

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di laurea in Biologia



ELABORATO DI LAUREA

**BIOLOGIA DEL MERLUZZO POLARE IN
UN CONTESTO DI CLIMATE CHANGE**

Tutor: Prof.ssa Chiara Papetti

Dipartimento di Biologia

Co-tutor: Erica Difronzo

Dipartimento di Biologia

Laureanda: Ivonne Articci

ANNO ACCADEMICO 2024/2025

INDICE

Introduzione	2
1. CAPITOLO 1 - Biologia ed ecologia del merluzzo polare	4
1.1 Habitat e distribuzione	4
1.2 Ciclo vitale e riproduzione	6
1.3 Fisiologia e adattamenti al freddo	9
2. CAPITOLO 2 - Impatti del cambiamento climatico e pressioni antropiche	10
2.1 Riscaldamento delle acque e perdita del ghiaccio marino	10
2.2 Acidificazione e variazione di salinità	12
2.3 Pressioni antropiche	14
Conclusioni	18
Bibliografia	19

“Strumenti di intelligenza artificiale come ChatGPT sono stati utilizzati per migliorare la grammatica e la chiarezza in alcune sezioni di questa tesi. Il contenuto scientifico, le analisi e le interpretazioni sono interamente miei.”

INTRODUZIONE

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide ambientali più rilevanti del nostro tempo. Questo fenomeno si manifesta attraverso: l'aumento delle temperature medie globali, le modificazioni delle precipitazioni atmosferiche, la maggiore frequenza di eventi meteorologici estremi, i profondi cambiamenti negli oceani con l'acidificazione delle acque e la riduzione dei ghiacciai. Tutti gli ecosistemi del pianeta sono interessati da queste dinamiche, tutti questi effetti si ripercuotono sulla biodiversità e sulla società umana.

A causa del fenomeno dell'amplificazione artica, l'Artico, si sta riscaldando a una velocità, quasi quattro volte superiore rispetto al resto del pianeta (Rantanen et al., 2022). Sia la temperatura superficiale marina, sia quella delle acque più profonde, mostrano un costante aumento nelle regioni artiche (Meredith et al., 2019). In tutti i mari artici, la copertura di ghiaccio marino è in diminuzione sia in estensione, che in spessore e la stagione di copertura del ghiaccio, si sta progressivamente riducendo a causa dello scioglimento primaverile, sempre più precoce e di un congelamento autunnale ritardato (si veda, ad esempio, Notz e SIMIP Community, 2020; Crawford et al., 2021). Le proiezioni dei modelli di futuri scenari climatici nell'Artico mostrano come intorno alla metà del XXI secolo, le estati artiche saranno caratterizzate, da un'estensione minima del ghiaccio marino prossima allo zero (Overland e Wang, 2013; Notz e Stroeve, 2018).

Tra le specie maggiormente sensibili ai cambiamenti ambientali in atto, vi è il merluzzo polare (*Boreogadus saida* Lepechin, 1774), una componente fondamentale della rete trofica artica. Si tratta infatti del pesce foraggio più abbondante nei mari artici, costituisce una risorsa alimentare essenziale per numerosi predatori come: mammiferi marini, uccelli marini e cetacei (ad esempio, Benoit et al., 2008; Dolgov et al., 2011; Geoffroy et al., 2016; Kono et al., 2016).

Il merluzzo polare è una specie di piccole dimensioni, ha una lunghezza di circa 20-25 cm (Scott e Scott, 1988), e può vivere fino a 7 anni (Hop et al., 1997). Vive in stretta relazione con il ghiaccio marino, soprattutto durante le prime fasi del ciclo vitale, quando le larve e i giovani esemplari si concentrano prevalentemente sotto o vicino alla copertura di ghiaccio (Bouchard e Fortier, 2011; David et al., 2016).

Le alterazioni dovute al cambiamento climatico, come l'aumento delle temperature e la riduzione del ghiaccio, possono modificarne la distribuzione e l'abbondanza generando effetti a cascata sull'intera rete alimentare pelagica, influenzando le specie che dipendono da esso (Welch et al., 1992; Tynan e DeMaster, 1997; Darnis et al., 2012). A queste pressioni ambientali si aggiungono altri fattori di stress, come la pesca e l'acidificazione degli oceani, che possono compromettere la stabilità delle popolazioni di merluzzo polare e alterare così gli equilibri ecologici dell'intero ecosistema artico.

Studiare il merluzzo polare è importante, perché questa specie può essere considerata un indicatore dello stato di salute dell'ecosistema. Le variazioni nella sua distribuzione e abbondanza riflettono i cambiamenti che stanno interessando l'ambiente in cui vive.

