

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA,
DELL'AMBIENTE E DELLA VITA (DISTAV)

Classe delle Lauree Magistrali in Biologia LM/6



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA

Corso di Laurea Magistrale in Biologia ed ecologia marina

**STUDIO SULL'ETÀ E L'ACCRESIMENTO DI *SARDINA PILCHARDUS*
(WALBAUM, 1792) LUNGO IL CICLO ONTOGENETICO: ANALISI
INTEGRATA DALLA FASE LARVALE ALLO STADIO ADULTO**

Laureando:

Sergio Poggio

Relatore:

Dott. Luca Lanteri

Correlatore:

Prof. Paolo Vassallo

ANNO ACCADEMICO 2024-2025

Riassunto

La presente tesi analizza in modo integrato l'età e l'accrescimento di *Sardina pilchardus* nel Mar Ligure, considerando l'intero ciclo ontogenetico, dalle fasi larvali (bianchetto) fino allo stadio adulto. La sardina riveste un ruolo ecologico fondamentale negli ecosistemi pelagici mediterranei, poiché trasferisce energia dal fitoplancton e dallo zooplancton ai predatori di livello superiore, e rappresenta al contempo una risorsa economica rilevante per la pesca costiera ligure. La sua forte sensibilità alle variazioni ambientali la rende inoltre un indicatore biologico dello stato ecologico del bacino ligure.

Il lavoro si basa su campagne di campionamento condotte nel 2024 e nel 2025, che hanno permesso di raccogliere 291 individui per l'analisi otolitica e oltre 3.000 organismi utilizzati per la descrizione delle distribuzioni di frequenza. Gli esemplari larvali e giovanili, ottenuti tramite pesca sperimentale autorizzata del bianchetto, sono stati analizzati mediante Modal Progression Analysis, che ha evidenziato quattro coorti distinte e tassi di crescita giornalieri (0,32 mm/giorno) in accordo con i valori riportati in letteratura per l'area ligure. Le analisi biometriche degli adulti hanno mostrato una popolazione dominata dalla classe di età 1+, con presenza minore di individui di età superiore, confermando la natura a ciclo vitale breve della specie.

Le relazioni lunghezza-peso indicano una crescita isometrica o debolmente allometrica ($b \approx 3$), mentre l'analisi degli otoliti ha evidenziato simmetria bilaterale e buona concordanza tra lettori ($PA \approx 70\%$). L'integrazione dei dati larvali e adulti ha consentito di stimare i parametri di crescita mediante i modelli di Von Bertalanffy e Gompertz. Entrambi descrivono una crescita rapida nelle prime fasi di vita, seguita da un rallentamento marcato dopo i due anni, con lunghezze asintotiche comprese tra 14 e 16 cm, valori coerenti con altri stock mediterranei quando si considerano anche le fasi giovanili.

I risultati forniscono un quadro completo della dinamica di crescita della sardina nel Mar Ligure, evidenziando l'importanza di includere le prime fasi di vita nelle valutazioni demografiche e la necessità di un monitoraggio continuo in un contesto di crescente variabilità ambientale e pressioni antropiche. Lo studio contribuisce alla definizione di strumenti utili per una gestione sostenibile della risorsa e per la tutela degli stadi giovanili, cruciali per il reclutamento e la resilienza della popolazione.

Abstract

The present thesis provides an integrated analysis of age and growth in *Sardina pilchardus* in the Ligurian Sea, considering the entire ontogenetic cycle, from the larval stages (bianchetto) to adulthood. Sardines play a fundamental ecological role in Mediterranean pelagic ecosystems, as they transfer energy from phytoplankton and zooplankton to higher-level predators, while also representing an economically important resource for coastal fisheries in Liguria. Their high sensitivity to environmental fluctuations further makes them a biological indicator of the ecological status of the Ligurian basin.

The study is based on sampling campaigns carried out in 2024 and 2025, which enabled the collection of 291 individuals for otolith analysis and more than 3,000 organisms used to describe length-frequency distributions. Larval and juvenile specimens, collected during authorized scientific surveys targeting sardine fry (bianchetto), were analyzed using Modal Progression Analysis, which revealed four distinct cohorts and daily growth rates (0,32 mm/day) consistent with values reported in literature for the Ligurian area. Biometric analyses of adults showed a population dominated by the 1+ age class, with fewer individuals belonging to older classes, confirming the short life cycle typical of the species.

Length–weight relationships indicated isometric or slightly allometric growth ($b \approx 3$), while otolith analysis revealed bilateral symmetry and good agreement between readers ($PA \approx 70\%$). The integration of larval and adult data allowed the estimation of growth parameters using both the von Bertalanffy and Gompertz models. Both models describe rapid growth during the early life stages, followed by a marked slowdown after two years, with asymptotic lengths ranging between 14 and 16 cm—values consistent with other Mediterranean stocks when juvenile stages are also considered.

Overall, the results provide a comprehensive picture of sardine growth dynamics in the Ligurian Sea, highlighting the importance of including early life stages in demographic assessments and the need for continuous monitoring in a context of increasing environmental variability and anthropogenic pressures. This study contributes to the development of tools to support sustainable resource management and the protection of juvenile stages, which are crucial for recruitment and population resilience.

Indice

1	Introduzione	5
1.1	L'importanza dei piccoli pelagici nei sistemi marini	5
1.2	Metodi di pesca in Mar Ligure	5
1.2.1	Importanza economica	5
1.2.2	Pesca a circuizione	7
1.2.3	Pesca con la lampara	8
1.2.4	Pesca del bianchetto con la sciabica da natante	9
1.3	Sistematica	10
1.3.1	Sinonimie	10
1.3.2	Nomi internazionali e nomi locali	10
1.4	Morfologia	11
1.5	Il bianchetto	12
1.6	Distribuzione geografica e batimetrica	13
1.6.1	Areale di distribuzione	13
1.6.2	Habitat	15
1.7	Dieta	15
1.8	Maturità sessuale e riproduzione	16
1.9	Età e accrescimento	16
1.10	Gestione e Conservazione	18
2	Materiali e metodi	22
2.1	Area di studio	22
2.2	Estrazione e preparazione degli otoliti	26
2.3	Lettura degli otoliti	27
2.4	Analisi dati	28
3	Scopo della tesi	33
4	Risultati	34
4.1	Distribuzione di frequenza del novellame di sardina (bianchetto) del 2024 e 2025	34
4.2	Distribuzione di frequenza del 2024 e 2025 della sardina	36
4.3	Relazione taglia-peso 2024-25 della sardina	41
4.4	Riproducibilità delle letture degli otoliti nei campioni 2024–2025	42
4.5	Chiave taglia-età adulti di <i>Sardina pilchardus</i>	43
4.6	Relazione taglia-lunghezza otolite	44
4.7	Modelli di crescita	46
5	Discussione	51
6	Conclusioni	55
7	Bibliografia	56
8	Ringraziamenti	62

1 Introduzione

1.1 L'importanza dei piccoli pelagici nei sistemi marini

I piccoli pesci pelagici rappresentano una componente fondamentale degli ecosistemi marini, svolgendo un ruolo chiave nel trasferimento di energia dai livelli trofici inferiori, quali fitoplancton e zooplancton, ai predatori di ordine superiore (Bakun, 2006; Cury et al, 2000). Grazie alla loro elevata abbondanza, alla rapida crescita e alla tendenza a formare grandi banchi, queste specie esercitano un'influenza significativa sulla struttura e sul funzionamento degli ecosistemi pelagici, contribuendo alla regolazione delle reti trofiche e alla produttività complessiva del sistema marino (Checkley et al, 2009).

Nel Mar Ligure, bacino caratterizzato da una marcata eterogeneità ambientale e da una dinamica oceanografica complessa, i piccoli pelagici rivestono un ruolo ecologico di primaria importanza. La presenza di fenomeni di mesoscala, come fronti termici e processi di risalita locale, favorisce un'elevata produttività planctonica, sostenendo popolazioni abbondanti di specie pelagiche costiere, tra cui la sardina *Sardina pilchardus* (Boucher et al, 1987; Relini et al, 2010).

Sardina pilchardus occupa una posizione centrale nella rete trofica del Mar Ligure, nutrendosi prevalentemente di plancton e costituendo una risorsa alimentare essenziale per numerosi predatori, quali pesci di taglia maggiore, cefalopodi, uccelli marini e mammiferi marini (Palomera et al, 2007; Cury et al, 2000). La sua collocazione intermedia nella rete trofica rende la specie particolarmente sensibile alle variazioni ambientali e climatiche, facendo della sardina un importante indicatore dello stato ecologico dell'ecosistema pelagico ligure (Lloret et al., 2015; Tunesi et al., 2005)

1.2 Metodi di pesca in Mar Ligure

1.2.1 Importanza economica

Oltre alla sua rilevanza ecologica, *S. pilchardus* riveste un'elevata importanza economica e sociale nel Mar Ligure, dove rappresenta una delle principali risorse della pesca artigianale e costiera. La sardina contribuisce in modo significativo al sostentamento delle comunità locali e costituisce una specie di grande valore culturale e gastronomico lungo le coste liguri (Relini et al, 2010; Leonart & Maynou, 2003). Pertanto, una gestione sostenibile degli stock di sardina nel Mar Ligure risulta essenziale non solo

per la conservazione degli ecosistemi marini, ma anche per garantire la continuità delle attività di pesca e la stabilità socioeconomica delle comunità costiere (FAO., 2018).



Figura 1: Recupero del pescato nel sacco di una rete a circuizione

In Liguria, secondo quanto riportato dal Fleet Register comunitario (2022), vi sono 148 unità da pesca che presentano in licenza la voce “circuizione”, pari a circa il 30% dell’intera flotta peschereccia. Tuttavia, la maggior parte di queste imbarcazioni afferisce al settore “piccola pesca”, in quanto si tratta di unità di dimensioni contenute (LFT < 12m) ed equipaggio limitato (1-3 persone), che nel corso

dell'anno fanno uso principalmente di attrezzi da posta (reti, palangari etc.) e, solo saltuariamente, si dedicano alla “circuizione” per catturare specie di passaggio, quali orate, ricciole, palamite, bonitti e alletterati. Le unità da pesca che, per tradizione e per caratteristiche tecniche, hanno come attività principale/esclusiva la pesca del “pesce azzurro” (acciuga e/o sardina in primis) sono per la maggior parte motopescherecci superiori ai 12 m (LFT), che svolgono la loro attività in un periodo ristretto dell'anno tra la primavera e l'autunno inoltrato (marzo-ottobre) con equipaggi numerosi (fino a 15 persone).

1.2.2 Pesca a circuizione

La pesca a circuizione è la tecnica tradizionale più utilizzata in mar Ligure per la cattura di pesci pelagici come sardine, acciughe e sgombri. Questo metodo si avvale di una luce intensa, prodotta da una lampara, la quale attira i pesci verso la superficie durante le ore notturne. La luce simula l'effetto della luna piena, richiamando i pesci che sono attratti dal chiarore. La rete da circuizione è una grande rete rettangolare con galleggianti lungo il bordo superiore e pesi lungo il bordo inferiore. Quando la lampara ha attirato i pesci, la barca madre circonda il banco di pesci con la rete, chiudendola rapidamente per intrappolare i pesci all'interno. La rete viene poi tirata a bordo utilizzando verricelli meccanici.

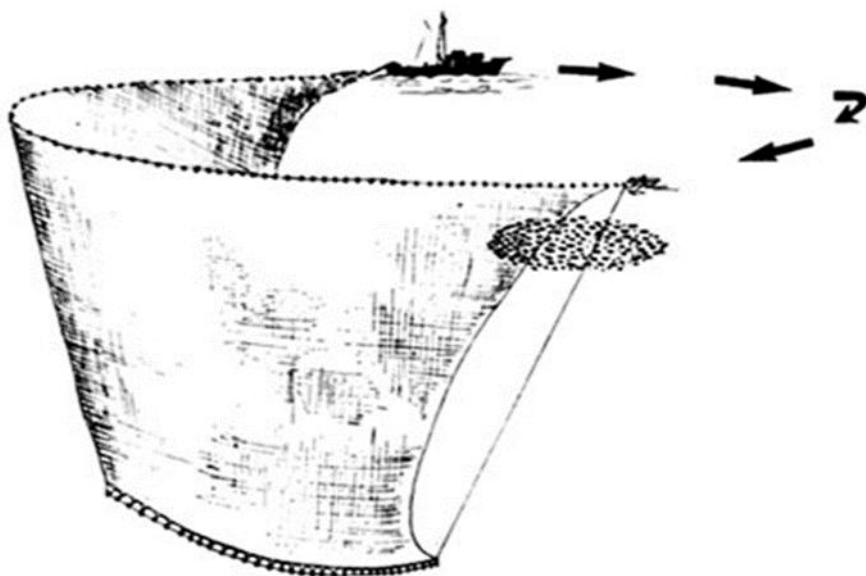


Figura 2: Pesca con reti a circuizione

1.2.3 Pesca con la lampara

La pesca con la lampara è una tecnica tradizionale di circuizione notturna che prevede l'impiego di una fonte luminosa per attrarre i pesci verso la superficie. L'operazione inizia al tramonto, quando una barca più piccola, dotata di una potente lampada, si posiziona in una zona ritenuta promettente e accende la luce per diverse ore, attirando i pesci planctivori come la sardina. Una volta che il banco si è sufficientemente concentrato, la barca madre circonda l'area con una rete a circuizione. La rete viene poi chiusa nella parte inferiore, intrappolando i pesci, e successivamente issata a bordo per lo sbarco. Questo metodo è considerato selettivo, poiché la luce attira principalmente le specie bersaglio, riducendo la cattura accessoria. Inoltre, ha un impatto ambientale contenuto: non danneggia i fondali marini e consente un controllo visivo diretto delle catture, favorendo una gestione sostenibile delle risorse ittiche.



Figura 3: Pesca con la lampara

1.2.4 Pesca del bianchetto con la sciabica da natante

La sciabica a maglia fine in uso nelle marinerie liguri per la cattura del rossetto e del bianchetto è utilizzata da imbarcazioni di modeste dimensioni, il cui equipaggio è spesso costituito da solo due persone, ed è recuperata molto lentamente a bordo con due piccoli “verricelli” (rulli salpa rete) o addirittura a braccia, ad imbarcazione completamente ferma.

La tecnica di pesca con la sciabica prevede la ricerca dei banchi di bianchetto mediante l’uso dell’ecoscandaglio: quando il segnale rileva quantità stimate sufficienti, si procede a calare la sciabica per circondare il banco (fig. 4). Un cavo della rete viene ancorato e munito di boa di segnalazione: - la barca compie un giro tornando verso il punto di partenza (1); - la rete viene salpata a bordo (2).

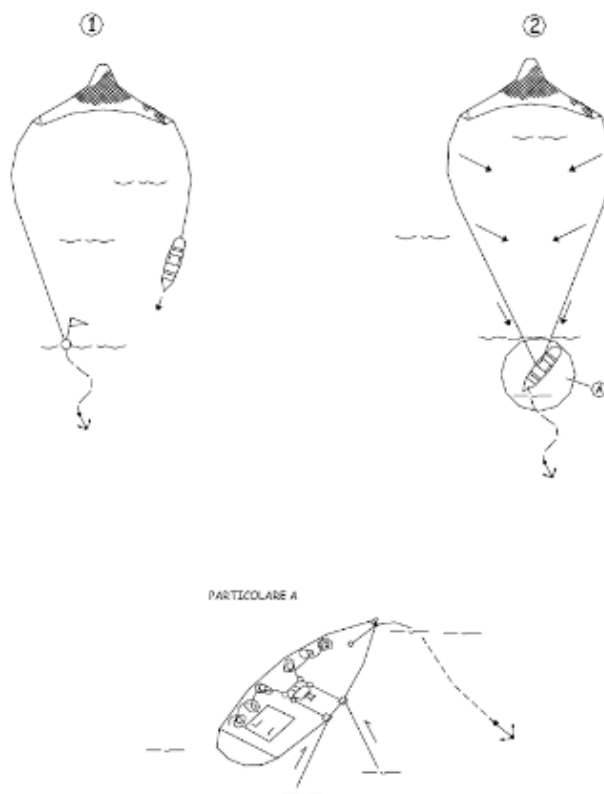


Figura 4: Fasi di cattura con rete a circuizione: (1) un'estremità del cavo della rete viene ancorata e dotata di boa di segnalazione; la barca compie una manovra circolare tornando al punto di partenza per completare la chiusura del cerchio; (2) la rete viene salpata a bordo, intrappolando il banco di pesci; (Particolare A) dettaglio del sistema di recupero della rete a bordo (Ferretti et al., 2002).

1.3 Sistematica

Dominio	<i>Eukaryota</i>
Regno	<i>Animalia</i>
Phylum	<i>Chordata</i>
Subphylum	<i>Vertebrata</i>
Superclasse	<i>Gnathostomata</i>
Classe	<i>Actinopterygii</i>
Ordine	<i>Clupeiformes</i>
Famiglia	<i>Clupeidae</i>
Genere	<i>Sardina</i>
Specie	<i>pilchardus</i>

1.3.1 Sinonimie

Alosa pilchardus, *Arengus minor*, *Clupanodon sardina*, *Clupea laticosta*, *Clupea pilchardus*,
Sardina dobrogica, *Sardina pilchardus sardina*.

1.3.2 Nomi internazionali e nomi locali

Italia: sardina, Francia: sardine, Spagna: sardina, Portogallo/Brasile: sardinha, Regno Unito/Stati Uniti: sardine (per esemplari piccoli), pilchard (per esemplari grandi), Germania: Sardine, Paesi Bassi: Sardien, Grecia: Σαρδέλα (Sardela), Turchia: Sardalya, Russia: Сардина (Sardina), Marocco/Tunisia (arabo):

سردين (Sardeen), Cina (mandarino): 沙丁鱼 (shādīngyú), Giappone: イワシ (Iwashi), Croazia: sardina, Catalogna: sardina.

1.4 Morfologia

Il corpo della sardina, ad eccezione della testa, è ricoperto da grosse squame caduche. Esso è cilindrico con il ventre piuttosto tondeggiante, più compresso nei giovanili, e può raggiungere una lunghezza di 25 cm LT in entrambi i sessi. Ha i fianchi ed il ventre bianco-argentei, mentre il dorso è verde-azzurro con riflessi iridescenti. Sul fianco, a partire dall'opercolo branchiale e fino ad oltre la pinna dorsale, è presente una fila di macchie scure, poco visibili in vivo. La bocca è rivolta verso l'alto e l'occhio è grande. Il margine posteriore dell'apertura branchiale è arrotondato e l'opercolo è caratterizzato da distinte strie (da 3 a 5) disposte a raggiera e dirette verso il basso. Le pinne ventrali si originano in corrispondenza della metà della pinna dorsale. La pinna caudale è biloba. Il numero totale di raggi molli varia da 13 a 21 nella dorsale e da 12 a 23 nella anale. Tutte le pinne sono prive di raggi spinosi. Sulla base di differenze somatiche, la sardina è considerata una specie polimorfica (Alegría-Hernández et al., 1985). Sebbene studi genetici abbiano descritto la struttura della popolazione della sardina come piuttosto omogenea (Spanakis et al., 1989; Magoulas, 2006), alcuni Autori riportano che essa sia suddivisa in 2 distinte sottospecie, quella atlantica *Sardina pilchardus pilchardus* e quella mediterranea *Sardina pilchardus sardina* (Alegría-Hernández et al., 1985; Atarhouch, 2007).

