

Università degli Studi di Padova  
Dipartimento di Scienze Statistiche  
Corso di Laurea Triennale in  
Statistica per le Tecnologie e le Scienze



**Applicazione del metodo cattura-ricattura per la stima  
di una Tavola di Mortalità in una popolazione di ghiri.**

Relatore: Prof. Stefano Mazzuco  
Dipartimento di Scienze Statistiche

Laureando: Elettra Bortolotto  
Matricola n. 1228629

Anno Accademico 2021/2022

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1. Il metodo di cattura-ricattura</b>	<b>2</b>
a. Introduzione al metodo.....	2
b. Assunti fondamentali.....	4
c. Marcatura degli animali .....	6
d. Modello di Cormack-Jolly-Seber .....	8
<b>2. Introduzione al caso di studio</b>	<b>11</b>
a. Descrizione della popolazione e raccolta dei dati .....	11
b. Obiettivo dell'analisi.....	14
<b>3. Analisi iniziale dei dati</b>	<b>15</b>
a. Operazioni apportate ai dati .....	15
b. Analisi esplorativa delle covariate.....	16
<b>4. Tavola di mortalità</b>	<b>24</b>
a. Stima della funzione di sopravvivenza .....	24
b. Calcolo della Tavola di Mortalità.....	29
<b>Risultati e conclusioni</b>	<b>35</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>38</b>

# Introduzione

Questa tesi si occupa di stimare la probabilità di sopravvivenza, per una popolazione di ghiri, utilizzando il metodo di cattura-ricattura. Grazie alla stima di tale probabilità si è in grado di calcolare, quindi, la Tavola di Mortalità insieme a tutte le altre quantità che la costituiscono: partendo dal numero di sopravvissuti fino alla  $j$ -esima sessione di cattura,  $l_j$ , si arriva ad ottenere la speranza di vita,  $e_j$ .

Nel primo capitolo vengono approfonditi gli aspetti teorici e i metodi tramite i quali sono stati raccolti i dati ed è stata svolta l'analisi sulla sopravvivenza. Ci si focalizzerà soprattutto sul metodo di cattura-ricattura, prestando particolare attenzione agli assunti alla base di tale metodo e alle diverse tecniche di marcatura degli animali. Infine, verrà presentato il modello di Cormack-Jolly-Seber, grazie al quale si sarà in grado di stimare la funzione di sopravvivenza degli individui interessati.

Nel secondo capitolo viene introdotto il caso di studio preso in esame specificando gli obiettivi che si vogliono ottenere dall'analisi. Inoltre, sono descritte, nello specifico, le informazioni più importanti relative ai dati e alla loro raccolta o alla codifica di particolari variabili di interesse.

Nel terzo e nel quarto capitolo vengono svolte le vere e proprie analisi dei dati: come prima cosa si effettua un'analisi esplorativa generale dichiarando le operazioni svolte sul dataset originale; successivamente, avvalendosi del modello di Cormack-Jolly-Seber, si calcolano le stime della funzione di sopravvivenza per le  $j$ -esime ricatture presenti in tutte le classi d'età  $i$ , nelle quali sono state precedentemente suddivisi i dati, e da esse si trovano le quantità per la costruzione della Tavola di Mortalità.

Infine, sono stati studiati i risultati ottenuti dalle analisi effettuate in precedenza, esponendo proprie considerazioni e facendo riferimento ad episodi noti dalla letteratura relativi a popolazioni di ghiri.

Si vuole puntualizzare che la tesi è stata redatta basandosi principalmente sulle informazioni trovate nel libro di Carey e Roach (2020).

# Capitolo 1

## Il metodo cattura-ricattura

### Introduzione al metodo

Tra gli ultimi anni dell'Ottocento e la prima metà del Novecento, inizia ad essere sempre più utilizzato il metodo di cattura-ricattura, in inglese definito come "*mark-recapture method*". Tale metodo si articola in più fasi: inizialmente, viene prelevato un campione di individui da un'area geografica prestabilita e si procede con la marchiatura degli stessi attraverso diverse tecniche, più o meno invasive; successivamente, i soggetti illesi vengono rilasciati in natura. Quindi, ad intervalli regolari, si compiono ulteriori campionamenti verificando il numero di soggetti già marchiati presenti ad ogni nuova rilevazione. Il metodo di cattura-ricattura, applicato all'ambito ecologico è in grado, dunque, di monitorare le popolazioni biologiche d'interesse riuscendo a stimare la dimensione di quest'ultime e fornendo un'analisi sulla sopravvivenza degli individui dopo ogni ricattura (Carey e Roach, 2020). Infatti, il biologo danese Petersen (1896) verificò come questo fosse molto utile per studiare la dimensione di una popolazione di platesse nel Mar Baltico. Successivamente, anche l'ornitologo americano Lincoln (1930) utilizzò il metodo cattura-ricattura per studiare una popolazione di uccelli acquatici. Grazie a queste pubblicazioni il modello è stato sempre più utilizzato ogni qualvolta si volesse stimare la grandezza di una determinata specie animale in un ambiente (Zecchin, 2014). Tale valore è ottenuto con uno stimatore che prende il nome di *indice di Lincoln-Petersen*: esso si basa sulla determinazione della proporzione tra animali marchiati e non marchiati, nella popolazione relativa al campionamento successivo (Carey e Roach, 2020). La formula attraverso la quale si ottiene la popolazione totale è la seguente (1):

$$P_t = \frac{M \cdot C}{R} \quad (1)$$

Con  $M$ : Numero di animali che sono stati marcati nella prima rilevazione

$C$ : Numero di animali che sono stati catturati nella seconda rilevazione

$R$ : Numero di animali già marchiati, ricatturati nella seconda rilevazione

Tuttavia, al fine di questa analisi, il metodo cattura-ricattura viene studiato e applicato solamente per la stima della funzione di sopravvivenza. L'analisi della sopravvivenza è, infatti, un argomento molto utilizzato in ambito demografico, poiché riesce a fornire risultati importanti relativi alla preservazione della specie e alle dinamiche tra le popolazioni d'interesse. Tale analisi si basa sulla stima del numero di individui, che sono morti in un periodo di tempo prefissato  $t$ , in relazione al numero totale di soggetti che erano a rischio di morte fino a quell'istante ed è stato delineato per la prima volta da Cormack (1964). Successivamente, grazie alle pubblicazioni dei colleghi George Jolly (1965) e George Seber (1965-1970) il metodo cattura-ricattura si è ulteriormente diffuso per questa analisi e, attraverso la creazione di un modello, chiamato *modello di Cormack-Jolly-Seber*, si è stati in grado di risalire alla sopravvivenza della popolazione tramite lo studio della storia cronologica delle ricatture dei singoli individui. Nei capitoli seguenti verranno presentati in modo più approfondito questo modello e la funzione di sopravvivenza ad esso collegata.

Un'ulteriore stima, legata al metodo di cattura-ricattura, è quella della probabilità definita di "cattura", in inglese *capture probability*, che permette di stimare la probabilità di catturare un animale che è vivo in un determinato tempo  $t$  dal momento che era presente nella popolazione al tempo  $t-1$ .

Il metodo di cattura-ricattura si basa su delle analisi statistiche che sono in continuo sviluppo e, negli ultimi 20 anni, sono state introdotte nuove procedure grazie alle quali si è cercato di migliorare questo metodo (Sandercock, B. K. 2003). Alcune innovazioni sono state introdotte nella selezione del modello (Anderson & Burnham, 2002), nell'utilizzo di modelli statistici all'avanguardia, che sono riusciti ad ovviare a molti problemi, e di nuovi pacchetti software che implementano un bootstrap parametrico (Program MARK, White & Burnham, 1999).

## **Assunti fondamentali**

La stima della sopravvivenza, che può essere studiata anche in relazione a dei fattori secondari della popolazione come il sesso e l'età, per portare a dei risultati demografici veritieri deve essere accurata e, quindi, avere un errore di misura minimo o nullo. Idealmente, infatti, si vorrebbe che tutta la popolazione di individui marcati durante la prima rilevazione possa essere rappresentata anche ad ogni campionamento successivo e che il destino, ovvero la sopravvivenza, di ogni soggetto possa essere predeterminato inequivocabilmente.

Ulteriori assunzioni importanti sono le seguenti:

- 1) La proporzione di animali marcati, catturati nel secondo campionamento, è uguale alla proporzione del totale degli animali marcati nella popolazione.
- 2) In ogni cattura il campione di individui deve essere rappresentativo per l'intera popolazione di interesse.
- 3) Il marchio con il quale è stato contrassegnato l'animale deve essere correttamente registrato e non può essere perso.
- 4) Gli individui marcati e gli individui non marcati hanno la stessa probabilità di cattura, in una delle sessioni di campionamento, e hanno anche la stessa probabilità di morte.
- 5) Gli animali si riproducono indipendentemente dal fatto che essi siano marcati o non marcati.
- 6) Il destino di ogni singolo animale, ovvero le probabilità di sopravvivenza e di cattura, è indipendente rispetto al destino di ogni altro individuo.
- 7) I periodi all'interno dei quali si svolge il campionamento sono molto brevi e gli animali vengono rilasciati velocemente.

Tuttavia, la maggior parte delle volte, alcune di queste assunzioni sono difficilmente applicabili sul campo al momento della cattura e della rilevazione dei dati (Sandercock, 2003), dal momento che diventa complesso tenere conto e rappresentare tutti gli individui, poiché, questi ultimi, possono nel frattempo essere emigrati altrove.

Inoltre, ci sono animali che una volta marchiati e rilasciati in natura non vengono più ricatturati nei campionamenti successivi e non entrano nemmeno a far parte

dello studio. Altri, invece, una volta rilasciati, non vengono rilevati durante ogni occasione di campionamento, anche se risultano essere in vita nel corso di tutto il periodo nel quale si è svolta l'analisi. Questi comportamenti portano ad ottenere una rilevazione imprecisa dei dati, in inglese chiamata *imperfect detection*, e fanno aumentare il rischio di commettere errori di stima.

Questo tema venne trattato anche dallo statistico inglese Buckland (1982). Nelle sue pubblicazioni, Buckland argomenta come, all'interno di studi di questo tipo, ci siano individui che vengono ricatturati più frequentemente rispetto ad altri e come questo porti alla violazione dell'assunto per il quale tutti gli individui, vivi nel periodo dello studio, abbiano la stessa probabilità di essere catturati. Tale problema era già stato investigato da Carothers (1979) che, per trovare una soluzione al problema, divise gli animali in due gruppi in base al fatto che la probabilità di essere catturati fosse alta o meno. Quindi, ipotizzò un modello parametrico sulla base del grado di emigrazione, ma quest'ultimo, fu velocemente ritenuto poco efficiente.

Infine, un ultimo assunto importante è quello riguardante l'età dei soggetti all'ultima cattura: questo valore non può essere considerato come una corretta approssimazione dell'età di morte. Gli individui, infatti, possono vivere molti anni dopo l'ultima cattura o non essere nemmeno più catturati successivamente alla marcatura iniziale, poiché, come è stato specificato in precedenza, l'efficienza nella cattura degli animali non è molto alta. In aggiunta, tale valore non è nemmeno detto che indichi l'età più anziana alla morte per quell'individuo (Carey e Roach, 2020).

## Marchatura degli animali

Il procedimento attraverso il quale si decide di identificare e catturare gli animali è una parte fondamentale nel metodo di cattura-ricattura. Si può incorrere, infatti, in numerosi errori di rilevazione se gli animali di uno stesso campione, mostrano tra loro delle grandi differenze nella tipologia di cattura (Buckland, S.T. 1982). Inoltre, è necessario che l'etichetta o la caratteristica con la quale sono contraddistinti i singoli soggetti sia ben riconoscibile e soprattutto duratura nel tempo, in modo da permettere l'individuazione dello stesso animale anche nei campionamenti successivi.

