



# La Genetica della Conservazione

La Genetica della Conservazione deriva in parte dalla genetica evoluzionistica ed in parte dalla genetica quantitativa. Tuttavia, mentre queste si occupano principalmente di grandi popolazioni regolate da fattori deterministici, la genetica della conservazione studia il comportamento di piccole popolazioni, in cui i fattori casuali hanno un'importanza ben maggiore.

# Perché le specie si estinguono?

Le specie in pericolo di estinzione diminuiscono di dimensione a causa di:

- ✓ perdita di habitat (Amazzonia)
- ✓ sovrasfruttamento (risorse ittiche)
- ✓ introduzione di specie competitive (Australia)
- ✓ inquinamento (anfibi)

Le popolazioni piccole risentono in maggior grado di:

- ✓ crisi demografiche
- ✓ alterazioni ambientali
- ✓ catastrofi improvvise

# Estinzioni documentate dal 1600 ad oggi

<i>Taxon</i>	<i>Totale</i>	<i>% nel taxon</i>	<i>% nelle isole</i>
mammiferi	85	2,1	60
uccelli	113	1,3	81
rettili	21	0,3	91
anfibi	2	0,05	0
pesci	23	0,1	4
invertebrati	98	0,01	49
fanerogame	384	0,2	36

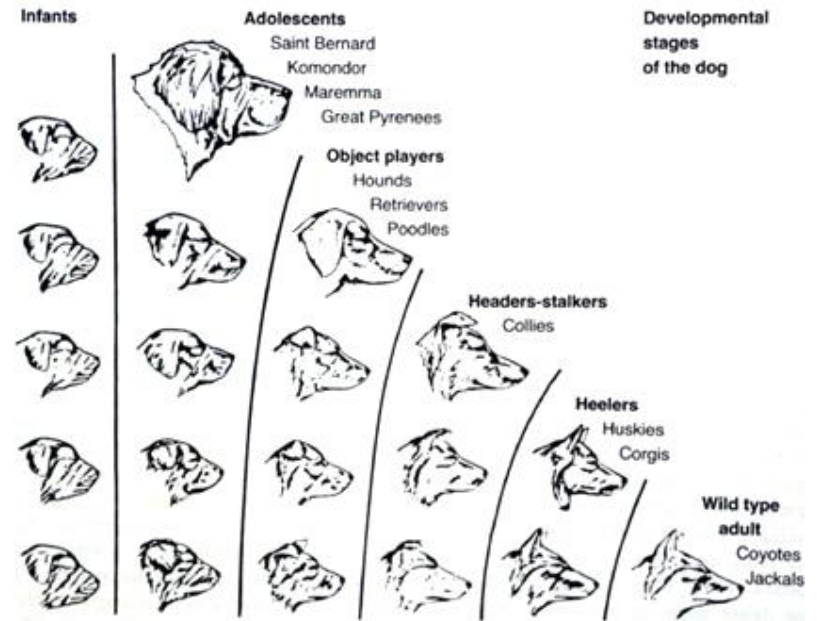
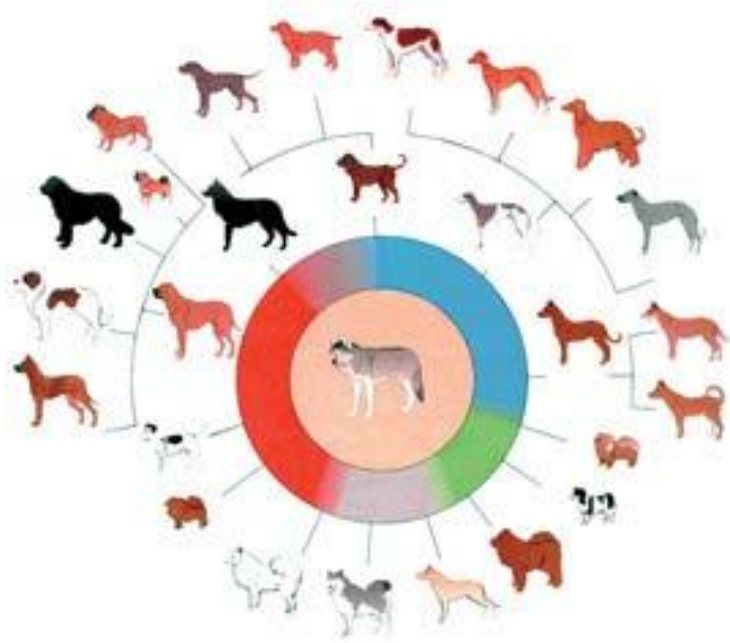
# Cause dell'estinzione

- Fattori associati all'uomo
- Fattori stocastici, tra cui:
  - ✓ stocasticità ambientale → variazione non prevedibile dei fattori ambientali (pioggia e siccità, nutrienti disponibili);
  - ✓ stocasticità demografica → oscillazioni nei rapporti nascite/morti, maschi/femmine, ecc.;
  - ✓ stocasticità genetica → inincrocio, perdita di diversità genetica.

# Cosa studia la Genetica della Conservazione?

- Depressione da inincrocio
- Perdita della diversità genetica e del potenziale evolutivo
- Frammentazione della popolazione e riduzione del flusso genico
- Processi casuali, come la deriva genetica, che prevalgono sulla selezione naturale
- Accumulo e perdita (*purificazione*) di mutazioni deleterie
- Gestione delle piccole popolazioni in cattività
- Risoluzione delle ambiguità tassonomiche (analisi molecolare) per la definizione dell'unità di gestione della specie in pericolo
- Aspetti forensi e legali

# La diversità genetica



Un caso di elevata diversità genetica è quello delle razze canine, tutte derivanti dal lupo e con esso interfeconde.



# Le popolazioni piccole hanno ridotta diversità genetica

Le popolazioni passate attraverso un *collo di bottiglia* presentano sia una ridotta variazione allozimica che per i microsatelliti, se confrontate con specie che non hanno subito riduzioni numeriche. Come si vede in tabella, **le specie minacciate hanno perso il 40% circa della diversità genetica rispetto a quelle non a rischio.**

Specie in pericolo	A	H%	Specie non a rischio	A	H%
Rinoceronte nero	4,2	69	Bufalo cafro	8,6	73
Lupo del Messico	2,7	42	Lupo grigio	4,5	62
Lupo etiopico	2,4	21	Coyote	5,9	68
Licaone	3,5	56	Cane domestico	6,4	73
Ghepardo	3,4	39	Leone africano	4,3	66
Cornacchia delle Marianne	1,8	16	Cornacchia americana	6,0	68
Gheppio delle Mauritius	1,4	10	Gheppio	5,5	68
Gheppio delle Seychelles	1,3	12	Gheppio africano m.	4,5	59
Falco pellegrino	4,1	48	Falco grillaio	5,4	70
Vombato <i>L. krefftii</i>	2,1	32	Vombato <i>L. latifrons</i>	5,9	71
<i>Potorus longipes</i>	3,7	56	Koala	8,0	81
Wallaby dalle briglie	11,6	83	Wallaby <i>P. assimilis</i>	12	86
Varano di Komodo	4,0	31	Alligatore americano	8,3	67
Mogano (pianta)	9,7	55	<i>P. arboreum</i>	9,3	67



# L'evoluzione

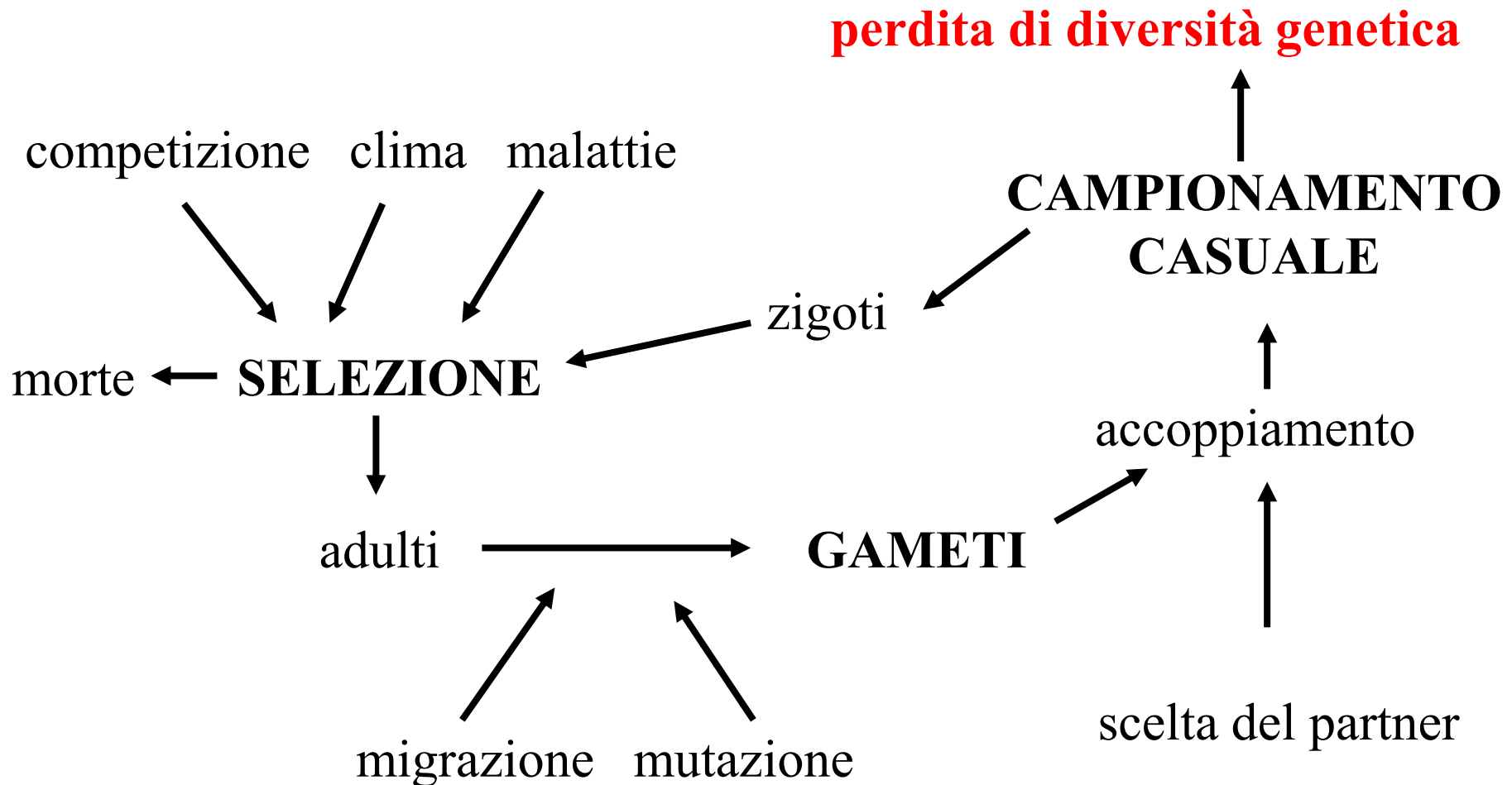
È il cambiamento della composizione genetica di una popolazione e si basa sulla diversità genetica della popolazione stessa. Sulla diversità genetica agisce la selezione naturale per determinare il **cambiamento evolutivo adattativo**.