L'obiettivo di questa tesi è quello di descrivere la vulnerabilità del merluzzo polare ai cambiamenti climatici e ad altri fattori di stress. In particolare, si intende approfondire come gli aspetti della biologia e dell'ecologia della specie, possano influenzarne la vulnerabilità al cambiamento ambientale, sia in maniera diretta che

indiretta, anche in funzione delle modificazioni dell'habitat e delle interazioni trofiche dell'ecosistema artico. A questo scopo, nei capitoli successivi, verranno descritte la biologia e l'ecologia del merluzzo polare, con particolare attenzione al suo habitat, al ciclo vitale e agli adattamenti al freddo. In seguito, verranno analizzati: gli impatti del cambiamento climatico, il riscaldamento delle acque, la perdita del ghiaccio marino, l'acidificazione, le variazioni di salinità e le principali pressioni antropiche, cioè le interferenze e i disturbi causati dalle attività umane.

CAPITOLO 1 - BIOLOGIA ED ECOLOGIA DEL MERLUZZO POLARE

1.1 Habitat e distribuzione

Il merluzzo polare è una specie a distribuzione circumpolare, ampiamente diffusa nell'Oceano Artico: dal Mare di Beaufort al Mare dei Ciukci, fino al mare di Kara, Laptev, Groenlandia e Barents (Klumov, 1937; Moskalenko 1964; Ponomarenko 1968; Chernova 2018; Nelson et al., 2020). È regolarmente presente sotto la copertura di ghiaccio (Gradinger e Bluhm, 2004; Melnikov e Chernova, 2013; David et al., 2016; Christiansen, 2017; Gjørseter et al., 2020), ed è considerato la specie ittica più abbondante nei mari della piattaforma artica (Craig et al., 1982; Dolgov et al., 2011; Antonov et al., 2017; Johannesen et al., 2017; Marsh et al., 2020). La biologia e il comportamento del merluzzo polare, come la deposizione delle uova, le date di schiusa, il periodo giovanile, la strategia riproduttiva e l'alimentazione, sono fortemente legati e adattati all'ambiente artico (Rass, 1968) e dipendono strettamente dalle condizioni ambientali.

All'interno del suo vasto areale di distribuzione, il merluzzo polare forma diversi stock, differenziati per area, comportamento riproduttivo e adattamenti locali. Lo stock del Mare di Barents è uno dei più estesi e documentati grazie ai monitoraggi russo-norvegesi, ed è caratterizzato da due principali aree di riproduzione localizzate a est di Svalbard/Spitsbergen e a sud-ovest di Novaya Zemlya (Ponomarenko, 1968; Hop e Gjørseter, 2013; Michalsen et al., 2013; Boitsov et al., 2013; Huserbråten et al., 2019). Nel Mare dei Ciukci, la struttura della popolazione risulta fortemente influenzata dalla copertura di ghiaccio marino e dall'afflusso di acque pacifiche, fattori che determinano variazioni nella densità, popolazioni più stabili e una stagione di crescita più lunga, grazie a temperature miti e ad una maggiore disponibilità di risorse trofiche (Maznikova et al., 2023). Nel Mare della Siberia orientale, la distribuzione del merluzzo polare mostra una grande variabilità spaziale, influenzata anch'essa da fattori ambientali. Nell'agosto 2015 è stata esaminata l'area meridionale del Mare della Siberia orientale, dove le temperature in prossimità del fondale variavano da -1,6 a 2,3 °C. Il merluzzo polare in queste zone non formava grandi branchi compatti, ma era distribuito in modo sparso. Sono state individuate due zone in cui il numero di individui era più elevato rispetto al resto dell'area. La prima, con le concentrazioni maggiori (3,341 mila individui/km²), si trovava nella parte orientale dell'area, influenzata da masse d'acqua ad alta salinità di origine oceanica. La seconda zona, anch'essa caratterizzata da elevate densità di individui (fino a 1,437 individui/km²), era localizzata al largo delle isole Medvezhi, all'interno di un vortice ciclonico (Maznikova et al., 2023). Nel Mare di Laptev, infine, banchi di merluzzo polare sono stati rilevati lungo il margine esterno della piattaforma. Le densità più elevate si sono osservate nella parte centrale dell'area, mentre verso est la concentrazione diminuiva progressivamente. A ovest sono stati osservati banchi misti contenenti giovani individui. (Maznikova et al., 2023).