Vi sono diverse tecniche per catturare e registrare gli individui, ma le più utilizzate sono i cosiddetti "*Life encounters*" che prevedono la cattura dell'animale attraverso delle trappole, la sua marchiatura e, quindi, il rilascio in natura senza che esso sia ferito in alcun modo. La marchiatura su questo tipo di soggetti si può dividere in tre grandi categorie. La tecnica più semplice è quella che si basa sull'utilizzo dei *natural marks*, ovvero di caratteristiche fisiche proprie del soggetto che permettono la sua distinzione da altri individui come, ad esempio, alcune sfumature o disegni particolari del manto e del piumaggio, campioni acustici del canto di alcuni uccelli, video di telecamere nascoste o campioni di DNA provenienti dalla loro muta. Un esempio di marchio naturale è presente in *Figura 1*: il piumaggio particolare di alcuni uccelli può essere, infatti, utilizzato per differenziarli da altri individui, appartenenti anche alla stessa specie, facendo riferimento a colori più accesi o alla disposizione differente di tratti caratteristici, riuscendo a distinguere individui che inizialmente sembrerebbero essere simili. Vi è, poi, il *noninvasive marking* che è una tecnica, definita appunto non invasiva, che utilizza strumenti esterni, solitamente di materiale plastico o metallico, da attaccare al collo (*Figura 2*), alle orecchie o agli arti dell'animale. Alcuni esempi possono essere: collari o tag su collo o zampe, etichette sulle orecchie, particolari colorazioni della pelliccia o delle piume attraverso vernici apposite o l'accorciamento delle unghie.

Infine, è presente la tecnica dell'*invasive marking*, che riguarda, appunto, procedure molto più invasive e dolorose per l'animale come tatuaggi, solitamente fatti sulla parte interna dell'orecchio, identificatori sottocutanei per il tracciamento, anche a



distanza, o l'amputazione delle falangi per i soggetti più giovani. In *Figura 3* è riportato un esempio di tatuaggio nella parte interna dell'orecchio di un coniglio.

Come spiegato nell' articolo di Silvy, Lopez e Peterson (2012), l'utilizzo dei marcatori naturali è la tecnica più utilizzata nel riconoscimento degli animali, poiché, non essendo necessaria una cattura vera e propria, questi ultimi sono liberi dallo stress derivante da essa. Tuttavia, se ai fini dello studio risulta necessaria la cattura, si prediligono le tecniche meno invasive anche se ad esse sono associate diversi svantaggi, come l'interferenza con l'usuale comportamento riproduttivo oppure l'aumento della mortalità sia per il malfunzionamento degli strumenti sia perché i soggetti sono maggiormente esposti ai predatori. In rari casi, vengono utilizzate le tecniche invasive, molto più dolorose per gli animali, ma che sono tuttavia permanenti e quindi utili soprattutto per analisi di lungo periodo o ad ampio raggio. D'altronde, come è ricordato da N. Silvy, Lopez e Peterson (2012), la scelta del corretto e più efficiente metodo di marcatura degli animali sta allo studioso stesso, che deve tenere conto sia della validità etica della tecnica che sta utilizzando sia di quella scientifica, cercando lo strumento che meno nuoce al soggetto, ma che è allo stesso tempo il migliore per il tipo di analisi effettuata.

Un'altra tecnica grazie alla quale si possono raccogliere i dati per il metodo cattura-ricattura è quella che si basa su dati provenienti da individui trovati già morti, definiti come *dead recovery data*. Uno dei vantaggi nell'utilizzo di questa tipologia di dato è che possono essere collezionati esemplari provenienti da regioni geografiche molto ampie e, quindi, anche i dati di sopravvivenza risultano essere più veritieri. Inoltre, la tecnica di marchiatura è indifferente e a discrezione di chi svolge l'analisi (Sandercock, B.K. 2003).



Figura 1: Esempio di natural marking nel piumaggio di un uccello.



Figura 2: Esempio di noninvasive marking: collare identificativo.



Figura 3: Esempio di invasive marking: tatuaggio in un coniglio.

## Modello di Cormack-Jolly-Seber

La sopravvivenza è uno degli aspetti più importanti per gli organismi viventi anche se il suo studio risulta essere, in alcuni casi, complicato dal momento che, non viene osservata direttamente ad occhio nudo, ma è frutto di numerose ed elaborate analisi (Schaub, M. e Vaterlaus-Schlegel, C. 2001).

Inoltre, l'ecologo Sandercock (2003), precisa come siano necessarie delle stime robuste della funzione di sopravvivenza dal momento che le ricatture degli animali possono essere svolte anche in periodi di tempo molto lunghi e tra la prima e l'ultima rilevazione possono passare molti anni. I tassi di crescita di molti animali vertebrati, che in alcuni casi hanno una lunghezza di vita mediamente lunga, subiscono, infatti, delle variazioni fisiche considerevoli nel corso degli anni influenzando i risultati della sopravvivenza. Questo problema è stato affrontato anche da Schaub e Vaterlaus-Schlegel (2001). I due studiosi puntualizzavano come la crescita dell'età dei soggetti, dettata dal tempo dell'analisi, e le numerose variabili esplicative come il sesso, il peso e la localizzazione geografica, avessero un'influenza più o meno positiva sulle stime di sopravvivenza in base al valore considerati.

L'analisi della sopravvivenza può essere svolta, quindi, con il metodo di cattura-ricattura tramite l'utilizzo del modello di Cormack-Jolly-Seber, che prende il nome dai suoi ideatori: Richard M. Cormack (1964), George Jolly (1965) e George Seber (1965-1970) che, come è stato già specificato in precedenza, sono stati i primi ad utilizzare lo studio cronologico delle ricatture nella stima della sopravvivenza di una popolazione animale. L'indagine si basa sull'utilizzo dei dati di soggetti marcati e non marcati, che verranno o meno ricatturati all'interno della  $j$ -esima sessione di cattura, per calcolare la probabilità di sopravvivenza ( $\Phi_j$ ): ovvero, si vuole ottenere una stima del numero di individui che sono morti in un certo periodo di tempo, in relazione al numero totale di quelli che erano considerati a rischio di sperimentare l'evento fino a quel momento. La stima di  $\Phi_j$ , ottenuta con il modello di Cormack-Jolly-Seber si basa, inizialmente, sull'equivalenza (2) che uguaglia le due seguenti quantità: la prima, a destra dell'uguale, corrisponde al rapporto tra il numero di individui che verranno ricatturati successivamente a  $j$  ( $r_j$ ), e quindi verificati vivi in quel momento, con il numero totale di animali verificati vivi ( $R_j$ ) al tempo precedente  $j-1$ ; nella seconda, invece, a sinistra dell'uguale, il numero di individui

marcati ricatturati solo in seguito, e quindi non rilevati ma confermati vivi, sono rapportati con la popolazione marchiata e non osservata a rischio al tempo  $j$ , ottenuta tramite la differenza tra la popolazione marchiata totale a rischio  $M_j$  e la popolazione marchiata catturata a  $j$ ,  $m_j$  (Carey e Roach, 2020).

$$\frac{z_j}{(M_j - m_j)} = \frac{r_j}{R_j} \quad (2)$$

Una sintesi delle quantità rappresentate nell'equazione (2) è la seguente:

- $z_j$ : numero dei componenti della popolazione marcata non catturati all'occasione di campionamento  $j$ , ma ad una successiva; ovvero di chi verrà di nuovo ricatturato dopo l'occasione  $j$ .
- $M_j$ : la grandezza della popolazione marcata subito prima della rilevazione  $j$ .
- $m_j$ : il numero di animali catturati alla rilevazione  $j$  che sono già marcati.
- $u_j$ : il numero di animali catturati alla rilevazione  $j$  che non sono marcati.
- $R_j$ : il numero totale di animali (già marcati in precedenza o che sono appena stati marcati) catturati all'occasione  $j$ , che sono rilasciati.
- $r_j$ : il numero di individui presenti in  $R_j$  che verranno ricatturati in seguito

Dal momento che la quantità  $M_j$  non è direttamente calcolabile dai dati è necessario risolvere l'equivalenza (2) in funzione di quest'ultima in modo tale da ottenere la popolazione marcata a rischio subito prima della  $j$ -esima rilevazione. L'equivalenza può essere, quindi, riscritta come si osserva nella formula (3).

$$M_j = m_j + \frac{R_j \cdot z_j}{r_j} \quad (3)$$

Calcolate tutte le quantità necessarie, si è in grado di determinare la stima della probabilità di sopravvivenza  $\Phi_j$  dal tempo di cattura  $j$  al tempo  $j+1$  per la popolazione presa a riferimento. Tale valore è riportato nell'equazione (4). Nella formula vengono rapportati tutti gli individui marcati che sono sopravvissuti dal tempo  $j$  al  $j+1$  con tutta la popolazione a rischio durante l'analisi, data dalla somma tra la popolazione non osservata a  $j$  e quella osservata (Carey e Roach, 2020).

$$\Phi_j = \frac{M_{j+1}}{(M_j - m_j) + R_j} \quad (4)$$

È necessario, infine, specificare alcuni punti importanti relativi all'utilizzo del modello di Cormack-Jolly-Seber. La probabilità di sopravvivenza che si calcola deve essere considerata stimata o, come viene spesso detta, "apparente", dal momento che il modello non tiene conto di animali che sono emigrati verso regioni geografiche lontane rispetto a quella dello studio, o di soggetti che non sono più stati ricatturati. Questo "svantaggio" presente nel modello di Cormack-Jolly-Seber viene ripreso anche nell'articolo di Schaub e Vaterlaus-Schlegel (2001), all'interno del quale viene spiegato come il modello non riesca a differenziare la vera mortalità dei soggetti dal calo della sopravvivenza dovuto ad un fattore migratorio di questi ultimi. Se si riuscisse a calcolare la vera probabilità di sopravvivenza, quindi, quest'ultima avrebbe dei valori più elevati rispetto a quella stimata poiché il denominatore dell'equazione (4) dovrebbe essere sottratto ulteriormente anche del numero di soggetti emigrati nel periodo  $j$  e non morti, facendo aumentare il numeratore e il valore totale.

## Capitolo 2

### Introduzione al caso studio

#### Descrizione della popolazione e raccolta dei dati

Il dataset preso in esame per l'analisi è costituito dalle rilevazioni effettuate su una popolazione di ghiri, campionata tramite il metodo di cattura-ricattura.

I ghiri sono dei piccoli roditori che fanno parte della famiglia dei *ghiridi*. Hanno caratteristiche che possono ricordare quelle di uno scoiattolo: la pelliccia è morbida e varia da un grigio chiaro e un marrone scuro sul dorso, ad un castano chiaro e bianco sul ventre; hanno orecchie tondeggianti poco pronunciate e una soffice coda che rimane sempre ben distesa. Sono animali notturni e si possono trovare in diverse regioni dell'Africa e dell'Europa, fino ad arrivare al Medio Oriente. In Italia sono segnalati principalmente in molte isole, come Sicilia, Sardegna e Isola d'Elba, e sulle Alpi, dove, grazie al fitto sottobosco, sono facilitati nel trovare nascondigli e tane per affrontare il lungo periodo invernale: da fine settembre, infatti, i ghiri si preparano per un periodo di letargo che durerà più di 6 mesi, in base alle temperature dell'anno considerato. Questo periodo di ibernazione è preceduto dalla ricerca necessaria di cibo, che porta i ghiri ad essere maggiormente esposti ai predatori. I soggetti, inoltre, tendono a riprodursi in modo irregolare, solitamente tra fine luglio e inizio settembre e in corrispondenza ad anni in cui vi è abbondanza di ghiande di faggio e quercia, che hanno un alto contenuto energetico (Bieber 1998, Schlund et al. 2002, Pilastro et al. 2003); al contrario, durante gli anni in cui le risorge tendono a scarseggiare, sembrano prediligere l'utilizzo del cibo solo per il letargo, in modo tale da risparmiare le energie accumulate (Lebl, K. et al. 2011). Si è osservato come vi sia una relazione abbastanza evidente tra riproduzione e sopravvivenza: infatti, i valori della funzione di sopravvivenza sono due volte maggiori negli anni non riproduttivi rispetto a quelli in cui gli individui si riproducono (Ruf et al. 2006), perché con i cuccioli e la ricerca maggiore di cibo, gli adulti sono più esposti all'attacco di altri animali.