L'evoluzione quindi implica qualunque **cambiamento** delle frequenze degli alleli, come determinate in base al principio di Hardy-Weinberg, dovuto ad una o più eccezioni ai cinque capisaldi su cui la teoria stessa si basa.

# Cosa influenza l'evoluzione?

1. La **mutazione**, che introduce nuova diversità genetica; nel breve termine però è una forza debole perché i tassi di mutazione sono solitamente molto bassi
2. La **migrazione** (flusso genico), che riduce le differenze tra popolazioni e quindi riduce la diversità genetica della specie
3. La **selezione**, che rappresenta la forza principale dell'evoluzione
4. Il **caso**, che ha importanza soprattutto per le popolazioni di piccole dimensioni, portando ad una perdita di diversità genetica
5. La **frammentazione** e la ridotta migrazione, che creano un differenziamento casuale tra le sottopopolazioni (vedi correlazioni con i punti 2 e 4)

# Una popolazione in evoluzione è un sistema complesso



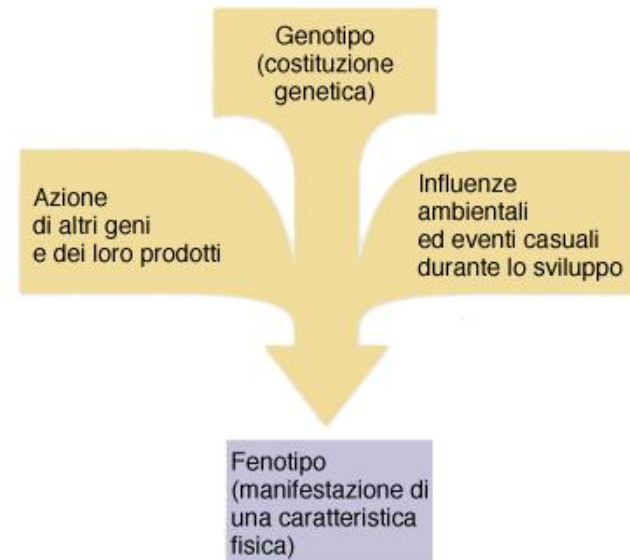
# Interazione genotipo-ambiente

Si ha quando una popolazione si adatta a particolari condizioni ambientali, per cui gli individui che la compongono si riproducono meglio nelle loro condizioni native che in altri ambienti.

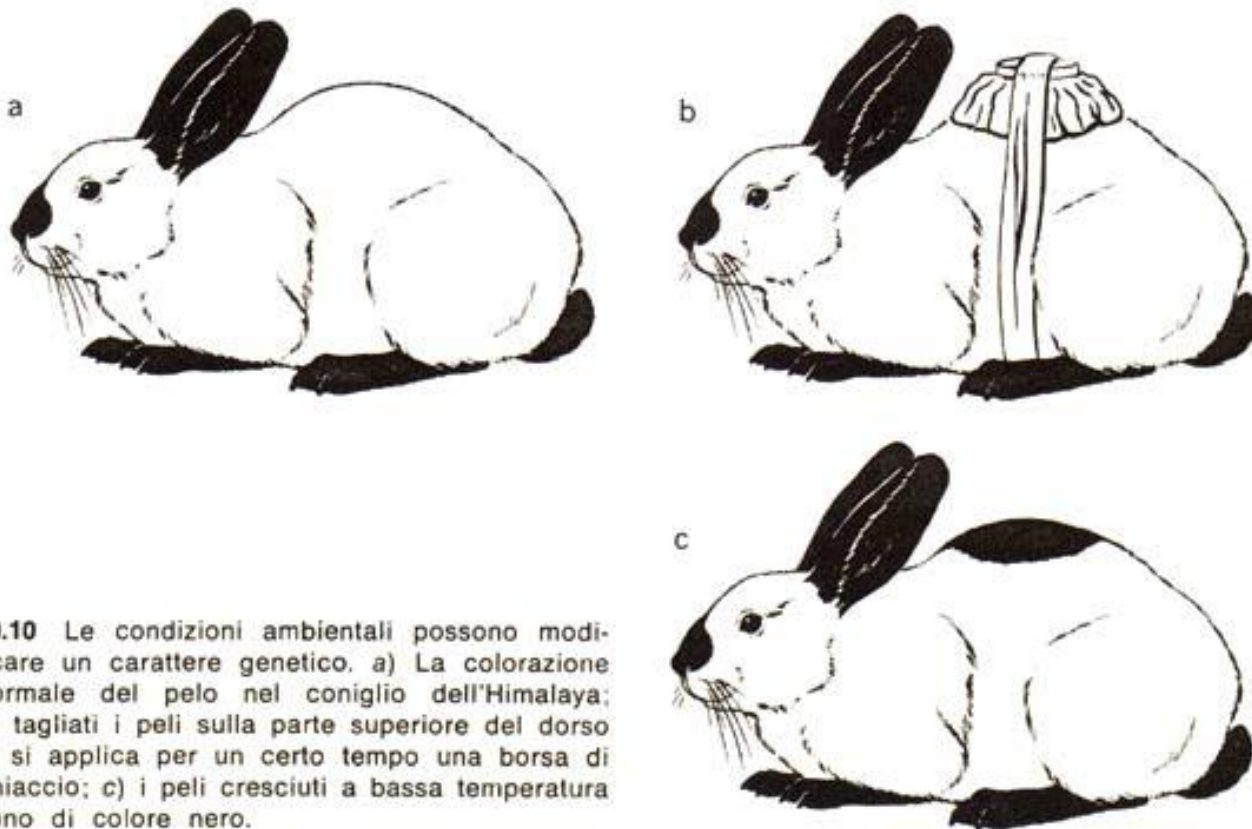
Di norma, si manifesta come una *gradazione di prestazioni* in ambienti diversi, oppure di cambiamenti inter-individuali che si presentano in ambienti eterogenei.

**Figura 10.1**

Influenze del progetto genetico (genotipo) sulla manifestazione fisica (fenotipo): interazioni con altri geni e i loro prodotti (ad esempio, gli ormoni) e con l'ambiente (ad esempio, l'alimentazione).



# Un esempio di interazione genotipo/ambiente non graduale

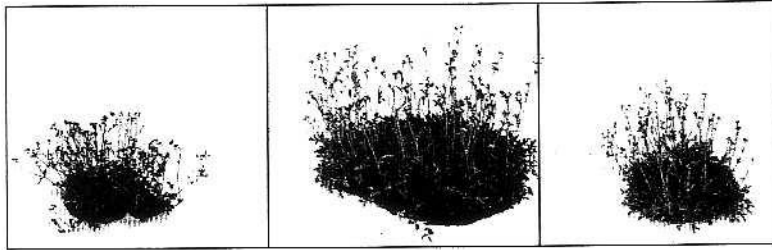


**10.10** Le condizioni ambientali possono modificare un carattere genetico. a) La colorazione normale del pelo nel coniglio dell'Himalaya; b) tagliati i peli sulla parte superiore del dorso vi si applica per un certo tempo una borsa di ghiaccio; c) i peli cresciuti a bassa temperatura sono di colore nero.

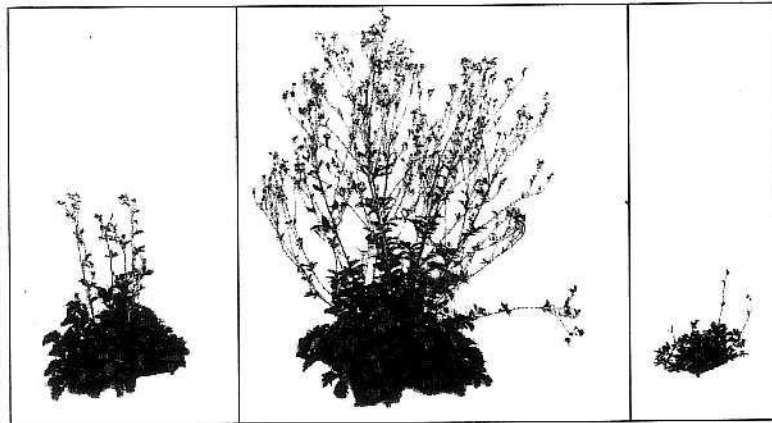
Cresciuta a livello  
del mare

Cresciuta a  
1400 m

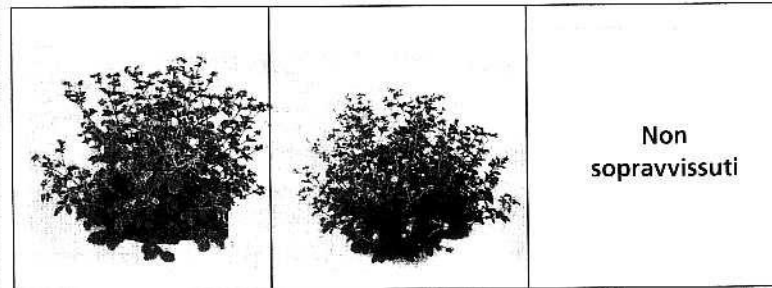
Cresciuta a  
3050 m



*Potentilla g. nevadensis* da 3050 m



*Potentilla g. hansen* da 1400 m



*Potentilla g. typica* dal livello del mare

# Un esempio di interazione genotipo/ambiente graduale

**Figura 3.4**

Interazioni genotipo ambiente in *Potentilla glandulosa*. Piante provenienti da alta, media e bassa altitudine vennero trapiantate nelle loro aree native ed in località differenti della California; per ogni pianta venne controllata la crescita e la sopravvivenza (da Clausen *et al.* 1940). Le popolazioni crescevano generalmente meglio nell'ambiente più simile al loro e molto peggio negli ambienti più dissimili dall'originale.