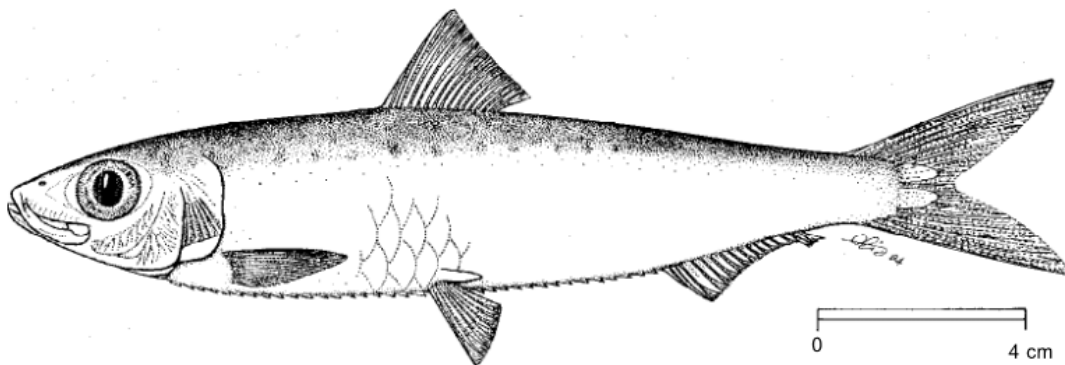


Figura 5: *Sardina pilchardus*

Rispetto a *Sardinella aurita*, anch'essa una specie pelagica della famiglia Clupeidae, diffusa nel Mediterraneo e nell'Atlantico orientale, si osservano somiglianze morfologiche ma anche differenze

diagnostiche rilevanti. *S. aurita* ha un corpo più slanciato e compresso lateralmente, una linea ventrale liscia o debolmente carenata priva di scudetti ossei evidenti, un opercolo ampio e sottile con una caratteristica macchia dorata post-opercolare, e scaglie più grandi e facilmente decidue; (Whitehead et al, 1988; Whitehead, 1985; Froese R. & Pauly, 2024; FAO, 2001). Al contrario, *S. pilchardus* presenta un corpo più tozzo e compatto, una linea ventrale con scudetti ossei ben sviluppati, un opercolo corto e robusto privo di pigmentazioni dorate, e una serie di macchie scure lungo i fianchi. Inoltre, *S. aurita* ha occhi proporzionalmente più grandi, una bocca più ampia e una pinna dorsale leggermente più arretrata, riflettendo adattamenti alimentari distinti all'interno dei Clupeidi (Russell & Carpenter, 1996).

1.5 Il bianchetto

Il termine bianchetto indica comunemente gli stadi tardo-larvali e giovanili di alcune specie di Clupeidi, in particolare della sardina europea (*Sardina pilchardus*, Walbaum 1792) e, in misura minore, dell'acciuga (*Engraulis encrasicolus*, Linnaeus 1758). Si tratta di individui di piccole dimensioni, generalmente compresi tra 20 e 40 mm di lunghezza totale, caratterizzati da corpo trasparente o biancastro e da una limitata differenziazione morfologica (Fig. 6).

Il bianchetto rappresenta una fase biologica estremamente delicata del ciclo vitale della sardina, poiché coincide con un periodo cruciale per la sopravvivenza, il reclutamento e la dinamica delle popolazioni (Romanelli et al, 2002; La Mesa, 2009).



Figura 6: Bianchetto

Dal punto di vista ecologico, il bianchetto riveste un ruolo chiave nella rete trofica pelagica mediterranea, rappresentando una risorsa alimentare fondamentale per numerosi predatori pelagici e demersali, oltre che per uccelli marini e grandi vertebrati marini (Stergiou & Karpouzi, 2002; Fossi et al, 2018)

La pesca del bianchetto è una attività tradizionale costiera, storicamente praticata in diverse regioni italiane, quali Liguria, Sicilia, Calabria e Campania. Essa veniva effettuata mediante reti a maglia molto fine (1–5 mm), come piccole reti a strascico costiero o reti di circuizione, localmente denominate sciabica (Marano et al., 1981; Romanelli et al, 2002). Tali attrezzi, pur garantendo elevate catture, risultavano scarsamente selettivi, con potenziali impatti sugli habitat costieri e sulle specie non bersaglio.

A causa della pressione esercitata sugli stadi giovanili e dei potenziali effetti negativi sul reclutamento, la pesca del bianchetto è stata progressivamente regolamentata. In Italia, periodi di pesca limitati erano inizialmente consentiti tramite decreti regionali, generalmente tra gennaio e marzo (Cefali et al., 1997). Tuttavia, con l'entrata in vigore del Regolamento (CE) n. 1967/2006, che vieta la cattura di stadi giovanili e l'uso di reti con maglie inferiori a 14 mm, la pesca del bianchetto è stata definitivamente chiusa a partire dal 2010 (EC, 2006). Tale provvedimento si inserisce nel quadro della Politica Comune della Pesca dell'Unione Europea, orientata alla tutela delle risorse ittiche e delle aree nursery (Cardinale et al., 2010). Storicamente, il bianchetto ha rappresentato un prodotto gastronomico di elevato valore economico (20–40 €/kg), molto apprezzato nella tradizione culinaria mediterranea (Armani et al., 2011; La Mesa et al. , 2009). Tuttavia, la sua cattura interessa una fase critica del ciclo vitale della specie e può compromettere il reclutamento e la sostenibilità degli stock (Carpi et al., 2017)

La tutela degli stadi giovanili di *Sardina pilchardus* è pertanto essenziale per garantire la conservazione delle popolazioni, la funzionalità degli ecosistemi marini e la sostenibilità a lungo termine delle attività di pesca nel Mediterraneo.

1.6 Distribuzione geografica e batimetrica

1.6.1 Areale di distribuzione

La sardina (*Sardina pilchardus*) è una specie pelagica ampiamente distribuita nell'Oceano Atlantico nord-orientale e nel Mar Mediterraneo. Nell'Atlantico, la sua presenza si estende dal Mare Celtico e dal

Mare del Nord meridionale fino alle coste della Mauritania e del Senegal, includendo anche le acque circostanti le Azzorre, Madeira e le Isole Canarie (Parrish et al, 1989). In Mediterraneo, la specie è particolarmente abbondante nel settore occidentale e nel Mar Adriatico, mentre risulta meno comune nel Mar di Marmara e nel Mar Nero (Froese & Pauly, 2015). In Italia, è presente in tutti i mari, con popolazioni significative lungo le coste tirreniche e adriatiche (Relini & Lanteri, 2010). La sardina vive in ambiente pelagico fino a profondità di circa 180 metri, ma si concentra prevalentemente tra i 15 e i 55 metri, dove trova condizioni ottimali per l'alimentazione e la riproduzione (Fischer et al, 1987a). Studi condotti nell'Adriatico, attraverso tecniche di marcatura, hanno evidenziato due principali cicli migratori stagionali: una migrazione primaverile dalla costa verso il largo, legata alla necessità di ricostituire le riserve lipidiche dopo il periodo riproduttivo, e una migrazione tardo-estiva in direzione costiera, che coincide con l'inizio della maturazione gonadica in condizioni ambientali favorevoli (Mužinić, 1973a; Krvarić & Mužinić, 1950).

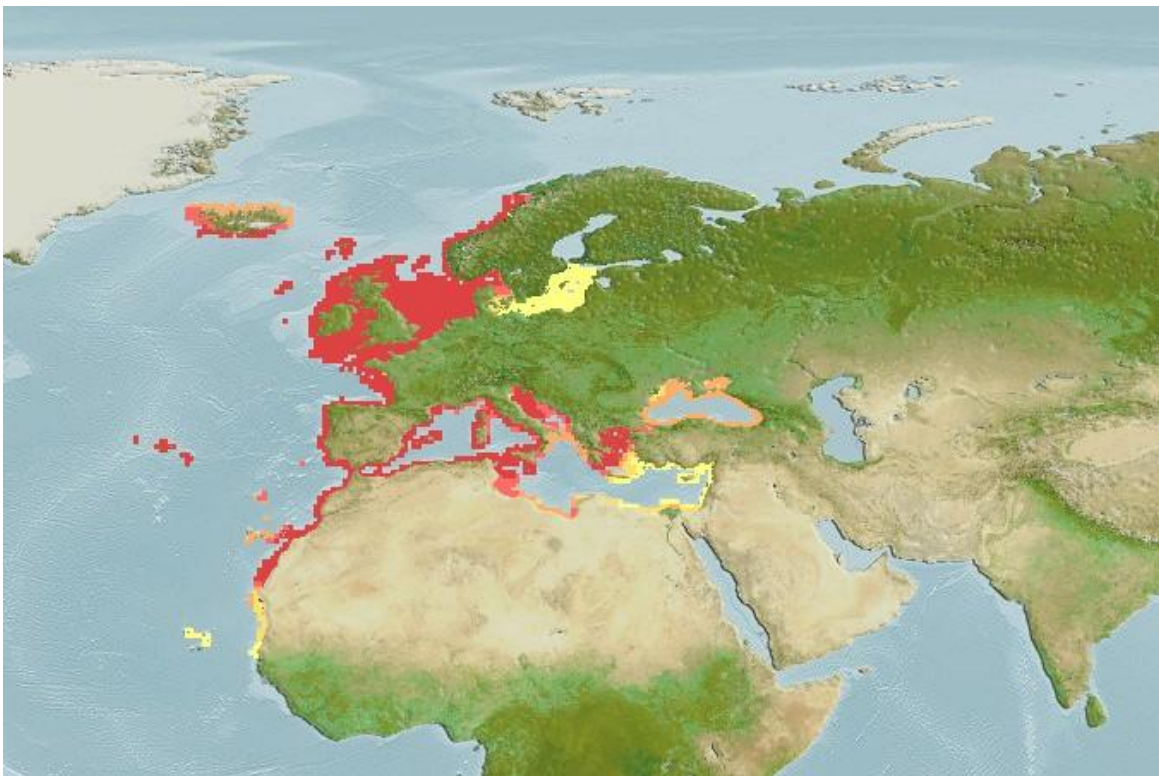


Figura 7: Areale di distribuzione

1.6.2 Habitat

Sardina pilchardus è una specie pelagica eurialina ed euriterma, capace di tollerare ampie variazioni ambientali, con preferenze per salinità comprese tra 27 e 41 psu e temperature tra 10 e 20 °C (Palomera et al., 2007). Vive prevalentemente nella fascia pelagico-neritica, tra i 10 e i 180 metri di profondità, con densità maggiori tra i 25 e i 100 metri, in particolare lungo la piattaforma continentale (Varela et al., 2021). La specie mostra un comportamento fortemente gregario, formando banchi numerosi già dallo stadio post-larvale. Questi banchi possono essere mono o plurispecifici e si organizzano secondo un principio di “gregarismo per taglia”, che favorisce l’aggregazione di individui di dimensioni simili, anche appartenenti a specie diverse (Giannoulaki et al., 2005). La distribuzione orizzontale e verticale della sardina è influenzata da fattori ambientali come temperatura, salinità e disponibilità di zooplancton, ma anche da pressioni antropiche e predazione, rendendola un indicatore sensibile delle variazioni climatiche e oceanografiche nel bacino occidentale del Mediterraneo (Borme et al., 2022).

1.7 Dieta

Nel Mediterraneo occidentale, *Sardina pilchardus* mostra una dieta prevalentemente planctivora, con una marcata selettività verso prede zooplanctoniche come copepodi calanoidi, cladoceri e appendiculari. Studi condotti nel Golfo di Trieste e lungo le coste spagnole e francesi hanno evidenziato una variazione stagionale e spaziale nella composizione della dieta, influenzata dalla disponibilità trofica e dallo stadio vitale degli individui. In particolare, durante la primavera e l’estate, la sardina tende a consumare maggiormente copepodi e appendiculari, mentre in autunno e inverno aumenta l’assunzione di fitoplancton e microzooplancton, suggerendo una strategia alimentare flessibile (Borme et al., 2022; Preciado et al., 2021). L’attività trofica è prevalentemente diurna, favorita dalla morfologia retinica priva di tapetum lucidum, che limita la visione in condizioni di scarsa luminosità (McEwan, 1938; Vilter, 1950). Al crepuscolo, i banchi si spostano verso strati più profondi per ridurre il rischio di predazione (Zwolinski et al., 2007). A differenza di altri clupeidi che si alimentano per filtrazione passiva, la sardina mostra comportamenti di selezione attiva delle prede, un adattamento che potrebbe ottimizzare l’efficienza alimentare in ambienti a bassa densità planctonica (Garrido et al., 2007). I principali predatori delle larve includono *Scomber scombrus* e *Lepidopus caudatus*, mentre gli adulti sono preda di *Merluccius merluccius*, *Thunnus thynnus*, altri grandi pelagici, uccelli marini e cetacei (Coll et al., 2007).

1.8 Maturità sessuale e riproduzione

Sardina pilchardus è una specie a fecondazione esterna con strategia riproduttiva di tipo batch-spawner, caratterizzata da ovulazioni multiple durante la stagione di riproduzione, che avvengono in modo asincrono (Ganias et al., 2003). Studi recenti condotti nel Mediterraneo centrale e nell'Adriatico medio-occidentale confermano che la maturità sessuale viene raggiunta generalmente entro il primo anno di vita, con una taglia di prima maturità (L50) variabile tra 10,5 e 12,5 cm nei maschi e tra 11,5 e 13 cm nelle femmine, a seconda dell'area geografica e delle condizioni ambientali. Il periodo riproduttivo mostra una marcata stagionalità: in Adriatico si estende principalmente da novembre a maggio, con un picco tra dicembre e febbraio, mentre nel Mediterraneo centrale si concentra tra ottobre e marzo (Chemello et al., 2023; Basilone et al. G. F., 2021). La riproduzione avviene in acque con temperature comprese tra 12 e 16 °C e salinità tra 35 e 39 psu, a profondità che variano tipicamente tra 50 e 120 metri. La fecondità assoluta può superare le 12.000 uova per femmina per stagione, con una fecondità relativa che si aggira intorno a 900–1000 uova per grammo di peso corporeo (Basilone et al. G. F., 2021). La durata dell'incubazione delle uova è fortemente influenzata dalla temperatura: a 18 °C la schiusa avviene in circa 46 ore, mentre a 13 °C può richiedere fino a 88 ore (Gamulin & Hure, 1955). Questi parametri sono fondamentali per comprendere la dinamica di popolazione della specie e per una gestione sostenibile degli stock nel Mediterraneo.

1.9 Età e accrescimento

Sardina pilchardus è una specie pelagica a ciclo vitale relativamente breve, con una longevità massima stimata tra 5 e 8 anni nel bacino del Mediterraneo, anche se in alcune aree, come le acque algerine, sono stati osservati individui fino a 10 anni (Ferhani et al., 2024). La crescita è rapida nei primi mesi di vita, con un'accelerazione significativa durante le fasi larvali e giovanili, favorita da condizioni ambientali ottimali come temperature comprese tra 13 e 18 °C e abbondanza di zooplancton. La deposizione giornaliera di incrementi negli otoliti sagitta durante lo stadio larvale è stata confermata sia in individui allevati che selvatici, con la formazione del primo anello già al momento della schiusa (Alemany & Álvarez, 1994).

Nel Mediterraneo centrale e occidentale, la crescita larvale giornaliera varia tra 0,20 e 0,38 mm/giorno,

con valori più elevati registrati in primavera, in corrispondenza dei picchi di produttività primaria (Gaamour & Khemiri, 2010; Basilone et al. G. F., 2021). L'accrescimento post-larvale e giovanile è influenzato da fattori ambientali come temperatura, salinità e disponibilità trofica, ma anche da pressioni antropiche e cambiamenti climatici. Ad esempio, nel Golfo del Leone, si è osservato un rallentamento della crescita e una riduzione della taglia media degli adulti in seguito a cambiamenti nel regime trofico e nella disponibilità di ossigeno disciolto (Van Beveren et al., 2014; Saraux et al., 2019).

La maturità sessuale viene generalmente raggiunta entro il primo anno di vita, con una taglia di prima maturità (L_{50}) che varia tra 10,5 e 13 cm nei maschi e tra 11,5 e 13,5 cm nelle femmine, a seconda della GSA e delle condizioni trofiche locali (Basilone et al. G. F., 2021; GFCM, 2020). I parametri di crescita stimati mediante l'equazione di von Bertalanffy mostrano una lunghezza asintotica (L_{∞}) compresa tra 18 e 22 cm e un coefficiente di crescita (k) tra 0,30 e 0,56, con differenze significative tra le diverse GSA (Mustac' et al., 2020; GFCM, 2020; Ferhani et al., 2024). In particolare, nelle acque tunisine, (Gaamour & Khemiri, 2010) hanno riportato valori di L_{∞} pari a 20,5 cm e $k = 0,41$, mentre nello Ionio e nel Canale di Sicilia i valori risultano leggermente inferiori, suggerendo una crescita più lenta ma una maggiore longevità potenziale (Badreldin et al., 2025).

L'analisi degli otoliti, in particolare delle sagitte, rappresenta lo strumento principale per la determinazione dell'età e per la ricostruzione dei pattern di crescita. Questi elementi calcarei, costituiti prevalentemente da aragonite, crescono per deposizione concentrica di strati annuali e stagionali, che possono essere letti e interpretati con tecniche ottiche o microchimiche (Fig. 8).

La validazione della periodicità degli anelli è stata confermata da studi sperimentali e da analisi di coerenza tra lettori, con percentuali di concordanza superiori all'85% (Ferhani et al., 2024). Inoltre, l'analisi microchimica degli otoliti sta emergendo come strumento utile per tracciare le migrazioni, identificare le unità di stock e ricostruire le condizioni ambientali vissute dall'individuo, rendendo gli otoliti veri e propri archivi biologici (Badreldin et al., 2025).

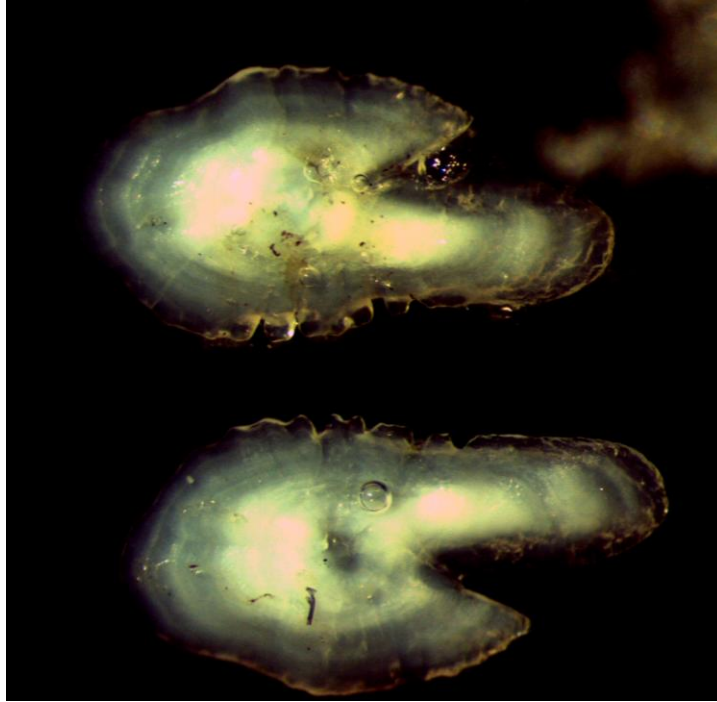


Figura 8: Coppia di otoliti di *Sardina pilchardus*

Nel contesto della gestione delle risorse alieutiche, la conoscenza accurata dei parametri di crescita, longevità e maturità sessuale di *S. pilchardus* è fondamentale per la valutazione degli stock e per la definizione di misure di conservazione efficaci. Le differenze regionali nei parametri biologici suggeriscono la necessità di approcci di gestione spazialmente espliciti, che tengano conto della struttura metapopolazionale della specie nel Mediterraneo (GFCM, 2020; Basilone et al. G. F., 2021). L'integrazione di dati biologici, ambientali e genetici rappresenta una direzione promettente per migliorare la comprensione della dinamica di popolazione della sardina e garantire una gestione sostenibile della risorsa.