I ghiri, nonostante siano dei mammiferi molto piccoli, sono comunque dei soggetti che si prestano bene allo scopo di questo studio, anche grazie alla loro particolare storia di vita.

I dati presi a riferimento per questa analisi sulla sopravvivenza provengono da una precedente indagine svolta da Andrea Pilastro, Giacomo Tavecchia e Guglielmo Marin, nella quale vengono approfondite le tematiche relative alla particolare longevità della popolazione di ghiri europei e alla loro irregolare riproduzione (Pilastro et al., 2003). All'interno dell'analisi, la popolazione presa a riferimento è quella dei ghiri europei commestibili (*Myoxus glis*), in inglese chiamati "*European edible (or fat) dormice*"; nell'antica Roma, ma anche nel resto d'Europa, infatti, questi animali erano considerati una prelibatezza e allevati in otri d'argilla prima di essere mangiati o essere utilizzati per la loro pelliccia. Nell'indagine, questi animali, sono stati studiati per un periodo di tempo lungo 8 anni, dal 1991 al 1998, nel sud delle Alpi italiane. Le rilevazioni si sono svolte, più precisamente, all'interno della Riserva Naturale del Pian Cansiglio, a Treviso, nella regione Veneto, dal momento che la foresta risulta essere ricca di alberi di Faggio e di Abeti rossi che, come si è visto, hanno un ruolo molto importante per quanto riguarda l'approvvigionamento dei soggetti studiati.

Le analisi sono iniziate con il posizionamento di circa 100 cassette di legno in tutto il bosco in modo tale che queste fossero utilizzate dagli animali come rifugio e nido. Successivamente, quindi, si sono effettuati periodici controlli di quest'ultime, solitamente due volte al mese, che sono stati intensificati soprattutto tra la fine dell'estate e l'inizio dell'autunno, in corrispondenza del periodo della riproduzione. Per gli individui già adulti, la marcatura si è svolta tramite il metodo di accorciamento delle unghie solamente durante i primi due anni dello studio, dal 1991 al 1992, mentre per gli anni successivi, sia per gli adulti che per i cuccioli, si è passati all'utilizzo di etichette numerate attaccate all'orecchio degli animali. Entrambe le tecniche fanno parte della categoria del "*noninvasive marking*".

Alla fine dell'ultima rilevazione, nel 1998, il totale di soggetti marchiati e non marchiati catturati nel corso dell'intera indagine, è stato di **2310** ghiri, alcuni di questi ricatturati anche più volte durante gli anni considerati.

Al momento della cattura, sono state registrate diverse informazioni relative agli individui come il sesso (maschi o femmine), il peso e l'età, misurati rispettivamente in grammi e anni. Nei capitoli successivi verranno presentate delle analisi più approfondite riguardo a queste variabili e alla loro relazione.

È necessario puntualizzare la particolare codifica che è stata utilizzata per la rilevazione dell'età dei soggetti, un metodo che solitamente è applicato per le popolazioni di uccelli, e che prevede una stima dell'età degli individui sulla base della data alla prima cattura di questi ultimi. Infatti, tutti i ghiri catturati sono associati ad un'età, ma non è detto che abbiano una data di nascita: solamente i giovani trovati nel nido con la madre possono averla poiché è possibile stabilire il giorno del parto con una precisione di qualche giorno. Ricordando che i parti avvengono tra fine luglio e inizio settembre, se la prima marcatura è avvenuta nell'anno di nascita e i cuccioli risultano essere ancora allattati, avranno un'età di **0.1** anni e una data di nascita esatta. Per la classificazione dell'età di questi ultimi si è utilizzato anche il metodo *von Vietinghoff-Riesch* (1960) che determina l'età dei cuccioli in base ad alcune caratteristiche fisiche, come il grado di separazione delle dita, la presenza di denti o se le orecchie e gli occhi sono già ben aperti (Pilastro et al. 2003). Se, invece, i ghiri sono stati catturati per la prima volta nell'anno di nascita, ma successivamente allo svezzamento, avranno un'età di **0.5** anni e, purtroppo, non potrà essere stimato un anno di nascita. Infine, se sono stati marcati per la prima volta dopo il secondo letargo, non si conosce bene la data di nascita dell'individuo e, quindi, si può solamente supporre un'età minima dei soggetti, che viene indicata attraverso l'uso di un numero pari (**2**=nato almeno 2 anni prima; **4**=almeno 3 anni; **6**=almeno 4 anni; ecc.). L'età delle ricatture avanza di conseguenza rispetto alla prima cattura e, se il numero intero è dispari, è noto l'anno di nascita e di conseguenza l'età in anni (**1**=1 anno/passato almeno un letargo; **3**=2 anni; **5**=3 anni; ecc.). Queste ultime codifiche indicano, in realtà, una vera e propria classe d'età, poiché non si tiene conto che siano passati i canonici 12 mesi dalla nascita, ma che l'individuo abbia affrontato almeno uno, due ecc. letarghi. Se si conoscesse la data di nascita di tutti i soggetti o si potesse prendere a riferimento una data media del mese considerato di nascita, si potrebbero calcolare, in giorni, le età dopo il primo letargo.

## Obiettivo dell'analisi

L'analisi della sopravvivenza è molto importante ed è ampiamente utilizzata in ambito ecologico poiché è in grado di monitorare le popolazioni animali d'interesse e analizzare come il tempo, gli improvvisi cambiamenti climatici o altri fattori secondari influiscano su queste ultime. Inoltre, in popolazioni di piccoli roditori, come possono esserlo i ghiri, sono difficilmente valutabili le cause che hanno portato alla morte di un individuo, ma, grazie allo studio sulle variazioni di sopravvivenza e sulla mortalità dei soggetti, queste ultime possono essere identificate con più facilità (Lebl, et al., 2011).

L'obiettivo di quest'analisi è, quindi, quello di studiare come cambia la longevità della popolazione di ghiri descritta precedentemente, sulla base dell'età che avevano gli individui al momento della prima e delle successive ricatture.

Per ottenere questo risultato, il campione di unità statistiche verrà suddiviso, in base all'età dei soggetti, in  $i$  sottogruppi e, successivamente, all'interno di ogni sottogruppo verranno calcolate le  $\Phi_{ij}$  stime della funzione di sopravvivenza grazie al modello di Cormack-Jolly-Saber. Alla fine si avranno  $j$  stime di sopravvivenza per ogni  $i$ -esimo gruppo. Una volta calcolate queste quantità, si è in grado, quindi, di ottenere i diversi valori che costituiscono la Tavola di Mortalità e di dare un'interpretazione riguardante la longevità dei soggetti in relazione alle diverse classi d'età.

Infine, bisogna ricordare che, come è stato detto in precedenza, la funzione di sopravvivenza calcolata utilizzando il modello di Cormack-Jolly-Saber è solamente una stima "apparente" della mortalità, dal momento che non riesce a differenziare tra i soggetti che non vengono ricatturati perché sono effettivamente morti da quelli che sono semplicemente emigrati verso altre regioni geografiche. La "vera" mortalità avrebbe, quindi, valori più bassi se si tenesse conto di questa differenziazione.



## Capitolo 3

### Analisi iniziale dei dati

#### Operazioni apportate ai dati

Nell'indagine sono state effettuate diverse operazioni sul dataset di partenza, grazie alle quali si sono ottenuti dei valori veritieri per le analisi esplorative iniziali e delle stime di sopravvivenza opportune per i dati in questione.

All'interno del dataset iniziale, infatti, si è notata la presenza di numerosi valori mancanti per molte delle variabili che sono state prese in considerazione, come ad esempio il sesso, il peso e l'età dei ghiri al momento della cattura; queste irregolarità dei dati sono dovute, probabilmente, all'impossibilità da parte degli studiosi di ottenere quella particolare informazione a causa di problemi esterni.

Quindi, per facilitare le analisi ed evitare di introdurre degli errori di misura nelle rilevazioni effettuate, sono stati eliminati tutti i dati "null" presenti del dataset. Un'unica eccezione è stata fatta per la variabile relativa alla marcatura, che riporta le stringhe, o i codici numerici, che identificano i diversi soggetti: in questo caso, infatti, i dati "null" non sono dei veri e propri valori mancanti, ma indicano che il soggetto catturato non era mai stato campionato prima e che, dunque, non presenta l'etichetta che permette di contraddistinguerlo dagli altri.

Inoltre, le unità statistiche della popolazione totale, composta dai soggetti marcati e non marcati, sono state suddivise in  $i$  gruppi in base all'età, in modo tale da facilitare, all'interno delle diverse classi, la stima delle funzioni di sopravvivenza per ogni possibile ricattura  $j$ . In questo modo, si è riusciti, sia a mantenere la relazione degli individui con tutte le possibili ricatture, sia a far appartenere, questi ultimi, alle diverse classi di età, fondamentali per la creazione della Tavola di mortalità. In aggiunta, anche i mesi relativi a tutti gli 8 anni di rilevazione (dal 1991 al 1998) sono stati suddivisi in gruppi; in questo modo è stato possibile individuare le  $j$  possibili ricatture effettuate nel corso dell'indagine.

## Analisi esplorativa delle covariate

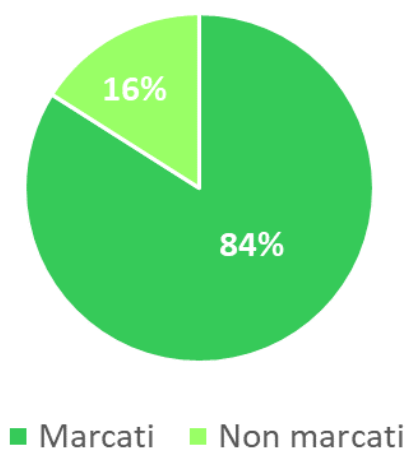
Una prima analisi è stata effettuata per verificare lo stato dei ghiri, ovvero studiare la proporzione che intercorre tra soggetti ricatturati e già marcati ed altri che non presentano una marcatura perché mai catturati prima. Per compiere ciò, sono stati eliminati dal dataset tutti i ghiri marchiati che comparivano più volte poiché ricatturati ripetutamente nel corso dell'analisi, dal momento che potevano influenzare negativamente i risultati.

STATO DEL SOGGETTO	Frequenza	Percentuale
Marcati	1937	83.85%
Non marcati	373	16.15%
<b>Totale</b>	<b>2310</b>	<b>100%</b>

Tabella 1: Misure di sintesi dello stato del soggetto, catturato in una delle possibili rilevazioni. Sia per i soggetti marcati sia per quelli non marcati sono indicate le frequenze assolute e le frequenze percentuali. Nell'ultima riga, inoltre, vengono riportati anche i totali relativi a tutta la popolazione.

