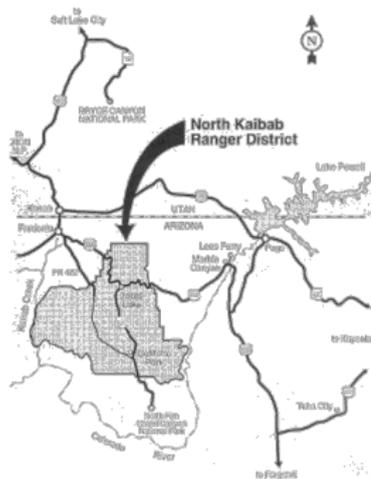


Modellistica ambientale
a.a. 2009/10
I cervi del Kaibab

I cervi dell'altopiano di Kaibab





L'altopiano di Kaibab, zona di grande valore paesaggistico ed ambientalistico, si trova in Arizona ed è popolato da un particolare tipo di cervo, il cervo mulo (*Odocoileus hemionus*), e da diversi tipi di predatori: coyote, puma, linci e volpi. A fine '800 sono stati introdotti nell'altopiano anche animali da allevamento come pecore e vacche. All'inizio del 1900 c'erano circa 4,000 cervi, 8,000 vacche, 10,000 pecore. Non abbiamo informazioni sul numero di predatori; sappiamo però che fra il 1907 ed il 1923 sono stati uccisi 3,000 coyote, 650 puma, 120 linci e 10 volpi.

Crescita della popolazione dei cervi e relativo degrado ambientale

L'introduzione degli allevamenti ha portato alla progressiva eliminazione dei predatori (per difendere gli animali di allevamento).

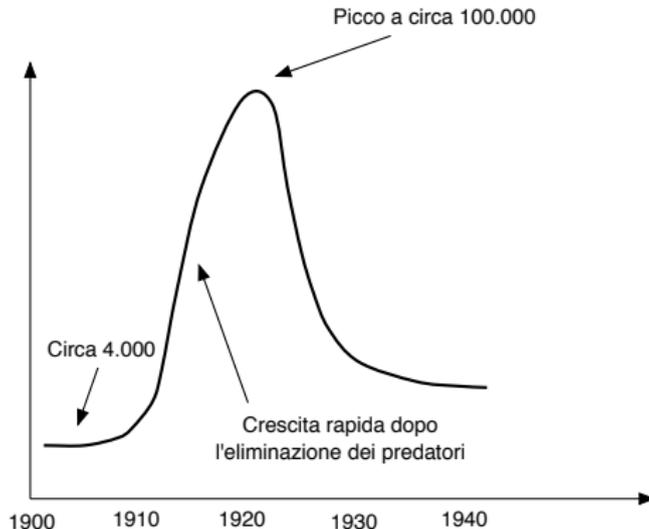
Questo ha portato ad una notevole crescita dei cervi: intorno al 1924 erano stimati in 100,000. La forte pressione esercitata sull'ambiente dai cervi ha portato in breve ad una forte diminuzione del foraggio disponibile, con conseguente degrado ambientale. Ciò ha avuto un effetto sulla popolazione dei cervi, che nella seconda metà degli anni 20 si è ridotta di circa il 60%. È stata una conseguenza non solo della fame per mancanza di cibo, ma anche di politiche sbagliate.

L'andamento di riferimento

Ci si propone di costruire un modello che ci permetta di studiare la dinamica della popolazione dei cervi nell'altopiano di Kaibab. Il primo passo è la costruzione di un *andamento di riferimento* basato sulle nostre conoscenze sul fenomeno. Questo andamento ci guiderà nella costruzione del modello.

L'andamento di riferimento

Ci si propone di costruire un modello che ci permetta di studiare la dinamica della popolazione dei cervi nell'altopiano di Kaibab. Il primo passo è la costruzione di un *andamento di riferimento* basato sulle nostre conoscenze sul fenomeno. Questo andamento ci guiderà nella costruzione del modello.



Crescita dei cervi, in assenza di predatori

- Consideriamo la popolazione dei cervi come una variabile di livello. I cervi raggiungono la capacità di riproduzione a circa un anno e mezzo di età, si accoppiano in novembre-dicembre e partoriscono in giugno-luglio. Una gravidanza produce uno o due nati, molto raramente più di due.
- Assumiamo che le femmine siano la metà della popolazione, che $2/3$ siano in età fertile, che ogni femmina fertile abbia un parto l'anno e che il numero medio di nati per parto si 1.6.
- Assumiamo poi che mediamente un cervo viva 15 anni.

Crescita dei cervi, in assenza di predatori

- Consideriamo la popolazione dei cervi come una variabile di livello. I cervi raggiungono la capacità di riproduzione a circa un anno e mezzo di età, si accoppiano in novembre-dicembre e partoriscono in giugno-luglio. Una gravidanza produce uno o due nati, molto raramente più di due.
- Assumiamo che le femmine siano la metà della popolazione, che $2/3$ siano in età fertile, che ogni femmina fertile abbia un parto l'anno e che il numero medio di nati per parto si 1.6.
- Assumiamo poi che mediamente un cervo viva 15 anni.

Crescita dei cervi, in assenza di predatori

- Consideriamo la popolazione dei cervi come una variabile di livello. I cervi raggiungono la capacità di riproduzione a circa un anno e mezzo di età, si accoppiano in novembre-dicembre e partoriscono in giugno-luglio. Una gravidanza produce uno o due nati, molto raramente più di due.
- Assumiamo che le femmine siano la metà della popolazione, che $2/3$ siano in età fertile, che ogni femmina fertile abbia un parto l'anno e che il numero medio di nati per parto si 1.6.
- Assumiamo poi che mediamente un cervo viva 15 anni.

Crescita dei cervi, in assenza di predatori

- Consideriamo la popolazione dei cervi come una variabile di livello. I cervi raggiungono la capacità di riproduzione a circa un anno e mezzo di età, si accoppiano in novembre-dicembre e partoriscono in giugno-luglio. Una gravidanza produce uno o due nati, molto raramente più di due.
- Assumiamo che le femmine siano la metà della popolazione, che $2/3$ siano in età fertile, che ogni femmina fertile abbia un parto l'anno e che il numero medio di nati per parto si 1.6.
- Assumiamo poi che mediamente un cervo viva 15 anni.

$$\text{Tasso netto di crescita} = 0.5 \times \frac{2}{3} \times 1.6 - \frac{1}{15} = 0.46666 \approx 0.5$$

Si ha allora, all'inizio della simulazione una crescita di 2,000 cervi l'anno.