1.10 Gestione e Conservazione

Sardina pilchardus è attualmente classificata nella Lista Rossa dell'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura (IUCN) nella categoria Least Concern (LC) a livello globale. Tale classificazione indica che, considerando l'intera area di distribuzione della specie, essa non soddisfa i criteri di rischio previsti per le categorie di minaccia, presentando popolazioni complessivamente

numerose e una distribuzione geografica ampia (Fig. 9).

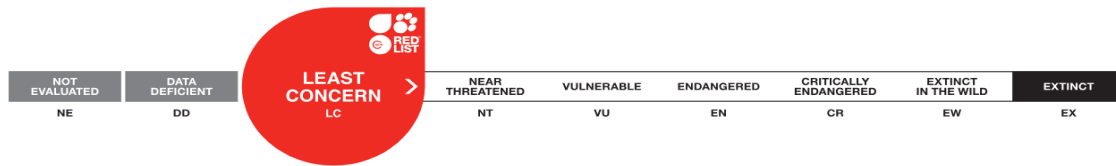


Figura 9: Red list IUCN a livello globale

Tuttavia, valutazioni condotte a scala regionale, come la European Red List of Marine Fishes, evidenziano una situazione differente per alcune aree europee, dove *Sardina pilchardus* risulta classificata come Near Threatened (NT). Questo status riflette segnali di declino locale delle popolazioni, attribuibili principalmente a fenomeni di sovrasfruttamento della risorsa, variazioni ambientali e cambiamenti climatici che incidono sulla disponibilità trofica e sul successo riproduttivo (Fig. 10).



Figura 10: Red list IUCN a livello europeo

La discrepanza tra la valutazione globale e quella regionale sottolinea l'importanza di considerare la scala geografica nelle analisi di conservazione e gestione delle risorse ittiche. Pur non essendo attualmente considerata una specie minacciata a livello mondiale, *Sardina pilchardus* richiede pertanto misure di gestione sostenibile, in particolare nelle aree in cui sono stati documentati trend negativi, al fine di prevenire un ulteriore deterioramento dello stato di conservazione.

Nel contesto delle GSA 9 e 10, recenti valutazioni condotte con il modello SPiCT (*Stochastic Production model in Continuous Time*) hanno fornito un quadro quantitativo aggiornato dello stato dello stock

(Musumeci, 2023).

L'analisi, basata su dati di sbarco (1994–2023) e su indici di abbondanza derivati dai survey acustici MEDIAS e a strascico MEDITS, ha evidenziato una situazione di sfruttamento sostenibile: la biomassa corrente (B_c) è stimata in 30.418 tonnellate, con un rapporto B/B_{target} pari a 1,63 e B/B_{lim} pari a 5,45, ben al di sopra delle soglie biologiche di sicurezza. La mortalità da pesca attuale ($F_c = 0,04$) risulta inferiore al valore di riferimento ($F/F_{target} = 0,13$), suggerendo margini per un potenziale incremento delle catture, pur con la necessità di cautela nella definizione di nuove opportunità di pesca (Fig. 11).

Stock status indicators:

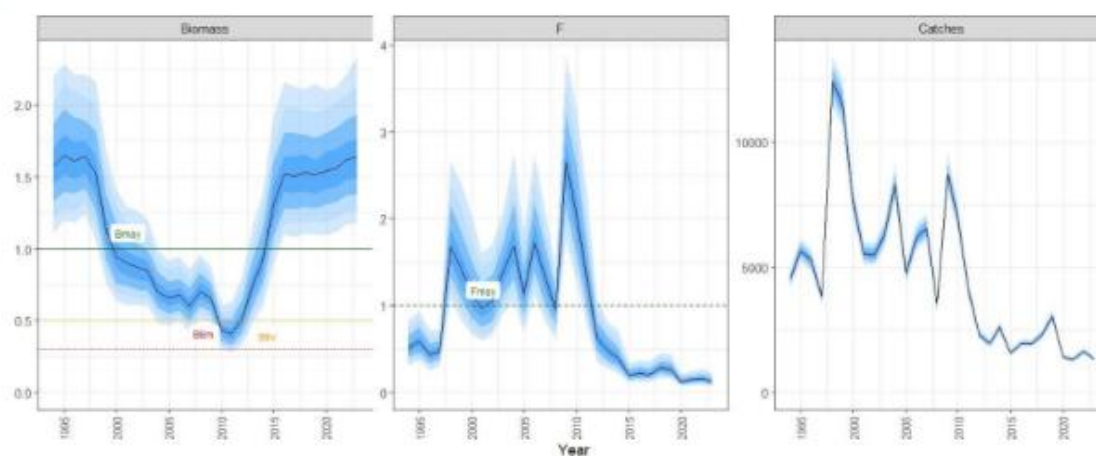


Figura 11: Indicatori di stato dello stock di *Sardina pilchardus* nelle GSA 09 e 10 (F_c , B_c , F/F_{target} , B/B_{target} , B/B_{lim} – SPiCT 2023) (da Musumeci, 2023).

Le proiezioni a breve (2026) e medio termine (2030) indicano che scenari di incremento moderato dello sforzo (fino a 0,9 F_{cur}) potrebbero mantenere la biomassa sopra i limiti biologici, mentre aumenti superiori (1,1–1,2 F_{cur}) comporterebbero una riduzione significativa della biomassa e un avvicinamento ai limiti di rischio ($B/B_{lim} < 4$) (Musumeci, 2023) (Fig. 12). Risulta quindi di massima importanza mantenere la mortalità da pesca entro livelli precauzionali, soprattutto in un contesto di incertezza ambientale e variabilità interannuale della produttività (Saraux et al., 2019).

La gestione efficace della sardina richiede quindi un monitoraggio continuo dei parametri biologici chiave (età, accrescimento, maturità sessuale) e l'adozione di strategie adattative basate su modelli quantitativi robusti (GFCM, 2020). L'analisi degli otoliti, in particolare, rappresenta uno strumento

cruciale per la stima dell'età e della crescita, fornendo informazioni essenziali per la valutazione dello stato degli stock (Ferhani et al., 2024). Inoltre, la crescente applicazione di approcci ecosistemici e la considerazione delle dinamiche metapopolazionali sono fondamentali per garantire la sostenibilità della risorsa nel lungo termine, in linea con i principi della Politica Comune della Pesca e delle raccomandazioni della GFCM (Basilone et al. G. F., 2021).

Table 2. Sardine (*Sardina pilchardus*) in GSAs 9 and 10. Summary of F-based short-term forecast scenarios for 2026.

Scenario	C2026	F2026/Fmsy	B2026/Bmsy	B2026/Bthr	B2026/Blim
Fcur	3657.2	0.363	1.655	3.31	5.516
0.8Fcur	4024.4	0.409	1.619	3.238	5.396
0.9Fcur	4702.9	0.5	1.548	3.095	5.159
1.1Fcur	5015	0.545	1.513	3.026	5.043
1.2Fcur	7231.6	0.998	1.192	2.384	3.973
Fmsy	6974.4	0.924	1.241	2.481	4.135

Table 3. Sardine (*Sardina pilchardus*) in GSAs 9 and 10. Summary of F-based medium-term forecast scenarios for 2030.

Scenario	C2030	F2030/Fmsy	B2030/Bmsy	B2030/Bthr	B2030/Blim
Fcur	3650.8	0.363	1.652	3.304	5.507
0.8Fcur	3997.1	0.409	1.608	3.216	5.359
0.9Fcur	4618.5	0.5	1.52	3.04	5.067
1.1Fcur	4894.2	0.545	1.476	2.953	4.922
1.2Fcur	6455	0.998	1.064	2.128	3.546
Fmsy	6338.8	0.924	1.127	2.255	3.758

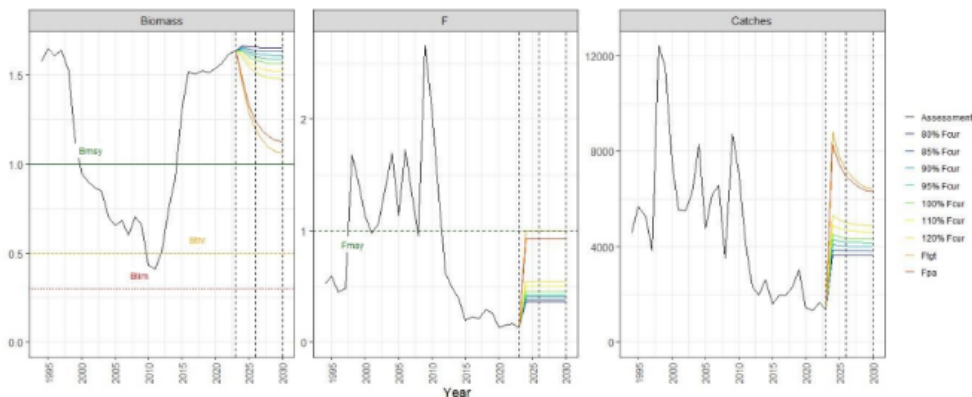


Figura 12: Scenari previsionali a breve (2026) e medio termine (2030) per la sardina nelle GSA 09 e 10 in funzione di diversi livelli di mortalità da pesca ($F_{cur} \pm 20\%$) (da Musumeci, 2023)

2 Materiali e metodi

2.1 Area di studio

Il bacino del Mar Ligure è una delle 30 Sub-Aree Geografiche (Geographic Sub Areas, GSAs) in cui viene suddiviso il Mar Mediterraneo e afferente alla GSA9 (Mar Ligure e Tirreno centro settentrionale). Su quest'area, che si estende per oltre 42.000 km² lungo 1.245 km di costa, si affacciano i Compartimenti marittimi di Imperia, Savona, Genova, La Spezia, Marina di Carrara, Viareggio, Livorno, Portoferraio, Civitavecchia, Roma-Fiumicino e Gaeta. La circolazione dell'acqua mediterranea è di tipo termo-alino, similmente a quanto accade con il cosiddetto “nastro trasportatore” che agisce a scala planetaria negli oceani della Terra.

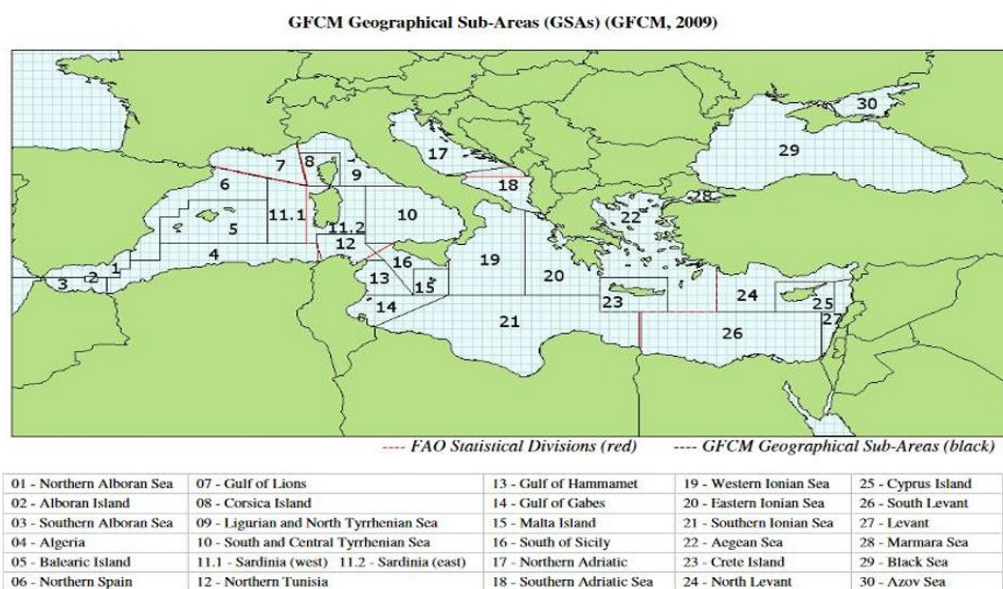


Figura 13: Geographic Sub-Areas (GSAs) nel Mar Mediterraneo. Risoluzione 2007, emanata nel 2009 (GFCM - FAO).

Il Mar Ligure si trova nella parte nord-occidentale del Mediterraneo. Su di esso si affacciano la Costa Azzurra, la costa settentrionale della Corsica, la costa ligure e parte della costa toscana. Il confine sud-occidentale è individuato dalla linea immaginaria che congiunge Capo Revellata (Corsica) con l'isola di Hyeres, mentre quello sud-orientale è fissato dalla linea tra Capo Corso (nei pressi dell'isola di Capraia) ed il Golfo di Baratti (Piombino). Questo mare è esteso circa 50.000 Km² considerando i confini

geografici delle coste liguri e provenzali a nord, della Corsica a sud ed il canale della Corsica inteso come separazione e/o collegamento con il Mar Tirreno. Nel Mar Ligure i movimenti delle masse d'acqua già menzionati sono resi complessi dalla conformazione del profilo batimetrico: la piattaforma continentale all'estremo levante è discretamente estesa e scende gradualmente entro i 1000 metri di profondità, mentre è particolarmente ridotta a ponente, dove importanti canyon incidono la scarpata continentale che raggiunge rapidamente i 2.700 m di profondità. La corrente ligure-provenzale, che scorre verso ovest ad una certa distanza dalla costa, produce un fronte geostrofico permanente, parallelo alle batimetriche (Astraldi et al, 1994; Millot, 1999). Il fronte, in sinergia con i venti settentrionali, genera fenomeni di upwelling di acqua intermedia levantina (LIW). A complicare l'andamento generale delle correnti più in prossimità della linea di costa intervengono numerosi fattori locali come le strutture antropiche, il microclima, le precipitazioni, la variazione stagionale dell'idrodinamismo e degli apporti fluviali, le già ricordate risalite per effetto dei venti settentrionali oppure l'affondamento delle acque accumulate verso costa sotto l'influenza dei venti meridionali da libeccio e da scirocco. Le conseguenze sono anomalie localizzate di circolazione, temperatura, salinità e torbidità, che in qualche misura condizionano la presenza e la distribuzione degli organismi marini, sensibili alle variazioni dei fattori fisici, chimici e biologici dell'ambiente in cui vivono (Petrillo et al, 1998). Le fluttuazioni di questo andamento generalizzato delle correnti dipendono, come detto poc'anzi, da fattori morfologici e stagionali a scala di bacino e dalle peculiarità a meso- e microscala. Tuttavia, le modificazioni climatiche che si stanno verificando negli ultimi decenni hanno causato alterazioni molto rilevanti, che in parte sono state riassorbite dal sistema e in parte permangono, con effetti futuri ancora sconosciuti.

Nel Mar Ligure la maggiore piovosità invernale è associata all'incremento della forza dei venti settentrionali ed all'aumento della corrente superficiale che, attraverso il canale della Corsica, contribuisce a rinforzare la circolazione ciclonica tipica del bacino ligure. Si innesca in tal modo la risalita di masse d'acqua profonda nelle aree di divergenza del fronte ligure-provenzale. Conseguenza positiva, dal punto di vista dell'attività alieutica, è l'incremento delle attività biologiche, che culminano con una crescita dell'abbondanza del mesozoo plancton, alimento base del pesce azzurro, grazie alle condizioni più favorevoli poiché ricche di nutrimento localizzata nelle zone di fronte in contrasto con la più frequente condizione di povertà generalizzata del Mar Ligure.

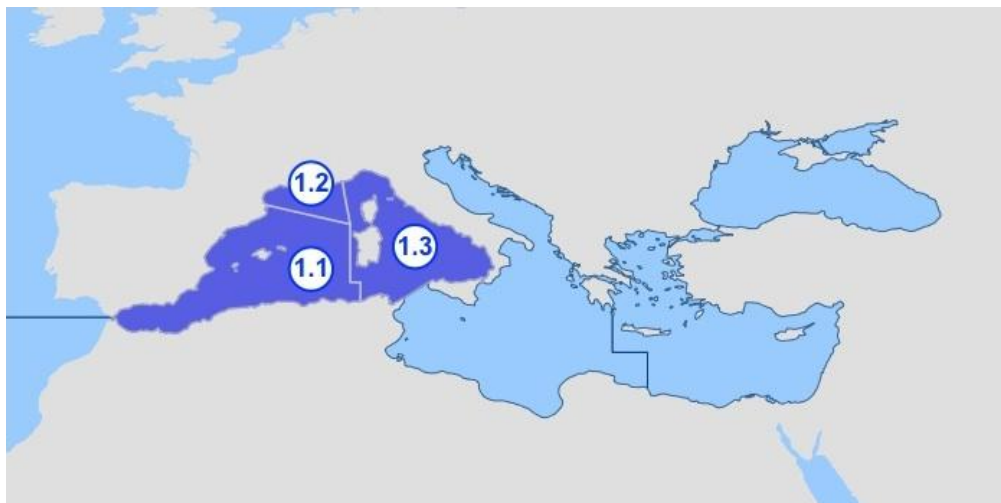


Figura 14: Zone FAO Mediterraneo Occidentale

Nello studio sono stati analizzati complessivamente 291 esemplari di *Sardina pilchardus*, provenienti da due annate distinte (2024 e 2025) della pesca a circuizione. Gli esemplari sono stati prelevati lungo la sotto-sotto area FAO 37.1.3 – Mar Ligure e Mar Tirreno, appartenete alla sotto area FAO 37.1.3 che fa riferimento al Mar Mediterraneo Occidentale (Fig. 14).

Il numero di individui analizzati per ciascun anno è riportato di seguito:

- 2024: 202 esemplari (8 campionamenti)
- 2025: 89 esemplari (4 campionamenti)

Di seguito la tabella con le date dei campionamenti, e gli esemplari analizzati per ogni uscita (Tab. 1).

Nel corso delle campagne di campionamento, sono stati raccolti rispettivamente 2318 esemplari adulti nel 2024 e 1080 nel 2025, i quali utilizzati per un'analisi descrittiva delle distribuzioni di frequenza calcolando i principali parametri statistici (media, deviazione standard, moda, mediana, asimmetria e curtosi) per ciascun anno, al fine di caratterizzare la struttura dimensionale della popolazione e confrontarne l'evoluzione interannuale.

Al tutto sono stati integrati i campioni derivati dalle campagne di pesca sperimentale al bianchetto svolte nel 2024 e nel 2025 effettuate in regime di pesca sperimentale con la sciabica da natante in Mar Ligure.