Durante l'anno, il merluzzo polare effettua due migrazioni stagionali: una migrazione prima di deporre le uova (inverno-autunno) e una post deposizione (primavera-estate). Questo comportamento fa sì che il merluzzo polare, durante i mesi invernali, si concentri in grandi aggregazioni, mentre nel resto dell'anno gli individui si distribuiscono in modo più uniforme e omogeneo nel loro areale (Yudanov, 1976; Wienerroither et al., 2011). La migrazione riproduttiva verso l'areale di distribuzione meridionale inizia in agosto-settembre, quando il merluzzo polare è più ampiamente distribuito vicino al bordo del ghiaccio nel nord-ovest, nord-est (Ponomarenko, 1968; Boitsov et al., 2013). In questo periodo dell'anno il merluzzo polare del Mare di

Barents si trova in tutte le aree settentrionali dei mari di Barents e di Kara (Ponomarenko, 1968; Wienerroither et al., 2011; Boitsov et al., 2013). La temperatura dell'acqua, le correnti, il ghiaccio marino e la disponibilità di cibo sono fattori chiave per i suoi spostamenti (Rass, 1968; Pechenik et al., 1973; Boitsov et al., 2013).

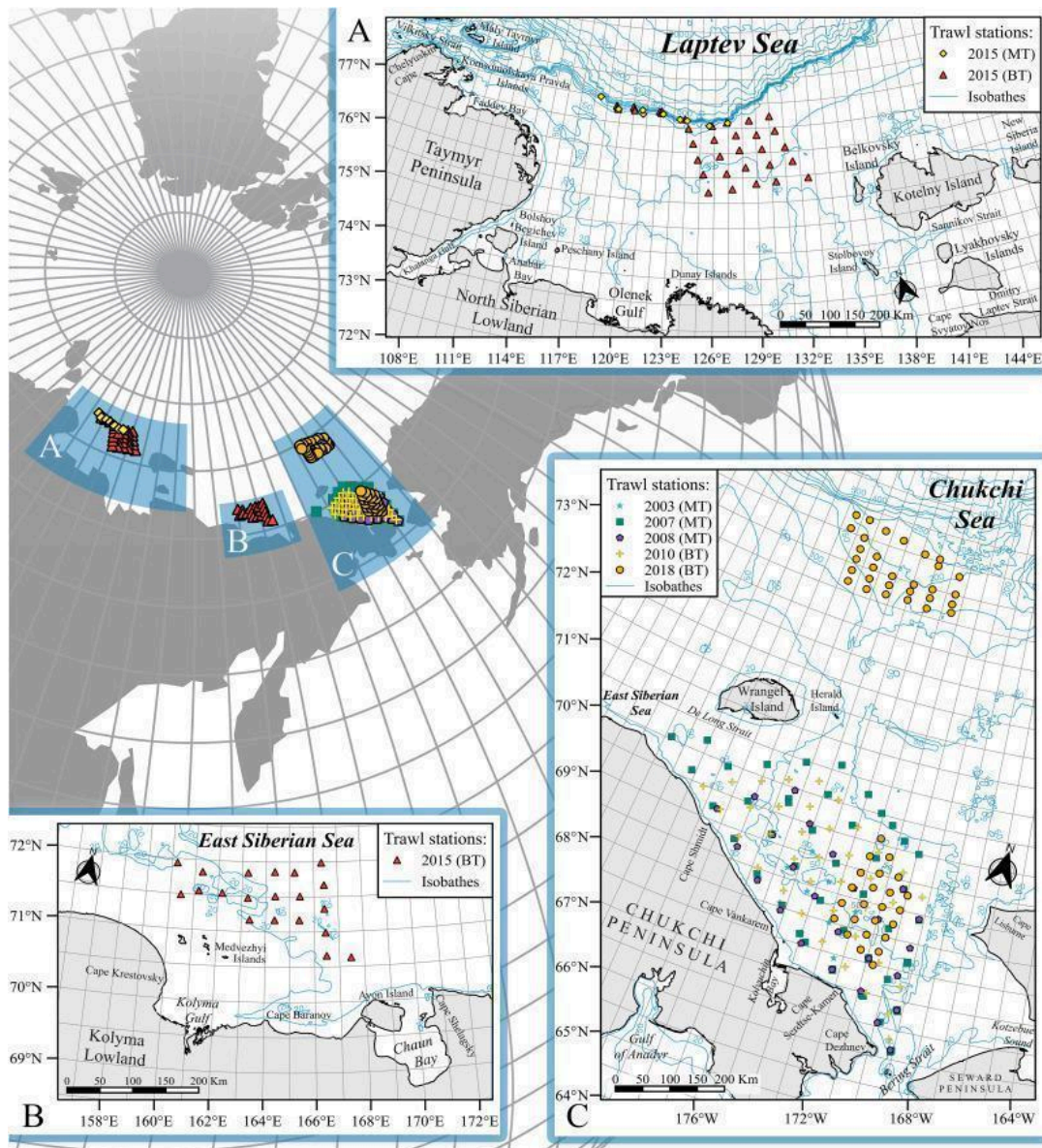


Figura 1. Aree di campionamento nel settore orientale dell'Artico russo: Mare di Laptev (A), Mare della Siberia orientale (B) e Mare dei Ciukci (C). I simboli nella mappa rappresentano le stazioni di campionamento a strascico (trawl stations). I colori e le forme differenti indicano l'anno del campionamento (dal 2003 al 2018) e il tipo di strascico utilizzato: strascico a mezz'acqua (MT), strascico con rete a tavoloni (OT) e strascico di fondo (BT) (Immagine di Maznikova et al., 2023).

1.2 Ciclo vitale e riproduzione

La stagione riproduttiva del merluzzo polare varia a seconda della regione, ma generalmente si svolge tra settembre e aprile, con un picco tra gennaio e febbraio (Ponomarenko, 1964; Shleinik, 1973; Hop e Graham, 1995; Ponomarenko, 2000a; Boitsov et al., 2013). La deposizione delle uova avviene tra tardo autunno e inizio inverno (Baranenkova et al., 1966; Craig et al., 1982), prevalentemente in prossimità della costa, in acque superficiali (Craig et al., 1982; Fevolden e Christiansen, 1997), anche se in alcune zone sono state osservate deposizioni in acque più profonde (Benoit et al., 2008; Geoffroy et al., 2011). Le uova pelagiche tendono a risalire e galleggiano sotto lo strato di ghiaccio marino, dove rimangono fino alla schiusa (Hop e Graham, 1995).