I predatori

- Consideriamo il puma. Mediamente possiamo assumere che uccida una preda una volta la settimana, e che i cervi rappresentino il 75% della sua dieta.
- Il numero di cervi uccisi da un puma ogni anno è allora dato da $52 \times 0.75 = 39$. Approssimando possiamo assumere che ogni puma uccida 40 cervi l'anno.
- I predatori sono diversi, ma possiamo considerarne un unico tipo, definendo il loro numero in numero di "puma equivalenti".
- Assumendo di partire da una situazione di equilibrio è ragionevole assumere che ci siano all'inizio della simulazione 50 predatori, che corrisponde a 2,000 cervi uccisi all'anno.

I predatori

- Consideriamo il puma. Mediamente possiamo assumere che uccida una preda una volta la settimana, e che i cervi rappresentino il 75% della sua dieta.
- Il numero di cervi uccisi da un puma ogni anno è allora dato da $52 \times 0.75 = 39$. Approssimando possiamo assumere che ogni puma uccida 40 cervi l'anno.
- I predatori sono diversi, ma possiamo considerarne un unico tipo, definendo il loro numero in numero di "puma equivalenti".
- Assumendo di partire da una situazione di equilibrio è ragionevole assumere che ci siano all'inizio della simulazione 50 predatori, che corrisponde a 2,000 cervi uccisi all'anno.

I predatori

- Consideriamo il puma. Mediamente possiamo assumere che uccida una preda una volta la settimana, e che i cervi rappresentino il 75% della sua dieta.
- Il numero di cervi uccisi da un puma ogni anno è allora dato da $52 \times 0.75 = 39$. Approssimando possiamo assumere che ogni puma uccida 40 cervi l'anno.
- I predatori sono diversi, ma possiamo considerarne un unico tipo, definendo il loro numero in numero di "puma equivalenti".
- Assumendo di partire da una situazione di equilibrio è ragionevole assumere che ci siano all'inizio della simulazione 50 predatori, che corrisponde a 2,000 cervi uccisi all'anno.

I predatori

- Consideriamo il puma. Mediamente possiamo assumere che uccida una preda una volta la settimana, e che i cervi rappresentino il 75% della sua dieta.
- Il numero di cervi uccisi da un puma ogni anno è allora dato da $52 \times 0.75 = 39$. Approssimando possiamo assumere che ogni puma uccida 40 cervi l'anno.
- I predatori sono diversi, ma possiamo considerarne un unico tipo, definendo il loro numero in numero di "puma equivalenti".
- Assumendo di partire da una situazione di equilibrio è ragionevole assumere che ci siano all'inizio della simulazione 50 predatori, che corrisponde a 2,000 cervi uccisi all'anno.

Andamento della popolazione di predatori

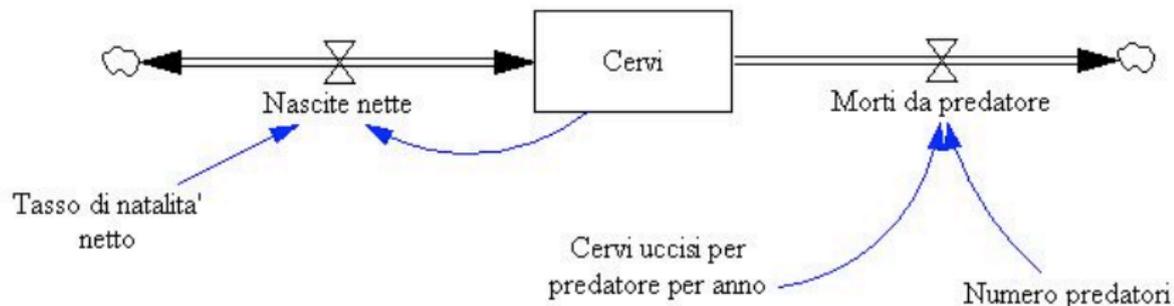
Immaginiamo ora che il numero dei predatori, costante a livello 50 fino al 1910, decresca poi linearmente fino a raggiungere, nel 1920, il livello 0.



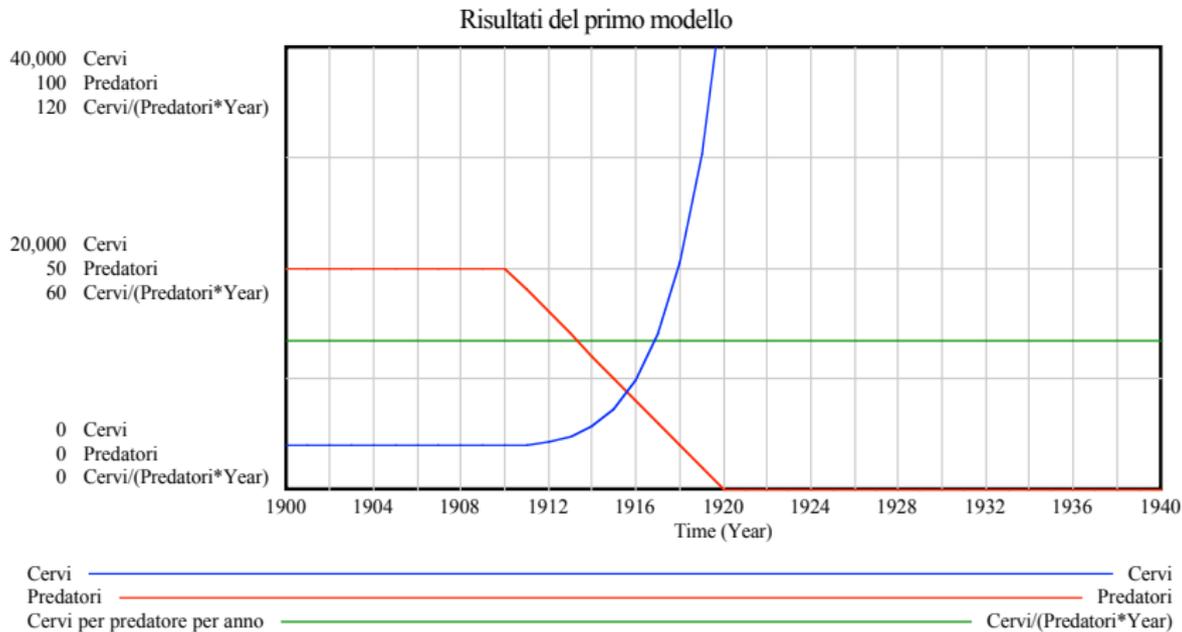
Un primo modello



Un primo modello



Una prima simulazione



Un secondo modello

- I risultati ottenuti non corrispondono all'andamento di riferimento. Non è pensabile che la popolazione dei cervi si accresca esponenzialmente.
- Non abbiamo tenuto conto del foraggio. In media un cervo richiede una tonnellata di foraggio per anno (foraggio richiesto unitario).
- L'altipiano produce circa 40,000 tonnellate di foraggio per anno (foraggio prodotto).
- L'indice di disponibilità di foraggio è il rapporto tra foraggio prodotto e foraggio richiesto (prodotto del foraggio richiesto unitario e del numero totale dei cervi).
- La richiesta soddisfatta sarà il 100% se la variabile indice di disponibilità di foraggio è maggiore o uguale ad 1. Altrimenti si riduce corrispondentemente. Ad esempio se l'indice di disponibilità di foraggio è 0.5, allora la richiesta soddisfatta sarà del 50%.