Tabella 1: Date di campionamento e n° di esemplari analizzati

2024	N°	2025	N°
20/03/24	15	09/04/25	26
25/04/24	20	12/06/25	30
14/05/24	24	26/06/25	18
28/05/24	28	30/09/25	15
26/06/24	33		
09/07/24	26		
23/07/24	29		
22/08/24	27		

Nei giorni seguenti al campionamento tutti gli organismi sono stati sottoposti a misurazioni biometriche: la lunghezza totale (LT) è stata rilevata mediante ittiometro con una precisione di 0,5 cm per le sardine adulte e 0,1 mm per le larve (bianchetti). Il peso corporeo è stato determinato utilizzando una bilancia da laboratorio con precisione pari a 0,1 (Fig. 15). Per ogni giornata di campionamento il numero di organismi catturati era maggiore di quelli analizzati, la scelta degli esemplari da dedicare all'estrazione degli otoliti è stata fatta mediante selezione casuale di 3-4 individui per ciascuna classe di lunghezza presente.



Figura 15: Ittiometro e bilancia di precisione utilizzati per rilevare la lunghezza e il peso singolo degli esemplari campionati.

2.2 Estrazione e preparazione degli otoliti

L'estrazione avviene attraverso la parte posteriore della testa (Carbonara & Follesa, 2019). In seguito gli otoliti vengono lavati all'interno di una piastra Petri (immersi in acqua ossigenata per 60s) per rimuovere il materiale organico, quindi asciugati e conservati in contenitori rigidi di plastica posizionati all'interno di rack datati.

Finito il processo di estrazione e pulitura ogni otolite è stato posizionato all'interno di una piastra Petri riempita con acqua demineralizzata e sono state scattate delle immagini digitali con un acquirente d'immagine LEICA DC100 con un ingrandimento di 2,5 oppure di 4, a seconda della grandezza dell'otolite (Fig. 16). Nel mentre è stata eseguita la prima lettura.

Dalle immagini acquisite è stato inoltre possibile effettuare le misure del diametro degli otoliti tramite il software IMAGE J (Rasband, 2023; version 1.54g); per ogni otolite si è misurato:

- Lunghezza totale;
- Lunghezza del raggio;

Le misurazioni vengono effettuate sull'asse maggiore che passa attraverso il nucleo nell'area posteriore dell'otolite (postrostrum), e viene sempre indicata la natura del bordo (opaco o traslucido) (Fig. 16).

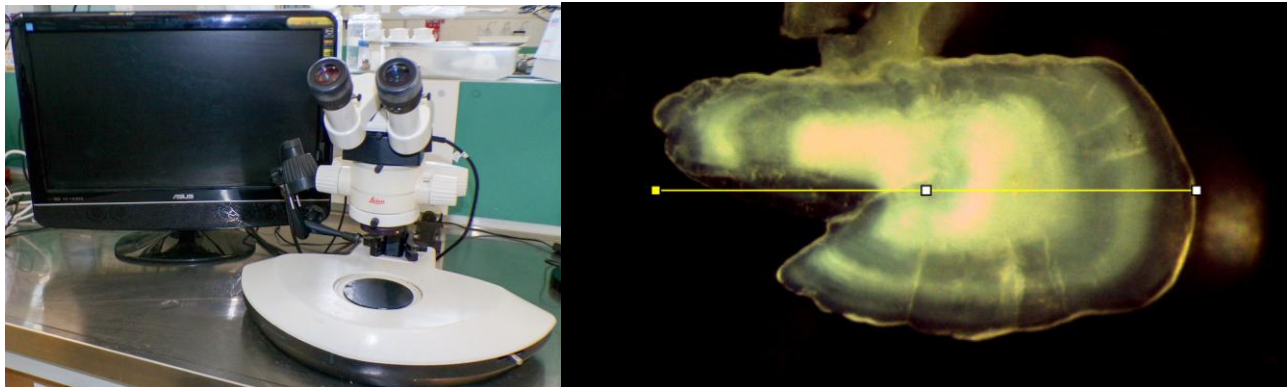


Figura 16: Binoculare stereoscopico con telecamera per l'acquisizione delle immagini e misurazione del diametro di un otolite.

2.3 Lettura degli otoliti

La lettura è il processo che permette di determinare l'età dell'animale attraverso l'osservazione delle bande presenti sull'otolite. La scelta del metodo di lettura è stata in parte effettuata seguendo quanto riportato nel manuale FAO (Carbonara & Follesa, 2019), in accordo con il picco del periodo riproduttivo durante i mesi invernali, la data di nascita è stata fissata al 1° gennaio (Panfilì et al., 2002).

La determinazione dell'età si è ottenuta conteggiando la totalità delle bande di accrescimento presenti all'interno delle strutture, che corrispondono a una deposizione stagionale; un anno di vita dell'animale corrisponde alla deposizione di una banda opaca (oltre al corpo centrale dell'otolite). Quindi sono presenti:

- banda ialina cioè quella formata generalmente durante il periodo di crescita lenta (banda più sottile), in cui le condizioni sono meno favorevoli (autunno-inverno) (Fig. 17);



Figura 17: Banda ialina

- banda opaca cioè quella formata generalmente durante il periodo di crescita veloce (banda più larga), in cui le condizioni trofiche e ambientali sono più favorevoli (primavera-estate) (Fig. 18).

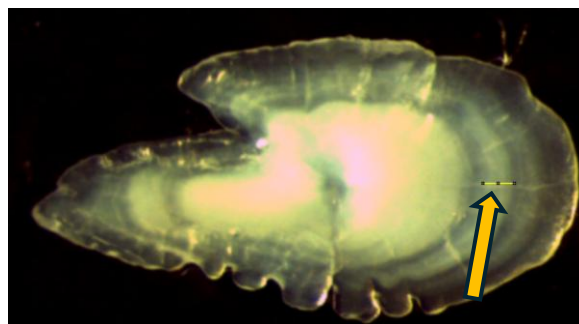


Figura 18: Banda opaca

La lettura delle bande di accrescimento è stata ripetuta due volte dopo circa 2 settimane, per una maggiore attendibilità e replicabilità dei dati; se il disaccordo permaneva questa veniva scartata. Al valore intero ottenuto è stata poi aggiunta una frazione decimale, calcolata dividendo il giorno dell'anno in cui è stato effettuato il campionamento per 365. In questo modo è stato possibile esprimere l'età in anni decimali, garantendo una maggiore precisione rispetto al metodo tradizionale che si limita all'approssimazione a mezzo anno (Carbonara & Follesa, 2019).

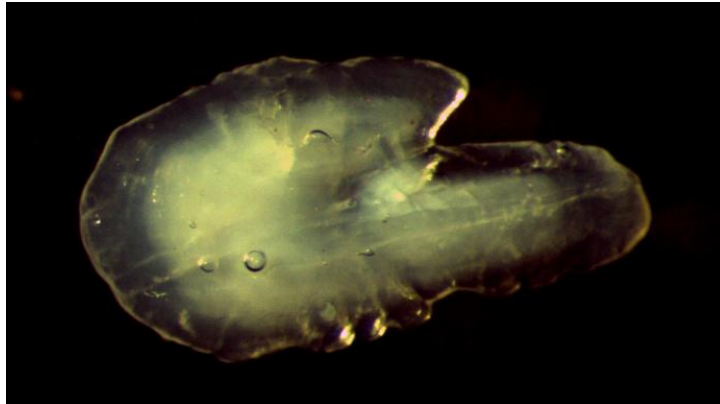


Figura 19: Otolite di un esemplare di 1 anno

2.4 Analisi dati

La determinazione dell'età del bianchetto è stata ricavata grazie l'analisi dell'accrescimento delle coorti (Modal Progression Analysis) condotta tramite il metodo di (Bhattacharya, 1967), che consiste nella scomposizione di una distribuzione di taglia composita, contenente più coorti/gruppi di individui nati nel medesimo periodo riproduttivo, in una successione di distribuzioni normali. La bontà della scomposizione è evidenziata da un indice di separazione; ai diversi picchi di distribuzione corrispondono in genere le singole coorti.

Per analizzare la relazione tra la lunghezza totale (cm) e il peso (g) degli esemplari adulti di *S. pilchardus*, sono stati utilizzati i dati biometrici raccolti durante le campagne di campionamento effettuate nel biennio 2024 e 2025. La relazione lunghezza-peso è stata modellata mediante una regressione non lineare di tipo potenza, secondo l'equazione:

$$W = a \cdot L^b$$

dove W è il peso in grammi, L la lunghezza in centimetri, a il coefficiente di forma e b l'esponente allometrico. I parametri a e b sono stati stimati tramite regressione non lineare dei dati osservati, utilizzando il metodo dei minimi quadrati. La bontà dell'adattamento del modello è stata valutata tramite il coefficiente di determinazione (R^2) e la significatività della regressione è stata valutata tramite test F di ANOVA.

Per valutare la relazione tra la lunghezza dell'otolite e la lunghezza totale del corpo in *S. pilchardus*, sono stati analizzati 189 esemplari per i quali erano disponibili e misurabili entrambi gli otoliti (destro e sinistro). Le misurazioni degli esemplari sono state effettuate con il metodo descritto in precedenza, attraverso il software image J. La relazione tra taglia del pesce e lunghezza dell'otolite è stata valutata separatamente per otoliti destri e sinistri mediante regressione lineare semplice, utilizzando la lunghezza dell'esemplare come variabile indipendente e la lunghezza dell'otolite come variabile dipendente. Al fine di verificare l'eventuale presenza di differenze sistematiche tra i due lati, è stato inoltre eseguito un T-test per campioni appaiati, confrontando le lunghezze degli otoliti destro e sinistro per ciascun individuo. Sono state calcolate la media, la deviazione standard e la deviazione standard delle differenze, utilizzando un livello di significatività pari a $\alpha = 0,05$.

Per la costruzione della chiave taglia-età di *S. pilchardus*, sono stati utilizzati i dati raccolti su un totale di 291 esemplari campionati nel Mar Ligure durante il biennio 2024–2025. La determinazione dell'età è stata effettuata mediante lettura degli anelli di accrescimento sugli otoliti sagittali, seguendo il conteggio delle bande ialine. Successivamente è stata verificata la concordanza tra le due letture. La precisione è stata quantificata tramite tre indicatori: **Percent Agreement (PA%)**, **Average Percent Error (APE%)** e **Coefficient of Variation (CV%)**, calcolati secondo le formule comunemente adottate in otolitometria.

Il **Percent Agreement (PA%)** è stato calcolato come:

$$PA\% = \frac{\text{Numero di letture concordanti}}{\text{Numero totale di otoliti letti}} \times 100$$

L'**Average Percent Error (APE%)**, che misura la differenza relativa tra le due letture per ciascun otolito, è stato calcolato come:

$$APE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{|X_{1j} - X_{2j}|}{\bar{X}_j} \right) \times 100$$

dove X_{1j} e X_{2j} rappresentano le due letture e \bar{X}_j la loro media.

Il **Coefficient of Variation (CV%)**, considerato uno degli indicatori più robusti di precisione, è stato calcolato come:

$$CV_j = \frac{\sqrt{\frac{(X_{1j} - \bar{X}_j)^2 + (X_{2j} - \bar{X}_j)^2}{2}}}{\bar{X}_j} \times 100$$

e il valore complessivo come media dei singoli CV_j :

$$CV\% = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N CV_j$$

Integrando agli otoliti concordi i dati relativi al bianchetto è stato possibile applicare il modello di crescita di VBGF espresso nella seguente formula:

$$L_t = L_\infty \cdot (1 - e^{-k(t-t_0)})$$

dove:

- L_t è la lunghezza totale prevista all'età t ,
- L_∞ è la lunghezza asintotica teorica (cm),
- k è il coefficiente di crescita (anno^{-1}),
- t_0 è l'età teorica alla quale la lunghezza del pesce sarebbe zero.

I parametri L_∞ , k e t_0 sono stati stimati mediante ottimizzazione iterativa dei minimi quadrati non lineari.

E il modello di crescita di Gompertz espresso nella seguente formula:

$$L(t) = L_{\infty} \cdot e^{-e^{-k(t-t_0)}}$$

dove:

- $L(t)$ = lunghezza prevista all'età t
- L_{∞} = lunghezza asintotica
- k = coefficiente di crescita
- t_0 = età teorica a cui la curva cambia concavità (punto di flesso)

La crescita in lunghezza di *S. pilchardus* è stata descritta mediante il modello di von Bertalanffy (VBGF) e il modello di Gompertz. I modelli sono stati applicati ai dati biometrici raccolti sui 203 esemplari con lettura degli otoliti concordanti, a questi sono stati integrati i dati del bianchetto del 2024-25.

I dati sono stati aggregati per classe di età, calcolando la lunghezza media osservata per ciascun gruppo. La curva di crescita è stata stimata mediante regressione non lineare pesata, utilizzando come peso la numerosità relativa di ciascuna classe di età, al fine di ridurre l'influenza delle classi scarsamente rappresentate.

Inoltre, è stato calcolato l'indice di performance di crescita Φ' secondo la formula di Pauly:

$$\Phi' = \ln(k) + 2 \cdot \ln(L_{\infty})$$

al fine di confrontare le prestazioni di crescita con quelle riportate in letteratura per altri stock mediterranei.

I dati sono stati elaborati separatamente per ciascun anno, ottenendo due insiemi di dati: $N = 2318$ per il 2024 e $N = 1080$ per il 2025.

Il test di (Kimura et al., 1980) è stato applicato per verificare se le curve di crescita delle due annate (2024 e 2025) potessero essere considerate statisticamente equivalenti oppure se differissero in modo significativo. Il test confronta un modello generale, in cui ciascun anno possiede un proprio set di parametri, con una serie di sottomodelli più restrittivi in cui uno o più parametri sono vincolati a essere

uguali tra i due anni. La significatività del confronto è valutata tramite la statistica del rapporto di verosimiglianza:

$$\lambda = n \ln \left(\frac{RSS_{\text{sub}}}{RSS_{\text{gen}}} \right)$$

che segue una distribuzione χ^2 con gradi di libertà pari alla differenza nel numero di parametri stimati.

L'analisi è stata condotta sia per il modello di von Bertalanffy (VBGF) sia per il modello di Gompertz, utilizzando le lunghezze medie per età pesate.

3 Scopo della tesi

Lo scopo di questa tesi è approfondire i processi di crescita di *Sardina pilchardus* nel Mar Ligure lungo l'intero ciclo ontogenetico, con particolare attenzione agli stadi giovanili, che rappresentano una delle fasi più delicate e meno documentate della biologia della specie. L'integrazione delle informazioni derivanti dal bianchetto e dagli individui adulti permette di ricostruire un quadro continuo dell'accrescimento, colmando una lacuna conoscitiva che spesso limita la comprensione della dinamica di popolazione. Una stima accurata del ritmo di crescita nelle diverse fasi ontogenetiche è essenziale non solo per interpretare la struttura demografica e il successo del reclutamento, ma anche per comprendere come fattori ambientali e pressioni antropiche influenzino la popolazione nel suo complesso.

Un obiettivo centrale del lavoro è l'identificazione di una curva di crescita biologicamente realistica e statisticamente robusta, ottenuta tramite il confronto tra i modelli di Von Bertalanffy e Gompertz. La ricerca di una curva di crescita ottimale è particolarmente rilevante per l'applicazione dei modelli age-based, strumenti fondamentali nella gestione degli stock ittici, poiché permettono di stimare parametri essenziali come mortalità, biomassa, reclutamento e produttività. Tali modelli richiedono una relazione affidabile tra lunghezza ed età, e la presenza dei dati larvali e giovanili consente di migliorare significativamente la precisione delle stime, riducendo le incertezze che spesso caratterizzano i piccoli pelagici.

Il miglioramento delle conoscenze sulla crescita della sardina assume inoltre un valore strategico per la gestione degli stock dei piccoli pelagici, un gruppo caratterizzato da cicli vitali brevi, elevata variabilità interannuale e forte sensibilità alle condizioni ambientali. Curve di crescita più realistiche consentono infatti di raffinare le valutazioni quantitative e di supportare decisioni gestionali più efficaci, in particolare nella definizione di misure di tutela degli stadi giovanili e nella valutazione del reclutamento. In quest'ottica, la tesi mira a produrre una base metodologica e biologica solida, utile sia per le future valutazioni dello stock nel Mar Ligure sia per il generale miglioramento dei modelli di gestione applicati ai piccoli pelagici mediterranei.

4 Risultati

4.1 Distribuzione di frequenza del novellame di sardina (bianchetto) del 2024 e 2025

La scomposizione Bhattacharya applicata ai dati di lunghezza dei bianchetti campionati nel 2024 ha evidenziato la presenza di quattro coorti distinte.

La prima coorte, centrata a 22 mm, rappresenta il 20% del campione, indicativa degli individui più giovani. La seconda coorte, con media 27 mm, costituisce la componente dominante della popolazione (46%). La terza coorte, centrata a 31 mm, rappresenta il 25% del totale. Infine, la quarta coorte, con media 38 mm e proporzione pari al 9%, rappresenta gli individui più maturi.

Poiché il campionamento è stato effettuato nel mese di aprile, l'interpretazione delle coorti in termini di periodo di nascita risulta coerente con la fenologia riproduttiva della specie. La prima coorte, centrata a 22 mm, corrisponde verosimilmente a individui nati alla fine di marzo o all'inizio di aprile, quindi appena reclutati nel campione (circa 30 giorni). La seconda coorte, con media 27 mm, è attribuibile a organismi nati all'inizio del mese di marzo (circa 60 giorni), che hanno avuto più tempo per accrescersi. La terza coorte, centrata a 31 mm, riflette individui nati all'inizio di febbraio (circa 90 giorni), mentre la quarta coorte, la più grande (38 mm), rappresenta esemplari nati a cavallo dell'inizio dell'anno (circa 120 giorni) e costituisce pertanto la coorte di individui più vecchi (Fig. 20; Tab. 2).

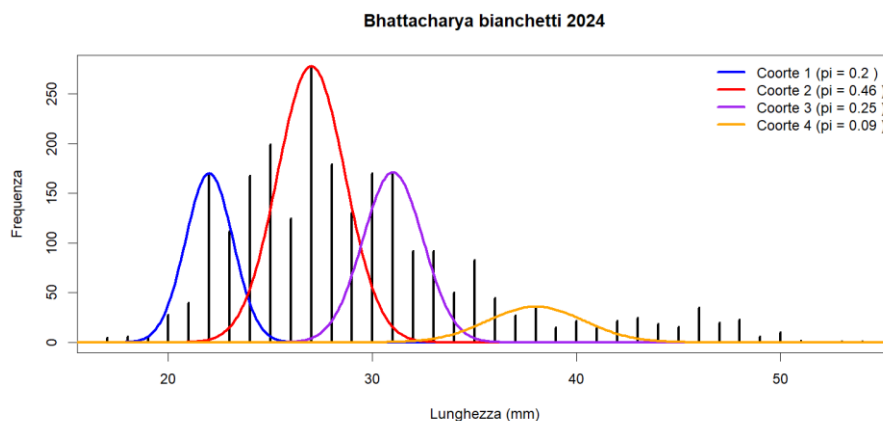


Figura 20: Distribuzione di frequenza bianchetto 2024

Tabella 2: parametri delle coorti di bianchetto nel 2024

Coorte	Media (μ) stimata	N° bianchetti	Peso relativo (π)
1	22	488,6	0,20
2	27	1123,78	0,46
3	31	610,75	0,25
4	38	219,87	0,09

Anche l'analisi di Bhattacharya applicata ai dati di lunghezza dei bianchetti campionati nella seconda metà di marzo 2025 ha evidenziato la presenza di quattro coorti distinte. La prima coorte, centrata attorno a 22 mm, rappresenta la frazione più giovane del campione. La seconda coorte, con media 25 mm, risulta la più abbondante (33%). La terza coorte, centrata a 30 mm, mostra una frequenza comparabile (31%). Infine, la quarta coorte, con media 38 mm, rappresenta il 18% del campione e riflette la presenza degli individui di maggior età. Poiché il campionamento è stato effettuato nella seconda metà del mese di marzo, è possibile interpretare ciascuna coorte anche in termini di periodo di nascita. La prima coorte, centrata a 22 mm, corrisponde verosimilmente a organismi nati a cavallo tra la fine di febbraio e l'inizio di marzo, quindi individui molto recenti (circa 30 giorni). La seconda coorte, con media 25 mm, è compatibile con esemplari nati a inizio febbraio, che hanno avuto circa un mese di crescita aggiuntiva (60 giorni). La terza coorte, centrata a 30 mm, riflette individui nati a cavallo dell'inizio anno, mentre la quarta coorte, la più grande (38 mm), rappresenta organismi nati presumibilmente nel mese di dicembre, pertanto si tratterebbe della coorte di individui più vecchi (Fig. 21; Tab. 3).