In *Tabella 1*, si osserva come il totale della popolazione rilevata nel corso di tutta la durata dell'indagine abbia una numerosità di **2310** individui. Di questi soggetti, circa l'**84%** dei ghiri ricatturati risulta essere marcato, mentre il rimanente **16%** non sembra presentare nessun simbolo di riconoscimento. Tale risultato può essere dovuto ad un basso tasso migratorio dei soggetti che, quindi, non spostandosi verso

Marcati e non marcati



altre aree geografiche, ma trovando rifugio nelle casette posizionate all'interno della foresta, al momento delle successive ricatture risultano essere già marcati. Questi valori sono riportati anche nel grafico a torta a fianco (*Figura 4*) dove i marcati sono rappresentati in verde scuro e i non marcati in verde chiaro.

Figura 4: Grafico a torta che rappresenta la proporzione percentuale di ghiri già marcati (verde scuro) e non marcati (verde chiaro) catturati nel corso dell'indagine.

Proseguendo con l'analisi, si sceglie di prendere a riferimento il sesso dei ghiri, in modo tale da essere in grado di verificare se quest'ultimo possa influenzare anche i successivi risultati relativi alla Tavola di mortalità e alla stima della funzione di sopravvivenza. La variabile sesso però presenta molti dati mancanti e, quindi, sono state apportate alcune modifiche al dataset; ciò ha comportato che il totale dei soggetti considerati in *Tabella 2* (2245) non corrisponda al totale dei soggetti che compongono l'intera indagine (*Tabella1*).

SESSO	Frequenza	Percentuale
Maschi	1170	52.12%
Femmine	1075	47.88%
<b>Totale</b>	<b>2245</b>	<b>100%</b>

Tabella 2: Frequenza assoluta e percentuale per la variabile sesso, facendo riferimento alla popolazione totale di ghiri, marchiata e non marchiata.

*Nota:* Il totale a cui si fa riferimento (2245) non corrisponde alla numerosità totale della popolazione a causa dei frequenti valori nulli presenti all'interno della variabile sesso.

Dal grafico in *Figura 5*, inoltre, si osserva come i soggetti di sesso maschile (52%) siano leggermente superiori a quelli di sesso femminile (48%) con una differenza tra i due di solo il 4%. Quest'ultima non comporta che ci siano cambiamenti rilevanti nelle analisi effettuate per le due popolazioni di ghiri. Tale risultato è confermato anche dallo stesso Andrea Pilastro, nella pubblicazione svolta insieme ai colleghi Tavecchia e Marin, nel 2003, all'interno della quale conclude che il sesso non sembra

influenzare in modo rilevante la sopravvivenza della popolazione considerata.

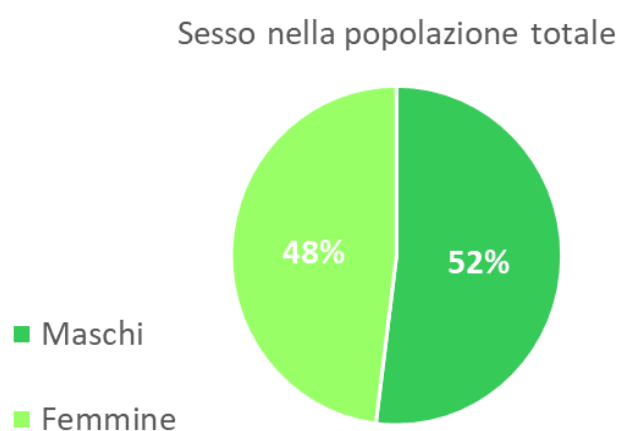


Figura 5: Grafico a torta che rappresenta la proporzione percentuale di ghiri di sesso femminile (verde chiaro) e di sesso maschile (verde scuro) all'interno della popolazione totale di soggetti a cui sono stati tolti i valori mancati della variabile sesso.

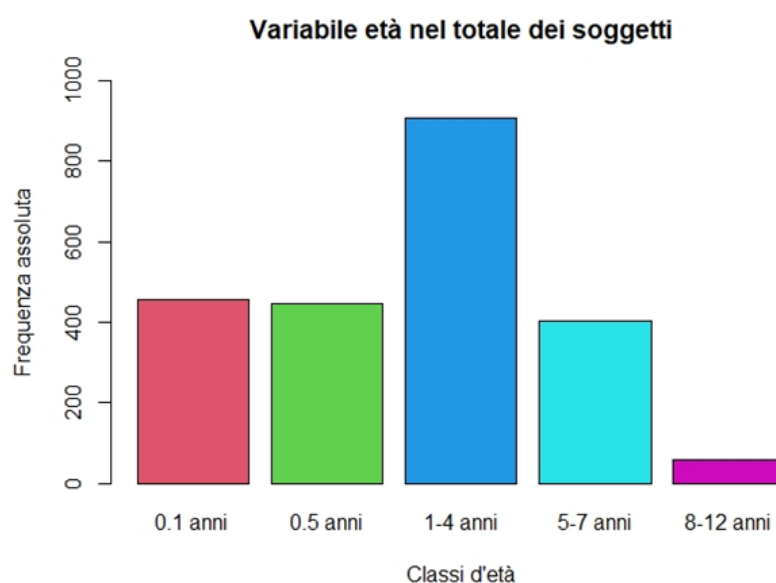
Analizzando l'età dei soggetti, si è scelto di suddividere la variabile in cinque gruppi in modo tale da avere delle analisi più lineari e comprensibili. Anche in questo caso, a causa di valori mancanti nella variabile età, la popolazione totale dei soggetti presi in considerazione è solamente di **2271** (Tabella 3). Il primo gruppo è quello che identifica i cuccioli (0.1 anni) che vivono nel nido con la madre e vengono ancora allattati; invece, i cuccioli già svezzati sono quelli che appartengono alla classe dei 0.5 anni. Infine, i gruppi successivi contengono i soggetti adulti, più o meno giovani, mentre nell'ultima classe sono stati raggruppati i ghiri più anziani, di 8 o più anni. Negli studi effettuati sulle Alpi, infatti, si registrano le lunghezze di vita più elevate e i ghiri possono arrivare a vivere anche fino a 9 anni (Pilastro et al., 2003).

CLASSE D'ETÀ	Frequenza	Percentuale
0.1	455	20.03%
0.5	447	19.68%
1-4	909	40.03%
5-7	403	17.75%
8+	57	2.51%
<b>Totale</b>	<b>2271</b>	<b>100%</b>

Tabella 3: Frequenza assoluta e percentuale per l'età della popolazione di ghiri. La variabile è stata suddivisa in classi d'età.  
*Nota1:* Da una prima analisi si ottiene che l'età media della popolazione sia di **2.57** anni.  
*Nota2:* Sono stati eliminati numerosi dati mancanti dalla variabile età.

In Figura 6, si osserva che la frequenza percentuale maggiore, con un valore di circa il **40%** (Tabella 3), si trova in corrispondenza dei soggetti aventi dagli 1 ai 4 anni, che costituiscono, insieme ai cuccioli già svezzati (**19.7%**) e ai cuccioli ancora allattati (**20.03%**) più dei tre quarti della popolazione totale. Da analisi precedenti, infatti, è risultato che l'età media dei soggetti si aggiri intorno ai **2.57** anni (Nota 1-Tabella 3), indicando come la

Figura 6: Grafico a barre utilizzato per la rappresentazione delle frequenze percentuali per le diverse classi della variabile età. I diversi colori indicano i vari gruppi in cui è classificata l'età.



popolazione sia abbastanza giovane. Le prime due classi, inoltre, sono gruppi della stessa ampiezza e sembrano avere delle distribuzioni percentuali molto vicine ai valori della classe degli adulti tra i 5 e i 7 anni (**17.8%**). Infine, si può dire che solamente una piccola parte della popolazione arrivi ad età più mature, circa il **3%**.

Continuando con l'analisi del peso dei soggetti, espresso in grammi, si osserva come, ancora una volta, la variabile sia costituita da numerose osservazioni mancanti, portando il dataset ad una numerosità di solo **2133** individui (*Tabella 4*).

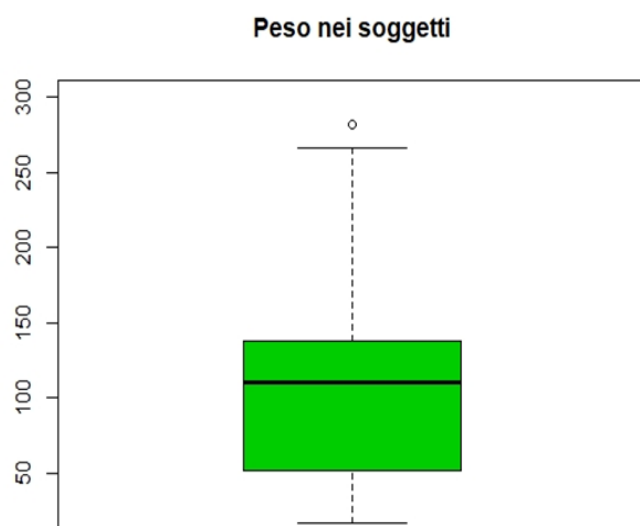
	Min.	Primo quartile	Mediana	Media	Terzo quartile	Max.	Totale soggetti	Standard deviation
Peso	17.1	52.0	<b>110.0</b>	<b>102.3</b>	138.0	282.0	2133	50.15

Tabella 4: Principali statistiche di sintesi per la variabile peso e totale dei soggetti.

*Nota 1:* I valori riportati nelle prime 6 colonne hanno tutti come unità di misura i grammi.

*Nota 2:* Il totale a cui si fa riferimento (2133) non corrisponde alla numerosità totale della popolazione a causa dei frequenti valori nulli presenti all'interno della variabile peso.

In *Tabella 4*, vengono riportate la media e la mediana che risultano avere dei valori abbastanza differenti tra di loro, rispettivamente di **110.0** gr e **102.3** gr; la deviazione standard è elevata e pari a **50.15**. All'interno della tabella, inoltre, sono indicati i valori minimi e massimi del peso, registrati per la popolazione di ghiri considerata: l'individuo più leggero mai registrato pesa **17** gr, mentre quello più pesante arriva a **282** gr. La *Figura 7* raffigura un boxplot, chiamato anche diagramma a scatola e baffi, nel quale è stata rappresentata la distribuzione della



variabile peso. Si nota come la mediana (linea nera) si aggiri sui **110gr** e che il baffo superiore arrivi fino a circa **282gr**. Si evidenzia, infine, la presenza di un *outlier* nel baffo superiore.

Figura 7: Boxplot utilizzato per la rappresentazione della variabile peso per i soggetti dell'intera popolazione marcata e non marcata. È presente un valore anomalo per i valori più elevati.

Proseguendo con l'analisi bivariata, si inizia con lo studio della variabile sesso espressa in relazione alla variabile età, in modo tale da verificare come la distribuzione della popolazione di maschi e femmine cambi in base alle diverse classi d'età considerate.