Un secondo modello

- I risultati ottenuti non corrispondono all'andamento di riferimento. Non è pensabile che la popolazione dei cervi si accresca esponenzialmente.
- Non abbiamo tenuto conto del foraggio. In media un cervo richiede una tonnellata di foraggio per anno (foraggio richiesto unitario).
- L'altipiano produce circa 40,000 tonnellate di foraggio per anno (foraggio prodotto).
- L'indice di disponibilità di foraggio è il rapporto tra foraggio prodotto e foraggio richiesto (prodotto del foraggio richiesto unitario e del numero totale dei cervi).
- La richiesta soddisfatta sarà il 100% se la variabile indice di disponibilità di foraggio è maggiore o uguale ad 1. Altrimenti si riduce corrispondentemente. Ad esempio se l'indice di disponibilità di foraggio è 0.5, allora la richiesta soddisfatta sarà del 50%.

Un secondo modello

- I risultati ottenuti non corrispondono all'andamento di riferimento. Non è pensabile che la popolazione dei cervi si accresca esponenzialmente.
- Non abbiamo tenuto conto del foraggio. In media un cervo richiede una tonnellata di foraggio per anno (foraggio richiesto unitario).
- L'altipiano produce circa 40,000 tonnellate di foraggio per anno (foraggio prodotto).
- L'indice di disponibilità di foraggio è il rapporto tra foraggio prodotto e foraggio richiesto (prodotto del foraggio richiesto unitario e del numero totale dei cervi).
- La richiesta soddisfatta sarà il 100% se la variabile indice di disponibilità di foraggio è maggiore o uguale ad 1. Altrimenti si riduce corrispondentemente. Ad esempio se l'indice di disponibilità di foraggio è 0.5, allora la richiesta soddisfatta sarà del 50%.

Un secondo modello

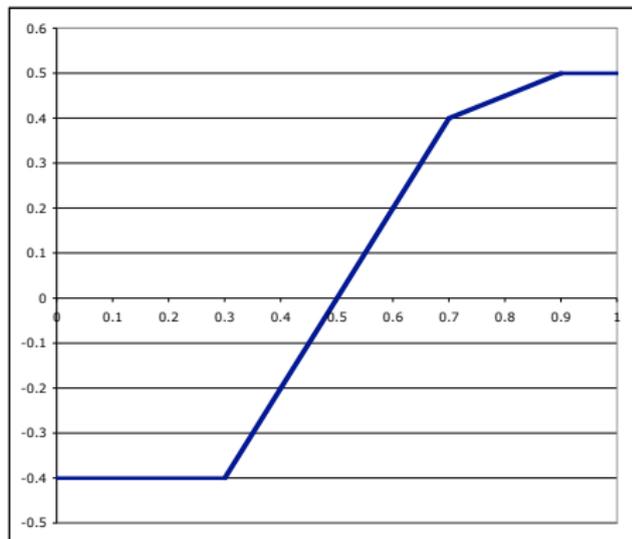
- I risultati ottenuti non corrispondono all'andamento di riferimento. Non è pensabile che la popolazione dei cervi si accresca esponenzialmente.
- Non abbiamo tenuto conto del foraggio. In media un cervo richiede una tonnellata di foraggio per anno (foraggio richiesto unitario).
- L'altipiano produce circa 40,000 tonnellate di foraggio per anno (foraggio prodotto).
- L'indice di disponibilità di foraggio è il rapporto tra foraggio prodotto e foraggio richiesto (prodotto del foraggio richiesto unitario e del numero totale dei cervi).
- La richiesta soddisfatta sarà il 100% se la variabile indice di disponibilità di foraggio è maggiore o uguale ad 1. Altrimenti si riduce corrispondentemente. Ad esempio se l'indice di disponibilità di foraggio è 0.5, allora la richiesta soddisfatta sarà del 50%.

Un secondo modello

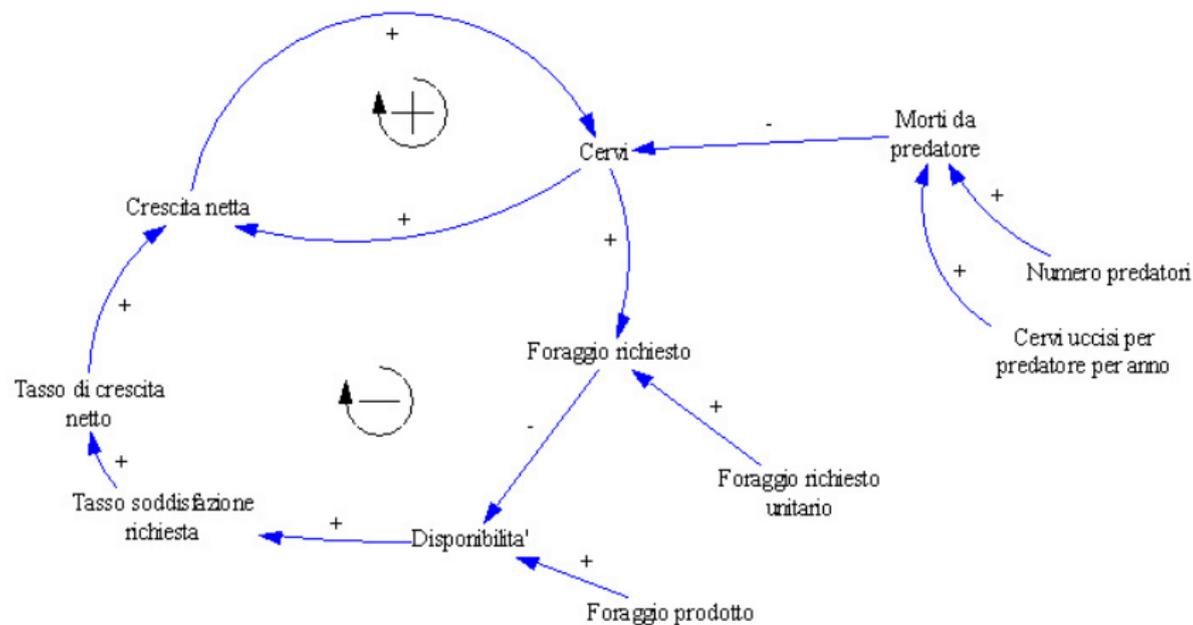
- I risultati ottenuti non corrispondono all'andamento di riferimento. Non è pensabile che la popolazione dei cervi si accresca esponenzialmente.
- Non abbiamo tenuto conto del foraggio. In media un cervo richiede una tonnellata di foraggio per anno (foraggio richiesto unitario).
- L'altipiano produce circa 40,000 tonnellate di foraggio per anno (foraggio prodotto).
- L'indice di disponibilità di foraggio è il rapporto tra foraggio prodotto e foraggio richiesto (prodotto del foraggio richiesto unitario e del numero totale dei cervi).
- La richiesta soddisfatta sarà il 100% se la variabile indice di disponibilità di foraggio è maggiore o uguale ad 1. Altrimenti si riduce corrispondentemente. Ad esempio se l'indice di disponibilità di foraggio è 0.5, allora la richiesta soddisfatta sarà del 50%.