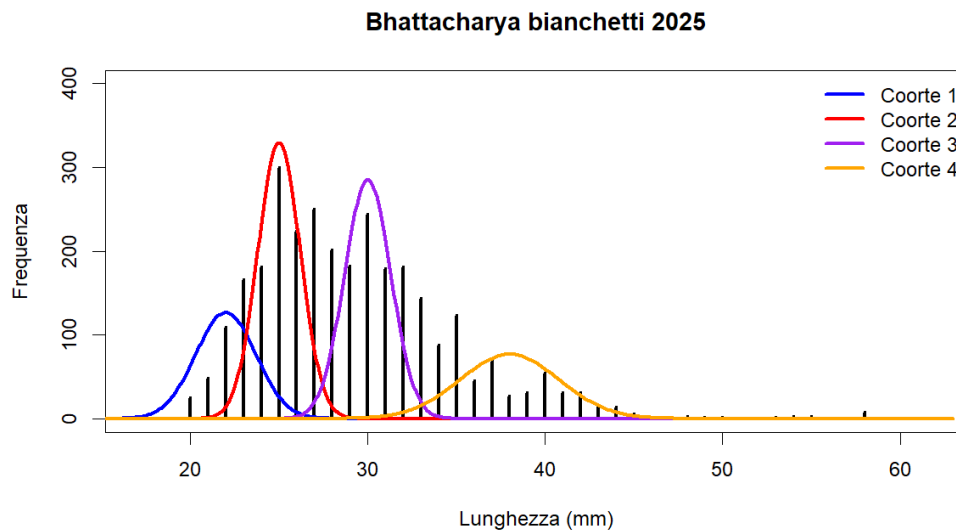


Figura 21: Distribuzione di frequenza bianchetto 2025

Tabella 3: parametri delle corti di bianchetto nel 2025

Coorte	Media (μ , mm)	N° bianchetti	Peso relativo (π)
1	22	540	0,18
2	25	990	0,33
3	30	930	0,31
4	38	540	0,18

Essendo che la corte maggiore sia nel 2024 che nel 2025 è pari a 38 mm, è possibile ipotizzare che questi esemplari, essendo nati tra la fine dell'anno precedente e l'inizio dell'anno del campionamento siano caratterizzati da un'età di 4 mesi (120 giorni), ottenendo in questo modo un tasso di crescita giornaliero di 0,32 mm/giorno coerente con i valori di crescita ritrovati nella stessa area da Romanelli et al. (2002) di 0,36 mm/giorno.

4.2 Distribuzione di frequenza del 2024 e 2025 della sardina

La distribuzione delle lunghezze della *S. pilchardus* campionata nel 2024 mostra una struttura dimensionale ampia e multimodale, caratterizzata da una popolazione eterogenea composta da individui appartenenti a più classi di taglia. Le lunghezze osservate variano tra 8 e 18 cm, con una media pari a 13,06 cm, una mediana di 13,5 cm e una moda a 14,0 cm, evidenziando la forte presenza della classe centrale. La deviazione standard, pari a 1,43 cm, e la varianza di 2,10 indicano una dispersione relativamente elevata, coerente con una popolazione strutturata in più coorti e caratterizzata da un ampio gradiente dimensionale.

La distribuzione delle lunghezze della sardina campionata nel 2024 mostra una struttura chiaramente multimodale, interpretabile attraverso tre coorti distinte che riflettono altrettanti gruppi di accrescimento (Fig. 22; Tab. 4). La prima coorte, centrata attorno ai 10 cm ($\mu = 10$, $\sigma = 0,60$), rappresenta la frazione più giovane della popolazione e contribuisce a circa 19,2% degli individui totali; il suo picco coincide con la colonna di 146 esemplari, indicando una presenza consistente ma inferiore rispetto alle classi successive. La seconda coorte, con media a 12 cm ($\mu = 12,0$ $\sigma = 0.70$), mostra un picco di 182 esemplari e costituisce circa 28% della popolazione: questa classe intermedia riflette individui in fase di crescita attiva e rappresenta una componente importante della struttura demografica. La terza coorte, centrata sui 14 cm ($\mu = 14$, $\sigma = 0.55$), è nettamente dominante: il suo picco raggiunge 437 esemplari e la sua area

corrisponde al 52,8% del totale, evidenziando una forte presenza di individui più maturi e di taglia maggiore.

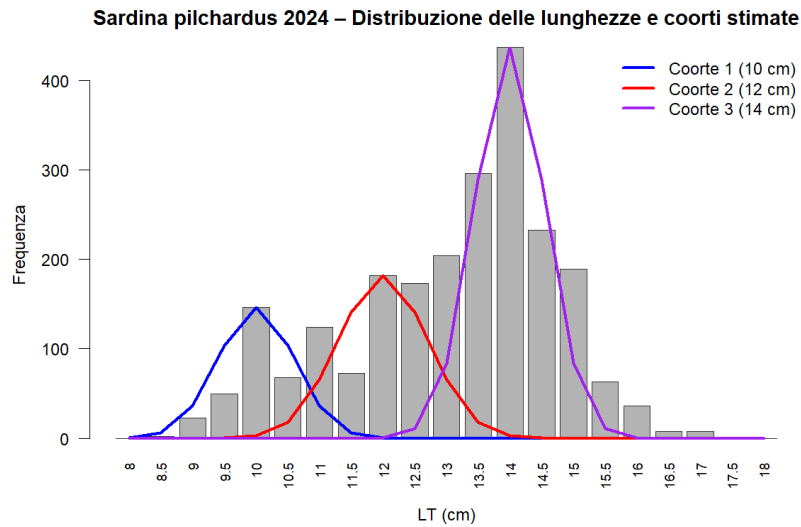


Figura 22: Distribuzione di frequenza sardina 2024

Tabella 4: analisi descrittiva distribuzione di frequenza 2024

Gruppo	Media (cm)	Mediana (cm)	Moda (cm)	σ	Varianza	Min	Max	%Individui
Coorte 1	10,0	10,0	10,0	0,60	0,36	8	12	19,2
Coorte 2	12,0	12,0	12,0	0,70	0,49	9	15	28,0
Coorte 3	14,0	14,0	14,0	0,55	0,30	12	16	52,8
Totale	13,06	13,5	140	1,43	2,10	8	18	100

Effettuando un’analisi più approfondita degli otto campionamenti svolti nel 2024 da marzo ad agosto, osserviamo in figura 23 come i primi due campionamenti (20/03 e 25/04) mostrano una distribuzione centrata su taglie medio-grandi (13–14,5 cm), con un picco stabile a 14 cm (75 individui). A metà maggio (14/05), la distribuzione si mantiene simile, ma con un leggero incremento delle frequenze nelle classi 14–15,5 cm. Il campionamento del 28/05 conferma questa tendenza, con un picco a 14 cm (96 individui) e una distribuzione più ampia verso le taglie maggiori.

A partire dal 26/06 si osserva un cambiamento marcato: compare una nuova coorte con un picco molto pronunciato a 13,5 cm (141 individui), accompagnata da una coda verso le taglie inferiori (fino a 9 cm). Nei campionamenti successivi (09/07 e 23/07), questa nuova coorte cresce rapidamente, spostando il picco verso 14–14,5 cm, mentre la coorte precedente si assottiglia. Infine, nel campionamento del 22/08, la distribuzione mostra una popolazione più mista, con due componenti sovrapposte: una a 14 cm (66 individui) e una più giovane attorno a 12,5–13,5 cm, suggerendo la coesistenza di due coorti.

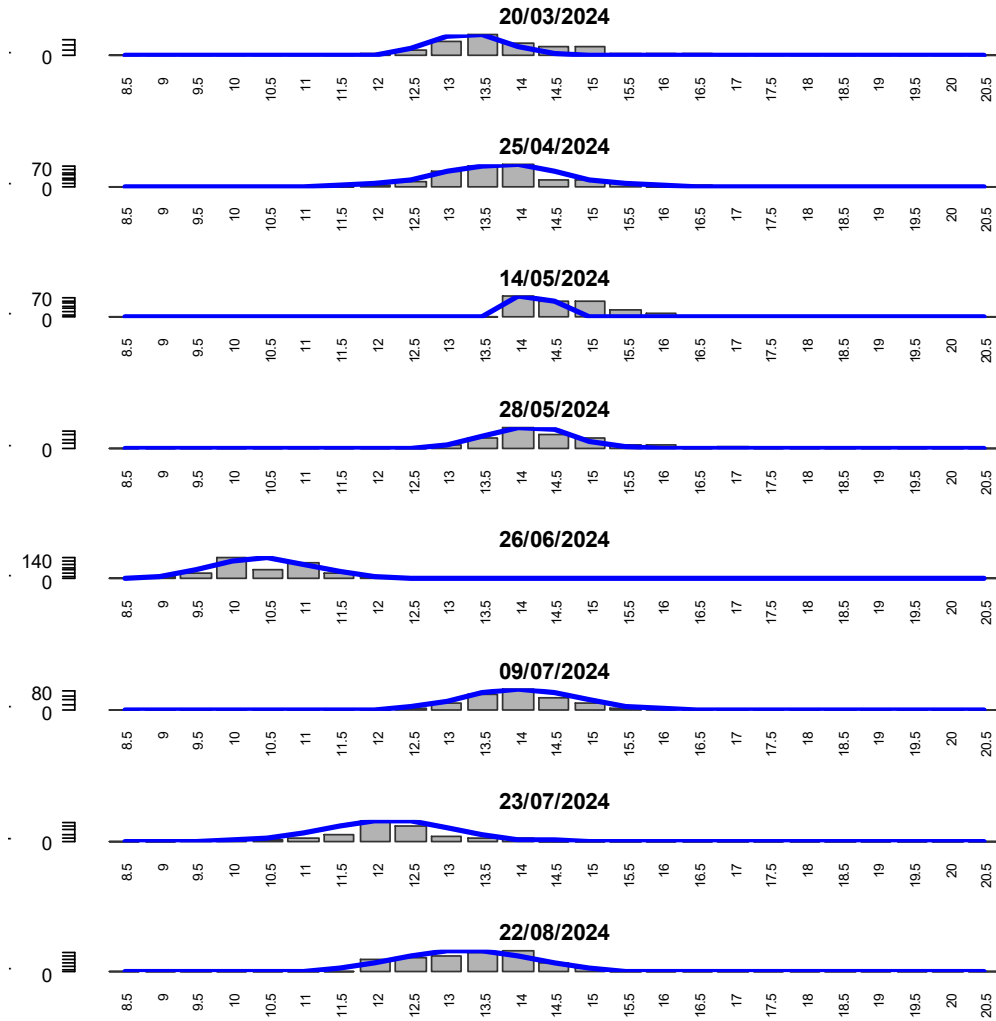


Figura 23: Campionamenti *Sardina pilchardus* 2024

Nel 2025 la distribuzione delle lunghezze della *Sardina pilchardus* mostra una struttura dimensionale relativamente compatta e dominata da individui di taglia medio-grande. Le lunghezze osservate variano

tra 11 e 17 cm, con una media pari a 13,70 cm, una mediana di 13,5 cm e una moda a 14 cm, confermando la forte presenza della classe centrale. La deviazione standard risulta pari a 1,07 cm, mentre la varianza è 1,15, indicando una distribuzione meno dispersa rispetto al 2024 e quindi una popolazione più omogenea.

L'analisi delle coorti ha evidenziato la presenza di due gruppi principali, modellati tramite curve gaussiane centrate rispettivamente a 13 cm e 14 cm. La coorte più giovane, centrata a 13 cm, presenta una deviazione standard di 0,90 cm e rappresenta circa il 40,7% degli individui campionati. La coorte dominante, centrata a 14 cm, mostra una deviazione standard di 0,85 cm e costituisce il 59,3% del totale. La sovrapposizione delle due coorti genera una distribuzione complessiva regolare e simmetrica, con una chiara prevalenza della classe modale a 14 cm (Fig. 24; Tab. 5). Nel complesso, i risultati del 2025 indicano una popolazione caratterizzata da una forte presenza di individui appartenenti alla coorte maggiore, con una struttura dimensionale più compatta rispetto all'anno precedente. Questa configurazione suggerisce un buon reclutamento della coorte dominante e una minore dispersione delle classi di età presenti nel campione.

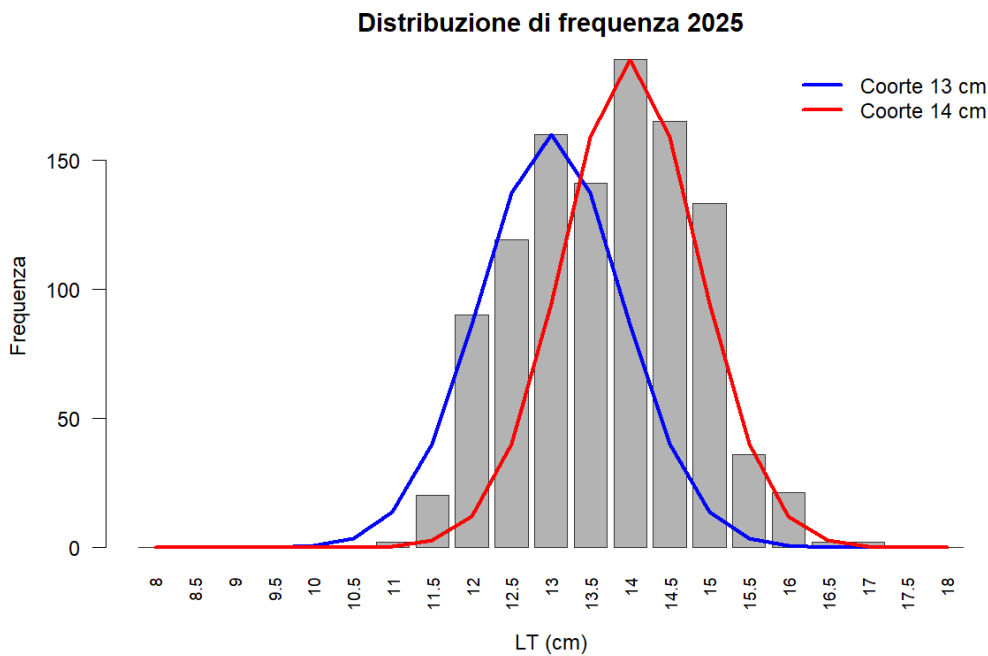


Figura 24: Distribuzione di frequenza 2025

Tabella 5: analisi descrittiva distribuzione di frequenza 2025

Gruppo	Media (cm)	Mediana (cm)	Moda (cm)	σ	Varianza	Min	Max	% Individui
Coorte 1 (13 cm)	13,0	13,0	13,0	0,90	0,81	11	15	40,7%
Coorte 2 (14 cm)	14,0	14,0	14,0	0,85	0,72	12	16	59,3%
Totale	13,70	13,5	14,0	1,07	1,15	11	17	100%

Nel corso del 2025 sono stati effettuati quattro campionamenti della popolazione di *S. pilchardus* (09/04, 12/06, 25/06, 30/09), ciascuno caratterizzato da una distinta distribuzione di frequenza delle lunghezze, che riflette l'evoluzione della coorte dominante nel tempo. Il primo campionamento (09/04) ha evidenziato una popolazione composta prevalentemente da individui di taglia tra 12 e 13 cm, con un picco a 12,0 cm (54 individui) e una distribuzione asimmetrica verso destra. Nel secondo campionamento (12/06), la coorte ha mostrato una crescita evidente, con un picco a 14,0 cm (76 individui) e una distribuzione più ampia e simmetrica. Il terzo campionamento (25/06) evidenzia una concentrazione di esemplari tra 13,0 e 14,0 cm, picco a 13 cm. Infine, nel campionamento del 30/09, la distribuzione si è spostata ulteriormente verso destra, con un picco a 14,5 cm (82 individui) e frequenze rilevanti anche nelle classi superiori, a indicare una crescita continua.

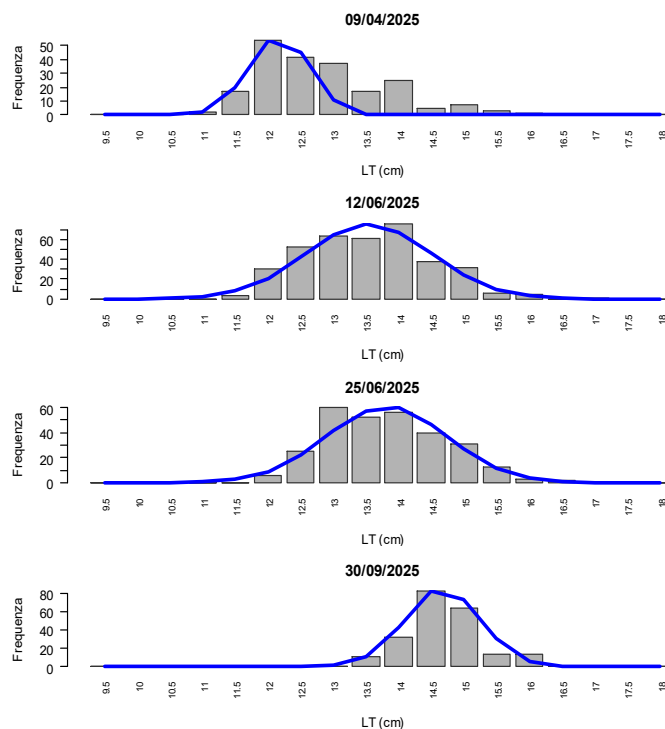


Figura 25: Campionamenti *Sardina pilchardus* 2024

Tabella 6: Tabella riassuntiva corti 2024-25

Anno	Gruppo	Media (cm)	Mediana (cm)	Moda (cm)	σ	Varianza	Min	Max	% Individui
2024	Coorte 1	10,0	10,0	10,0	0,60	0,36	8	12	19,2%
	Coorte 2	12,0	12,0	12,0	0,70	0,49	9	15	28,0%
	Coorte 3	14,0	14,0	14,0	0,55	0,30	12	16	52,8%
	Totale	13,06	13,5	14,0	1,43	2,10	8	18	100%
2025	Coorte 1	13,0	13,0	13,0	0,90	0,81	11	15	40,7%
	Coorte 2	14,0	14,0	14,0	0,85	0,72	12	16	59,3%
	Totale	13,70	13,5	14,0	1,07	1,15	11	17	100%

4.3 Relazione taglia-peso 2024-25 della sardina

Il grafico mostra la relazione lunghezza-peso per gli esemplari campionati nel 2024 (N=2318) e nel 2025 (N=1080). Sull'asse delle ascisse è riportata la lunghezza totale (cm), mentre sull'asse delle ordinate è indicato il peso (g) di ciascun individuo.