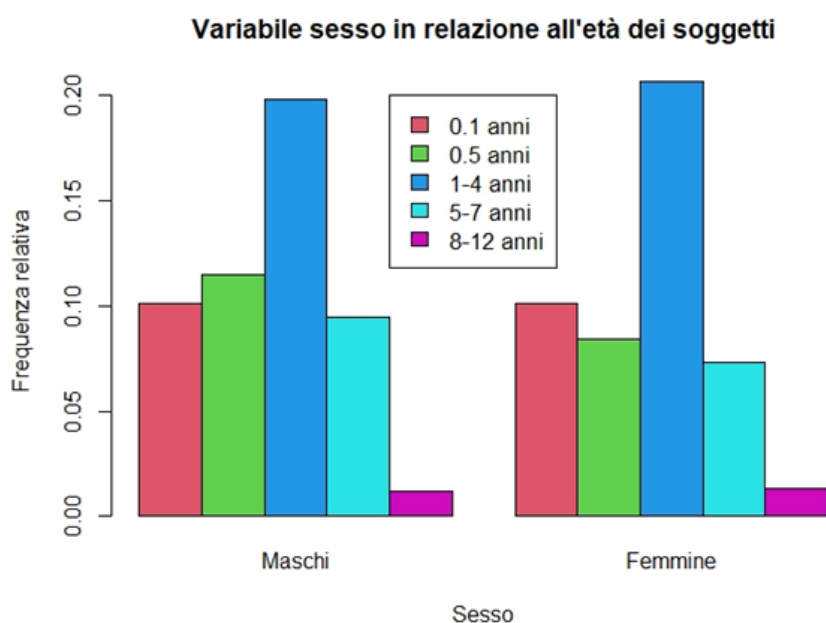
CLASSI D'ETÀ (in anni)	SESSO DEI SOGGETTI		
	Maschi	Femmine	Totale
0.1	0.10	0.10	<b>0.20</b>
0.5	0.12	0.08	<b>0.20</b>
1-4	0.20	0.22	<b>0.42</b>
5-7	0.09	0.07	<b>0.16</b>
8+	0.01	0.01	<b>0.02</b>
<b>Totale</b>	<b>0.52</b>	<b>0.48</b>	<b>1</b>

Tabella 5: Distribuzione percentuale della variabile sesso in relazione alle diverse classi d'età. Sono state incluse anche le colonne con i totali.

Dai risultati derivanti dalla relazione tra queste due variabili (Tabella 5), si può notare che tutti i valori rappresentati risultano essere molto simili tra i maschi e le femmine, per tutte le classi d'età considerate. In Tabella 5, infatti, gli unici valori leggermente diversi tra i sessi sono quelli che si registrano per la classe dei 0.5 anni, rispettivamente del **12%** per i maschi e del solamente l'**8%** per le femmine.

Questo è osservabile anche dalla Figura 8, in cui si nota come la colonna verde relativa alle femmine sia lievemente più bassa rispetto a quella dei maschi.

Figura 8: Grafici a barre relativi alla distribuzione della variabile sesso in funzione delle diverse età dei soggetti per la popolazione totale di ghiri. L'età è stata suddivisa in cinque classi e i diversi colori indicano l'appartenenza dei soggetti ai vari gruppi.



Inoltre, nell'ultima colonna a destra (*Tabella 5*), relativa al totale per età, l'unico valore elevato si registra per la classe 1-4 anni (**42%**) dal momento che, come abbiamo visto in precedenza, quest'ultima ha una numerosità maggiore rispetto alle altre. Questo aspetto viene evidenziato anche nel grafico (*Figura 8*) tramite la colonna azzurra, che è molto elevata sia per i maschi (**0.20**) che per le femmine (**0.22**). Viene, quindi, confermata l'ipotesi fatta in precedenza secondo la quale il sesso non influenzi, in modo rilevante, le analisi effettuate sui dati.

Un'ulteriore analisi bivariata può essere effettuata per le variabili peso ed età. È utile, infatti, verificare come il peso si distribuisca diversamente in base alla classe d'età considerata: ci si aspetterebbero dei valori del peso relativamente bassi per i cuccioli ancora allattati e i soggetti più anziani, ormai privi di tante energie per cercare il cibo; al contrario, i soggetti adulti o già svezzati potrebbero essere quelli caratterizzati da valori del peso più elevati, o comunque nella media (*Tabella 4*).

CLASSI D'ETÀ (anni)	CLASSIFICAZIONE DEL PESO (gr)				Totale
	< 52	52-110	111-138	>138	
0.1	7.69	9.42	1.70	2.52	<b>21.33</b>
0.5	0.56	4.41	9.38	6.62	<b>20.97</b>
1-4	12.05	7.83	8.63	12.10	<b>40.61</b>
5-7	4.17	4.17	3.38	2.77	<b>14.49</b>
8+	0.70	0.89	0.51	0.51	<b>2.60</b>
<b>Totale</b>	<b>25.17</b>	<b>26.72</b>	<b>23.59</b>	<b>24.52</b>	<b>100</b>

Tabella 6: Distribuzione percentuale della variabile peso in relazione alle diverse classi d'età.  
Nota: Come per la variabile età, anche il peso è stato suddiviso in classi: per la divisione ci si è basati sui primi tre quartili della sua distribuzione (*Tabella 4*).

Come ipotizzato precedentemente, in *Tabella 6* si osserva come per le classi 0.1, 5-7 e 8+ le percentuali più elevate siano in corrispondenza dei valori più bassi del peso: il **17%** (9.42+7.69) dei cuccioli e l'**8%** (4.17+4.17) della classe 5-7 anni risulta pesare meno di 110 gr e lo stesso risultato, anche se in percentuale minore, vale per il **2%** (0.70+0.89) degli anziani. All'interno delle classi di soggetti adulti (1-4 anni) o già svezzati (0.5 anni), invece, le percentuali più elevate si hanno in valori leggermente o di molto superiori al peso medio della popolazione, ovvero almeno

maggiori di 111 gr. Per la classe 0.5 la frequenza maggiore è del **9.38%** in corrispondenza di pesi leggermente superiori alla media; al contrario, per la classe dall'1 ai 4 anni è del **12%** circa, in corrispondenza di pesi maggiori ai 138 gr.

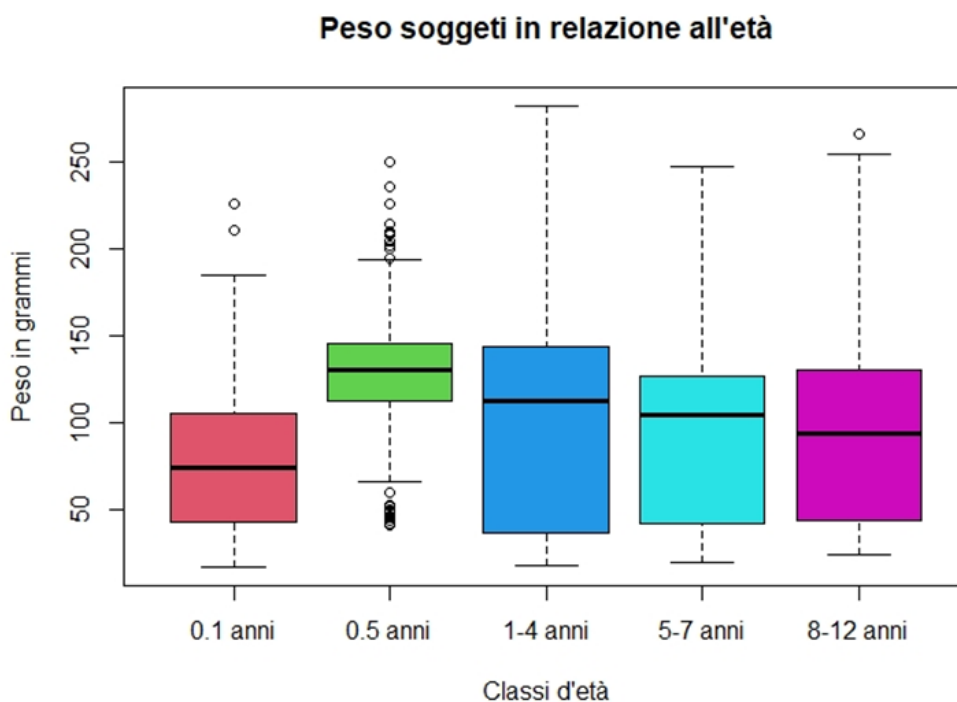


Figura 9: Boxplot relativi alla distribuzione della variabile peso in funzione delle diverse età dei soggetti, appartenenti alla popolazione totale di ghiri. L'età è stata suddivisa in cinque classi e i colori indicano l'appartenenza dei soggetti ai vari gruppi. *Nota:* Si osserva come nel boxplot relativo alla classe d'età di 0.5 anni (verde) siano presenti numerosi outliers sia nel baffo inferiore che in quello superiore.

In *Figura 9*, sono raffigurati cinque boxplot di colori differenti, che rappresentano i gruppi nei quali è stata suddivisa la variabile età. Il grafico ha lo scopo di confrontare le classi d'età della popolazione che troviamo in ascissa con i valori del peso, che si possono osservare in ordinata. A prima vista, si nota come la classe dei cuccioli ancora allattati (scatola rossa) abbia pesi più bassi e che la sua mediana sembri essere quella minore. I ghiri già adulti e anziani, descritti con le scatole blu, azzurre e viola, sembrano avere, invece, caratteristiche abbastanza simili tra loro, seppure, la classe 1-4 anni abbia un range di valori molto più grande, spingendosi anche verso pesi elevati. È necessario, prestare particolare attenzione alla classe dei cuccioli già svezzati che risultano avere numerosi valori anomali, definiti come



*outliers*, sia sul baffo superiore sia su quello inferiore. La scatola verde, infine, è quella che ha pesi in media più elevati, che sembrerebbero aggirarsi intorno al valore medio di **110** gr, che è già stato presentato in *Tabella 4*: tale valore era ottenuto dalla popolazione di ghiri totali senza procedere con la suddivisione in classi d'età.

## Capitolo 4

### Tavola di mortalità

#### Stima della funzione di sopravvivenza

Le analisi univariate e bivariate che sono state svolte nel capitolo precedente, hanno descritto la distribuzione delle diverse variabili esplicative e portato alla luce alcune relazioni, più o meno importanti, tra quest'ultime. Grazie a tali risultati si è in grado, quindi, di stimare le funzioni di sopravvivenza per le diverse classi d'età in cui è stato suddiviso il campione, ricorrendo al metodo di cattura-ricattura e al modello di Cormack-Jolly-Seber, già descritti in modo approfondito nel Capitolo 1.

In letteratura, la sopravvivenza per popolazioni di piccoli roditori è stata uno degli argomenti più trattati dagli studiosi, soprattutto per quanto riguarda il ghio europeo, che è caratterizzato, come si è visto in precedenza, da una storia di vita lunga e particolare, prestandosi bene, quindi, agli scopi di questo studio. Da analisi svolte negli ultimi decenni si è osservato come la sopravvivenza di questi animali cambi in base al periodo dell'anno preso in considerazione: la probabilità di morte risulta essere massima all'inizio dell'estate, diminuisce tra l'inizio e la fine dell'autunno ed è minima durante il periodo del letargo, ovvero i mesi invernali (Lebl et al. 2010). Questi risultati sono dovuti al fatto che all'inizio del periodo estivo i ghiri, che successivamente al letargo possono arrivare ad avere perso gran parte del loro peso corporeo, hanno la necessità di trovare nuove risorse energetiche e questa maggiore ricerca di cibo, che continuerà anche nei mesi successivi, li porterà ad essere più esposti all'attacco dei diversi predatori. Nel periodo invernale, invece, soprattutto in corrispondenza dei mesi del letargo, gli animali sono al sicuro all'interno delle loro tane e meno esposti ai numerosi pericoli esterni.

Tuttavia, in alcuni casi, è stata registrata un'elevata mortalità anche nei mesi invernali soprattutto a causa di fattori meteorologici e ambientali (Lyman et al., 1982). Infatti, se l'inverno sopraggiunge con temperature più alte o basse rispetto al normale o ha una lunghezza differente rispetto agli anni precedenti, gli animali possono trovarsi storditi e arrivare impreparati al periodo del letargo; la conseguenza di queste alterazioni è, in molti casi, la morte del ghio per malnutrizione o assideramento. Tali cambiamenti climatici portano, inoltre, ad una

ricerca maggiore di provviste da parte dell'animale, che di conseguenza è soggetto ad un rischio più elevato di essere ucciso dai possibili predatori (Schaub et al., 2001).