# Interazione genotipo-ambiente e gestione delle specie in pericolo

- ✓ La fitness non può essere prevista se non si conosce l'interazione genotipo-ambiente degli individui riallocati
- ✓ Il successo della reintroduzione può essere compromesso dall'adattamento genetico alla cattività
- ✓ Il mescolamento di popolazioni diverse potrebbe portare a combinazioni genetiche con basse prestazioni (fitness) in uno o più ambienti di reintroduzione
- ✓ La conoscenza dell'interazione deve essere nota per poter selezionare le popolazioni da reintrodurre nell'ambiente selvatico

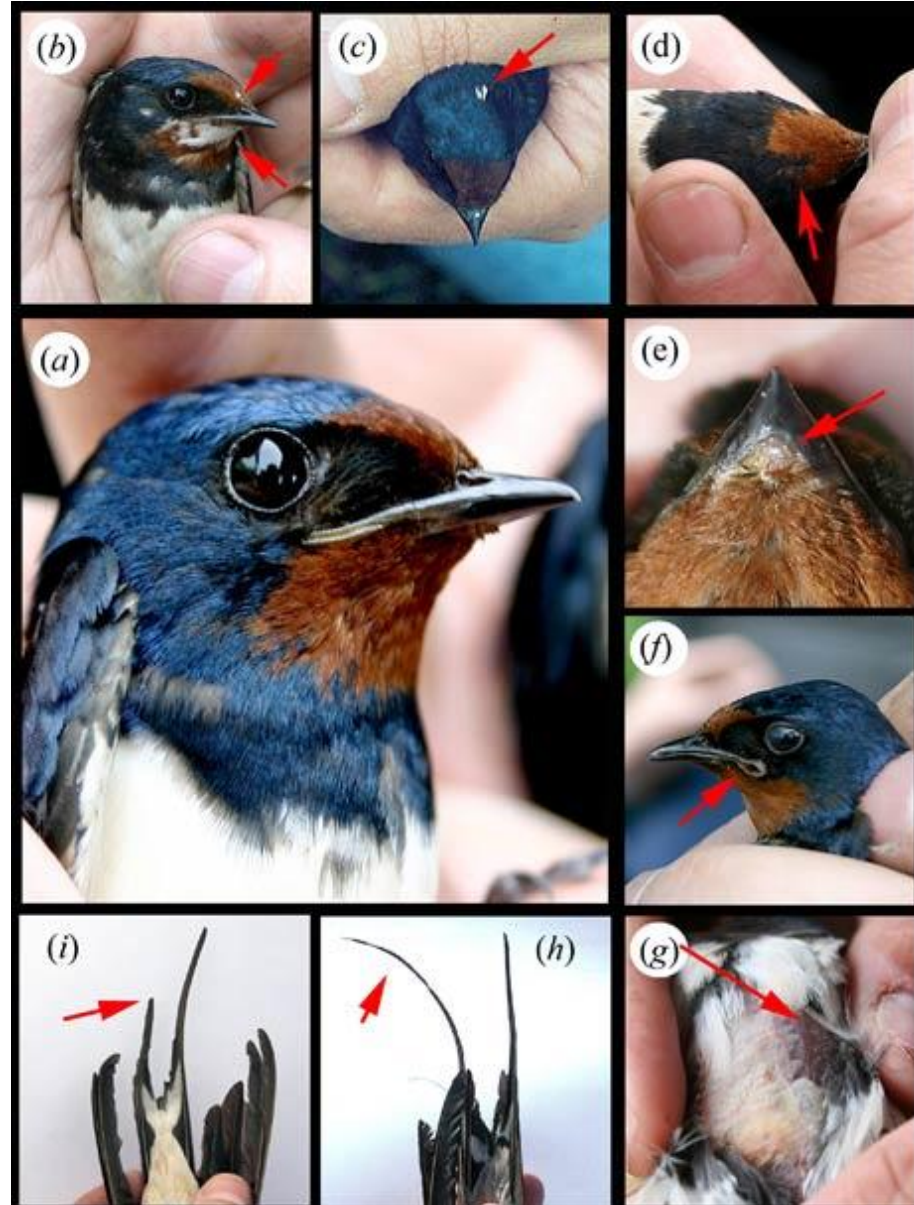


# Equilibrio mutazione-selezione

Di tutte le mutazioni che insorgono spontaneamente nel genoma e che hanno effetti fenotipici (escluse quindi le mutazioni silenti o selettivamente neutrali), si stima che **solo l'1-2% possa avere effetti vantaggiosi**. La selezione può rimuovere alleli deleteri insorti in seguito ad eventi mutazionali. Tuttavia, soprattutto in popolazioni grandi, tale processo è molto lento e il numero di mutazioni deleterie che insorgono *ex novo* è di norma **maggiore** del numero di alleli deleteri persi. Quando si raggiunge un bilanciamento tra questi processi (se no la popolazione scompare...) si ha l'**equilibrio mutazione-selezione**. La conseguenza è che tutte le popolazioni naturali che praticano esoincrocio hanno basse frequenze di alleli deleteri, che concorrono al carico mutazionale.

# Un esempio di carico mutazionale in- dotto *artificialmente*

Images of barn swallows (*Hirundo rustica* L., rondine comune) living near the site of the Chernobyl Nuclear Power Plant explosion show a variety of abnormal features. Picture (a) shows a normal swallow, while the other pictures show signs of albinism (white feathers), deformed beaks, deformed air sacs, and bent tail feathers. The high levels of abnormalities in the birds suggest that radiation is also the culprit in the higher than average levels of health issues in humans living near Chernobyl - a direct contradiction to a World Health Organization - led report blaming social stresses for the ailments. Photographs courtesy Tim Mousseau



# Concetti generali

Le popolazioni di interesse per la conservazione sono piccole e/o stanno diminuendo la loro numerosità. Le popolazioni piccole e isolate presentano **maggiore inincrocio** e perdita della diversità genetica, che determina:

- ✓ una diminuzione della fitness riproduttiva detta **depressione da inincrocio**;
- ✓ una ridotta capacità di evolvere in risposta ai cambiamenti ambientali.

# Perdita della diversità genetica: il fenomeno del *collo di bottiglia*

La riduzione drastica della dimensione della popolazione viene detta **collo di bottiglia** (*bottleneck*) ed è del tutto simile all'*effetto del fondatore*.



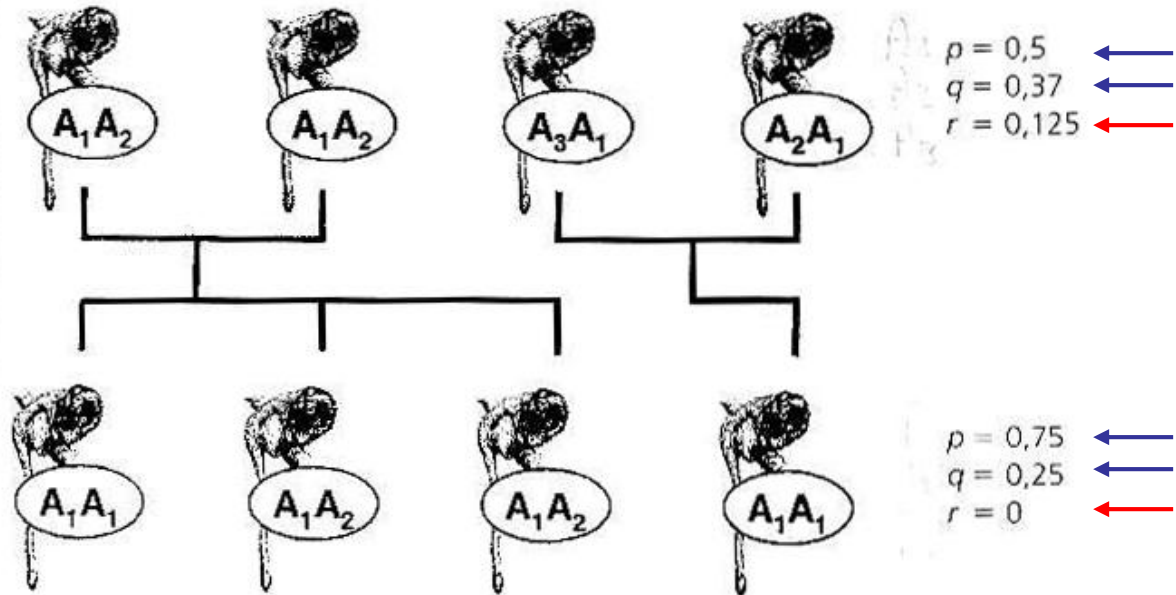
SPECIE	DIMENSIONE DEL COLLO DI BOTTIGLIA
<i>Mammiferi</i>	
Orice d'Arabia	10
Furetto dai piedi neri	7
Bisonte europeo	13
Rinoceronte indiano	17
Cervo di Padre David	~5
Cavallo di Przewalski	12
Leopardo delle nevi	7
<i>Uccelli</i>	
Condor della California	14
Rallo di Guam	12
Gheppio delle Mauritius	2
Oca delle Hawaii	17
Amazzone di Porto Rico	13
Gru americana	14
<i>Invertebrati</i>	
Grillo campestre	12

# La deriva genetica

Nelle piccole popolazioni, le frequenze degli alleli possono fluttuare vistosamente da una generazione all'altra; inoltre gli alleli rari possono essere persi casualmente. Questo porta alla **deriva genetica casuale** (*random genetic drift*)

Figura 4.1

Deriva genetica in una piccola popolazione di leontocebo rosalia.  $p$ ,  $q$  ed  $r$  sono, rispettivamente, le frequenze degli alleli  $A_1$ ,  $A_2$  ed  $A_3$ . L'allele  $A_3$  viene perso per effetto del caso. Inoltre le frequenze di  $A_1$  ed  $A_2$  cambiano da una generazione alla successiva, con  $A_1$  che aumenta e  $A_2$  che diminuisce.

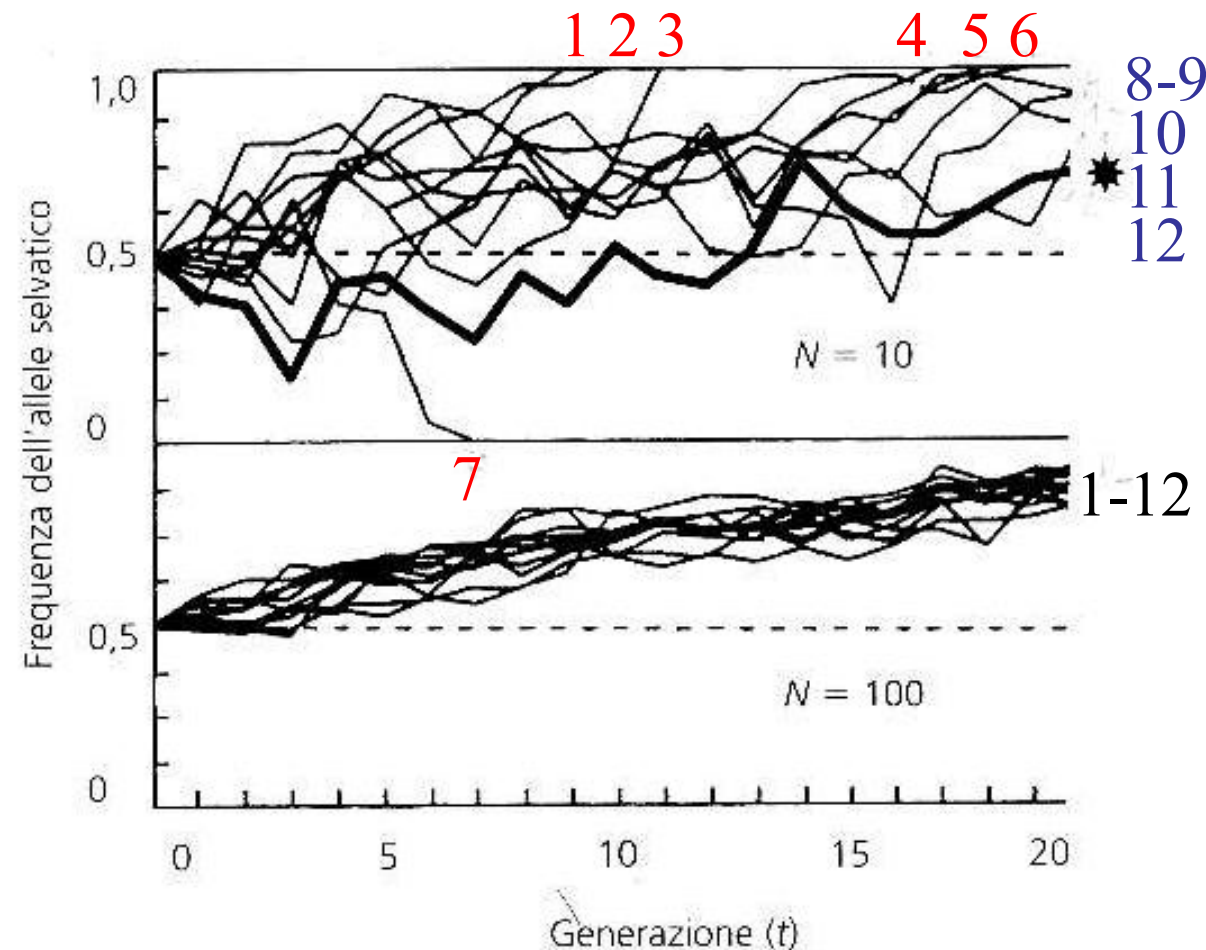




# Un esempio pratico

1-6:  $A/A$  7:  $a/a$  8-12:  $A$  e  $a$

Popolazioni 1-7: **fissazione** (omozigosità) dell'allele!