Gli individui vanno da una taglia minima di 8,5cm per un peso 4,1g fino a esemplari di taglie 19 cm LT per un peso di 49,2g (Fig. 26).

La funzione di regressione che descrive questa relazione è:

Per il 2024: $W = 0,0056x^{3,1179}$

Una relazione che descrive un andamento allometrico positivo e un coefficiente $R^2 = 0,9476$, che indica un'ottima capacità del modello di spiegare la variabilità dei dati osservati.

Per il 2025: $W = 0,0092x^{2,9248}$

Una relazione che descrive un andamento allometrico negativo con un coefficiente $R^2 = 0,8805$, che indica una buona capacità del modello di spiegare la variabilità dei dati osservati.

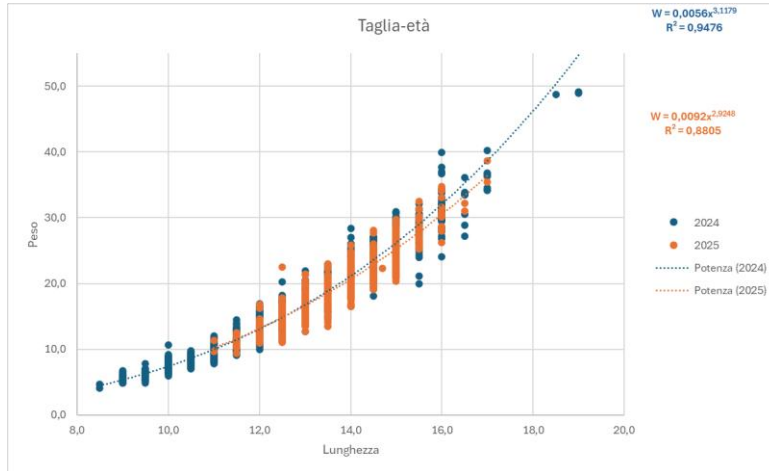


Figura 26: Lunghezza-peso 2024 e 2025

4.4 Riproducibilità delle letture degli otoliti nei campioni 2024–2025

Dei 291 otoliti analizzati, raccolti tra il 2024 e il 2025, 203 hanno mostrato una concordanza tra lettori, pari al 69,8% del totale. La coerenza interna delle letture risulta supportata da un coefficiente di variazione medio (CV%) del 12,9%, indicativo di una variabilità moderata tra osservatori, e da un APE% medio pari al 9,1%. Considerando i due anni separatamente, nel 2025 sono risultati concordanti 67 otoliti su 89, mentre nel 2024 la concordanza ha riguardato 136 otoliti su 202, confermando una buona affidabilità complessiva delle letture e una riproducibilità adeguata ai fini delle analisi di età e crescita.

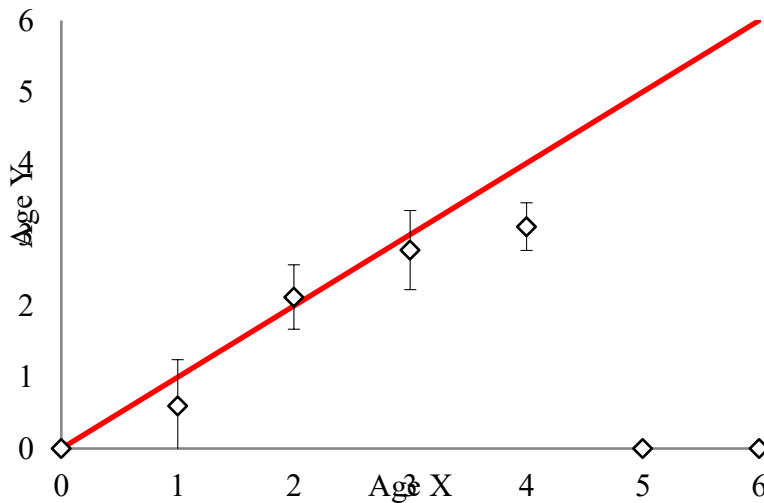


Figura 27: Age bias plot

4.5 Chiave taglia-età adulti di *Sardina pilchardus*

La tabella riportata rappresenta la chiave taglia-età costruita sulla base degli esemplari campionati nel biennio 2024-2025 (N=291), per i quali si è ottenuta concordanza nella lettura degli otoliti (203 letture concordi su un totale di 203 analizzate, equivalente ad un 69,8%). Di questi 67 appartengono al 2025 e 136 al 2024. Le righe della tabella corrispondono alle classi di taglia (esprese in centimetri), mentre le colonne indicano le classi di età (in anni). Ogni cella riporta il numero di individui appartenenti a una specifica combinazione taglia/età (Tab. 7).

Tabella 7: Chiave taglia-età adulti di *Sardina pilchardus* 2024-25

Taglia / Età	0	1	2	3	4	Totale
9	1					1
9,5	3					3
10	1		1			2
10,5	2		3	1		6
11			2			2
11,5	1	1	4			6
12	2	3	9	3		17
12,5		1	10	6		17
13		4	14	7		25
13,5			16	6		22
14		1	14	16	1	32
14,5			6	6		12
15		1	10	7		18
15,5			9	8		17
16			4	9		13
16,5				5		5
17			2	2		4
Totale	10	11	104	76	1	202
Lunghezza Media (cm)	10,4	12,8	13,6	14,4	14,0	13,7
Dev. standard	1,04	0,96	1,45	1,39	0	1,64

Gli individui di età 0 mostrano una lunghezza media pari a 10,4 cm, con una deviazione standard di 1,04 cm, indicando una variabilità relativamente contenuta nelle prime fasi di vita. A partire dall'età 1, la lunghezza media aumenta a 12,8 cm (SD = 0,96), mentre la classe di età 2 rappresenta il gruppo numericamente più abbondante (n = 104) e presenta una lunghezza media di 13,6 cm, con una deviazione standard leggermente più elevata (1,45 cm), riflettendo una maggiore eterogeneità dimensionale. Gli individui di età 3 raggiungono una lunghezza media di 14,4 cm (SD = 1,39), confermando la progressione della crescita e una variabilità ancora moderata. L'unico individuo assegnato all'età 4 mostra una lunghezza pari a 14 cm. Considerando l'intero campione, la deviazione standard totale delle lunghezze risulta pari a 1,64 cm.

4.6 Relazione taglia-lunghezza otolite

L'analisi della relazione tra la taglia degli individui (LT) e la lunghezza degli otoliti (LO), condotta su un totale di 189 coppie di otoliti, ha evidenziato una chiara correlazione positiva per entrambi i lati. I risultati mostrano che la crescita dell'otolite segue un andamento lineare rispetto alla lunghezza del pesce con una correlazione statisticamente significativa (p value < 0,01) sia per gli otoliti destri che sinistri.

Per gli otoliti destri, la retta di regressione ottenuta è: $y = 0,1429x + 0,538$

con un coefficiente di determinazione $R^2 = 0,69$, indicando che circa il 70% della variabilità nella lunghezza dell'otolite è spiegata dalla taglia dell'esemplare.

Per gli otoliti sinistri, la relazione stimata è: $y = 0,1394x + 0,584$

con un coefficiente di determinazione $R^2 = 0,68$, un valore praticamente identico a quello ottenuto per il lato destro.

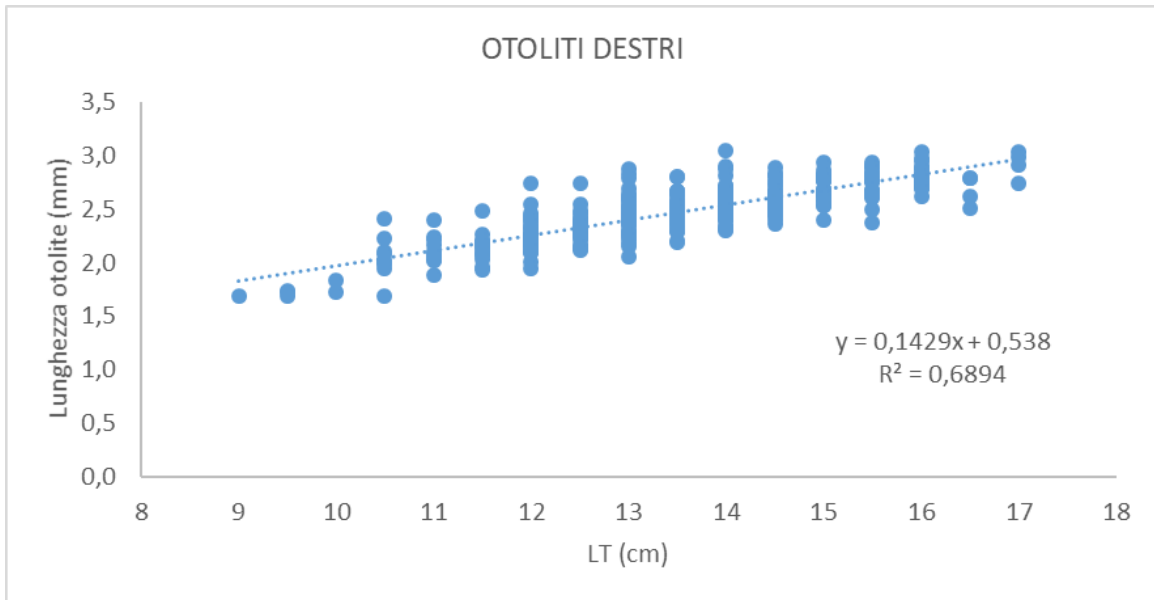


Figura 28: relazione taglia-lunghezza otolite destro

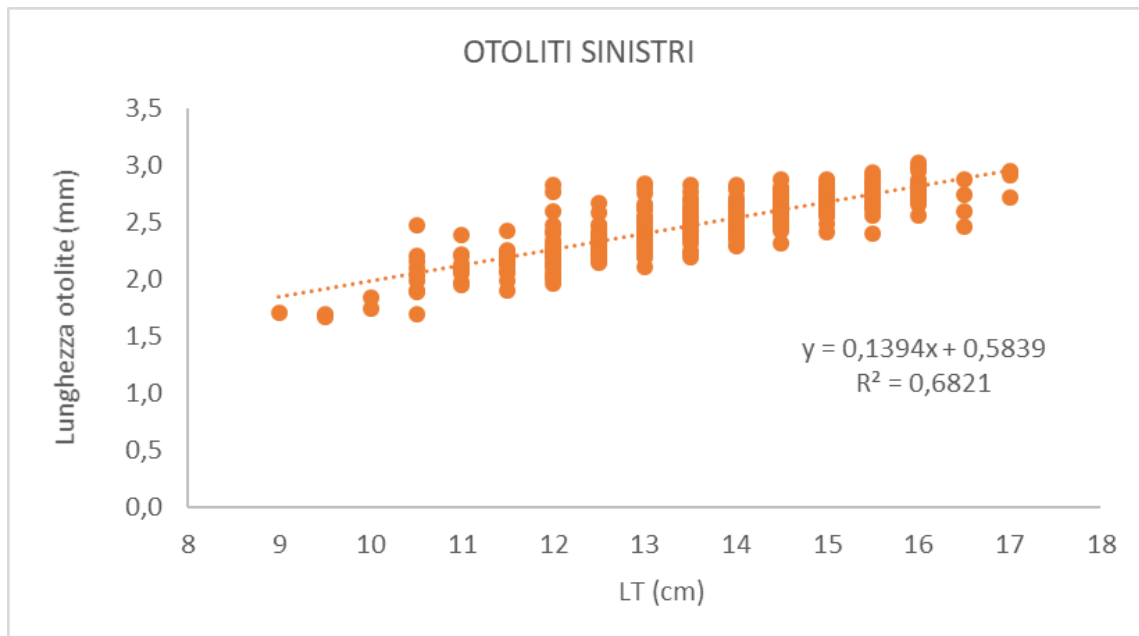


Figura 29: Relazione taglia-lunghezza otolite sinistro

Il t-test per campioni appaiati, condotto su 189 coppie di otoliti, non ha evidenziato differenze significative tra lato destro e sinistro. La differenza media tra le due misurazioni è risultata pari a $-0,01$ mm, con una deviazione standard delle differenze di $0,10$ mm e un errore standard di $0,0073$ mm. La

statistica t calcolata è pari a $-1,37$, con 188 gradi di libertà, e il relativo p-value ($p = 0,17$) conferma l'assenza di differenze statisticamente significative. Nel complesso, questi risultati dimostrano che gli otoliti destro e sinistro presentano dimensioni sovrapponibili e possono essere utilizzati in modo intercambiabile nelle analisi biometriche.

Tabella 8: statistica t-test

Statistica	Valore
Numero di coppie (n)	189
Media otoliti dx (mm)	2,48
Media otoliti sx (mm)	2,49
Differenza media (dx - sx)	-0,01 mm
Deviazione standard delle differenze	0,10 mm
Errore standard (SE)	0,0073
Gradi di libertà (df)	188
p-value	0,17

4.7 Modelli di crescita

Il modello di Von Bertalanffy, applicato ai dati del 2024, ha stimato una lunghezza asintotica pari a circa 14,88 cm, con un coefficiente di crescita relativamente elevato ($k = 0,975$) e un valore di $t_0 = 0,021$, indicando una crescita rapida nelle prime fasi di vita e un successivo rallentamento verso l'asintoto. Il modello mostra un buon adattamento ai dati, come confermato dal valore di $AIC = 95,08$ (Fig. 30).

Il modello Gompertz, applicato agli stessi dati, ha restituito una lunghezza asintotica leggermente inferiore ($L_\infty \approx 13,92$ cm) e un coefficiente di crescita più accentuato ($k = 3,000$), e un $t_0 = 0,399$. Questo modello ha mostrato un adattamento ancora migliore, con un $AIC = 87,76$ (Fig. 30).

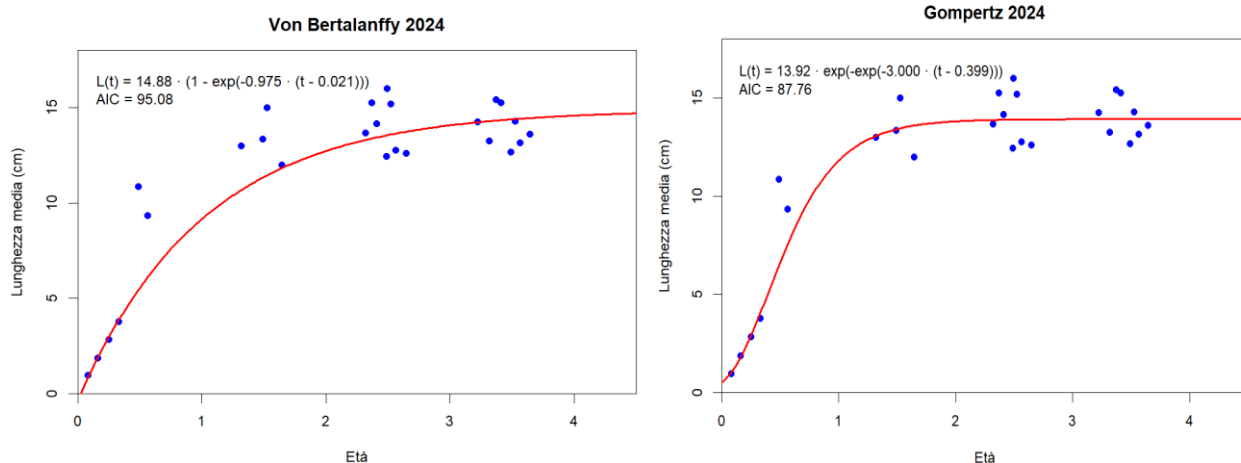


Figura 30: Von Bertalanffy e Gompertz 2024

Il modello di Von Bertalanffy, applicato ai dati del 2025, ha stimato una lunghezza asintotica pari a $L_{\infty} = 15,70$ cm, con un coefficiente di crescita $k = 0,849$ e un valore di $t_0 = 0,010$, indicando una crescita iniziale rapida seguita da un progressivo rallentamento verso l'asintoto. L'adattamento del modello ai dati risulta molto buono, come evidenziato dal valore di $AIC = 23,40$, nettamente inferiore rispetto a quello ottenuto per il 2024, segno di una maggiore coerenza interna del dataset 2025 (Fig. 31).

Il modello Gompertz, applicato agli stessi dati, ha stimato una lunghezza asintotica leggermente inferiore ($L_{\infty} = 14,00$ cm) e un coefficiente di crescita più elevato ($k = 2,714$), con un punto di flesso collocato attorno a $t_0 = 0,424$. Anche in questo caso il modello descrive adeguatamente la crescita, con un valore di $AIC = 26,99$, leggermente superiore a quello del Von Bertalanffy (Fig. 31).

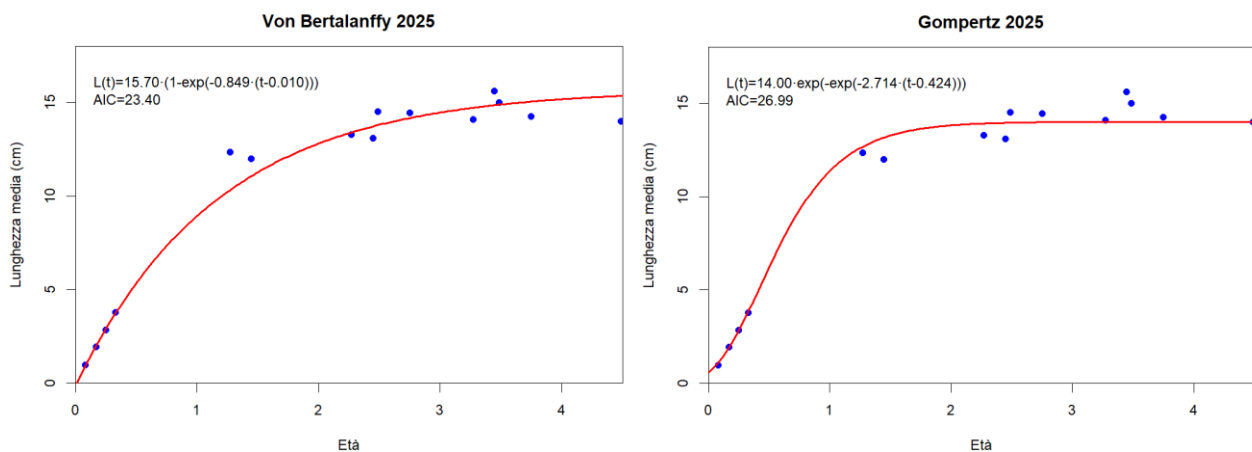


Figura 31: Von Bertalanffy e Gompertz 2025

Il modello di Von Bertalanffy, applicato ai dati integrati di 2024 e 2025, ha stimato una lunghezza asintotica pari a $L_{\infty} = 15,05$ cm, con un coefficiente di crescita $k = 0,916$ e un valore di $t_0 = 0,014$, indicando una crescita iniziale rapida che tende progressivamente a stabilizzarsi verso l'asintoto. L'adattamento del modello risulta soddisfacente, come evidenziato dal valore di $AIC = 91,03$, coerente con la variabilità del dataset combinato (Fig. 32).