Il periodo di incubazione dipende fortemente dalla temperatura dell'acqua, variando da circa 25-35 giorni a 0° C (Aronovich et al., 1975) fino a 60 giorni a 1,5 °C (Hop e Graham, 1995). Lo sviluppo embrionale avviene più efficacemente tra 1,5 e 3,0 °C, ma allo stesso tempo, temperature superiori a 2,0 °C riducono il successo di schiusa (Sakurai et al., 1998; Dahlke et al., 2018; Laurel et al., 2018). Le uova del merluzzo polare hanno un diametro compreso tra 1,5 mm e 1,8 mm, sono lisce, a parete sottile, con un unico corion e prive di pigmentazione (Sakurai et al., 1998). Con la progressiva riduzione della copertura di ghiaccio marino prevista nei prossimi decenni, le uova saranno più suscettibili alle variazioni termiche e alle radiazioni UV, fattori che possono ridurre la sopravvivenza (Altukhov, 1981; Borkin et al., 1987b; Dahms et al., 2011; Christiansen, 2017; Laurel et al., 2018; Spencer et al., 2020; Bouchard et al., 2021). Tuttavia, un moderato riscaldamento superficiale, può accelerarne lo sviluppo, favorendo così una schiusa anticipata (Laurel et al., 2018).

Alla schiusa le larve misurano tra 3,5 mm e 7 mm di lunghezza standard (ad esempio, Hop e Graham, 1995; Ponomarenko, 2000b; Bender et al., 2021) che diminuisce con l'aumentare della temperatura tra 0,4 °C e 3,8 °C (Laurel et al., 2018). La loro sopravvivenza dipende dalla temperatura, infatti hanno uno scarso sviluppo al di sotto di 1 °C e al di sopra di 5 °C (Kashkina, 1962; Rass, 1968; Altukhov, 1981; Fortier et al., 2006; Koenker et al., 2018a; Koenker et al., 2018b). Le dimensioni delle larve e successivamente dei giovani di merluzzo polare, variano significativamente all'interno della stessa stagione, in relazione al momento della schiusa (Baranenkova et al., 1966; Borkin, 1990; Ponomarenko, 2000; Fortier et al., 2006; Bouchard e Fortier, 2011), che varia annualmente a seconda della temperatura dell'acqua e del regime di congelamento (Aronovich et al., 1974; Borkin, 1983). La schiusa di massa avviene generalmente tra maggio e luglio, più grandi sono le larve, maggiore è la loro probabilità di sopravvivenza. Questo è spesso collegato ad una maggiore capacità di nuotare e di nutrirsi, soprattutto durante il periodo critico che segue l'esaurimento del tuorlo e corrisponde con l'inizio dell'alimentazione esogena (Bouchard et al., 2013). Oltre la taglia, alla schiusa, anche la temperatura influisce sulle traiettorie di crescita, valori più elevati la favoriscono, ma possono contemporaneamente aumentarne la mortalità (Rass, 1968; Koenker et al., 2018b). Koenker et al. (2018b) hanno stimato una temperatura ottimale per la crescita compresa tra 5 °C e 7 °C, mentre la temperatura ottimale per la sopravvivenza corrisponde a 2 °C. Analogamente, Bender et al. (2021) hanno riportato una crescita più rapida, ma una sopravvivenza inferiore a 3 °C rispetto a 0 °C, questo perché le larve alla schiusa erano meno sviluppate. I vantaggi associati ad una crescita rapida, sono probabilmente compensati da un aumento del fabbisogno metabolico a temperature più elevate (David et al., 2022). Si prevede che un moderato aumento della temperatura superficiale marina (SST, *sea surface temperature*), possa temporaneamente favorire il reclutamento nelle regioni