Relazione tra tasso netto di crescita e indice di disponibilità di foraggio

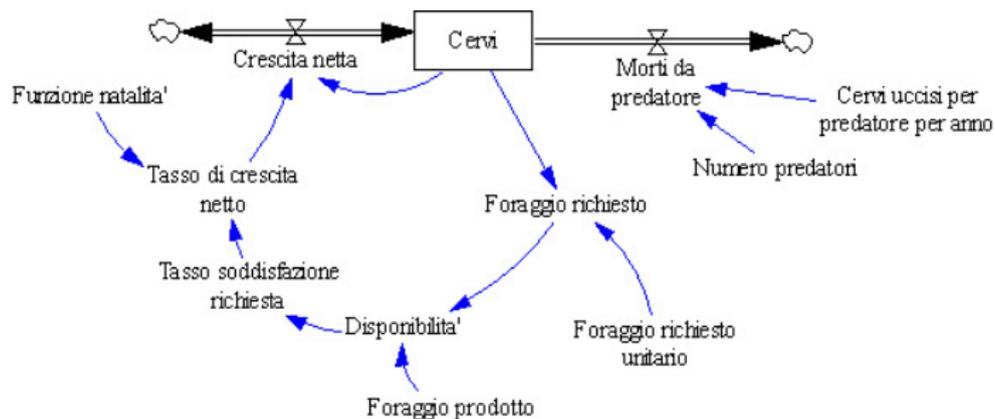
Indice di disponibilità di foraggio	Tasso netto di crescita
0	-0.4
0.3	-0.4
0.4	-0.2
0.5	0
0.6	0.2
0.7	0.4
0.8	0.45
0.9	0.5
1	0.5