Il modello Gompertz, applicato agli stessi dati, ha restituito una lunghezza asintotica leggermente inferiore ($L_{\infty} = 13,92$ cm) e un coefficiente di crescita più elevato ($k = 2,841$), con un $t_0 = 0,412$. Questo modello ha mostrato un adattamento migliore rispetto al Von Bertalanffy, come suggerito dal valore di $AIC = 84,29$ (Fig. 32).

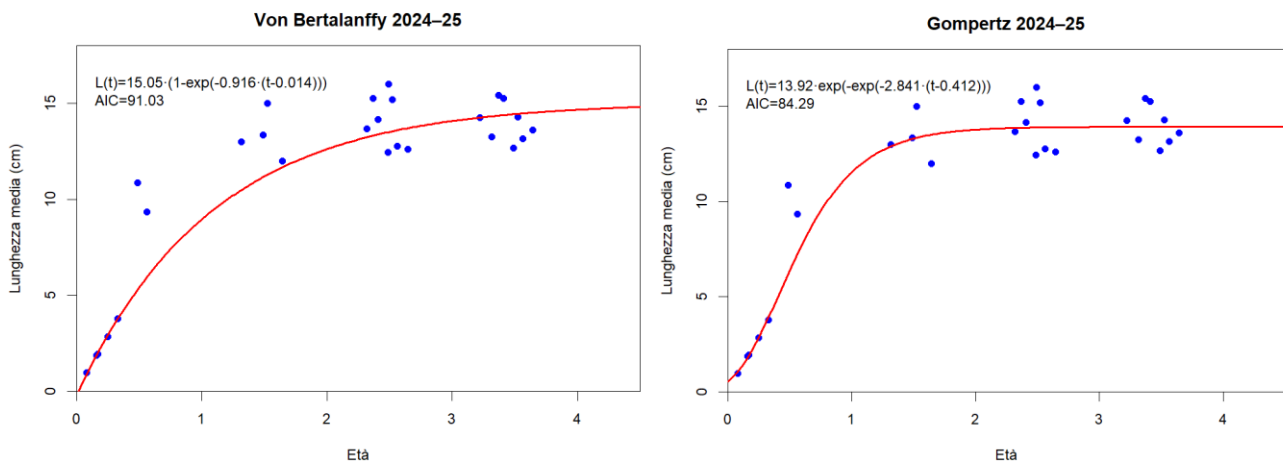


Figura 32: Von Bertalanffy e Gompertz 2024-25

I valori di L_{∞} , k e t_0 ottenuti sia con il modello di Von Bertalanffy sia con il Gompertz risultano infatti molto simili, indicando che non si osservano variazioni significative nel ritmo di crescita o nella lunghezza asintotica tra i due anni. Questa stabilità è confermata anche dall'indice ϕ' , che sintetizza la crescita combinando L_{∞} e k : i valori risultano molto vicini tra 2024 e 2025 sia per il modello di Von Bertalanffy ($\phi' = 5,375$ nel 2024 e $5,343$ nel 2025) sia per il Gompertz ($\phi' = 6,365$ nel 2024 e $6,277$ nel 2025), evidenziando una coerenza generale nella dinamica di crescita (Tab. 9).

Un elemento interessante emerge dal confronto tra i due modelli: nonostante il Gompertz sia tradizionalmente applicato soprattutto ai pesci cartilaginei, in entrambi gli anni esso restituisce valori di AIC simili o leggermente inferiori (nel 2024) rispetto al Von Bertalanffy, e anche l'indice ϕ' risulta

sistematicamente più elevato. Indicando un interessante applicazione del modello di Gompertz anche per i piccoli pelagici.

Inoltre, in entrambi i modelli utilizzati (Von Bertalanffy e Gompertz), il valore stimato di L_{∞} risulta inferiore ad alcune lunghezze medie osservate nelle classi di età più avanzate. Questo comportamento non rappresenta un errore, ma riflette la natura asintotica e rigidamente parametrizzata dei modelli di crescita, che tendono a privilegiare l'andamento complessivo della curva rispetto a valori estremi o influenzati da bassa numerosità campionaria.

Tabella 9: confronto tra modelli di crescita

Anno / Modello	L_{∞} (cm)	k	t_0	AIC	ϕ'
2024 – Von Bertalanffy	14,88	0,975	0,021	95,08	5,375
2024 – Gompertz	13,92	3,000	0,399	87,76	6,365
2025 – Von Bertalanffy	15,70	0,849	0,010	23,40	5,343
2025 – Gompertz	14,00	2,714	0,424	26,99	6,277
2024–25 – Von Bertalanffy	15,05	0,916	0,014	91,03	5,335
2024–25 – Gompertz	13,92	2,841	0,412	84,29	6,311

I valori ottenuti attraverso la chiave taglia età mostrano incrementi modesti tra le classi di età 0–1 (+2,4 cm) e 1–2 (+0,8 cm), seguiti da una crescita molto ridotta nelle classi successive, fino a un leggero decremento tra 3 e 4 anni, attribuibile alla scarsità di individui campionati in questa classe (Tab. 10).

I modelli di crescita restituiscono tassi più elevati nelle prime fasi di vita rispetto ai valori osservati, con incrementi compresi tra 9,06–10,76 cm nel primo anno e tra 2,45-3,88 cm nel secondo.

Questa importante differenza tra i valori del primo anno è dovuta alla presenza del bianchetto nei modelli, i quali tendono ad azzerare i valori al t_0 .

Dopo i due anni, sia il Von Bertalanffy sia il Gompertz mostrano un rallentamento marcato della crescita, con incrementi inferiori a 2 cm/anno e prossimi allo zero dopo i 4 anni, in piena coerenza con la biologia della specie.

Tabella 10: Confronti tra i tassi di crescita

Intervallo	Chiave taglia-età 24–25		VBGF 24–25		Gompertz 24–25	
	Lunghezza media	Tasso di crescita	Lungh. media	Tasso di crescita	Lungh. media	Tasso di crescita
0–1	10,4	2,4	0,014	9,06	0,412	10,76
1–2	12,8	0,8	8,9	3,88	11,4	2,45
2–3	13,6	0,8	12,8	1,66	13,8	0,18
3–4	14,4	–0,4	14,5	0,71	14	0,01
4–5	14,0	—	15,2	0,30	14	0,00

L'analisi delle curve di crescita ha evidenziato differenze marcate tra i modelli stimati per il 2024 e il 2025. I parametri della Von Bertalanffy Growth Function (VBGF) mostrano infatti valori distinti per i due anni, con il 2024 caratterizzato da un valore di k più elevato (0.975) e un L_{∞} leggermente inferiore rispetto al 2025. Al contrario, nel 2025 la crescita risulta più lenta ($k = 0.849$) ma tende verso un asintoto maggiore (15.70 cm). L'indice di performance di crescita (ϕ') risulta molto simile tra i due anni, suggerendo una coerenza generale nel ritmo di crescita, pur con differenze nei parametri strutturali della curva.

Per quanto riguarda il confronto tra le curve VBGF del 2024 e del 2025 ha evidenziato differenze significative tra le due annate. I valori di log-likelihood mostrano un netto miglioramento nel 2025 (**–7,6986**) rispetto al 2024 (**–43,5388**), indicando che il modello generale (parametri separati per anno) si adatta molto meglio rispetto ai sottomodelli vincolati.

Anche per il modello di Gompertz il test di Kimura ha indicato differenze significative tra le curve dei due anni. Nel 2024 il modello mostra un logLik più alto (**–39,3786**) rispetto al 2025 (**–12.8784**), suggerendo che la forma della curva di crescita differisce tra le due annate. Il 2024 è caratterizzato da una crescita iniziale più rapida, mentre nel 2025 la curva risulta più graduale. Il modello generale risulta quindi significativamente migliore rispetto ai sottomodelli vincolati, confermando la non equivalenza delle curve.

5 Discussione

La determinazione dell'età del bianchetto è stata ottenuta attraverso l'analisi dell'accrescimento delle coorti mediante il metodo di Bhattacharya (1967), che consente di scomporre una distribuzione di taglia composita in una serie di componenti gaussiane, ciascuna rappresentativa di una coorte distinta. La buona separazione dei picchi modali osservati nei campionamenti di aprile 2024 e marzo 2025 ha permesso di identificare con chiarezza la coorte di dimensioni maggiori, centrata attorno ai 38 mm. Considerando che tali individui sono verosimilmente nati tra la fine dell'anno precedente e l'inizio dell'anno del campionamento, è possibile attribuire loro un'età di circa quattro mesi (120 giorni). Da questa stima deriva un tasso di crescita giornaliero pari a 0,32 mm/giorno, valore che rappresenta la velocità media di accrescimento nelle prime fasi di vita. Questo risultato trova un solido riscontro nella letteratura in quanto precedenti studi nell'area ligure riportano un tasso di crescita pari a 0,36 mm/giorno (Romanelli et al., 2002), praticamente sovrapponibile a quello ottenuto nel presente studio, con una differenza minima di soli 0,04 mm/giorno. Ulteriori studi sulle larve di *S. pilchardus* sono stati condotti nel Golfo di Biscaglia e nell'Adriatico, dove le velocità di crescita nei primi 30 giorni risultano comprese tra 0,64 e 0,79 mm/giorno (Dulcic', 1994), valori più elevati di quelli osservati nel presente studio ma che rientrano pienamente nella variabilità attesa per popolazioni naturali soggette a condizioni ambientali mutevoli, come oscillazioni termiche stagionali o variazioni nella disponibilità trofica delle diverse aree di studio.

La relazione lunghezza-peso ottenuta nel presente studio mostra una variabilità interannuale marcata ma biologicamente coerente con quanto riportato per *S. pilchardus* in Mediterraneo. Nel 2024, la popolazione ligure ha evidenziato una crescita allometrica positiva ($b = 3,1179$), con un'elevata capacità predittiva del modello ($R^2 = 0,9476$), indicando individui in buona condizione corporea. Questo valore risulta molto vicino a quello riportato da (Mustać et al., 2020) per l'Adriatico orientale ($b = 3,069$), suggerendo una struttura corporea simile tra le due popolazioni. Nel 2025, invece, il valore di b è risultato inferiore ($b = 2,925$), con una crescita quasi isometrica e un R^2 comunque elevato (0,8805). Tale riduzione può riflettere variazioni nella disponibilità trofica, nella composizione per taglie o nella condizione fisiologica stagionale, fenomeni già osservati in altre popolazioni mediterranee.

Il confronto con la letteratura mostra come i valori del 2024 si avvicinino ai parametri riportati da (Keznine, 2020) per la popolazione marocchina occidentale, che presenta una crescita quasi isometrica

sia nelle femmine ($b = 3,0056$; $R^2 = 0,97$) sia nei maschi ($b = 3,0363$; $R^2 = 0,9698$). I valori del 2025, invece, risultano più simili alle popolazioni caratterizzate da una condizione corporea più variabile, come quelle descritte da (Badreldin et al., 2025) nel Mediterraneo sud-orientale, dove si osservano valori di b molto elevati (3,3967–3,4101) ma con forte differenziazione sessuale.

Il confronto tra la lunghezza totale (LT) e la lunghezza degli otoliti (LO), basato sulle regressioni lineari, ha fornito i seguenti risultati: per gli otoliti destri: $y=0,1429x+0,538$ ($R^2 = 0,69$) e per gli otoliti sinistri $y=0,1394x+0,584$ ($R^2 = 0,68$). Rispetto alla regressione lineare riportata da (Bilge et al., 2018) evidenzia differenze sostanziali nella correlazione tra LT e LO. Gli autori, analizzando popolazioni dell'Egeo meridionale, hanno ottenuto la seguente regressione lineare ($y = 52,028 + 2,2924x$) con un coefficiente di determinazione $R^2 = 0,95$, nettamente superiore a quello osservato nel presente studio. L'elevato valore di R^2 indica che nella popolazione egea la lunghezza dell'otolite è un predittore maggiormente affidabile della lunghezza totale, con una variabilità residua molto ridotta. La differenza tra i due studi può riflettere diversi fattori biologici ed ecologici. La popolazione ligure potrebbe presentare una maggiore eterogeneità nella crescita degli otoliti, influenzata da condizioni trofiche più variabili, da una struttura per età più diversificata o da differenze ambientali tipiche del Mediterraneo occidentale. Al contrario, la popolazione dell'Egeo sembra caratterizzata da una crescita più regolare e da una relazione LT-LO più stretta e prevedibile.

La qualità delle letture otolitiche ottenute in questo studio risulta complessivamente elevata e superiore agli standard riportati negli esercizi di calibrazione internazionali per il Mediterraneo. La percentuale di concordanza ($PA = 69,8\%$ sul totale dei campioni; $67,3\%$ nel 2024 e $75,3\%$ nel 2025) si colloca in linea con quanto osservato negli exchange ICES, nei quali la concordanza per il Mediterraneo varia tipicamente tra il 65% e il 67% (ICES, 2017). Gli indici di precisione mostrano un miglioramento sostanziale rispetto ai benchmark disponibili: il coefficiente di variazione medio ($CV = 12,9\%$) e l'APE medio ($9,1\%$) risultano infatti nettamente inferiori ai valori riportati nei workshop WKARAS e negli esercizi di calibrazione precedenti, dove CV e APE raggiungono rispettivamente il $70\text{--}105\%$ e il $44\text{--}60\%$ (ICES, 2017).

È importante sottolineare che, nel presente studio, le letture sono state effettuate dallo stesso lettore, con una seconda sessione svolta a distanza di due settimane. Questo approccio elimina la variabilità inter-lettore e consente di valutare esclusivamente la precisione intra-lettore, che la letteratura considera

generalmente più elevata e più stabile rispetto alla variabilità tra osservatori (Campana, 2001; Beamish & Fournier, 1981). La bassa variabilità riscontrata riflette quindi una buona coerenza interna del lettore e una leggibilità complessivamente adeguata degli otoliti analizzati. Fattori quali la qualità del materiale otolitico, la chiarezza degli anelli nelle popolazioni locali e la standardizzazione del protocollo di lettura possono aver ulteriormente contribuito a ridurre l'incertezza associata alla determinazione dell'età (Chilton & Beamish, 1982; Morison et al., 1998).

La curva di crescita di Von Bertalanffy del Mar Ligure nel 2024–2025 mostra caratteristiche nettamente distinte rispetto alle altre popolazioni mediterranee analizzate, con un L_{∞} molto più basso e un coefficiente K sensibilmente più elevato (Fig. 33; Tab. 11). Una possibile spiegazione biologica di queste differenze risiede nella presenza del bianchetto (stadio larvale e giovanile della sardina), che rappresenta una componente fondamentale della struttura demografica ligure ma non è incluso nelle curve di crescita provenienti da altre aree del Mediterraneo. La presenza di un'elevata proporzione di individui molto giovani tende infatti a spostare la curva verso valori più alti di K , riflettendo una crescita iniziale rapida, e contemporaneamente a ridurre la stima di L_{∞} , poiché la popolazione campionata è dominata da individui che non hanno ancora raggiunto le classi di età più avanzate.

Al contrario, gli studi provenienti da Adriatico, Spagna, Nord Africa, Stretto di Sicilia ed Egeo si basano quasi esclusivamente su individui giovanili o adulti, con una rappresentazione molto più completa delle classi di età superiori. Questo porta a stime di L_{∞} più elevate (17–21 cm) e valori di K più bassi (0,45–0,93), riflettendo una crescita più graduale e una maggiore longevità potenziale. La curva ligure, includendo anche il bianchetto, descrive invece una popolazione caratterizzata da crescita accelerata nelle prime fasi di vita e taglia finale ridotta, un pattern coerente con una struttura demografica sbilanciata verso le classi giovanili. Pertanto, le differenze osservate tra la Liguria e le altre regioni sono dovute alla presenza del bianchetto, che influenza in modo significativo la forma della curva VBGF.

Inoltre, in due serie temporali (2024 e 2024–25), il modello di Gompertz ha mostrato valori di AIC inferiori rispetto alla VBGF, suggerendo una migliore aderenza ai dati osservati. L'applicazione di questo modello è stato supportato dalla letteratura, in particolare negli stadi giovanili e larvali dell'acciuga (*Engraulis encrasicolus*) (Aldanondo et al., 2011), che ne sottolineano l'efficacia nel rappresentare traiettorie di crescita caratterizzate da un rapido incremento iniziale.

Curve di crescita VBGF – Confronto Mediterraneo

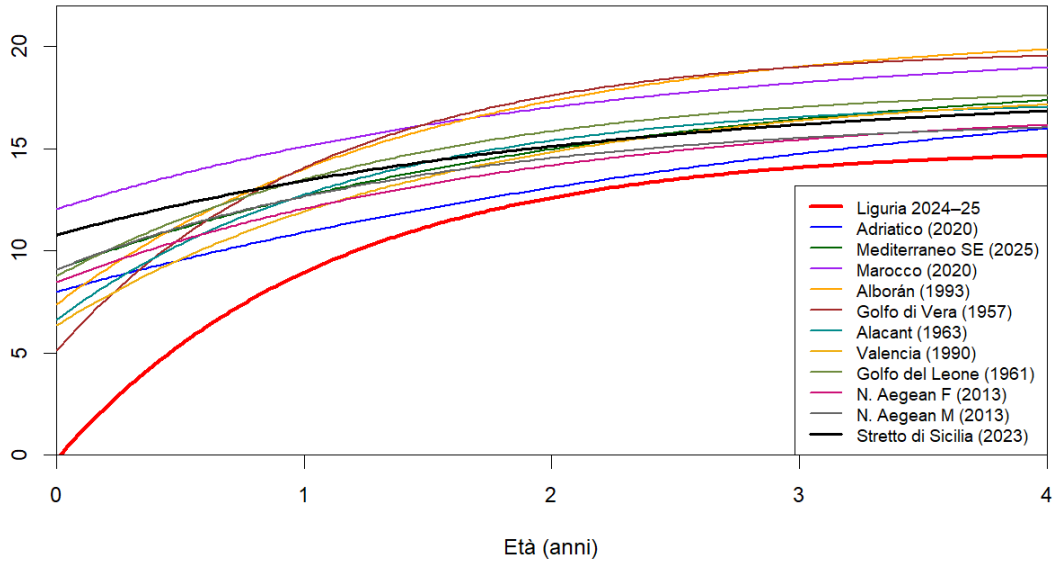


Figura 33: Confronto delle curve di Von Bertalanffy con la letteratura

Tabella 11: valori delle curve in letteratura

Studio / Area	L_{∞} (cm)	K	t_0	Φ
Mar Ligure 2024–25	15,05	0,916	0,014	5,43
Adriatico (Mustac' et al., 2020)	19,71	0,286	-1,82	5,53
Mediterraneo SE (Badreldin et al., 2025)	19,00	0,45	-1,45	5,74
West Mediterranean, Morocco (Keznine, 2020)	20,21	0,47	-1,93	5,89
Alborán (Alemany & Alvarez, 1993)	20,69	0,69	-0,64	6,03
Golfo di Vera (Larraneta & Lopez, 1957)	19,90	0,93	-0,32	6,10
Alacant (Lopez 1963)	17,41	0,84	-0,57	5,79
Valencia (Morales-Nin & Pertierra, 1990)	18,02	0,65	-0,67	5,77
Golfo del Leone (Lee, 1961)	18,18	0,70	-0,94	5,83
N Aegean (F) (Voulgaridou & Stergiou, 2013)	17,21	0,530	-1,28	5,63
Stretto di Sicilia (Basilone et al., 2023)	18,00	0,459	-1,99	5,17

6 Conclusioni

I risultati ottenuti nel biennio 2024–2025 forniscono un quadro completo e coerente della crescita di *Sardina pilchardus* nel Mar Ligure, evidenziando una dinamica caratterizzata da un'accelerazione marcata nelle prime fasi di vita e da un rallentamento progressivo con l'aumentare dell'età. L'integrazione dei dati larvali, giovanili e adulti ha permesso di ricostruire l'intero ciclo ontogenetico, migliorando la comprensione dei processi di accrescimento e generando stime dei parametri biologici coerenti con quanto riportato per altri stock mediterranei. Le analisi delle coorti del bianchetto hanno confermato tassi di crescita giornalieri compatibili con la letteratura, mentre i modelli di Von Bertalanffy e Gompertz hanno descritto adeguatamente le curve di crescita, fornendo lunghezze asintotiche realistiche per la popolazione ligure. Le relazioni taglia–peso e taglia–otolite, unite alla lettura otolitica, hanno contribuito a rafforzare la solidità del quadro biologico delineato.