Come è stato confermato anche dalle analisi esplorative del capitolo precedente, la sopravvivenza non sembra essere influenzata dalla variabile sesso (Pilastro et al., 2003) poiché risulta avere valori molto simili tra maschi e femmine. Al contrario, si è notato come i ghiri abbiano un grado di sopravvivenza differente in base alla classe d'età di appartenenza: gli individui più giovani, ad esempio, anche se sono comunque soggetti al rischio di predatori, malattie e parassiti, soprattutto nei primi mesi di vita, risultano avere dei livelli di mortalità meno elevati rispetto ai ghiri già adulti (4-11 anni) che iniziano, invece, ad avvicinarsi verso gli ultimi anni della loro vita. In letteratura, infatti, si stimava che un ghiro da giardino raramente superasse i 3 anni d'età in stato selvatico (Baudoin, 1979), invece, dalle analisi di Pilastro et al. (2003), relative al ghiro commestibile europeo studiato sulle Alpi italiane, le stime si sono alzate fino ad una media di 9 anni di vita, con un intervallo tra i 6 e i 12 anni.

Il dataset preso a riferimento, che come è stato già detto si basa sulle indagini effettuate proprio da Pilastro, ha come età massima osservata 18 anni, ma solamente pochi individui sono arrivati vivi a quell'età. Per ovviare a questo problema, il campione è stato suddiviso in 7 classi sulla base della numerosità dei sottogruppi (0.1, 0.5, 1-3, 4-5, 6, 7-11 e 12+ anni) e sono stati eliminati tutti i dati mancanti relativi alla variabile età, in modo tale da non introdurre errori di misura nelle stime di sopravvivenza calcolate. L'implementazione dei risultati per la realizzazione di tabelle e grafici e il calcolo delle diverse quantità necessarie alla creazione della Tavola di Mortalità, è stata svolta tramite l'utilizzo del software "R Studio". Ci si è serviti di questo software anche per determinare le variabili  $Z_{ij}$ ,  $M_{ij}$ ,  $m_{ij}$ ,  $u_{ij}$ ,  $R_{ij}$  e  $r_{ij}$ , impiegate nella creazione delle diverse stime di sopravvivenza. Per la descrizione di tali quantità e del loro utilizzo all'interno delle equazioni (3) e (4), si richiama a quanto è già stato spiegato in modo approfondito nel Capitolo 2 all'interno del paragrafo 3, relativo al modello Cormack-Jolly-Seber.

In *Tabella 7*, vengono rappresentate le stime della funzione di sopravvivenza,  $\Phi_{ij}$  (equazione (4)), ottenute per ogni classe d'età  $i$  e a loro volta suddivise in  $j$  ricatture, che sono state individuate tra i mesi e gli anni in cui è avvenuto un campionamento

per quel determinato gruppo  $i$ . Ricatture con  $j$  uguali, ma in età differenti, possono, quindi, non identificare lo stesso periodo temporale nelle diverse classi, ma equivalere solo alla prima, seconda ecc. rilevazione all'interno di queste ultime. Questo succede perché, durante i vari campionamenti nei mesi tra il 1991 e il 1998, non sono sempre stati catturati ghiri di ogni possibile età. Ad esempio, la prima rilevazione per la classe d'età 0.1 è relativa all'agosto del 1991, mentre quella per i ghiri di 6 anni è del luglio 1993, indicando che nei primi 3 anni di indagini non sono mai stati avvistati individui aventi quest'età.

Tale suddivisione del dataset ha portato ad ottenere anche un numero di stime differenti in base alla classe d'età considerata, poiché i gruppi di ricattura sono stati formati su diverse numerosità di  $i$ . Di conseguenza, in *Tabella 7*, si nota come per le età 0.5 e 7-11 anni le ricatture siano solamente 3, mentre per quella da 1 a 3 anni  $j$  sia uguale a 7 e così via.

NUMERO DI RICATTURE $J$	GRUPPI DI ETÀ DEI GHIRI ( $i$ )						
	0.1	0.5	1-3	4-5	6	7-11	12+
1	0.819	0.897	0.581	0.358	0.970	0.468	0.311
2	0.926	0.657	1	1	0.332	0.304	0.661
3	0.951	//	1	0.699	0.434	//	0.216
4	//		0.630	0.586	1		//
5			0.851	0.930	0.173		
6			0.587	0.139	//		
7			//	//			

Tabella 7: Stime delle  $j$ -esime funzioni di sopravvivenza tramite il metodo di Cormack-Jolly-Seber per le diverse classi d'età considerate.

*Nota 1:* i simboli "//" sono posti in corrispondenza dell'ultima ricattura per le diverse classi d'età, delle quali non è possibile calcolare la stima della sopravvivenza.

Per indicare la stima dell'ultima possibile ricattura, è stato utilizzato il simbolo "//": questa mancanza è dovuta al fatto che le sopravvivenze possono essere ottenute solamente fino alla ricattura  $j-1$ , a causa delle quantità necessarie per il loro calcolo. Queste ultime, infatti, soprattutto per ottenere le variabili  $M_{ij+1}$  presenti all'interno dell'equazione (4), si basano sui dati della ricattura successiva, che però per l'ultimo sottogruppo non esistono.

È necessario puntualizzare, inoltre, che al momento dell'analisi delle stime, si sono notati diversi valori anomali per tutte quelle ricatture effettuate in corrispondenza del 1992 e di giugno-luglio 1995. Dal momento che questi ultimi influenzavano negativamente l'intero campione, si è presa la decisione di non considerarli nelle operazioni successive e per ogni possibile classe d'età, eliminandoli anche dalla *Tabella 7*. Le anomalie, potrebbero essere state causate dalle diverse numerosità presenti all'interno delle  $j$  ricatture, che in base al mese e all'anno considerati, come è stato già detto, risultano avere un numero di individui catturati differente.

Nel paragrafo successivo, si passerà al calcolo della Tavola di Mortalità per la popolazione di ghiri e saranno necessari solamente dei singoli valori delle varie stime di sopravvivenza precedentemente calcolate (*Tabella 7*), uno per ogni classe d'età. Si ha la necessità, quindi, di compiere "un'unificazione" delle  $j$ -esime stime cercando di ovviare anche alla questione della differenza di numerosità all'interno dei sottogruppi considerati.

Statistiche di sintesi	GRUPPI DI ETÀ DEI GHIRI ( $i$ )						
	0.1	0.5	1-3	4-5	6	7-11	12+
Media ponderata	0.868	0.723	0.743	0.520	0.371	0.351	0.433

Tabella 8: Media ponderata delle stime di sopravvivenza (*Tabella 7*) per ogni possibile ricattura  $j$ , relativa ad ogni classe d'età  $i$ . Come pesi sono state utilizzate le numerosità delle ricatture, differenti per ogni campionamento  $j$  effettuato.

Come soluzione al problema della ricerca di una stima di sopravvivenza singola per ogni classe, si è scelto di utilizzare una media ponderata ( $\mu_i^P$ ), i cui pesi si basano sulle diverse numerosità di ogni  $j$ -esima ricattura all'età  $i$ . I risultati ottenuti, presentati in *Tabella 8*, derivano, quindi, dall'applicazione dell'equazione (5) ai dati, ricordando come le variabili  $m_{ij}$  e  $u_{ij}$  indichino rispettivamente il numero di soggetti marchiati e non marchiati, presenti all'interno del sottogruppo  $j$  per la classe d'età  $i$ .

$$\mu_i^P = \frac{\sum_{j=1}^J ((m_{ij} + u_{ij}) \cdot \Phi_{ij})}{\sum_{j=1}^J (m_{ij} + u_{ij})} \quad \forall i = 1 \dots 7 \quad (5)$$

Si evidenzia, inoltre, come la dimensione dell'indice  $J$  nelle due sommatorie sia differente sulla base della classe d'età  $i$  di cui si sta facendo la media.

Osservando i risultati ottenuti in *Tabella 8*, si nota come la sopravvivenza più elevata sia in corrispondenza della classe dei cuccioli di 0.1 anni con un valore di **0.868**. Questi ultimi, infatti, essendo ancora al sicuro nel nido con la madre hanno una probabilità di morte inferiore rispetto, ad esempio, ai cuccioli già svezzati (0.5 anni) e i ghiri di 1-3 anni che, iniziando ad uscire da soli all'esterno per procacciarsi il cibo, sono anche maggiormente esposti agli attacchi dei predatori, arrivando ad avere stime di sopravvivenza rispettivamente di **0.723** e **0.743**. Le classi successive, tra i 4 e gli 11 anni, toccano valori ancora più bassi (**0.351**), come si può notare anche dalla *Figura 10*. La sopravvivenza sembra avere un leggero aumento in corrispondenza dei soggetti più anziani, 12+ anni, con un valore dello **0.433**. Le cause di questo andamento anomalo verranno verificate e approfondite nel paragrafo successivo.

Anche in *Figura 10*, si nota come la curva di sopravvivenza abbia due decrementi molto evidenti in questo intervallo considerato: il primo punto di minimo locale si trova in corrispondenza della classe d'età 0.5 anni (seconda classe) e uno successivo è presente per i ghiri di età compresa tra i 7 e gli 11 anni (sesta classe). Il secondo minimo può essere considerato come globale almeno per l'intervallo d'età (0.1-18 anni) che si è scelto di prendere a riferimento.

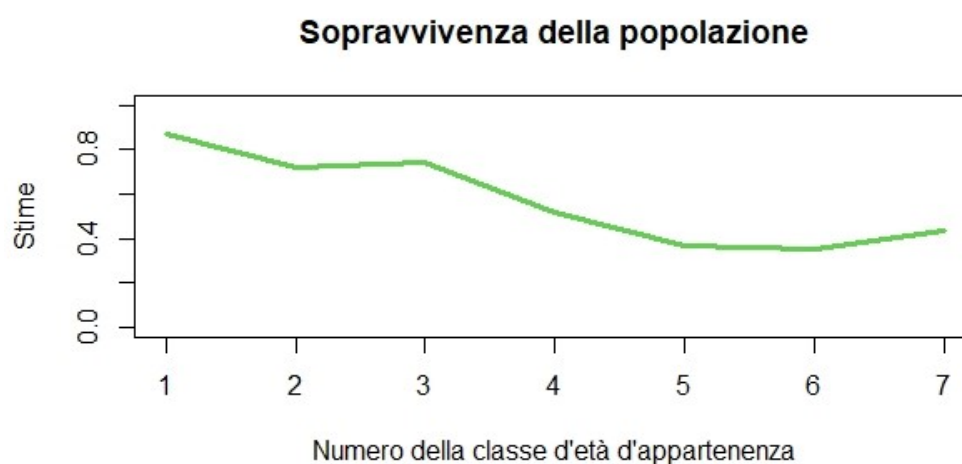


Figura 10: Curva di sopravvivenza per la popolazione di ghiri presa a riferimento all'interno dell'analisi.

*Nota:* l'asse delle ascisse è in funzione delle 7 classi d'età costituite precedentemente.