**Figura 4.2**

Effetti della deriva genetica sugli alleli selvatico (+) e nero ( $b$ ) per un locus che determina il colore del corpo nel tribolium della farina. Sono state utilizzate popolazioni con due diverse dimensioni,  $N = 10$  e  $N = 100$ , ed effettuate 12 ripetizioni per ciascuna popolazione. Tutte le popolazioni partivano da una frequenza di 0,5 per entrambi gli alleli e vennero mantenute per campionamento casuale di 10 o 100 individui che costituivano i genitori della generazione successiva (da Rich et al. 1979). *Un'ampia fluttuazione delle frequenze alleliche è stata riscontrata nelle popolazioni piccole ( $N = 10$ ) per deriva genetica casuale, sia tra diverse ripetizioni che tra generazioni successive all'interno di ogni singola ripetizione. Al contrario, le frequenze alleliche nelle popolazioni grandi hanno mostrato una maggiore costanza.*

# Commenti

- ✓ Le fluttuazioni delle frequenze nelle popolazioni con dimensione  $N=10$  sono molto più ampie di quelle delle popolazioni con  $N=100$ .
- ✓ Alcune popolazioni piccole perdono diversità e raggiungono l'omozigosità (fissazione dell'allele) nel giro di poche generazioni, mentre le grandi popolazioni non mostrano fissazione (anche se un *trend* è evidente).
- ✓ Si verifica una differenziazione casuale tra le popolazioni piccole, pur partendo da frequenze iniziali identiche (0,5).
- ✓ Benché l'andamento generale sia la perdita dell'allele a fitness minore, una popolazione (la 7) ha fissato proprio questo allele → **la deriva genetica ha superato la selezione!**



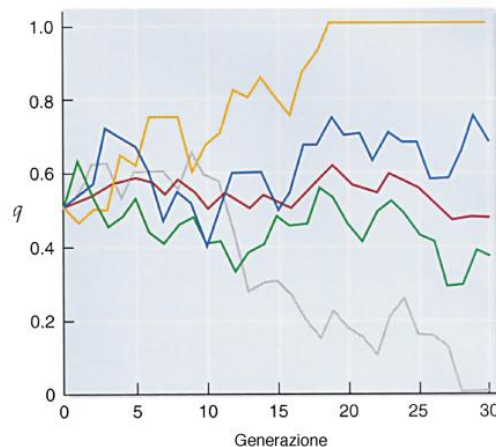
# Regole generali

1. Le popolazioni naturali frammentate vanno incontro a questi effetti per tutti i loci genetici;
2. le popolazioni di dimensioni minori subiscono una deriva genetica più forte di quelle grandi.

Per esempio, in un villaggio di 20 persone con  $p=0,9$  e  $q=0,1$  i 40 alleli che vanno a formare la generazione successiva saranno tutti A con probabilità:  $0,9^{40} = 1,5\%$ .

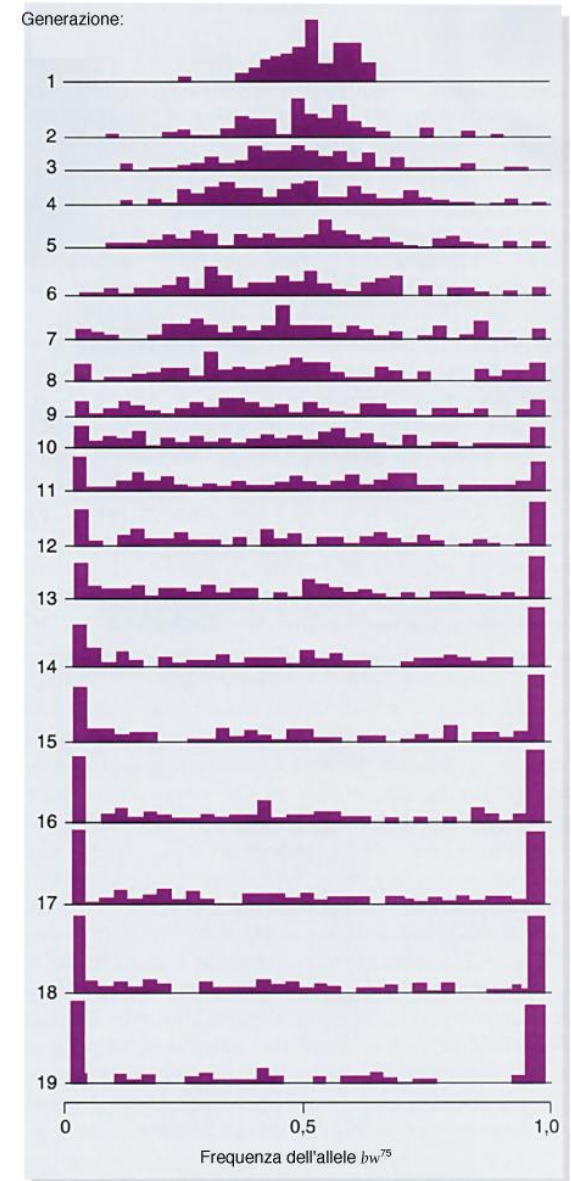
**Figura 22.12**

L'effetto della deriva genetica sulla frequenza ( $q$ ) dell'allele  $A^2$  in quattro popolazioni. Ogni popolazione comincia con  $q$  pari a 0,5 ed una dimensione effettiva di 20. La frequenza media per le quattro repliche dell'allele  $A^2$  è indicata dalla linea color magenta. Questi risultati sono stati ottenuti mediante simulazione al computer.



**Figura 22.11**

I risultati degli studi di Buri sulla deriva genetica in 107 popolazioni di *Drosophila melanogaster*. Sono mostrate le distribuzioni delle frequenze dell'allele  $bw^{75}$  tra popolazioni in 19 generazioni successive. Ciascuna popolazione era formata di 16 individui.



# L'inincrocio

L'inincrocio si ha quando c'è accoppiamento tra individui più o meno strettamente imparentati. Questo fenomeno avviene anche in popolazioni grandi, ma in tempi estremamente più lunghi. L'inincrocio porta a riduzione dell'eterozigosità, quindi a riduzione della fitness e di conseguenza all'aumento di rischio di estinzione. La perdita di fitness è detta **depressione da inincrocio** (*inbreeding depression*). L'inincrocio viene misurato con il coefficiente di inincrocio (F).

# Conseguenze

Il coefficiente di inincrocio aumenta rapidamente, tanto che con popolazioni di 4 individui (per esempio tipiche degli zoo)  $F$  raggiunge il 74% in 10 generazioni → gli individui debbono essere trasferiti frequentemente da uno zoo all'altro per minimizzare l'effetto dell'inincrocio!

# La dimensione della popolazione

La popolazione censita quasi mai corrisponde alla popolazione assoluta. Molte piccole popolazioni fluttuano numericamente (anche molto), e sono le fasi di bassa numerosità ad influenzarle di più. Inoltre non tutti gli individui contribuiscono allo stesso modo alle generazioni successive. Oppure, lo stesso numero di individui in specie diverse può avere impatti genetici differenti a seconda della struttura della popolazione e del sistema di incrocio.

# La popolazione ideale

- ✓ Numero costante di individui che si incrociano in tutte le generazioni
- ✓ Generazioni distinte e non sovrapposte
- ✓ Assenza di migrazione o flusso genico
- ✓ Tutti gli individui sono potenziali riproduttori
- ✓ Tutti gli individui sono ermafroditi
- ✓ L'unione dei gameti è casuale, inclusa l'autofecondazione
- ✓ Assenza totale di selezione
- ✓ Tasso di mutazione pari a zero
- ✓ Numero di prole per adulto: 1, con varianza 1

# Dimensione effettiva della popolazione ( $N_e$ )

**La dimensione effettiva di una popolazione è la dimensione di una popolazione ideale che andrebbe incontro ad una perdita di diversità genetica da inincrocio della stessa intensità rispetto alla popolazione reale.**

Ad esempio, se una popolazione reale è composta da 1000 individui ma perde diversità con lo stesso tasso di una popolazione ideale di 100, allora la popolazione reale ha un numero effettivo di individui pari a 100 (e non 1000!).

# Caratteristiche di $N_e$

- ✓ Misura il comportamento genetico di una popolazione reale paragonandolo a quello di una ideale
- ✓ Le conseguenze genetiche negative su una popolazione piccola dipendono da  $N_e$  (numero effettivo) e non da  $N$  (numero assoluto di individui)
- ✓  $N_e$  è solitamente molto inferiore ad  $N$  (mediamente, intorno al 10%)
- ✓ Se la popolazione reale possiede le caratteristiche di quella ideale, allora  $N_e=N$ ; qualunque differenza invece agirà negativamente su  $N_e$ , abbassandone il valore



# Un esempio

Il salmone *chinook* della California ha  $N=2000$ , ma  $N_e=85$  (poiché  $N_e/N=0,04$ )  $\rightarrow$  il rischio della sua estinzione è più vicino nel tempo di quanto non ci si aspettasse.



Una popolazione di 250 individui potrebbe avere una  $N_e$  di soli 25 individui (in media,  $N_e/N=0,1$ ), quindi potrebbe dimezzare la sua attuale eterozigosità nell'arco di sole 34 generazioni.

# Rapporto sessi sbilanciato

Spesso nelle popolazioni reali il numero di maschi e femmine non è uguale; per esempio, in molti mammiferi le popolazioni sono organizzate come *harem*. Un esempio estremo è l'elefante marino, dove il rapporto maschi:femmine=1:100.