Esistono diversi aspetti che meritano approfondimenti futuri. Un primo obiettivo riguarda l'estensione della serie temporale dei campionamenti, fondamentale per valutare la variabilità interannuale dell'accrescimento, influenzata da condizioni oceanografiche, disponibilità trofica e cambiamenti climatici. Sarà altresì utile perfezionare la stima dell'età nelle fasi larvali e giovanili mediante analisi otolitiche, così da ridurre eventuali discrepanze tra dati osservati e modelli teorici. Un altro sviluppo importante consiste nell'integrare i parametri di crescita con indicatori fisiologici, dati ambientali e indici di abbondanza, con l'obiettivo di costruire modelli predittivi più affidabili e sensibili alle dinamiche ecosistemiche. Un ulteriore obiettivo di grande interesse sarà quello di effettuare distinzioni sistematiche tra maschi e femmine, al fine di verificare l'eventuale presenza di differenze nei tassi di crescita, nella lunghezza asintotica o nella struttura per età. Studi su altre popolazioni mediterranee riportano differenze anche marcate tra i sessi; introdurre questa distinzione potrebbe migliorare ulteriormente la precisione dei modelli e la descrizione delle dinamiche demografiche locali.

Infine, un obiettivo strategico di medio periodo è l'integrazione dei risultati in modelli quantitativi di gestione degli stock dei piccoli pelagici, come modelli age-based o approcci ecosistemici. Curve di crescita più realistiche, arricchite da informazioni sulle prime fasi vitali e da potenziali differenze tra sessi, potranno migliorare la stima della mortalità, del reclutamento e dello stato dello stock, contribuendo allo sviluppo di strategie gestionali più efficaci e sostenibili per la sardina nel Mar Ligure.

7 Bibliografía

- Aldanondo et al., U. C. (2011). Growth of young-of-the-year European anchovy (*Engraulis encrasicolus*, L.) in the Bay of Biscay. *Scientia Marina* 75(2), 227-235.
- Alegría-Hernández et al., V. M.-N. (1985). Morphological variability of *Sardina pilchardus* Walb. in the western Mediterranean. . *Investigación Pesquera*, 49(1), 23–36.
- Alemaný & Alvarez. (1993). Growth differences among sardine (*Sardina pilchardus* Wallb.) populations in Western. *Scientia Marina*, 57(2–3), 229–234.
- Alemaný & Álvarez, F. (1994). Formation of initial daily increments in sagittal otoliths of reared and wild *Sardina pilchardus* yolk-sac larvae. *Marine Biology*, 121, 35–39.
- Armani et al. (2011). Multiplex conventional and real-time PCR for fish species identification of Bianchetto (juvenile form of *Sardina pilchardus*), Rossetto (*Aphia minuta*), and Icefish in fresh, marinated and cooked products. *Food Chemistry*, 1, 133, 184-192;.
- Astraldi et al. (1994). Water exchange between the Tyrrhenian and Ligurian Seas. *Journal of Marine Systems*, 5(3–5), 287–297.
- Atarhouch, T. R. (2007). Genetic differentiation among sardine (*Sardina pilchardus*) populations along the Moroccan coast. . *Fisheries Research*, , 89(1), 9–17.
- Badreldin et al., F. R. (2025). Biological aspects and population dynamics of the European pilchard (*Sardina pilchardus*) in the southeastern Mediterranean waters. *Journal of Fish Biology*.
- Bakun, A. (2006). Wasp-waist populations and marine ecosystem dynamics: Navigating the “predator pit” topographies. . *Progress in Oceanography*, 68(2–4), 271–288.
- Basilone et al. (2023). Age and Growth of European Sardine (*Sardina pilchardus*) in the Central Mediterranean Sea: Implication for Stock Assessment. *Fishes* 2023,, 8, 202.
- Basilone et al., G. F. (2021). Reproduction and sexual maturity of European sardine (*Sardina pilchardus*) in the Central Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 8.
- Beamish & Fournier. (1981). A method for comparing the precision of a set of age determinations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*,. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*,, 38(8), 982–983.
- Bhattacharya, C. G. (1967). A simple method of resolution of a distribution into Gaussian components. *Biometrics*, 23(1), 115–135. *Biometrics*, 23(1), 115–135., 23(1), 115–135.

- Bilge et al., G. F. (2018). Relationship between sagittal otolith size and fish size in *Engraulis encrasicolus* and *Sardina pilchardus* in the Southern Aegean Sea, Turkey. *Aquatic Sciences and Engineering*, 33(4), 127–133.
- Borme et al., D. L. (2022). Diet of Adult Sardine *Sardina pilchardus* in the Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1012.
- Boucher et al., J. I. (1987). Daily and seasonal variations in the spatial distribution of zooplankton populations in relation to the physical structure in the Ligurian Sea front. *Journal of Marine Research*, 45, 133 - 173.
- Campana, S. E. (2001). Accuracy, precision and quality control in age determination, including a review of the use and abuse of age validation methods. *Journal of Fish Biology*, 59(2), 197–242.
- Carbonara & Follesa, M. C. (2019). Handbook on fish age determination: a Mediterranean experience. *FAO*.
- Cardinale et al., (2010). Stock assessment of Mediterranean fisheries: state of the art and future challenges. *General Fisheries Commission for the Mediterranean (GFCM)*, *FAO*.
- Carpi et al. (2017). Impact of late-larval fishing on sardine stock dynamics. *ICES Journal of Marine Science*, 74, 728–738.
- Cefalì et al. (1997). La pesca del novellame in Sicilia. *Biologia Marina Mediterranea*, 4, 457–463.
- Checkley et al., D. M. (2009). Climate change and small pelagic fish. Cambridge University Press.
- Chemello et al., G. C. (2023). One-year study on the reproductive biology, ovary characterization and age of the European sardine (*Sardina pilchardus*) in the middle-west Adriatic Sea. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1266894.
- Chilton & Beamish, R. J. (1982). Age determination methods for fishes studied by the Groundfish Program at the Pacific Biological Station. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60.
- Coll et al., M. S. (2007). An ecosystem model of the Northern and Central Adriatic Sea: Analysis of the trophic network and the impact of fishing. *Journal of Marine Systems*, 67, 119–154.
- Cury et al., P. B. (2000). Small pelagics in upwelling systems: patterns of interaction and structural changes in “wasp-waist” ecosystems. *ICES Journal of Marine Science*, 57(3), 603–618.
- Dulčić. (1994). Estimation of age and growth of sardine, *Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792), larvae by reading daily otolith increments. *Institute of Oceanography and Fisheries*, set. I, MeftroviCa 63, Split, Croatia.

- EC. (2006). Council Regulation (EC) No 1967/2006 concerning management measures for Mediterranean fisheries.
- FAO. (2001). Species identification guide for fishery purposes. *The living marine resources of the Eastern Central Atlantic.*, FAO Roma.
- FAO. (2018). The State of Mediterranean and Black Sea Fisheries. *FAO, Rome.*
- Ferhani et al., B. S. (2024). Age and growth of European pilchard *Sardina pilchardus* (Clupeidae) from the Southwestern Mediterranean Sea. . *Journal of Ichthyology*, , 64, 1025–1030.
- Ferretti et al., M. T. (2002). Classificazione e descrizione degli attrezzi da pesca in uso nelle marinerie italiane con particolare riferimento al loro impatto ambientale. . *ICRAM, Roma.* , 126 pp. .
- Fischer et al, W. B.-L. (1987a). Fiches FAO d'identification des espèces pour les besoins de la pêche. *Méditerranée et mer Noire. Zone de pêche 37.* Rome: FAO.
- Fossi et al. (2018). Ecopath model of the Mediterranean pelagic food web. *Marine Ecology Progress Series*,, 604, 1–17.
- Froese & Pauly, D. (2015). FishBase.
- Froese R. & Pauly, D. (2024). FishBase. *World Wide Web electronic publication.*
- Gaamour & Khemiri. (2010). Growth and reproduction of *Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792) in the Gulf of Tunis (Central Mediterranean). *Scientia Marina*,, 74(3), 549–556.
- Gamulin & Hure, J. (1955). Contribution à la connaissance de l'écologie de la ponte de la sardine (*Sardina pilchardus* Walb.) dans l'Adriatique. . *Acta Adriatica*,, 7(3), 1–72.
- Ganias et al., K. S. (2003). Evaluation of spawning frequency in a Mediterranean sardine population (*Sardina pilchardus sardina*). *Marine Biology*, , 142, 1169–1179.
- Garrido et al. (2007). Laboratory investigations on the effect of prey size and concentration on the feeding behaviour of *Sardina pilchardus*. . *Marine Ecology Progress Series*, , 330: 189–199.
- GFCM, (. F. (2020). Report of the benchmark session for the assessment of sardine and anchovy in GSAs 17–18. FAO.
- Giannoulaki et al., M. M. (2005). The spatial distribution of anchovy and sardine in the northern Aegean Sea in relation to hydrographic regimes. . *Belgian Journal of Zoology*, , 135(2), 151–156.
- ICES. (2017). Age Reading Exchange for Small Pelagics in the Mediterranean. ICES Working Group Reports.

- Kezine, M. A. (2020). The reproduction and growth of the sardine *Sardina pilchardus* in West Mediterranean, Morocco. Faculty of Science, Abdelmalek Essaadi University, Tetouan & Faculty of Science and Technology, Tanger, Morocco.
- Kimura et al., D. K. (1980). Likelihood methods for the von Bertalanffy growth curve. . *Fishery Bulletin*, , 77(4), 765–776.
- Krvarić & Mužinić, R. (1950). Tagging experiments on sardine in the Adriatic Sea. *Acta Adriatica.*, 3, 1-18.
- La Mesa et al. . (2009). Biology and fishery of sardine juveniles. . *Fisheries Research*, 96, 9–21., 96, 9–21.
- La Mesa, M. e. (2009). Biology and fishery of sardine juveniles. . *Fisheries Researc*, 96, 9–21.
- Larraneta & Lopez, L. (1957). El crecimiento de la sardina (*Sardina pilchardus* Walb.) de las costas de Castellòn. *Inv. Pesc.*, , 6; 53-82.
- Lee. (1961). La sardine du golfe de Lyon. (*Sardina pilchardus sardina* Regan). *Rev.Trav. Peches marit.*, 25(4): 419-511.
- Lleonart & Maynou, F. (2003). Fish stock assessments in the Mediterranean. State of art. *Scientia Marina*,, 67 (S1), 37–49.
- Lloret et al., P. I. (2015). mpact of environmental variability and fishing pressure on small pelagic fish and their role in the ecosystem of the northwestern Mediterranean Sea. . *Marine Biology Research*,, 11(4), 450–461.
- Magoulas, A. C. (2006). Mitochondrial DNA reveals a strong genetic structure in the European sardine *Sardina pilchardus*. . *Marine Biology*, , 149(5), 1313–1325.
- Marano et al. (1981). Pesca del bianchetto in Italia. *Quad. Lab. Tecnol. Pesca*.
- McEwan, R. (1938). Studies on the visual system of teleosts.
- Millot. (1999). Circulation in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, Volume 20, Issues 1–4, Pages 423-442.
- Morales-Nin & Pertierra. (1990). Growth rates of the anchovy *Engraulis encrasicolus* and the sardine *Sardina pilchardus* in the northwestern Mediterranean Sea. *Mediterranean Sea. Marine Biology*, 107(2), 349–356., 107(2), 349–356.
- Morison et al., A. K. (1998). n integrated system for production fish ageing: image analysis and quality assurance. *North American Journal of Fisheries Management*, , 18(3), 587–598.

- Mustać et al., Č. G. (2020). Comparison of growth parameters between sardine (*Sardina pilchardus* Walbaum, 1792) and anchovy (*Engraulis encrasicolus* Linnaeus, 1758) from the Eastern Adriatic Sea. . *Journal of Maritime & Transportation Sciences, Special Edition.*, No. 3, 325–333.
- Musumeci, C. C. (2023). Stock assessment of *Sardina pilchardus* in GSA 9–10 using the SPiCT model. *ISPRA & COISPA Technical Report, MEDIAS–MEDITS Programme.*
- Mužinić, R. (1973a). Migration of sardine in the Adriatic Sea determined by tagging experiments. *FAO Fisheries Report.*
- Palomera et al. (2007). Small pelagic fish in the NW Mediterranean Sea: An ecological review. *Progress in Oceanography*, 74 (2-3), 377-396.
- Panfili et al., d. P.-P. (2002). Manual of fish sclerochronology. *Brest, France, IFREMER-IRD co-edition.*, 464 pp.
- Parrish et al, S. R. (1989). The monotypic sardines, *Sardina* and *Sardinops*: their taxonomy, distribution, stock structure, and zoogeography. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 46 (pg. 2019-2036).
- Petrillo et al, M. D. (1998). Uova di *Engraulis encrasicolus* e parametri ambientali nella zona pilota di Chiavari, Mar Ligure (1985-1996). *Biol Mar Medit* 5(3),, 349-360.
- Preciado et al. (2021). Feeding ecology of small pelagic fish in the western Mediterranean Sea: trophic niche partitioning and seasonal variability. . *Marine Environmental Research*, , 170, 105393.
- Relini & Lanteri, L. (2010). Atlante delle specie ittiche del Mediterraneo: Clupeiformi. *Biologia Marina Mediterranea*, , 17(Suppl. 1), 1–92.
- Relini et al, G. T. (2010). Large pelagic fish, swordfish, bluefin and small tunas, in the Ligurian Sea: biological characteristics and fishery trends. . *Chemistry and Ecology*,, 26(S1), 341–357.
- Romanelli et al. (2002). Growth and mortality of *Sardina pilchardus* larvae. *Fisheries Research*,, 58, 321–331.
- Romanelli et al., M. C. (2002). Growth and mortality of exploited *Sardina pilchardus* (Walbaum) larvae along the western coast of Italy. . *Fisheries Research*, , 55, 205–218.
- Russell & Carpenter, K. E. (1996). Clupeidae. In: *FAO Species Identification Guide for Fishery Purposes. The Living Marine Resources of the Western Central Pacific.*
- Saraux et al., C. V. (2019). Small pelagic fish dynamics: a review of mechanisms in the Gulf of Lions. . *Progress in Oceanography*, , 172, 230–247.
- Spanakis et al., E. T. (1989). Genetic differences between populations of sardine (*Sardina pilchardus*) in the Aegean and Ionian Seas. . *Journal of Fish Biology*,, 35(1), 1–9.

- Stergiou & Karpouzi, V. S. (2002). Feeding habits of Mediterranean fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 12, 1–53.
- Tunesi et al., M. A. (2005). Species richness and biogeographic outlines of the fish assemblage of the Portofino Marine Protected Area (Ligurian Sea). *Biologia Marina Mediterranea*, 12(1), 379–384.
- Van Beveren et al., E. B.-M.-L.-H. (2014). Rapid changes in growth, condition, size and age of small pelagic fish in the Mediterranean. *Marine Biology*, 161, 1809–1822.
- Varela et al., J. L.-Q. (2021). Environmental drivers of sardine (*Sardina pilchardus*) habitat use in the western Mediterranean Sea. *Fisheries Oceanography*, 30(5), 472–487.
- Vilter, V. (1950). Recherches sur la structure de la rétine des poissons téléostéens. *Annales de l'Institut Océanographique de Monaco*, 25, 1-88.
- Voulgaridou & Stergiou. (2013). Trends in various biological parameters of the European sardine, *Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792), in the eastern Mediterranean Sea. *Scientia Marina*, 67(S1), 269–280. *Scientia Marina*, 67(S1), 269–280.
- Whitehead et al, P. J. (1988). Clupeoid fishes of the world. FAO.
- Whitehead, P. J. (1985). FAO Species Catalogue. Vol. 7 *Clupeoid fishes of the world*. , FAO Fisheries Synopsis No. 125.
- Zwolinski et al., M. A. (2007). Diel variation in the vertical distribution and schooling behaviour of sardine (*Sardina pilchardus*) off Portugal. *ICES Journal of Marine Science*, 64(5), 64(5), 963–972.

8 Ringraziamenti

È stato un percorso lungo, durato quasi sei anni, fatto di momenti bellissimi e altri più complicati. Guardandomi indietro, sento il bisogno di ringraziare tutte le persone che, in modi diversi, hanno contribuito a questo traguardo. Per prima cosa ci tengo a ringraziare il dottor Lanteri per tutto l'impegno dedicatomi, per la disponibilità e la pazienza avuta durante questo percorso.

Ci tengo a ringraziare tutti i compagni di squadra che ho incontrato lungo il cammino, da Spezia ad Albisola, passando per i tanti anni al CUS. In particolare, i “Casa Cusser”: Igor, Carra, Arco, Pippo e Marco. Con voi non abbiamo condiviso solo allenamenti, ma avventure — e forse sarebbe più corretto dire disavventure — che porterò sempre con me.

Un grazie speciale va a Pedro e Mirko, due persone straordinarie che mi hanno permesso di vivere l'esperienza più bella della mia vita. Con Pedro ho condiviso viaggi, pescate e momenti che non dimenticherò mai.

Una menzione particolare la merita “Don Carra”, amico fedele, se non fratello. Condividiamo tutto, persino i posti di pesca, e sei sempre stato tu a spronarmi, ricordandomi ogni volta: “meglio un'ora a pesca che una sui libri”. Ancora oggi non trovo nulla di sbagliato in questa affermazione... grazie. Un ringraziamento speciale va anche alla Fede, una persona preziosa conosciuta a metà di questo percorso. Mi sei stata accanto in ogni momento, affrontando sacrifici, viaggi infiniti e tante ore di macchina solo per vederci anche quando il tempo era poco. La tua presenza ha fatto la differenza.

Infine, ma non per importanza, la mia famiglia. Grazie nonna Maria per avermi trasmesso la dedizione allo studio: so che saresti orgogliosa di questo traguardo, così come lo sarebbe stato nonno Bruno. Grazie a nonna Ivana e nonno Lucio, che mi hanno sempre sostenuto durante ogni esame. Grazie zia e zio per essere come dei secondi genitori.

Grazie ad Annina, una sorella speciale: anche se ci vediamo poco, so che ci sei sempre.

E poi mamma e papà. Mamma, la persona più buona che conosca: non mi hai mai fatto mancare nulla e mi hai permesso di dedicarmi allo studio con serenità. Papà, nonostante un lavoro impegnativo e faticoso, hai sempre fatto tutto il possibile per noi. Senza i vostri sacrifici, non so se sarei riuscito ad arrivare fin qui.