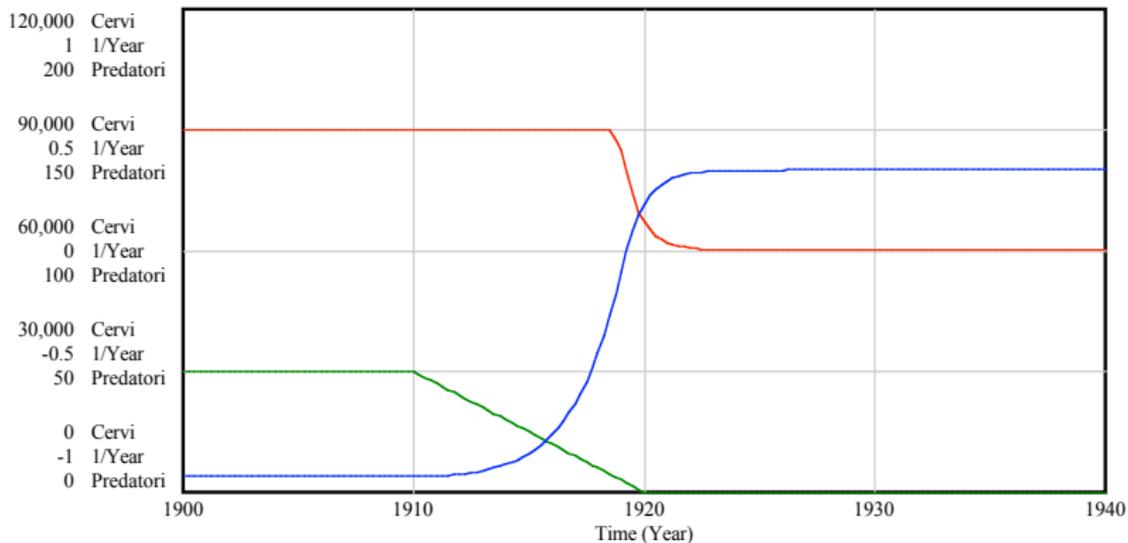
Il diagramma causale del nuovo modello



Il modello

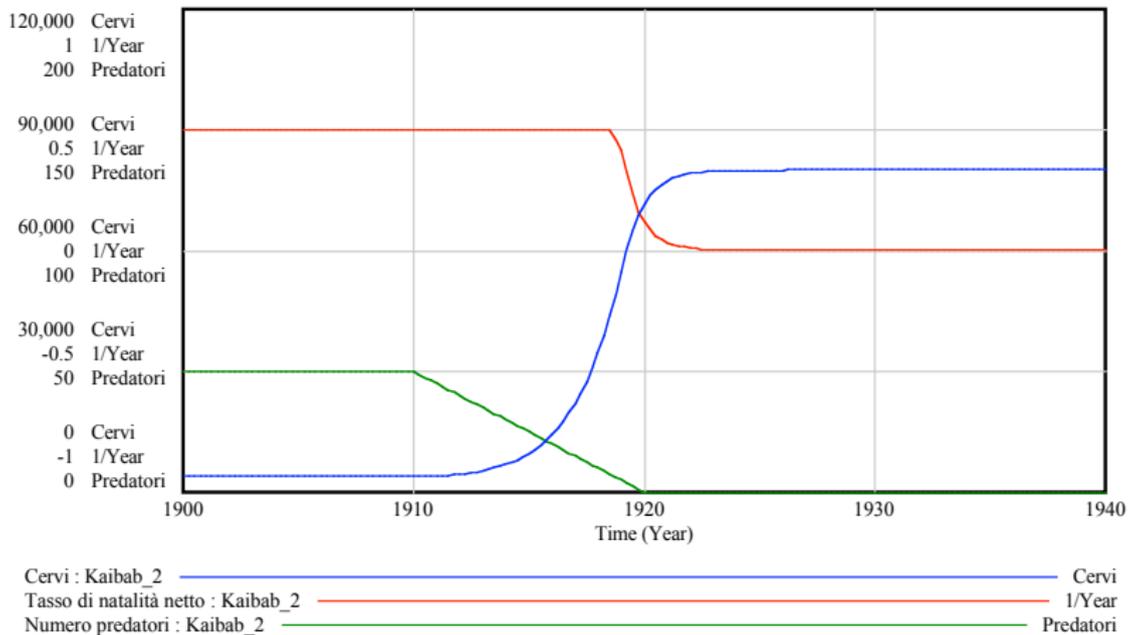


I risultati della seconda simulazione



Cervi : Kaibab_2 — Cervi
Tasso di natalità netto : Kaibab_2 — I/Year
Numero predatori : Kaibab_2 — Predatori

I risultati della seconda simulazione



ATTENZIONE: l'andamento della popolazione di cervi, anche se meno irrealistico di quello fornito dal primo modello, è ancora lontano dall'andamento di riferimento.

Per verificare la sensibilità del modello ai parametri usati:

- effettuate simulazioni con valori un po' più bassi (0.75) o un po' più alti (1.25) di foraggio richiesto unitario;
- provate con valori di 35 e 45 cervi uccisi per anno e per predatore.

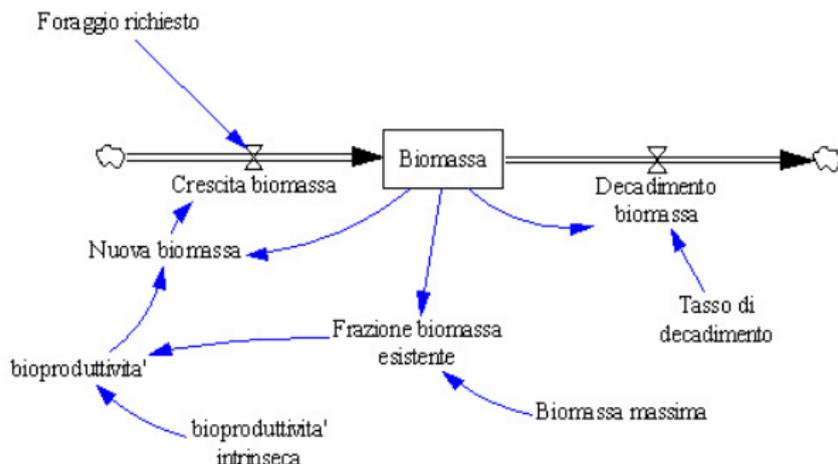
Il livello biomassa

- Finora non abbiamo inserito il livello della **biomassa totale** esistente nell'altipiano, ma solamente la quantità che viene prodotta annualmente.
- Allarghiamo il modello considerando la biomassa presente come un **livello** caratterizzato da una crescita determinata dalla quantità di biomassa nuova che cresce annualmente, da quanto viene mangiato dai cervi e dalla quantità che annualmente decade.

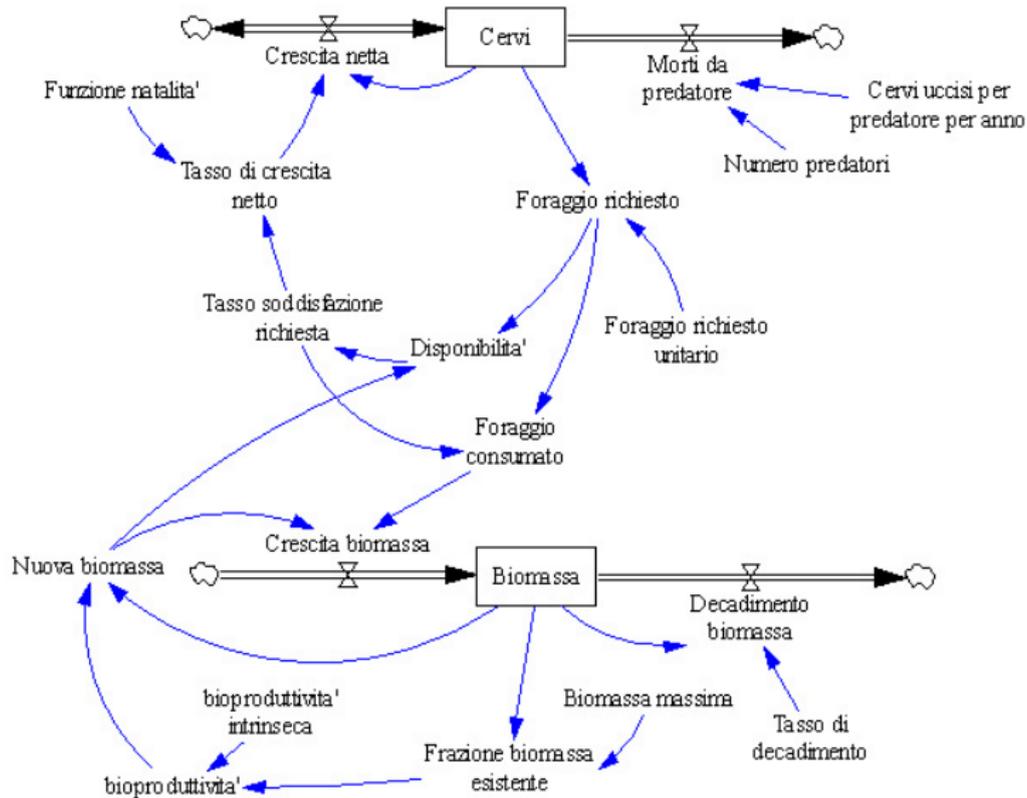
Assumiamo che:

- esista un valore massimo di biomassa che l'altipiano può sostenere: 400,000 tonnellate;
- il tasso teorico di riproduzione della biomassa sia del 40% ;
- il tasso effettivo di riproduzione sia inversamente proporzionale al rapporto tra il valore della biomassa esistente e quello della biomassa massima;
- il valore della biomassa esistente nel 1900 assumiamo fosse di 286,014 t onnellate: si tratta del valore che garantisce condizioni di equilibrio stabile nel periodo 1900 – 1910;
- il tasso di decadimento della biomassa sia del 10%.