## Calcolo della Tavola di Mortalità

Successivamente allo studio della stima della funzione di sopravvivenza, ci si può, quindi, focalizzare sulla creazione della Tavola di Mortalità. Quest'ultima, costituisce uno degli strumenti più importanti e più utilizzati in ambito demografico poiché è in grado di raccogliere tutte le informazioni riguardanti i dati di mortalità di una determinata popolazione, verificandone l'andamento nel corso degli anni e permettendo il confronto con altri soggetti di specie o regioni geografiche differenti. Il primo che vide la necessità di organizzare i dati di mortalità fu lo statistico britannico John Graunt che, intorno al 1661, iniziò a raccogliere informazioni riguardanti il numero di bambini battezzati e il numero di sepolture effettuate a Londra in quegli anni. Graunt, infatti, si rese conto che era necessario uno studio approfondito di queste quantità per portare alla luce possibili anomalie nella lunghezza di vita della popolazione e riuscire a confrontare negli anni l'andamento di quest'ultima per trovare un *pattern* (Glass, 1964); in una pubblicazione nel 1662, egli presentò per la prima volta una Tavola di Mortalità calcolata per una popolazione umana. Nei secoli successivi, capita l'importanza dello studio sulla mortalità, sono stati creati diversi database con queste informazioni; un esempio, può essere lo "*Human Mortality Database*", che racchiude l'insieme di dati per i paesi più sviluppati del mondo, disponibili per numerosi anni. L'organizzazione in tavole dei dati di mortalità è stata, negli anni, ampliata anche a tutta la popolazione animale, portando informazioni importanti per studi in ambito ecologico e biologico.

Nell'analisi effettuata, per la costruzione della Tavola, si prende a riferimento una coorte fittizia, i cui soggetti sono influenzati dai tassi di mortalità della "vera" popolazione di ghiri durante tutto il periodo di interesse. La radice della Tavola,  $l_0$ , che corrisponde alla popolazione iniziale della coorte, è stata posta pari a 10000 soggetti dal momento che il dataset di partenza si basa su una popolazione di più di 2000 individui senza considerare tutti i ghiri ricatturati più volte. Da questo valore derivano tutti i sopravvissuti delle classi successive, definiti  ${}_n l_i$ . Inoltre, per poter "chiudere" la Tavola, si è assunto che al compimento dei 20 anni d'età la coorte di ghiri presa a riferimento fosse completamente estinta e che quindi la mortalità dell'ultima classe fosse massima, ovvero pari a 1.

Per la costruzione di una Tavola di Mortalità è necessario seguire dei passaggi ben specifici e collegati l'uno con l'altro: inizialmente, con le stime di sopravvivenza di partenza, calcolate precedentemente, che sono state poi unificate tramite la media ponderata  $\mu_i^P$ , si riescono a calcolare le diverse probabilità di morte  ${}_nq_i$ ; questi risultati sono ottenuti tramite l'equazione (6) e devono essere svolti per ogni classe d'età  $i$ .

$${}_nq_i = 1 - \mu_i^P \quad (6)$$

Dal momento che queste ultime sono caratterizzate da ampiezze differenti sono stati calcolati anche i tassi di mortalità  ${}_nm_i$ , partendo proprio dalle probabilità di morte  ${}_nq_i$  e utilizzando la funzione espressa dall'equazione (7). Questi ultimi, infatti, permetteranno un confronto più equo tra le mortalità delle classi poiché sono indipendenti dalla diversa ampiezza dei gruppi.

$${}_nm_i = \frac{n \cdot {}_nq_i}{n - (n - {}_n\alpha_i) \cdot {}_nq_i} \quad (7)$$

Inoltre, viene introdotta la misura  ${}_n\alpha_i$ , relativa al tempo medio di esposizione al rischio per i soggetti. Quest'ultima viene ipotizzata pari alla metà dell'ampiezza delle classi (equazione (8)).

$${}_n\alpha_i = n/2 \quad (8)$$

Grazie al calcolo dalle probabilità di morte  ${}_nq_i$  e una volta fissata la radice  $l_0$  si è, dunque, in grado di determinare il numero di sopravvissuti della Tavola  ${}_nl_i$ , ovvero gli individui che sono in vita all'età  $i$  poiché sono sopravvissuti all'età  $i-1$ . Questo valore è determinato grazie ad una produttoria tra tutte le probabilità di sopravvivenza, fino a quella della classe precedente a quella di interesse, che vengono pre-moltiplicate dalla radice della Tavola (equazione (9)).



$${}_n l_i = l_0 \cdot \prod_y^{i-1} (1 - {}_n q_y) \quad (9)$$

Ottenute le quantità precedenti si riescono, quindi, a calcolare i decessi  ${}_n d_i$  ovvero il numero di morti per ogni classe d'età  $i$  (equazione (10)).

$${}_n d_i = {}_n q_i \cdot {}_n l_i \quad (10)$$

Nell'equazione (11) viene presentata la formula per l'ottenimento del numero di anni vissuti,  ${}_n L_i$ , che viene definito, in alcuni casi, anche come tempo di esposizione al rischio. Per il calcolo di tale quantità vengono utilizzati sia il numero di sopravvissuti che il numero di decessi.

$${}_n L_i = n \cdot {}_n l_i - (n - {}_n \alpha_i) \cdot {}_n d_i \quad (11)$$

Infine, per il completamento della Tavola sono necessarie la retrocumulata  ${}_n T_i$  e la speranza di vita  ${}_n e_i$ . La prima quantità è relativa al numero di anni vissuti  ${}_n L_i$ , in equazione (12), e corrisponde appunto alla sommatoria di questi ultimi partendo dalla classe  $i$  fino ad arrivare all'ultima  $I$ , tralasciando le precedenti.

$${}_n T_i = \prod_{y=i}^I {}_n L_y \quad (12)$$

Tramite il rapporto tra i diversi valori della retrocumulata  ${}_n T_i$  e il numero di sopravvissuti si determina, invece, la speranza di vita all'età  $i$ ,  ${}_n e_i$ , per ogni possibile classe (equazione (13)).

$${}_n e_i = \frac{{}_n T_i}{{}_n l_i} \quad (13)$$

Applicando in ordine queste formule, partendo dalle stime di sopravvivenza, si ottiene, quindi, la Tavola di Mortalità per la popolazione di ghiri presa a riferimento all'interno dell'indagine. I valori ricavati sono stati riportati tutti in *Tabella 9*, indicando anche l'ampiezza  $n$  della classe considerata.

Classi d'età	$n$	$n\alpha_i$	$n\mu_i$	$nq_i$	$nm_i$	$n_l$	$nd_i$	$nL_i$	$nT_i$	$ne_i$
<b>0.1</b>	1	0.5	0.868	0.132	0.141	10000	1320	9340	46434	4.64
<b>0.5</b>	1	0.5	0.723	0.277	0.322	8680	2404	7478	37094	4.27
<b>1-3</b>	3	1.5	0.743	0.257	0.295	6276	1613	16408	29616	4.72
<b>4-5</b>	2	1	0.520	0.480	0.631	4663	2238	7087	13209	2.83
<b>6</b>	1	0.5	0.371	0.629	0.918	2425	1525	1662	6121	2.52
<b>7-11</b>	5	2.5	0.351	0.649	0.961	900	584	3038	4459	4.95
<b>12+</b>	9	4.5	<b>0</b>	<b>1</b>	0.791	316	316	1421	1421	4.5

Tabella 9: Tavola di Mortalità per una coorte fittizia di 10000 individui.  
*Nota:* si ipotizza che l'estinzione della popolazione avvenga entro i 20 anni d'età per questo motivo l'ultima classe avrà una mortalità massima pari a 1.

Da una prima analisi sui tassi di mortalità si osserva come i valori più bassi siano in corrispondenza delle classi d'età 0.1 e 1-3 anni, rispettivamente di **0.141** e **0.295**. Come si può percepire anche dalla curva in *Figura 11*, si registra, invece, un leggero aumento della mortalità (con un tasso pari a **0.322**) rispetto alla prima (0.1 anni) e alla terza (1-3 anni) classe per quanto riguarda i soggetti con età 0.5, probabilmente dovuto al fatto che i cuccioli, già svezzati, iniziano per le prime volte ad allontanarsi dal nido e, ancora inesperti, sono attaccati con più facilità dai possibili predatori. Nelle classi successive, quindi, relative agli individui più adulti, si ha un incremento del tasso di mortalità, che tocca il valore più alto, **0.961**, per i ghiri tra i 7 e gli 11 anni. Questo aumento, visibile anche dalla *Figura 11*, inizia a diminuire in corrispondenza dei ghiri più anziani (12+), dove il tasso torna a un valore di **0.791**.



Figura 11: Tassi di mortalità relativi alla coorte fittizia per la popolazione di ghiri presa a riferimento all'interno dell'analisi.

*Nota:* l'asse delle ascisse è in funzione delle 7 classi d'età costituite precedentemente.

I sopravvissuti della coorte fittizia dai 10000 di partenza, diminuiscono fino a diventare **316** nell'ultima classe d'età considerata (*Tabella 9*). In aggiunta, grazie alla *Figura 12*, si osserva come la curva abbia un andamento decrescente e che entro il settimo gruppo considerato (12+) la popolazione sia completamente estinta, come era stato assunto a priori.

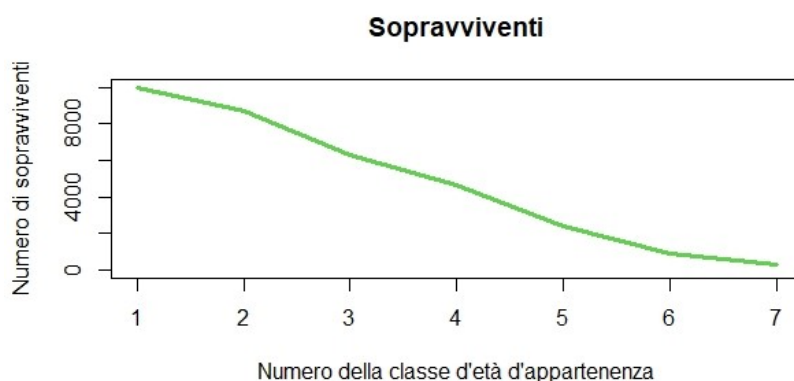


Figura 12: Curva che analizza l'andamento dei sopravvissuti per tutte le classi d'età considerate.

*Nota:* l'asse delle ascisse rappresenta le 7 classi d'età descritte nella Tavola di Mortalità.

Dai risultati ottenuti si evidenzia, inoltre, che i valori nella colonna dei decessi sembrano indicare come la maggior parte degli individui, **7780** ghiri dei 10000 totali, muoia tra gli 0.5 e i 6 anni, mentre per le popolazioni più anziane e per i cuccioli, le quantità trovate sembrano essere inferiori con un numero di morti pari a **584**, per la classe 7-11 anni, e **316** per la 12+.

Questo particolare schema della mortalità, che può essere definito altalenante, è da considerarsi strettamente collegato alle caratteristiche biologiche del ghiro stesso: le indagini effettuate da Pilastro et al. (2003) indicavano come l'età media di un individuo si aggirasse intorno ai 9 anni, con un intervallo di valori compresi tra i 6 e i 12 anni; è proprio in corrispondenza di queste età che, anche nei dati della *Tabella 9*, si registrano, infatti, il maggior numero di decessi. Si intuisce, quindi, come i soggetti siano subito "scremati" durante i primi anni di vita, soprattutto intorno agli 0.5 anni, quando devono imparare per la prima volta a sopravvivere al di fuori del nido per procacciarsi il cibo da soli. Successivamente, tra gli 1 e i 3 anni, quando i ghiri sono già più maturi e scaltri e si sottraggono più facilmente ai pericoli dell'esterno, la sopravvivenza sembra aumentare, anche se in modo lieve. Quest'ultima, tuttavia, inizia a decrescere subito dalla classe successiva, a partire dalla quale, i ghiri iniziano ad entrare in quell'intervallo critico introdotto da Pilastro (2003), dove la mortalità raggiunge i suoi livelli massimi. Quindi, una volta superato questo "scalino", in cui la maggior parte della popolazione è destinata a morire, e raggiunte età più avanzate, dove le energie per la ricerca del cibo sono calate e di conseguenza anche il rischio di essere uccisi dai predatori, la probabilità di morte per i pochi ghiri rimasti tende a diminuire nuovamente, influenzando pertanto anche i valori della speranza di vita della Tavola calcolata. Quest'ultima, infatti, è caratterizzata da valori che sembrano essere molto simili tra soggetti giovani ed anziani, proprio perché la maggior parte dei decessi avvengono in corrispondenza delle classi d'età centrali della popolazione (0.5-6 anni). Inoltre, si osserva come siano presenti valori abbastanza bassi soprattutto per le prime classi d'età; ad esempio, la speranza di vita alla nascita è pari solamente a **4.64** anni. Nelle ultime due classi, come è stato detto in precedenza, le speranze ritornano ad avere valori abbastanza elevati, rispettivamente di **4.95** e **4.5** anni, ma rimangono comunque dentro all'estremo superiore ipotizzato per l'ultima classe d'età pari a 20 anni.