**In questo caso estremo si ha che  $N_e=4$ !**

# Regola generale

Se tutti gli individui contribuiscono con un uguale numero di alleli alla generazione successiva, la differenza delle frequenze alleliche nella generazione successiva si minimizza mentre si massimizza la diversità genetica. Inoltre si minimizza anche l'inincrocio. Tuttavia:

- ✓ Un allele perso in una generazione da una popolazione di dimensioni ridotte non può essere riguadagnato quando la popolazione si ristabilisce
- ✓ L'inincrocio dovuto alla popolazione ridotta non si riduce quando la popolazione aumenta di nuovo di dimensioni

# Effetto della frammentazione

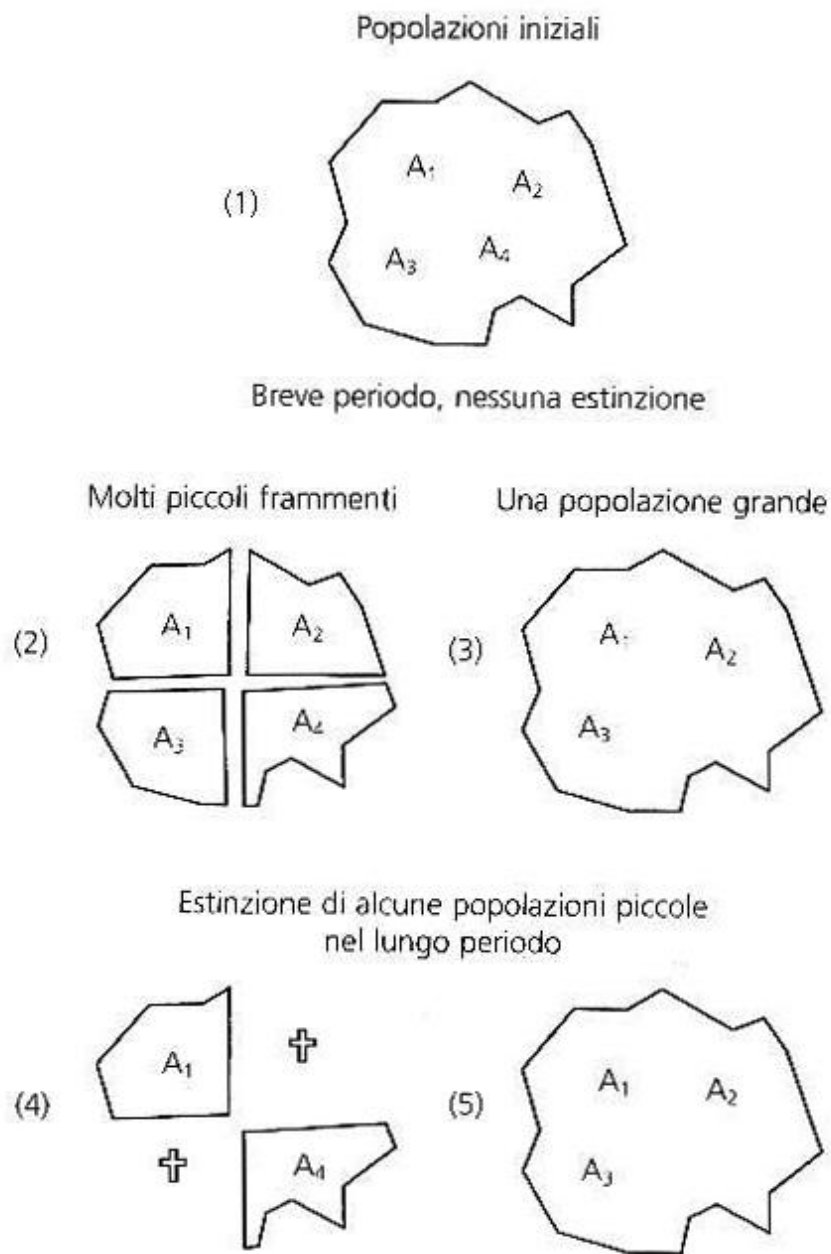
L'impatto sulle popolazioni dovuto a frammentazione (spesso dovuta all'uomo) dipende da:

- ✓ numero di sottopopolazioni;
- ✓ dimensione delle sottopopolazioni
- ✓ distribuzione geografica delle sottopopolazioni
- ✓ distanza tra le sottopopolazioni
- ✓ capacità di dispersione della specie (migrazioni)
- ✓ ambiente dell'area interposta tra i frammenti
- ✓ impatto dell'area interposta sulla dispersione
- ✓ tempo trascorso dalla frammentazione
- ✓ tasso di estinzione delle sottopopolazioni
- ✓ tasso di ricolonizzazione delle sottopopolazioni

# La frammentazione

**Figura 4.11**

Conseguenze genetiche di una singola grande popolazione (SL) rispetto a tanti piccoli frammenti (SS) completamente isolati e con lo stesso numerosità iniziale in diverse scale temporali. (1) A1- A4 rappresentano i quattro alleli inizialmente presenti nella popolazione. Nel breve periodo, in assenza di estinzioni, ci si attende che alcune delle piccole popolazioni (2) vadano incontro alla fissazione più velocemente, ma mantengano una maggiore diversità genetica generale rispetto alla singola grande popolazione (3). Le probabilità che un allele venga perso sono maggiori per la popolazione grande rispetto all'insieme di tutte le piccole popolazioni. Ognuna delle popolazioni SS avrà comunque un livello di inincrocio maggiore della popolazione SL. Nel lungo periodo, quando si verificano le estinzioni delle piccole ma non delle grandi popolazioni, l'insieme delle piccole popolazioni che sono sopravvissute (4) avrà mantenuto meno diversità genetica della singola grande popolazione (5).



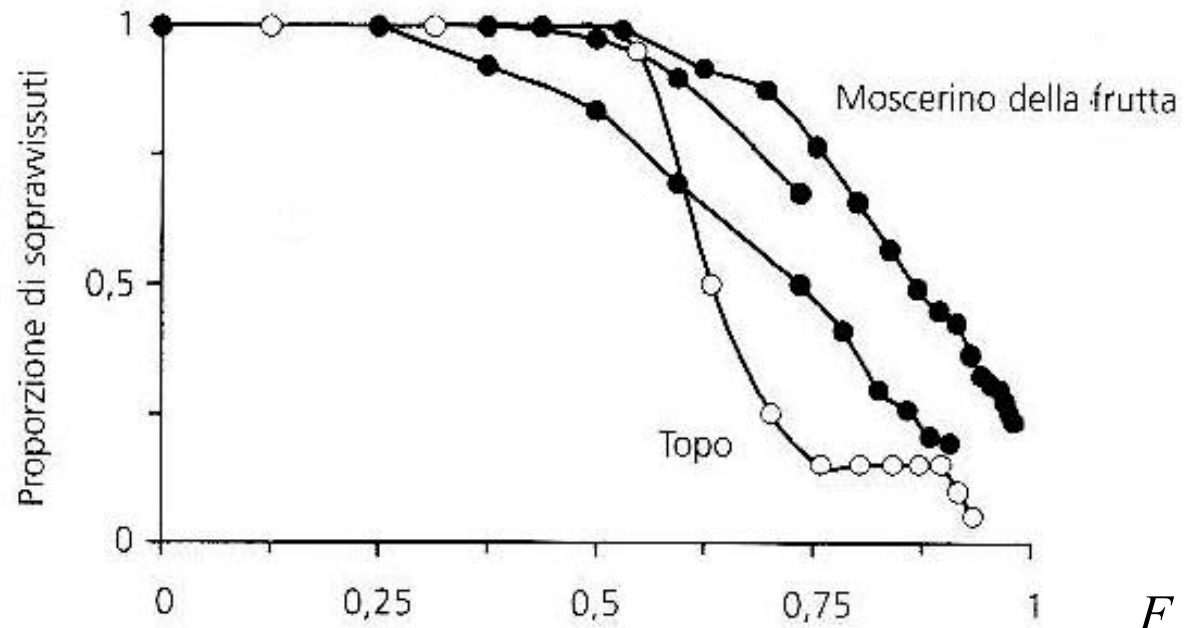
# Genetica ed estinzione

Nonostante sia controverso il ruolo della genetica nell'estinzione (si tende a dare maggiore importanza a fattori stocastici come crisi demografiche e catastrofi ambientali), molte sono le prove a favore del ruolo dei fattori genetici nell'estinzione. In particolare:

- ✓ Molte popolazioni viventi sono geneticamente compromesse (ridotta diversità, inincrocio)
- ✓ La ridotta variabilità rende le specie più suscettibili all'estinzione
- ✓ La ridotta variabilità produce individui con fitness ridotta
- ✓ L'inincrocio provoca l'estinzione in popolazioni sperimentali
- ✓ Prove indirette dimostrano che anche in popolazioni naturali l'inincrocio provoca estinzione
- ✓ Simulazioni e modelli al computer supportano questi fatti

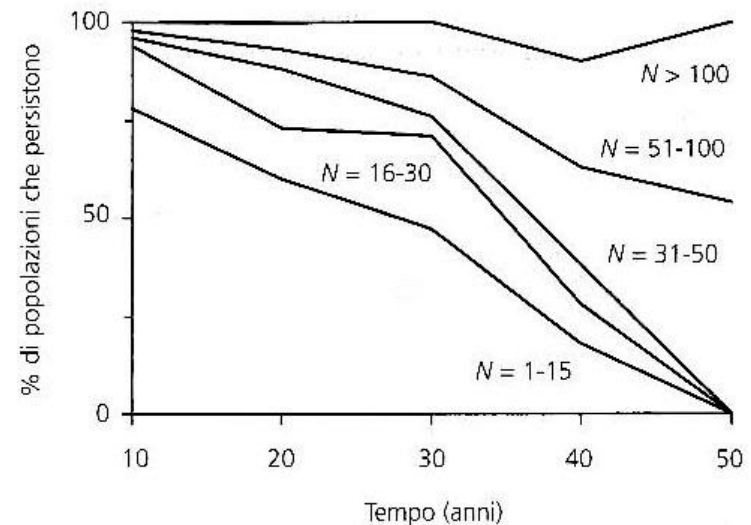
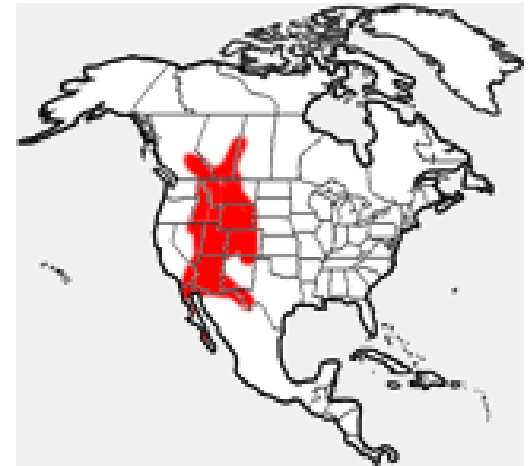
# Inincrocio ed estinzione: modelli sperimentali

Si ha l'estinzione dell'80-100% delle popolazioni di laboratorio se degli organismi, che normalmente si esocrociano, vengono artificialmente sottoposti ad incrocio fratello/sorella. Questa estinzione è molto rapida (8 generazioni) ed è ancora più veloce se si esegue l'autofecondazione (3 generazioni).





# L'esempio della pecora delle Montagne Rocciose (*Ovis canadensis*)





# Auto-incompatibilità ed estinzione nelle piante

Il sistema di auto-incompatibilità delle piante serve a prevenire l'auto-fecondazione. Se però la popolazione si riduce drasticamente, a causa della deriva genetica è possibile che le poche piante sopravvissute siano auto-incompatibili tra loro e quindi la popolazione risulta estinta funzionalmente (ad esempio: *Hymenoxys acaulis* varietà *glabra*, salvata solo in seguito ad esoincrocio con altre varietà).



# Inincrocio e resistenza alle malattie

La perdita di diversità genetica diminuisce drasticamente la capacità degli organismi di resistere a nuovi patogeni. Ad esempio, il castagno americano (*Castanea dentata*) si è quasi estinto in seguito all'introduzione nel suo areale del fungo *Cryphonectria parasitica*.