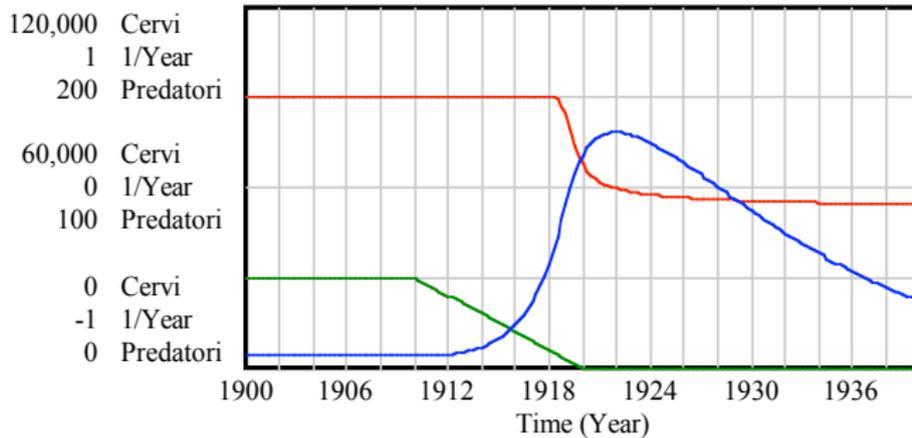
Il modello della Biomassa



Il terzo modello



Il risultati del terzo modello



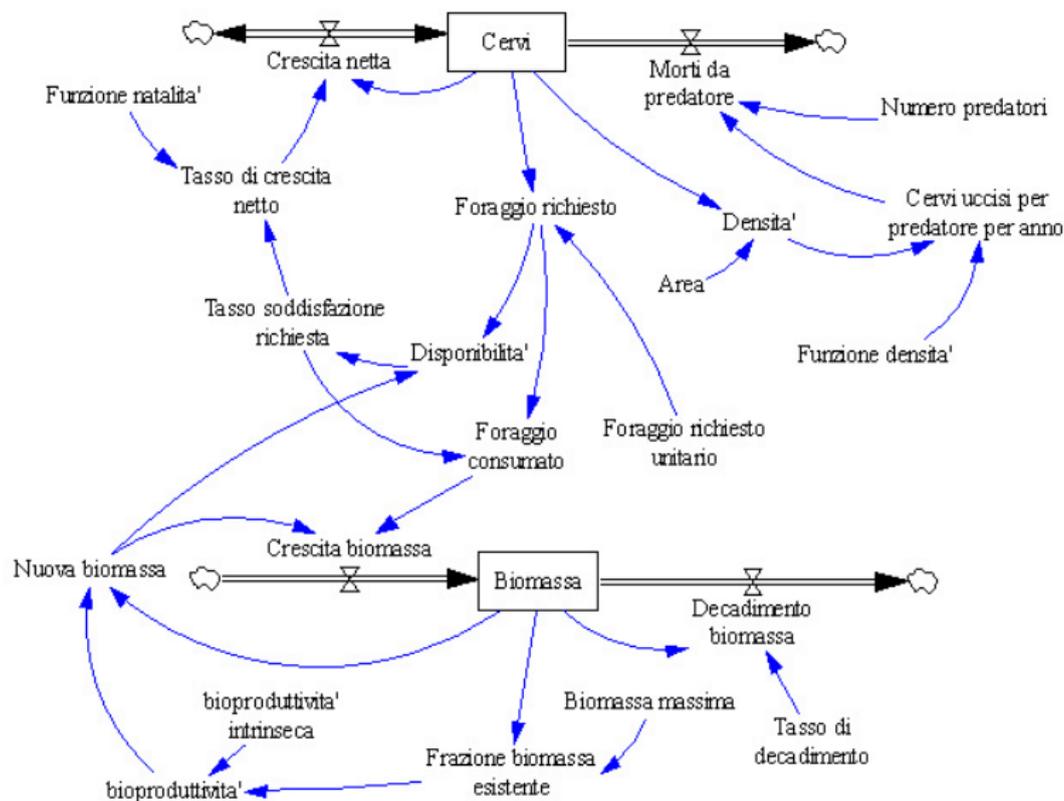
Cervi : Kaibab_3 — Cervi
Tasso di crescita netto : Kaibab_3 — 1/Year
Numero predatori : Kaibab_3 — Predatori

Cervi uccisi e densità

- Finora abbiamo supposto che ogni puma uccidesse 40 cervi l'anno, indipendentemente dal numero dei cervi.
- È ragionevole assumere che il numero dei cervi uccisi sia anche una funzione della densità dei cervi (cervi per acro).
- Il numero di acri è 800.
- Una funzione ragionevole è espressa dalla seguente tabella:

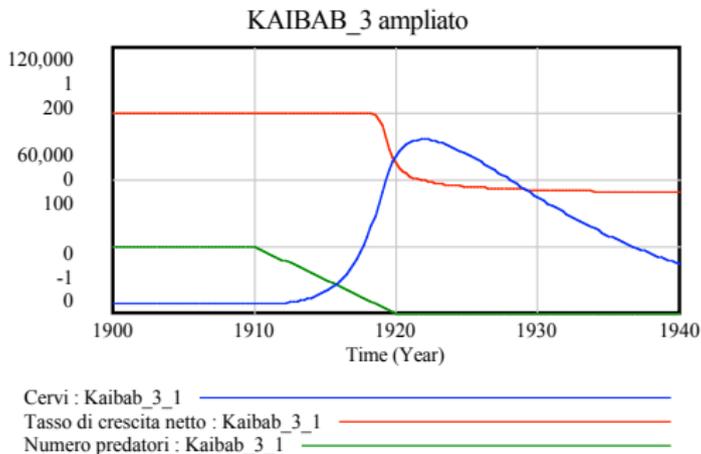
Densità	0	1	2	≥ 3
Cervi uccisi per anno	0	20	30	40

Il terzo modello ampliato



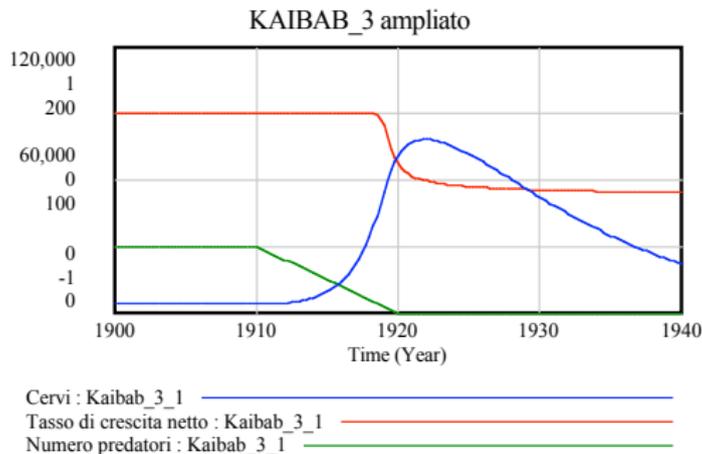
Il risultati del terzo modello ampliato

I risultati non cambiano rispetto a quelli ottenuti precedentemente.