Questo comportamento, tuttavia, non è peculiare delle popolazioni di piccoli roditori, ma può essere esteso a molte altre specie animali.

## Risultati e conclusioni

La popolazione considerata all'interno di quest'indagine è stata studiata con lo scopo di effettuare un'analisi della sopravvivenza e, conseguentemente, calcolare la Tavola di Mortalità ad essa associata. Il campione è stato rilevato attraverso la tecnica di cattura-ricattura, rendendo necessario, quindi, tenere conto di questo particolare campionamento anche nelle analisi successive.

Nel primo capitolo, è stato presentato il metodo cattura-ricattura prestando particolare interesse agli assunti su cui quest'ultimo si basa e sulle tecniche più utilizzate per la marcatura degli animali. Inoltre, è stato introdotto in modo approfondito il modello di Cormack-Jolly-Saber, esplicitando anche le equazioni che sono state impiegate in seguito per la stima della funzione di sopravvivenza. A testimonianza di alcune delle scelte fatte, sono state portate all'attenzione numerose pubblicazioni, più o meno recenti, di biologi e statistici che riguardavano la popolazione d'interesse e le tecniche utilizzate per la stima delle diverse quantità, sia nell'analisi della sopravvivenza, sia per la creazione della Tavola di Mortalità.

Successivamente, è stato introdotto il dataset di interesse: i dati provenivano da una popolazione di ghiri europei rilevati sulle Alpi italiane nel periodo tra il 1991 e il 1998 (Capitolo 2). A seguire, sono state fatte delle analisi esplorative iniziali per alcune variabili d'interesse considerate rilevanti (Capitolo 3) come il sesso, il peso e l'età. Si è osservato come gran parte della popolazione, circa l'**84%** fosse già marcata, mentre solamente il restante **16%** non fosse mai stato avvistato prima; questi dati possono portare a risultati interessanti relativi al grado di emigrazione della popolazione di ghiri, che in questo caso sembra, tuttavia, essere molto basso dato lo sbilanciamento tra i due gruppi. Le analisi esplorative riguardanti il sesso, invece, hanno dimostrato come non ci siano differenze evidenti tra il numero di maschi e di femmine nel campione, con dei valori percentuali rispettivamente del **52%** e **48%**. La non rilevanza della variabile sesso sarà confermata anche nell'analisi bivariata effettuata in relazione con l'età dei soggetti che sembrano avere, se non in alcuni casi, andamenti molto simili. Per quanto riguarda la variabile peso, che presentava numerosi dati mancanti e outliers, si è visto come il valore medio della popolazione fosse circa di **110** gr e che in base all'età del ghiro il peso aumentasse o diminuisse. Per i soggetti più giovani ancora nel nido con la madre e

gli individui più anziani, di età superiore ai 5 anni, i valori indicavano un peso inferiore rispetto alla media trovata; al contrario, per i ghiri già svezzati (0.5 anni) e i giovani adulti, tra 1-4 anni, si sono osservati pesi più elevati, ad esempio, nel secondo gruppo, il **21%** dei soggetti, su un totale del **40%** della rispettiva classe d'età, indicavano valori superiori ai **111 gr**.

Nel quarto capitolo, quindi, sono state effettuate le vere e proprie analisi d'interesse. Inizialmente, si è focalizzata l'attenzione sullo studio della funzione di sopravvivenza: il dataset è stato suddiviso in  $i=7$  sottogruppi in base all'età degli individui e, per ogni loro possibile ricattura  $j-1$ , sono state calcolate le stime di sopravvivenza  $\Phi_{ij}$ , utilizzando il modello di Cormack-Jolly-Seber. In seguito, è stata effettuata una media geometrica di queste ultime, in modo tale da trovare dei valori "unici" per le stime in tutti gli  $i$ -esimi gruppi d'età, che sono stati utilizzati successivamente nel calcolo delle diverse quantità che costituiscono la Tavola di Mortalità. Grazie alla sopravvivenza, infatti, è stata determinata la probabilità di morte  ${}_nq_i$ , dalla quale derivano anche tutte le quantità successive. Inoltre, per la creazione della Tavola, è stata ipotizzata una coorte fittizia di 10000 individui e si è assunto che quest'ultima si estinguesse completamente entro i 20 anni d'età, limite superiore dell'ultima classe d'età 12+. Dai risultati ottenuti, si è osservato come la speranza di vita fosse molto simile tra i soggetti più giovani (**4.64** anni) e quelli più anziani (**4.5** anni). La causa di questa anomalia è stata trovata in una particolare disposizione del numero dei decessi, che, infatti, risultava essere massimo in prossimità delle classi centrali della Tavola, ovvero per i ghiri tra gli 0.5 e i 6 anni; al contrario, i cuccioli erano quelli con dei tassi di mortalità minore e anche i soggetti più anziani (12+) avevano delle probabilità di morte inferiori rispetto alla classe precedente. L'analisi ha confermato, quindi, come questa popolazione di ghiri commestibili europei abbia una storia di vita simile a quella di molte altre specie animali: dopo essere usciti dal nido (0.1 anni), che fungeva loro da protezione, gli individui tra gli 0.5 e i 7-8 anni, ricchi di energie, sono quelli maggiormente esposti agli attacchi dai predatori e, soprattutto per i ghiri ancora inesperti, si registra, infatti, il numero di decessi maggiore. Vi è una vera e propria "scrematura" della popolazione in corrispondenza di queste classi, dopo la quale rimangono in vita solo gli individui più esperti e con un istinto di sopravvivenza migliore. Una volta

superate queste età caratterizzate da una probabilità di morte molto elevata e raggiunti momenti della vita più avanzati, dove il rischio di essere uccisi dai predatori diminuisce dal momento che i ghiri rimangono più spesso all'interno delle loro tane, la mortalità tende nuovamente a diminuire.

Concludendo, per migliorare ed integrare le analisi effettuate, si sarebbe potuto cercare di diminuire il numero di informazioni mancanti, o dati *null*, presenti all'interno del dataset, che in molte delle variabili di interesse avevano numerosità elevate. Questa azione avrebbe sicuramente arricchito i risultati, portando a delle analisi più complete. Inoltre, poiché le stime di sopravvivenza sono state influenzate anche dalla disparità numerica tra soggetti marcati  $m_{ij}$  e non marcati  $u_{ij}$ , si sarebbe potuto provare a bilanciare le due popolazioni, magari compiendo più catture al di fuori delle cassette di legno posizionate nella foresta durante il periodo di studio. Infine, dal momento che in letteratura è risaputo che la sopravvivenza dei ghiri dipende in modo considerevole anche dai cambiamenti climatici e metereologici del periodo di osservazione (Lyman et al., 1982 e Schaub et al., 2001), si sarebbero potute introdurre, nel dataset, delle ulteriori variabili relative alla temperatura o al numero di piogge negli anni in cui si è svolta l'indagine.

## Bibliografia

- Anderson, D. R.; Burnham, K. P. (2002). Avoiding pitfalls when using information-theoretic methods. *In*: Sandercock, B. K. (2003). Estimation of survival rates for wader populations: a review of mark-recapture methods. *Wader Study Group Bull*, **100**, 165.
- Baudoin, C. (1979). Behavioural mechanisms of population regulation in a hibernating mammal *Eliomys quercinus*. *In*: Schaub, M.; Vaterlaus-Schlegel, C. (2001). Annual and seasonal variation of survival rates in the garden dormouse (*Eliomys quercinus*). *Journal of Zoology*, **255**, 91.
- Bieber, C. (1998). Population dynamics, sexual activity, and reproduction failure in the fat dormouse (*Myoxus glis*). *In*: Lebl, K., et al. (2011). Survival rates in a small hibernator, the edible dormouse: a comparison across Europe. *Ecography*, **34**(4), 683-685.
- Buckland, S. T. (1982). A Mark-Recapture Survival Analysis. *Journal of Animal Ecology*, **51**(3), 833-847.
- Carey, J. R.; Roach, D. A. (2020). *Biodemography: An Introduction to Concepts and Methods*. Princeton University Press, pp. 238-252.
- Carothers, A. D. (1979). Quantifying Unequal Catchability and its Effect on Survival Estimates in an Actual Population. *In*: Buckland, S. T. (1982). A Mark-Recapture Survival Analysis. *Journal of Animal Ecology*, **51**(3), 835-846.
- Cormack, R. M. (1964). Estimates of Survival from the Sighting of Marked Animals. *Biometrika*, **51**(3/4), 429-438.
- Glass, D. V. (1964). John Graunt and His Natural and Political Observations. *Notes and Records of the Royal Society of London*, **19**(1), 63-100.
- Lebl, K., et al. (2011). Survival rates in a small hibernator, the edible dormouse: a comparison across Europe. *Ecography*, **34**(4), 683-692.
- Lyman, C. P., et al. (1982). Hibernation and torpor in mammals and birds. London: Academic Press. *In*: Schaub, M.; Vaterlaus-Schlegel, C. (2001). Annual and seasonal variation of survival rates in the garden dormouse (*Eliomys quercinus*). *Journal of Zoology*, **255**, 89, 96.
- Manly, B. F. J.; Seber, G. A. F. (1973). Animal Life Tables from Capture-Recapture Data. *Biometrics*, **29**(3), 487-500.
- Pilastro, A., et al. (2003). Long living and reproduction skipping in the fat dormouse. *Ecology*, **84** (7), 1784-1792.
- Preston, S. H.; Heuviline P. (2001). *Demografy. Mesasuring and Modeling Population Processes*. Blackwell Publishing.



Ruf, T., et al. (2006). High survival in poor years: life history tactics adapted to mast seeding in the edible dormouse. *In: Lebl, K., et al. (2011). Survival rates in a small hibernator, the edible dormouse: a comparison across Europe. Ecography, 34(4), 683.*

Sandercock, B. K. (2003). Estimation of survival rates for wader populations: a review of mark-recapture methods. *Wader Study Group Bull, 100, 163-174.*

Schaub, M.; Vaterlaus-Schlegel, C. (2001). Annual and seasonal variation of survival rates in the garden dormouse (*Eliomys quercinus*). *Journal of Zoology, 255, 89-96.*

Schlund, W., et al. (2002). Long-term comparison of food availability and reproduction in the edible dormouse (*Glis glis*). *In: Lebl, K., et al. (2011). Survival rates in a small hibernator, the edible dormouse: a comparison across Europe. Ecography, 34(4), 683-685.*

Silvy, N.; Lopez R.R.; Peterson, M. J. (2012). Techniques for Marking Wildlife. *Texas A&M University.*

White, G. C.; Burnham, K. P. (1999). Program MARK: survival estimation from populations of marked animals. *In: Sandercock, B. K. (2003). Estimation of survival rates for wader populations: a review of mark-recapture methods. Wader Study Group Bull, 100, 165-168.*

Zecchin, P. (2014). Un'analisi del modello di cattura-ricattura. Università degli studi di Trento.