settentrionali dell'Oceano Artico (Bouchard et al., 2017), mentre nelle aree meridionali, la sopravvivenza larvale risulta già compromessa dal superamento dei limiti termici di tolleranza (Huserbrå-ten et al., 2019; Marsh e Mueter, 2020; Bouchard et al., 2021; Deary et al., 2021). Le larve di merluzzo polare sono eurialine, cioè si adattano ad habitat ed ambienti soggetti a rapide variazioni di salinità, dovute allo scioglimento dei ghiacci e allo scarico fluviale (Spencer et al., 2020). La loro bassa densità, fa sì che si trovino negli strati superficiali dei mari da 0 a 30 m di profondità (Shleinik, 1970; Belikov et al., 1991; Bouchard et al., 2016; Spencer et al., 2020), dove possono sfruttare l'acqua salmastra, la quale offre un rifugio termico (Spencer et al., 2020). In particolare, nei mari di Beaufort, Laptev, e nella Baia di Hudson, l'acqua salmastra proveniente dai pennacchi fluviali aumenta il punto di congelamento sotto il ghiaccio, consentendo alle larve precoci di sopravvivere all'inverno, offrendo un rifugio termico contro le temperature potenzialmente letali e di beneficiare di una stagione di crescita più lunga (Bouchard e Fortier, 2008; Bouchard e Fortier, 2011; Schembri et al., 2021). Durante l'estate, invece, la presenza di acqua di disgelo glaciale meno densa, può determinare la permanenza delle larve in strati più profondi, fornendo un ulteriore rifugio termico contro le acque superficiali eccessivamente calde (Bouchard et al., 2021). L'aumento di tali acque di disgelo negli ecosistemi dei fiordi artici potrebbe attenuare la mortalità larvale, associata alle alte temperature estive e alla maggiore esposizione alle radiazioni UV.

I giovani merluzzi polari (età 0 anni), sono caratterizzati da un'ampia tolleranza termica e possono sopravvivere a temperature comprese tra 1 °C e 12 °C, anche se il loro tasso di crescita si riduce al di sopra dei 9 °C (Laurel et al., 2017). Le variazioni nella quantità e nella qualità del cibo disponibile, insieme ai cambiamenti della temperatura dell'habitat, influenzeranno probabilmente il successo del passaggio dallo stadio giovanile a quello maturo. I copepoditi (stadi giovanili dei copepodi), e gli adulti del copepode calanoide *Calanus glacialis*, rappresentano la principale fonte di carbonio per i giovani merluzzi polari, essenziale per l'accumulo di riserve lipidiche nel fegato e nei muscoli, necessarie per sopravvivere all'inverno (Bouchard e Fortier, 2020; Copeman et al., 2020). Durante la crescita i giovani merluzzi polari tendono a spostarsi verso acque più profonde rispetto allo strato superficiale, dove vivevano da larve, in quanto nuotano meglio, tollerano meglio il freddo e cercano aree più ricche di cibo. Dopo aver raggiunto una lunghezza di 30-55 mm alla fine della prima estate, tendono a spostarsi verso strati d'acqua più profondi nell'Oceano Pacifico e Atlantico (Borkin et al., 1987b; Ponomarenko, 2000b; Bouchard e Fortier, 2011; Benoit et al., 2014; Geoffroy et al., 2016; Majewski et al., 2016). Tuttavia, una parte dei giovani e degli individui immaturi rimane legata al ghiaccio marino, conducendo uno stile di vita simpagico (Lønne e Gulliksen, 1989; David et al., 2016). Si pensa che gli esemplari nati più tardi, restino associati al ghiaccio all'inizio dell'inverno per evitare la predazione da parte degli adulti (cannibalismo) o la competizione con individui più grandi nati nello stesso anno. Questi giovani si spostano poi verso acque più profonde solo al raggiungimento della maturità sessuale, tra i 2 e i 3 anni di età (Craig et al., 1982; Geoffroy et al., 2016).