Il risultati del terzo modello ampliato

I risultati non cambiano rispetto a quelli ottenuti precedentemente.



Siamo più vicini all'andamento di riferimento rispetto ai primi due modelli, ma ancora non abbiamo la rapida decrescita della popolazione dei cervi che ci aspettiamo.

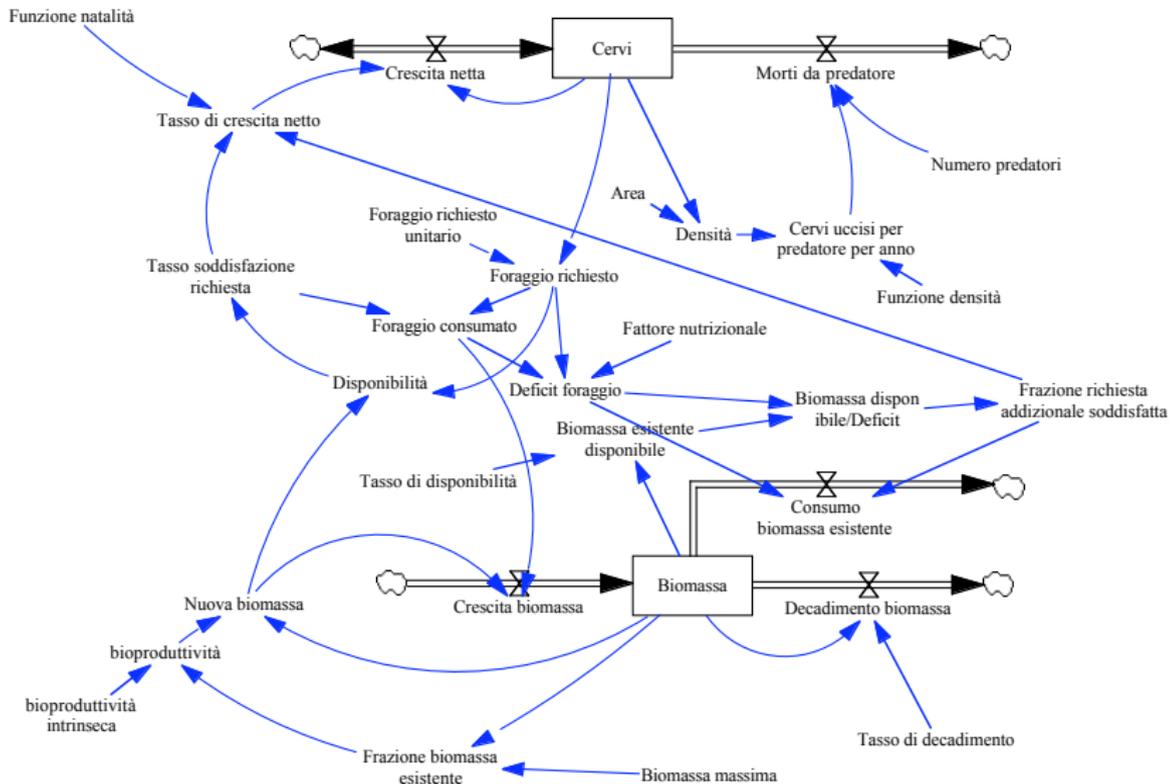
Il quarto modello

Nei modelli costruiti finora abbiamo considerato come foraggio solamente la vegetazione nuova, nata nel corso dell'anno, che in effetti è quella che gli animali preferiscono.

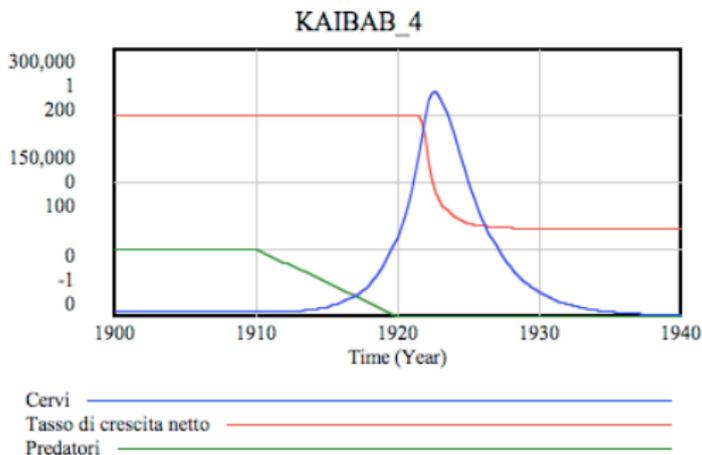
Tuttavia, in condizioni di carenza alimentare, gli animali si rivolgono anche alla vegetazione vecchia. Questo è provato dal fatto che sono stati osservati alberi completamente consumati fino ad una certa altezza.

Inseriamo allora la vecchia biomassa, assumendo che solamente il 25% sia disponibile ogni anno per il consumo da parte dei cervi. Assumiamo poi che il valore nutrizionale della vecchia biomassa sia 1/4 di quello della nuova, cioè che per ottenere lo stesso nutrimento fornito da 1 Kg di nuova biomassa ci vogliano 4 Kg della vecchia.

Il quarto modello



Il risultati del quarto modello



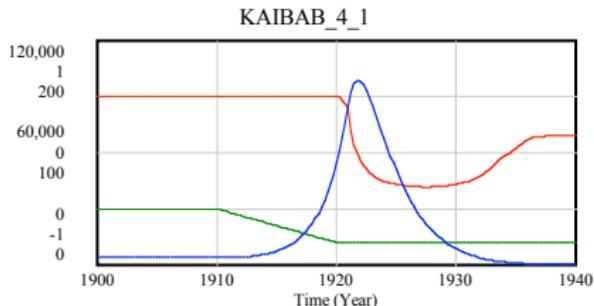
L'andamento ottenuto è ora abbastanza simile a quello di riferimento. Questo è vero almeno fino alla fine degli anni 20; poi dal '30 in poi la popolazione dei cervi tende ad estinguersi, il che non corrisponde all'andamento di riferimento. Osserviamo che il picco raggiunto dai cervi è più alto, il che è dovuto alla maggiore disponibilità di foraggio. L'intaccare lo stock di biomassa esistente porta però all'estinzione della popolazione dei cervi.