# Regole generali

Le estinzioni nelle popolazioni naturali sono più frequenti se:

- ✓ La dimensione iniziale della popolazione è piccola (nell'esempio dell'*Ovis canadensis*,  $N \leq 50$ )
- ✓ Le fluttuazioni nelle dimensioni delle popolazioni sono più ampie (frequenti colli di bottiglia)
- ✓ Si hanno tempi di generazione minori (tempo assoluto inferiore)
- ✓ L'areale è ridotto

# *La minima popolazione vitale*

Quanto deve essere grande una popolazione per rimanere geneticamente vitale per lunghi (migliaia di anni) periodi di tempo? Devo verificare se:

1. la dimensione è tale da evitare la depressione da inincrocio;
2. c'è sufficiente diversità genetica per far fronte ai cambiamenti ambientali;
3. le nuove mutazioni deleterie non sono accumulate in quantità tali da costituire un pericolo.

# Popolazioni geneticamente vitali

Stime empiriche sembrano suggerire che, **nel breve periodo**, potrebbe essere sufficiente  $N_e \sim 50$ . Ricordare che:

- l'inincrocio aumenta ad un tasso di  $1/(2N_e) \rightarrow$  tutte le popolazioni a numero finito sono soggette, prima o poi, a depressione da inincrocio;
- non esiste un valore soglia minimo al di sotto del quale la depressione da inincrocio non crei *danni*;
- maggiore è il coefficiente di inincrocio  $F$ , maggiore è la velocità con cui una popolazione si estingue.

Dati sperimentali sulla mosca domestica suggeriscono che il numero di generazioni prima dell'estinzione sia mediamente molto simile al numero effettivo ( $N_e$ ) medio di individui!



# Valore della *minima popolazione vitale*

- ✓ Secondo alcuni autori,  $N_e=50$  potrebbe essere sufficiente solo nel breve periodo (notare che molte specie e popolazioni in pericolo hanno  $N_e \leq 50!$ );
- ✓ tenendo conto del bilancio tra deriva genetica e insorgenza di nuove mutazioni, altri autori suggeriscono un  $N_e$  di almeno 500;
- ✓ tenendo conto che solo il 10% circa delle nuove mutazioni non sono deleterie ma potrebbero risultare utili nel futuro, altri propongono un  $N_e$  compreso tra 500 e 5.000;
- ✓ poiché  $N_e$  mediamente è 1/10 della popolazione reale, ne risulta che **una popolazione reale, per essere considerata geneticamente vitale, dovrebbe essere composta da almeno 5.000-50.000 individui censiti! Questo numero *potrebbe* essere sufficiente a mantenere il potenziale evolutivo a breve termine.**

# Cosa succede se $N_e < 500$ ?

Ovviamente le specie o le popolazioni con  $N_e < 500$  non sono *condannate* all'estinzione a breve termine, semplicemente hanno un maggiore rischio in tale senso e serve un intervento più incisivo per mantenerle. Ad esempio:

- ✓ isolare la popolazione dai competitori
- ✓ evitare epidemie e contagi
- ✓ ripristinare l'habitat originale

...oltre, ovviamente, ad aumentarne il numero e la diversità!

# Analisi della vitalità della popolazione (PVA)

Questa analisi combina insieme i fattori deterministici e stocastici per valutarne l'impatto sulla popolazione in pericolo; **può predire il rischio di estinzione di una popolazione e la sua più probabile causa.**

✓ I fattori deterministici sono quelli che hanno direzione costante e intensità relativamente regolare; spesso, direttamente o indirettamente, sono associati all'azione dell'uomo

✓ I fattori stocastici contengono invece un alto numero di variabili casuali ed hanno effetti imprevedibili sia per direzione che per intensità



# Esempi di fattori deterministici

- ✓ Distruzione dell'habitat, evento secondario a sviluppo agricolo, urbano, ecc.
- ✓ Sovrasfruttamento a scopo commerciale o ricreativo
- ✓ Inquinamento involontario o volontario (pesticidi, erbicidi)
- ✓ Introduzione accidentale o intenzionale di specie esotiche
- ✓ Combinazioni multiple dei fattori elencati

**I processi deterministici in genere diminuiscono le dimensioni della popolazione che diventa quindi molto sensibile ai fattori stocastici.**

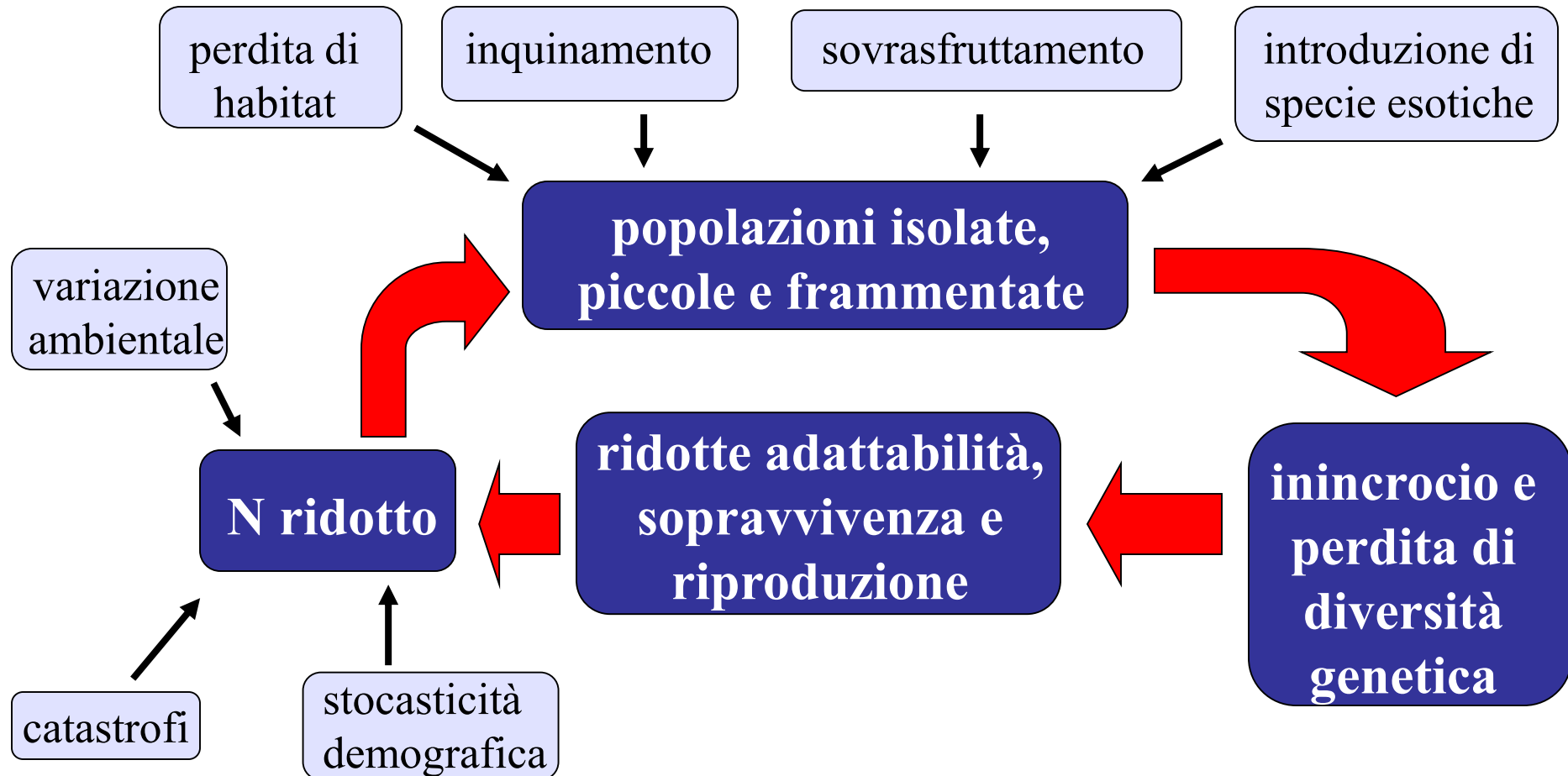
# Esempi di fattori stocastici

- ✓ **Stocasticità demografica**, dovuta alle fluttuazioni demografiche (rapporto nascite/morti, rapporto sessi, ecc.)
- ✓ **Stocasticità ambientale**, dovuta alle fluttuazioni nelle precipitazioni, nelle temperature, nel numero dei predatori, nelle risorse alimentari, nella densità di competitori
- ✓ **Stocasticità genetica**, dovuta a depressione da inincrocio, perdita di variabilità, accumulo di mutazioni deleterie
- ✓ **Catastrofi**, cioè eventi ambientali estremi (cicloni, incendi, alluvioni, eruzioni vulcaniche, epidemie)

**Ognuno di questi eventi, singolarmente, può causare l'estinzione di popolazioni a rischio!**

# Il vortice di estinzione

**I fattori stocastici, se combinati, hanno un impatto più dannoso della somma dei singoli impatti!**



# La depressione da esoincrocio

Nel caso si abbia a che fare con due popolazioni o due sottospecie della stessa specie, che siano geneticamente differenziate, e soprattutto se la differenziazione avviene in seguito ad adattamenti ad habitat diversi, gli ibridi  $F_1$  possono avere una **fitness ridotta** (per fertilità o vitalità) rispetto ai due gruppi di partenza. È un evento molto importante da considerare quando si vuole cercare di recuperare una popolazione con depressione da inincrocio, esoincrocandola con una popolazione non depressa. Nel caso della divergenza all'habitat, ad esempio, l'ibrido potrebbe non essere adatto a nessuno dei due habitat delle popolazioni da cui è originato.

# L'esempio delle rane corroboree

Le *Pseudophryne corroboree* sono degli anfibi che vivono in Australia. Nella zona di ibridazione tra popolazioni del nord e del sud (diverse per colorazione e tipo di alcaloidi cutanei secreti) il 17% degli ibridi hanno anomalie larvali (nelle singole popolazioni le anomalie sono meno del 4%).



# La depressione da esoincrocio

Se la differenziazione tra popolazioni è dovuta a deriva genetica, anziché ad adattamento, è probabile che la depressione da esoincrocio sia poca o nulla.

Diventa invece molto marcata quando la **differenziazione è adattativa** e quando la **dispersione** delle popolazioni è **limitata**. Molti esempi in tal senso in effetti derivano dalle piante (di solito a bassa dispersione).

# Depressione da esoincrocio e selezione

Anche se l'incrocio tra le popolazioni determina una depressione da esoincrocio, **la selezione naturale di solito ripristina rapidamente la fitness e spesso l'aumenta** → gli svantaggi a breve termine sono di norma ampiamente bilanciati dai vantaggi a medio termine (eterosi). Fanno eccezione i casi in cui gli ibridi  $F_1$  siano totalmente sterili o con sopravvivenza estremamente ridotta (nel qual caso però spesso si è di fronte ad un errore tassonomico!)