I merluzzi polari immaturi (età 1 o 2 anni), sono molto sensibili alle alte temperature, infatti, l'esposizione prolungata a valori superiori a 6 °C rallenta la crescita e riduce l'efficienza con cui utilizzano il cibo, mentre il metabolismo aumenta, richiedendo più energia per sopravvivere (Kunz et al., 2016; Laurel et al., 2016; Laurel et al., 2017; Kunz et al., 2018). Temperature più elevate, tra 10 e 12 °C, possono provocare una crescita negativa e un aumento della mortalità (Laurel et al., 2016). Questi giovani pesci possono trovarsi sia sotto il ghiaccio marino, dove si nutrono di prede simpagiche (Lønne e Gulliksen, 1989; David et al., 2016; Kohlbach et al., 2017), sia in acque profonde libere dal ghiaccio, dove la loro dieta è composta da copepodi e

altri piccoli invertebrati (Orlova et al., 2009; Walkusz et al., 2011; Hop e Gjøsæ-ter, 2013; Nahrgang et al., 2014; Geoffroy et al., 2019). La progressiva riduzione del ghiaccio e i ritardi nella sua formazione limitano l'habitat disponibile per i giovani merluzzi, diminuendo anche la presenza delle loro prede (Kohlbach et al., 2017; Hop et al., 2021a). Di conseguenza è probabile che una parte dei giovani merluzzi sia costretta a spostarsi verso acque più profonde (Borkin et al., 1987a; Dupont et al., 2021).

Il merluzzo polare adulto (età > 2 anni) può vivere in acque con temperature fino a 13,5 °C, ma la temperatura ottimale è tra 3 °C e 10 °C (Drost et al., 2016; Kunz et al., 2016; Laurel et al., 2017; Leo et al., 2017; Koenker et al., 2018a; Koenker et al., 2018). Alle latitudini più meridionali del suo areale, temperature più elevate sono associate a una minore abbondanza delle popolazioni adulte (Eriksen et al., 2015; Marsh e Mueter, 2020; Chawarski et al., 2022). Con la crescita gli adulti tendono a spostarsi verso acque più profonde, soprattutto negli strati più profondi, al largo o all'interno dei fiordi artici (Falk-Petersen et al., 1986; Wathne et al., 2000; Christiansen et al., 2012; Geoffroy et al., 2016; Majewski et al., 2016; Forster et al., 2020). Il merluzzo polare si riproduce più volte nel corso della sua vita (Hop et al., 1995; Nahrgang et al., 2014). Le aree di riproduzione ipotizzate si trovano in diverse zone dell'Artico, tra cui il Mare di Barents, il Mare di Kara, il Mare di Pechora e l'arcipelago di Severnaya Zemlya (Huserbråten et al., 2019; Aune et al., 2021; Chernova, 2021). In alcune occasioni, i merluzzi polari giovani e adulti formano delle grandi aggregazioni vicino alla superficie (Crawford e Jorgenson, 1996), osservate sia in aree costiere, che lungo il bordo del ghiaccio, in particolare nell'artico siberiano e in quello canadese (Andriashev et al., 1954; Moskalenko, 1964; Andriashev et al., 1980). Questi banchi di merluzzi polari offrono un importante fonte di cibo per predatori marini, come foche, uccelli e balene, anche se i meccanismi che ne determinano la formazione sono ancora sconosciuti.