Analisi di sensitività.

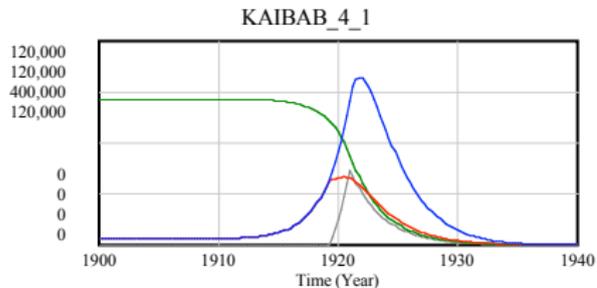
- Verificate la risposta del modello a variazioni della quantità di foraggio per anno richiesto da un cervo. Si confrontino gli andamenti della popolazione di cervi nei casi di 0.75 tonnellate all'anno, 1 tonnellata all'anno e 1.25 tonnellate all'anno.
- Si faccia la stessa cosa con riferimento al fattore nutrizionale della biomassa vecchia. Si usino i valori: 0, 0.25, 0.5, 0.75.

Ipotesi sui predatori

Assumiamo ora che i predatori non scompaiano completamente fra il 1910 ed il 1920, ma che il loro numero passi da 50 a 20. I risultati della simulazione sono quelli indicati nei grafici sottostanti. L'andamento non è cambiato sostanzialmente. Abbiamo ancora una crescita veloce della popolazione dei cervi e poi un suo altrettanto rapido declino.



Cervi —————
Tasso di crescita netto —————
Predatori —————



Foraggio richiesto : Kaibab_4_1 —————
Foraggio consumato : Kaibab_4_1 —————
Biomassa : Kaibab_4_1 —————
Consumo biomassa esistente : Kaibab_4_1 —————

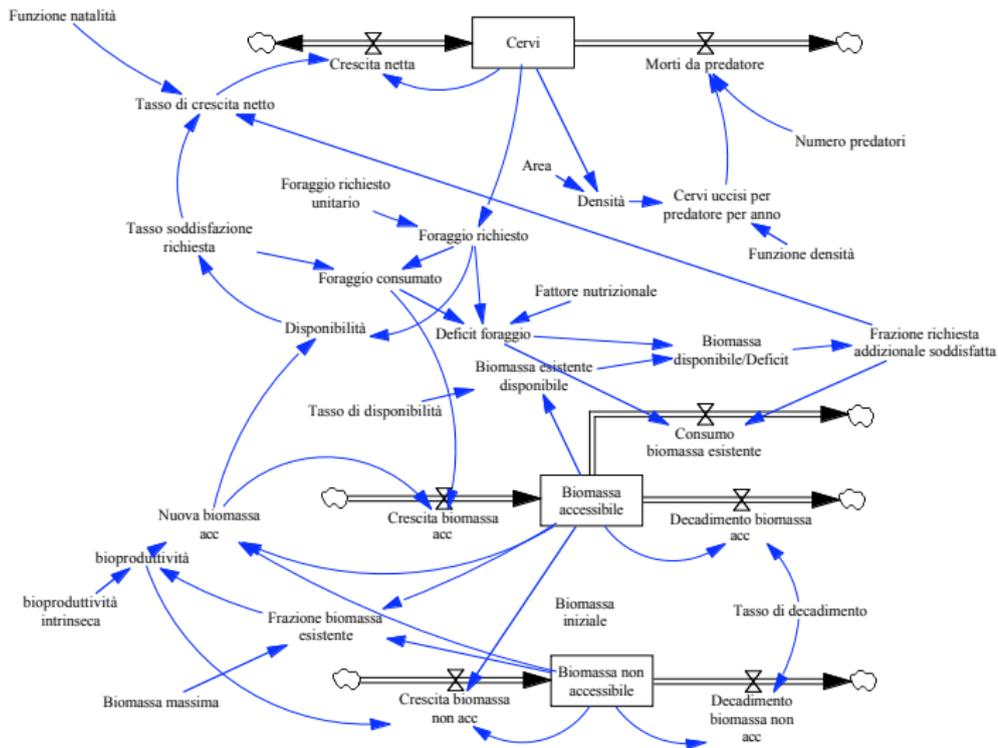
Un ultimo modello (1)

- Il modello costruito finora, anche se produce un andamento della popolazione dei cervi molto vicino quello diriferimento, non è ancora soddisfacente. La popolazione dei cervi, dopo il forte decremento della seconda metà deglianni '20, dovrebbe stabilizzarsi ad un livello significativamente maggiore di quello iniziale, mentre il modello fornisce un andamento decrescente fino alla estinzione della popolazione.
- Uno dei motivi di questo comportamento anomalo potrebbe essere il fatto che si è considerata, in principio, tutta la biomassa esistente utilizzabile come cibo dai cervi. Questo porta alla scomparsa della biomassa ed alla conseguente estinzione dei cervi.

Un ultimo modello (2)

- In effetti i cervi in condizione di mancanza di cibo distruggono solo una parte delle vegetazione, quella che possono più facilmente raggiungere. La restante parte della vegetazione mantiene la capacità di rinnovarsi e quindi anche di produrre alimento per i cervi.
- Possiamo allora assumere che la biomassa sia divisa in due parti, quella accessibile ai cervi e quella non accessibile. Useremo quindi due livelli per rappresentare la biomassa. Inizialmente assumiamo che la biomassa accessibile sia il 70% della biomassa totale.
- Assumiamo poi che il 30% della nuova biomassa prodotta da quella non accessibile sia accessibile, mentre il 10% della nuova biomassa prodotta da quella accessibile sia non accessibile.

Il modello finale



Commenti al modello

L'andamento della popolazione dei cervi è ora molto più vicino a quello di riferimento. Abbiamo una decrescita nel corso degli anni '20 ed una tendenza alla stabilizzazione dopo il 1930 ad un livello più alto di quello iniziale. Ciò è consistente con le osservazioni. Osserviamo anche un notevole deterioramento della biomassa: quella accessibile tende a ridursi notevolmente fino quasi a sparire, mentre quella non accessibile tende a stabilizzarsi ad un livello più alto di quello iniziale. Anche questo è consistente con le osservazioni.