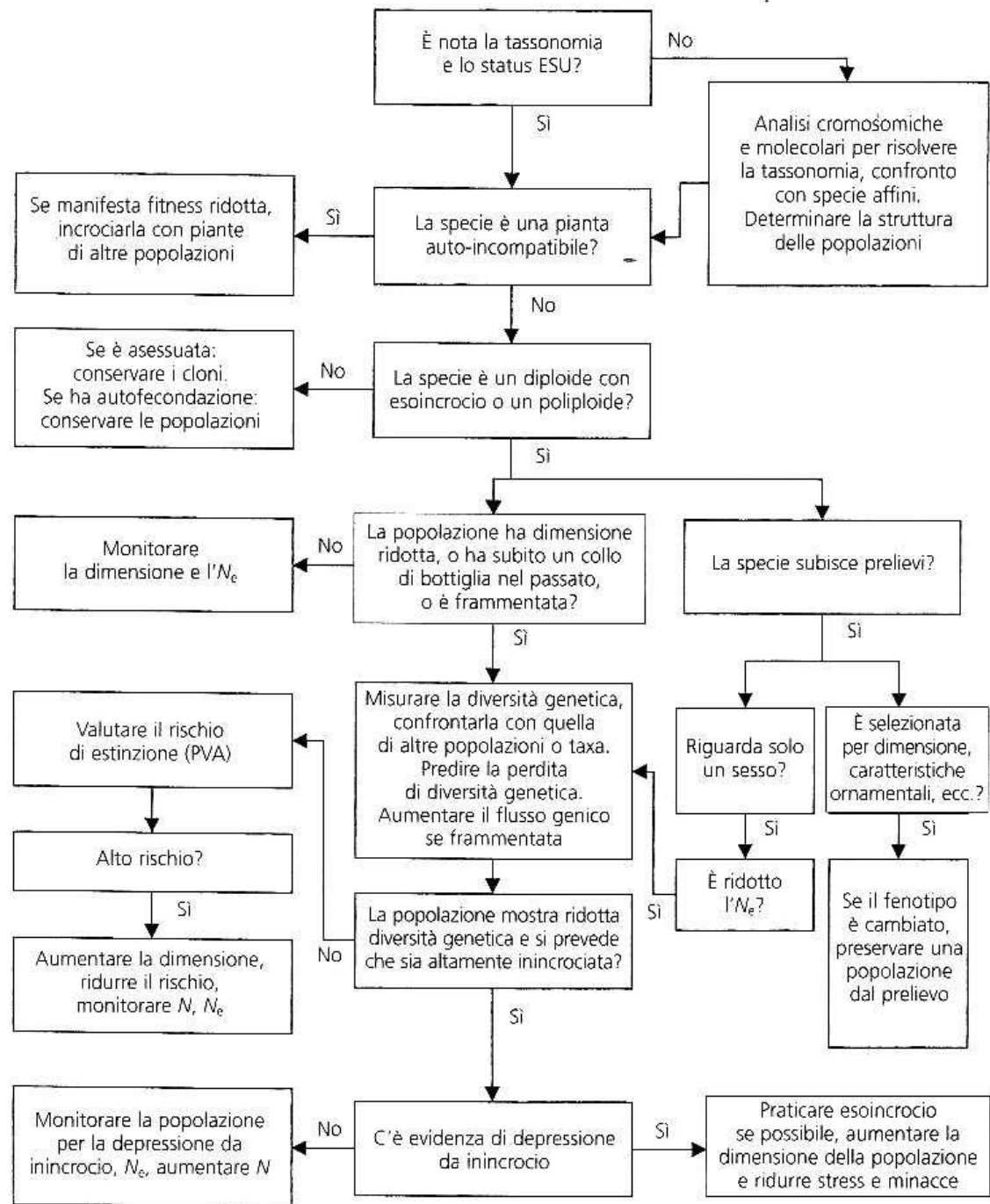
# Le unità di gestione

Se due popolazioni o sottospecie sono sufficientemente differenziate nelle caratteristiche adattative o nella composizione genetica, possono richiedere trattamenti separati al fine della conservazione. La scelta si fa tenendo in considerazione il bilancio tra:

- ✓ il *costo* di mantenere due o più popolazioni al posto di una sola;
- ✓ i rischi da depressione da esoincrocio o i benefici derivanti dalla fusione.



# La gestione genetica delle popolazioni a rischio di estinzione



# Aumentare la dimensione della popolazione a rischio

Le popolazioni a rischio sono sempre caratterizzate dall'esiguo numero di individui che la compongono ( $N$ ). Aumentare il numero degli individui, invertendo il declino demografico della popolazione, permette di attenuare simultaneamente la maggior parte delle minacce stocastiche. Se la riduzione della popolazione è avvenuta per una sola generazione (o comunque molto poche) tale che  $N_e \geq 50$ , l'impatto genetico sulla popolazione stessa è minimo.

**Il primo ruolo di ecologisti, naturalisti ed ambientalisti è quello di identificare e rimuovere le cause del declino demografico.**

# Recupero tramite esoincrocio

Una strategia efficace per il recupero di popolazioni in pericolo consiste nell'incrociarle con popolazioni differenti, in modo da ripristinare fitness e diversità genetica. Gli individui da scegliere dovranno:

- ✓ provenire da popolazioni con esoincrocio (se disponibili); oppure
- ✓ provenire da popolazioni con inincrocio, ma differenziate geneticamente dalla popolazione nella quale stanno per essere introdotti.

# Validità dell'approccio: due esempi



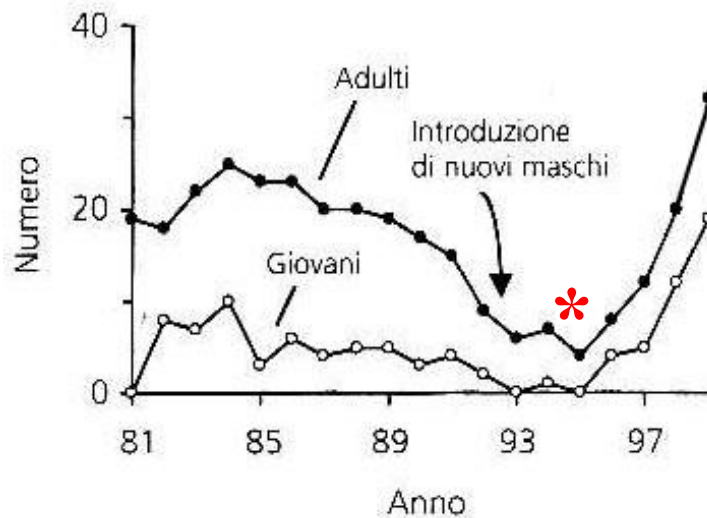
Vipera berus



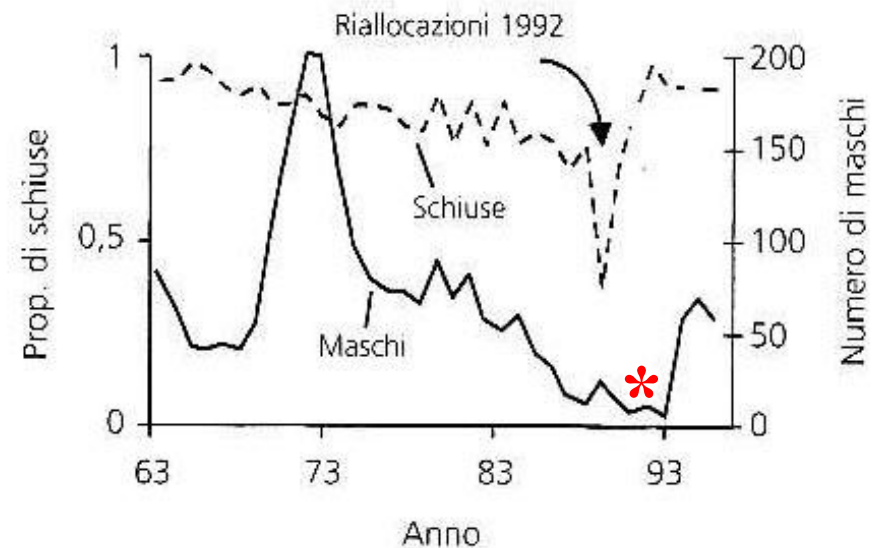
Tympanuchus cupido

(a) Vipere

\* depressione da esoincrocio



(b) Tetraone maggiore delle praterie



# Se popolazioni *vicine* non ci sono...

In caso di mancanza di individui affini appartenenti ad altre popolazioni, si può ricorrere alle sottospecie, ricordando però che in questo caso la depressione da esoincrocio può avere effetti gravi. Tuttavia, se si riesce ad ottenere ibridi *più o meno fertili*, ben presto la selezione farà sì che gli individui a maggiore fitness siano favoriti

- ✓ ripristinando la popolazione
- ✓ aumentandone la fitness totale

eliminando così la depressione da esoincrocio!

# La situazione peggiore

Si ha quando c'è una sola popolazione e nessuna sottospecie disponibile. In questo caso la strategia prevede di:

- ✓ aumentare la dimensione della popolazione (N)
- ✓ costituire popolazioni in più località
- ✓ massimizzare il tasso riproduttivo migliorando l'ambiente
- ✓ allevare gli organismi in cattività o con altri mezzi *ex situ*
- ✓ isolare la popolazione dai cambiamenti ambientali (quarantena per malattie o parassitosi, evitare competitori e predatori, ecc.)

**Tutti questi interventi *dovrebbero* minimizzare il rischio di estinzione in seguito ad eventi stocastici.**



# L'esempio della *Wollemia nobilis*

- ✓ È una specie *relietta* australiana scoperta da poco e nota in precedenza solo dai fossili.
- ✓ Non possiede più variabilità individuale in centinaia di loci genetici.
- ✓ Tutti gli individui sono passibili di infezione da parte di un fungo comune che determina avvizzimento apicale.

## Piano di recupero:

- ✓ secretazione località di crescita
- ✓ accesso ai siti solo a personale autorizzato
- ✓ protocolli igienici rigidi per evitare malattie
- ✓ prevenzione degli incendi
- ✓ mantenimento campioni *ex situ*



# Gestione di popolazioni frammentate

Molte specie minacciate possiedono habitat frammentati. La gestione in questi casi richiede:

- ✓ incremento dell'area e della qualità dell'habitat
- ✓ incremento artificiale del flusso genico tramite riallocazione di individui
- ✓ creazione di corridoi di habitat
- ✓ ricostituzione delle popolazioni negli habitat in cui sono scomparse (se ancora disponibile)



*Ailuropoda melanoleuca*





# Problemi di riallocazione

La riallocazione di individui può essere costosa, soprattutto per animali di taglia grande, può comportare il rischio di lesioni, trasmissione di malattie, alterazioni del comportamento dopo il rilascio. Ad esempio, i leoni maschi riallocati uccidono tutti i cuccioli presenti; in altri casi, i maschi sessualmente adulti e residenti possono attaccare ed uccidere i maschi riallocati. In alcuni casi si può rimediare a questi problemi con l'inseminazione artificiale, quando questa tecnica sia stata sviluppata per un certo organismo.

