildebeests in-radius 3 > 3 [
    ; escape
    rt 180
    set status 4
  ]
]
; Status 3: try to kill
if status = 3 [
  ; try to kill
  set lionsattacks (lionsattacks + 1)
  fd 0.2
  let prey one-of wildebeests-on neighbors with [count wildebeests in-radius 2 < 2]
  ifelse prey != nobody [
    ; approach to the prey
    face prey
    fd 0.1
    if [distance myself] of prey < 1 and count wildebeests in-radius 1 < 2 [
      ; predation
      ask prey [ die ]
      set wildebeestseatenbylions wildebeestseatenbylions + 1
      set status 6
    ]
  ]
  set status 2
]
set accelerationtime accelerationtime + 1
if accelerationtime > 100 [
  rt 180
  ; Tired, stop the attack and go away
  set status 7
]
if count wildebeests in-radius 3 > 3 [

```

```

; escape
rt 180
set status 4
]
;
; Status 4: escape mode, warned from to many wildebeest choose to run away a bit
if status = 4 [
  ifelse count wildebeests in-radius 15 < 1 [
    set status 1
  ] [
    ifelse count wildebeests in-radius 5 > 1 [
      ; acceleration phase
      fd 0.15
    ] [
      ; simply run
      fd 0.08
      ; one single wildebeest, try to catch him again
      set status 1
    ]
  ]
]
;
; Status 5: escape from a big herd, but don't try to hunt again then
if status = 5 [
  ifelse count wildebeests in-radius 15 < 1 [
    set status 6
  ] [
    ifelse count wildebeests in-radius 5 > 1 [
      fd 0.15
    ][
      fd 0.05
    ]
  ]
]
;
; Status 6: satiated, walk away
if status = 6 [
  set color orange
  fd 0.05
  rt random-int-between -10 10
  if count wildebeests in-radius 3 > 3 [
    ; escape
    rt 180
    set status 5
  ]
]
;
; Status 7: failed attack, go away and try again later
if status = 7 [
  fd 0.05
  rt random-int-between -10 10
  if count wildebeests in-radius 3 > 3 [
    ; escape
    rt 180
    set status 4
  ]
  if count wildebeests in-radius 10 = 0 [
    ; normal status
    set status 0
  ]
]
;
; Handle lions life
if count wildebeests-on neighbors > 4 [
  die
]
]
end
;

;----- Boids model: flocking -----
; Functions to hanlde the flocking of the herds in according with the boids model
; OBS: check the report to understand the choice of the parameters for each status of the wildebeests

to to-flock [a b c d]
  find-flockmates
  if any? flockmates
  [ find-nearest-neighbor
    let minimum-separation a ;numero di patch per le cui si tengono distanziate mentre si muovono
    ifelse distance nearest-neighbor < minimum-separation
    [ separate b ]
    [ align c
  ]

```

```

        cohere d] ]
end

to find-flockmates
; Research neighnorood size: visual space where every wildebeest look for other ones to join them (aggregation)
let vision 8
; "neighborood"
set flockmates other wildebeests in-radius vision
end

to find-nearest-neighbor
set nearest-neighbor min-one-of flockmates [distance myself]
end

to separate [mst]
; Separation degree (the lower is it, the less they separate from each other while marching)
let max-separate-turn mst
turn-away ([heading] of nearest-neighbor) max-separate-turn
end

to align [mat]
; Alignment degree (the higher is it, the more they align)
let max-align-turn mat
turn-towards average-flockmate-heading max-align-turn
end

to-report average-flockmate-heading
let x-component sum [dx] of flockmates
let y-component sum [dy] of flockmates
ifelse x-component = 0 and y-component = 0
[ report heading ]
[ report atan x-component y-component ]
end

to cohere [mct]
; Cohesion degree (the higher is it, the higher is their research for cohesion,
; the littler is it and the more they hold their position)
let max-cohere-turn mct
turn-towards average-heading-towards-flockmates max-cohere-turn
end

to-report average-heading-towards-flockmates
let x-component mean [sin (towards myself + 180)] of flockmates
let y-component mean [cos (towards myself + 180)] of flockmates
ifelse x-component = 0 and y-component = 0
[ report heading ]
[ report atan x-component y-component ]
end

to turn-towards [new-heading max-turn]
turn-at-most (subtract-headings new-heading heading) max-turn
end

to turn-away [new-heading max-turn]
turn-at-most (subtract-headings heading new-heading) max-turn
end

to turn-at-most [turn max-turn]
ifelse abs turn > max-turn
[ ifelse turn > 0
[ rt max-turn ]
[ lt max-turn ] ]
[ rt turn ]
end
;----- Extra functions -----
; Extra useful functions

; Function to pick a random integer in a range
to-report random-int-between [ min-num max-num ]
report random (max-num - min-num) + min-num
end

; Function to report if a agent is on water
to-report on-water?
report (shade-of? pc当地 blue) or (shade-of? pc当地 sky) or (shade-of? pc当地 cyan)
end

```

```
; Function to report if a agent is on depth-water
to-report on-depth-water?
  report (shade-of? pc当地色 blue)
end
;—
```