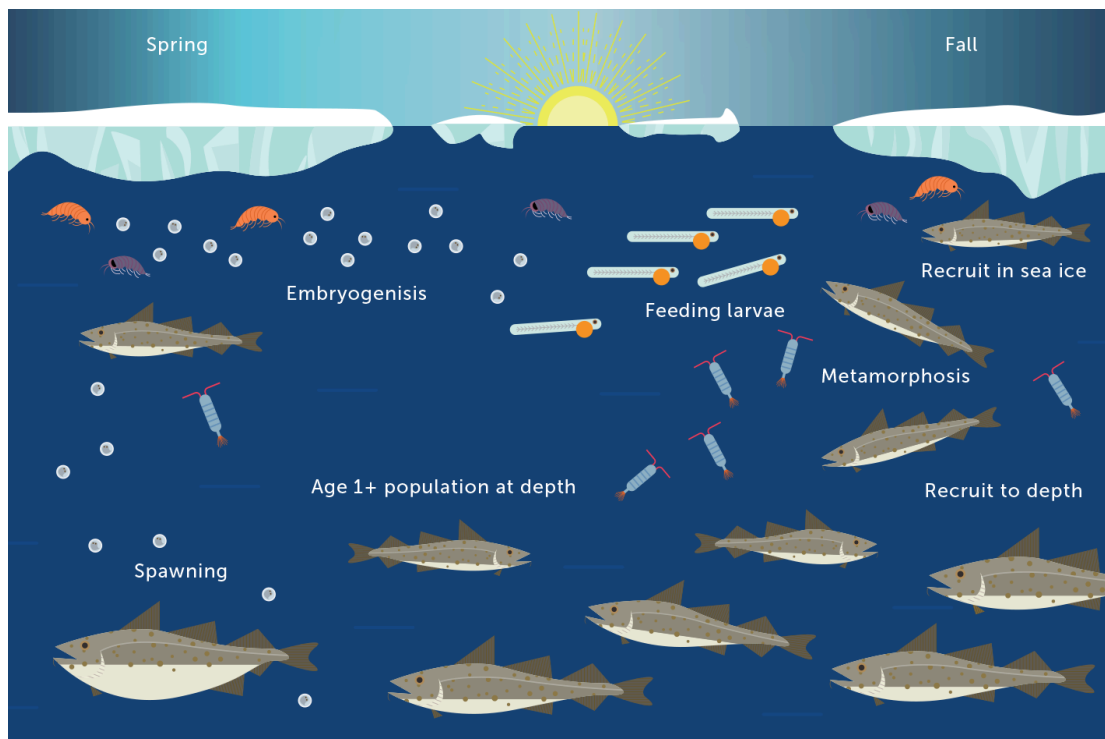


Figura 2. Il ciclo vitale del merluzzo polare nei mari artici (Immagine di Geoffroy et al., 2023).

1.3 Fisiologia e adattamenti al freddo

Nei pesci polari la vita in acque vicine al punto di congelamento rappresenta una grande sfida. Come tutti gli organismi a sangue freddo, il loro metabolismo dipende dalla temperatura dell'ambiente: quando questa scende, anche le attività cellulari rallentano. Per continuare a vivere e mantenere le funzioni vitali, questi animali devono trovare un nuovo equilibrio tra l'energia che producono e quella di cui hanno bisogno. Ci riescono regolando diversi processi: come la velocità delle reazioni enzimatiche, la diffusione dei nutrienti e la flessibilità delle membrane cellulari, che devono rimanere funzionali anche a temperature vicino allo zero (Hochachka e Somero, 2002; Somero, 2004).

All'inizio del Novecento, i primi studi di Ege e Krogh (1914) mostrarono che al diminuire della temperatura, il metabolismo dei pesci rallenta in modo prevedibile. Da queste osservazioni nacque la cosiddetta "curva del metabolismo standard" (Krogh, 1916). Qualche decennio più tardi, Scholander e colleghi (1953) confrontarono i consumi di pesci tropicali e artici, notando che questi ultimi mantenevano un metabolismo sorprendentemente alto anche a 0 °C. Si pensò quindi che le specie polari fossero metabolicamente adattate al freddo, cioè capaci di mantenere un'attività metabolica più elevata di quella prevista, per specie temperate alle stesse temperature. Nel complesso il metabolismo del merluzzo polare risulta essere capace di adattarsi alle basse temperature, grazie a una regolazione fine dei processi cellulari. Queste strategie dall'ottimizzazione mitocondriale alla gestione delle riserve energetiche permettono al merluzzo polare di mantenere attive le sue funzioni vitali, anche in acque prossime al punto di congelamento. Anche se il dibattito sull'adattamento metabolico al freddo rimane aperto, è chiaro che il merluzzo polare ha sviluppato altre strategie di sopravvivenza fondamentali per affrontare le condizioni estreme del suo ambiente. Tra queste le glicoproteine antigelo (AFGP, *Antifreeze Glycoproteins*) rappresentano uno degli adattamenti più importanti, perché permettono al merluzzo polare di sopravvivere nelle gelide acque artiche. Si tratta di una straordinaria innovazione evolutiva nei membri della famiglia dei merluzzi nordici (*Gadidae*), fondamentale per evitare la morte per congelamento inoculativo, un rischio costante in ambienti dove temperature vicine allo zero possono far gelare i fluidi corporei. Per lungo tempo, l'origine genomica e il meccanismo molecolare di questo tratto adattativo sono rimasti poco chiari. Oggi sappiamo che le AFGP si legano ai cristalli di ghiaccio, che entrano in contatto con il corpo del pesce e ne bloccano la crescita, impedendo così la formazione di ghiaccio all'interno dei tessuti e proteggendo i fluidi corporei iposmotici dal congelamento (DeVries, 1983; Cheng, 1998). In questo modo i liquidi interni del merluzzo polare restano fluidi anche a temperature prossime a -1,8 °C, consentendogli di sopravvivere dove pochi altri organismi potrebbero. Studi di genetica molecolare più recenti (Baalsrud et al., 2017; Zhuang et al., 2018) hanno dimostrato che i geni responsabili delle AFGP, si sono evoluti *de novo* a partire da un gene ancestrale, non correlato alle funzioni antigelo, probabilmente un gene coinvolto nella funzione digestiva che ha acquisito una nuova funzione nel tempo. Le glicoproteine antigelo sono presenti anche nei pesci antartici. In entrambi i gruppi le AFGP sono codificate da una famiglia di geni poliproteici. Nonostante questa somiglianza, analisi dettagliate delle sequenze e delle sottostrutture dei geni AFGP, forniscono una solida prova che le glicoproteine in queste due famiglie di pesci polari, si siano in realtà evolute in modo indipendente. Nei pesci antartici deriva dal gene del tripsinogeno pancreatico, mentre nei pesci artici non è correlato a quel gene (Chen et al., 1997).