# Il problema dei corridoi di habitat

Tramite i corridoi si può ristabilire il flusso genico naturale. Tuttavia il corridoio deve essere circondato da zone cuscinetto, e deve essere pensato in base all'animale che deve usufruirne. Animali grandi, ad esempio, hanno bisogno di corridoi ampi. Questi corridoi permettono anche alle popolazioni di fare fronte ai **cambiamenti climatici** (migrazione); senza i corridoi, molte popolazioni risultano bloccate perché ostacolate da habitat inospitali che separano le aree protette, quindi **il corridoio stesso deve essere fatto in modo da poter essere attraversato!**

# Gestione del flusso genico

Per questa gestione, si deve considerare:

- ✓ quali individui si devono riallocare
- ✓ quanti individui si devono riallocare
- ✓ con quale cadenza temporale gli individui vanno riallocati
- ✓ dove vanno riallocati gli individui e da dove prelevarli
- ✓ inizio e fine della riallocazione

**Obiettivo: identificare un sistema che mantenga le popolazioni geneticamente vitali, che si adattino ad eventuali altri limiti gestionali, e che sia realizzabile economicamente.**

# Allevamento integrativo

Si tratta di catturare individui adulti in natura, allevarli in condizioni controllate, e poi rilasciare in natura la progenie ottenuta. In questo caso **non esistono popolazioni in cattività permanente**. Questo prevede due scopi in conflitto tra loro: reintroduzione di giovani e mantenimento della diversità. Il conflitto è dovuto al fatto che se la specie è prolificata, posso prelevare solo pochi adulti dalla natura (vantaggio), ma poi tutti i giovani saranno imparentati tra loro, a causa delle differenze nella dimensione della famiglia (svantaggio); d'altro canto, se la specie è poco prolificata, dovrò prelevare tanti adulti (svantaggio) ma la progenie sarà geneticamente più differenziata (vantaggio).

# Allevamento di sostegno

Alcune popolazioni selvatiche, per ragioni varie, non sono in grado di autosostenersi; vengono quindi sostenute incrementando il numero degli individui prelevando gli adulti da **popolazioni cresciute permanentemente in cattività** (ad esempio, i pesci di interesse commerciale). I danni che questa pratica provoca sono:

- ✓ Riduzione della dimensione effettiva della popolazione
- ✓ Perdita di diversità genetica
- ✓ Depressione da inincrocio
- ✓ Diminuzione della fitness a causa degli adattamenti genetici alla cattività

# Riproduzione assistita

Si tratta di **tecniche artificiali per la riproduzione**, e comprendono:

- ✓ Fecondazione artificiale
- ✓ Conservazione genetica in *banche*
- ✓ Salvataggio dei gameti
- ✓ Crioconservazione di gameti
- ✓ Fertilizzazione *in vitro*
- ✓ Trasferimento di embrioni
- ✓ Trasferimento di materiale nucleare (clonaggio)
- ✓ Conservazione di tessuti e semi in *banche* (piante)

**Nota: molte di queste tecnologie sono ancora in fase di sviluppo e comunque non sono disponibili per tutti gli organismi!**

# Vantaggi della riproduzione assistita

1. La crioconservazione di seme maschile può essere utile per fecondare le femmine di un'altra popolazione in caso di specie altamente frammentate
2. Le banche genetiche possono conservare la diversità genetica per lunghi periodi di tempo senza la perdita *naturale* di alleli tramite incroci e generazioni successive
3. La conservazione di gameti di individui deceduti permette di conservare e *riutilizzare* la loro diversità anche dopo la loro morte
4. L'impianto di embrioni può riuscire in specie affini a quelle a rischio
5. Il clonaggio può parzialmente risolvere il problema della scarsità di individui adatti alla riproduzione



# Vantaggi dell'allevamento in cattività

L'allevamento in cattività è una componente essenziale per la conservazione in quanto:

- ✓ Istituisce popolazioni *ex situ* in località sicure
- ✓ Educa e impegna la gente comune e favorisce la raccolta dei fondi per la salvaguardia delle specie in pericolo
- ✓ Fornisce materiale di ricerca e dati applicabili alle specie in natura
- ✓ Procura organismi per la reintroduzione

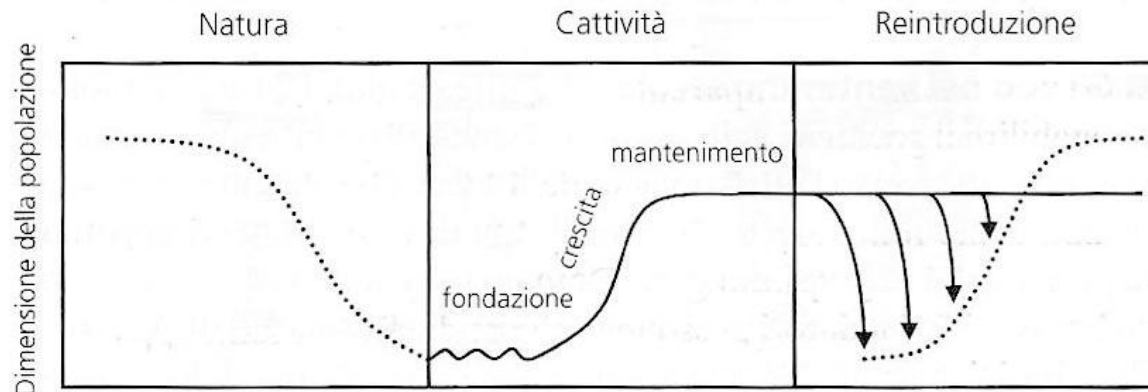
## **Principali siti di allevamento in cattività:**

- ✓ Zoo e bioparchi
- ✓ Acquari
- ✓ Orti botanici

# Cattività e reintroduzione

È un processo in sei fasi, che prevede:

1. Riconoscimento del declino della popolazione selvatica e delle sue conseguenze genetiche
2. Costituzione di una popolazione in cattività
3. Crescita della popolazione in cattività fino ad un valore adeguato
4. Mantenimento nel tempo della popolazione
5. Scelta degli individui per la reintroduzione
6. Gestione della popolazione reintrodotta in natura



# Mantenimento della popolazione in cattività

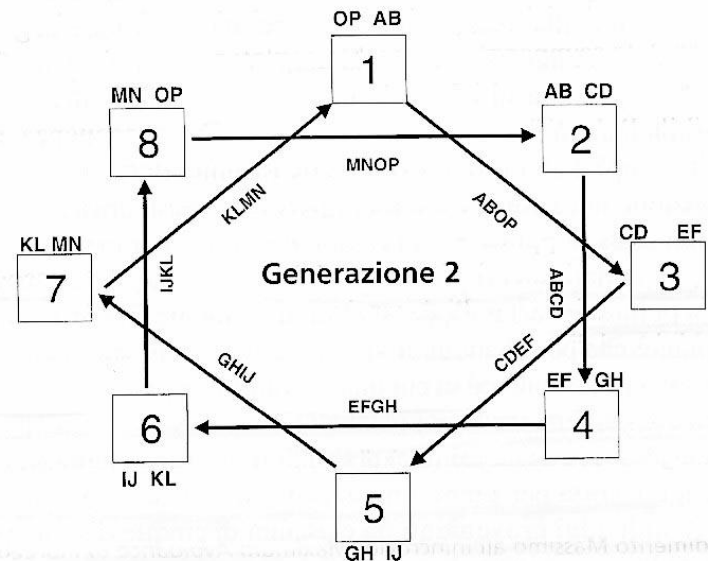
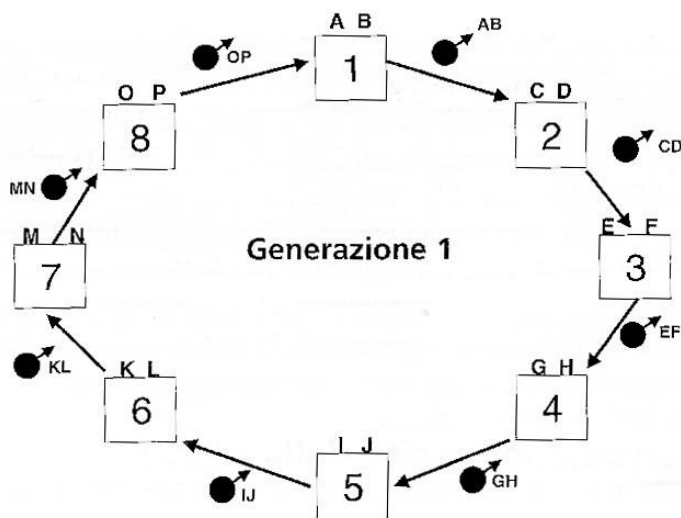
Le popolazioni allevate in cattività si deteriorano a causa di:

- ✓ depressione da inincrocio
- ✓ perdita di diversità genetica
- ✓ accumulo di mutazioni deleterie
- ✓ (mal)adattamenti genetici alla cattività

**L'idea è quella di rendere minimo qualsiasi cambiamento del *pool* genico nelle generazioni, *congelando* l'evoluzione della popolazione in cattività.**

# Gestione dei gruppi

Obiettivo finale: minimizzare l'inincrocio! Quindi, se non sono noti gli alberi genealogici degli individui in cattività, la gestione a rotazione dei gruppi può essere d'aiuto. Nell'esempio, si gestisce prima con gruppi contigui, poi ogni due, poi ogni quattro. Alla quarta generazione si ricomincia da capo (anche se a questo punto inizia l'inincrocio). Anche qui l'effetto è simile a quello di aumentare il rapporto  $N_e/N$ .



# Conservazione *ex situ* delle piante

Per le piante la situazione è più semplice poiché possono essere conservati i semi (eccezione: molte piante tropicali senza *dormienza del seme*) e, in alcuni casi, possono essere crioconservate. Nelle piante con autofecondazione è necessario che i semi vengano da più popolazioni diverse (se possibile) poiché la diversità tra popolazioni è maggiore che tra individui della stessa popolazione → si consigliano 1-20 semi provenienti da ciascuno di 10-50 individui, a loro volta provenienti da almeno 5 popolazioni diverse.

# Cambiamenti genetici in cattività

Fattori stocastici e deterministici agiscono diversamente, con tempi diversi e hanno relazioni diverse con la dimensione della popolazione. Tra i fattori deterministici che influenzano il successo della reintroduzione in natura, c'è il **cambiamento ambientale della cattività che altera la pressione selettiva**. Questo effetto è molto più evidente in popolazioni grandi che piccole (contrariamente all'inincrocio!).

L'adattamento genetico alla cattività rappresenta una delle maggiori minacce al successo delle reintroduzioni. Esempi: l'istinto alla fuga penalizzato dalle recinzioni; il comportamento sottomesso, favorito dagli allevatori; la capacità di cattura della preda; la capacità di sfuggire ai predatori; la mancata resistenza alle malattie dovuta alle cure veterinarie.

# Minimizzare l'adattamento genetico alla cattività

- ✓ Rendere minimo il numero di generazioni in cattività
- ✓ Rendere minima la selezione in cattività, creando un ambiente il più possibile simile a quello naturale
- ✓ Rendere minima la variazione genetica all'interno delle popolazioni
- ✓ Rendere massima la proporzione di immigranti nell'ambiente naturale con introduzioni frequenti di individui nuovi
- ✓ Rendere massima la lunghezza della generazione



# Chi reintrodurre?

Idealmente, gli individui da reintrodurre saranno:

- ✓ sani
- ✓ con maggiore fitness
- ✓ con minore coefficiente di inincrocio
- ✓ con ampia diversità genetica

Tuttavia bisogna anche tenere conto che togliere questi individui dalla popolazione in cattività, indebolisce la popolazione stessa → conflitto tra popolazioni → gestione oculata nel tempo degli individui!