CAPITOLO 2 - IMPATTI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO E PRESSIONI ANTROPICHE

2.1 Riscaldamento delle acque e perdita del ghiaccio marino

Negli ultimi decenni le condizioni fisiche e biologiche nell'Oceano Artico stanno cambiando a ritmi senza precedenti (Gaston et al., 2003; Polyakov et al., 2005; Steele et al., 2011; Barber et al., 2015; Berge et al., 2015; Carmack et al., 2015, 2016). Il ghiaccio marino simbolo dell'ambiente artico è oggi più sottile, fragile e discontinuo: non solo si è ridotta l'estensione, ma anche la qualità, lo spessore e la stabilità del ghiaccio pluriennale (Krishfield et al., 2014; Vaughan et al., 2013; Perovich et al., 2014). In molte aree sono state registrate anomalie di temperatura superficiale del mare (SST) fino a 5 °C, oltre la media stagionale, con estati sempre più calde e prolungate (Steele et al., 2008; Timmermans e Proshutinsky, 2014). Le temperature delle acque più profonde tra i 60 e gli 800 metri stanno diventando più calde a causa dell'ingresso di flussi di acqua dall'Atlantico e dal Pacifico (Polyakov et al., 2010; Shimada et al., 2006). Di conseguenza l'ecosistema marino artico nel suo insieme si sta riorganizzando. Le acque più calde e la perdita di ghiaccio stanno modificando la stratificazione e la quantità di luce, mentre l'acidificazione ne altera l'equilibrio chimico. A questo si aggiunge la migrazione delle specie non autoctone, che cambiano la composizione delle comunità marine e la dinamica della rete trofica. (Gaston et al., 2003; Wassmann et al., 2011; Hutchings et al., 2012; Barber et al., 2015; Carmack et al., 2016; Steiner et al., 2015).

Le variazioni termiche e la progressiva riduzione del ghiaccio marino descritte in precedenza hanno effetti diretti e indiretti sulle specie che abitano l'Oceano Artico. In particolare, il merluzzo polare risente in modo significativo del riscaldamento delle acque, che ne condiziona la sua sopravvivenza, la riproduzione e la distribuzione geografica. La distribuzione del merluzzo polare si sta espandendo verso nord, a causa del riscaldamento delle acque oceaniche, come osservato negli ultimi anni nei mari di Barents e di Bering (Geoffroy et al., 2023). Nella parte meridionale del suo areale in particolare nei passaggi del Pacifico e dell'Atlantico, le acque stanno diventando sempre più calde e offrono condizioni favorevoli alle specie boreali, a discapito del merluzzo polare. Le popolazioni di merluzzo polare alle latitudini più elevate potrebbero inizialmente beneficiare di un moderato aumento della temperatura. In alcune regioni acque leggermente più calde potrebbero favorire la crescita e la sopravvivenza delle larve e dei giovani (Bouchard e Fortier, 2011; Dupont et al., 2020). Tuttavia, nel lungo termine, questi effetti positivi potrebbero essere contrastati da ulteriori fattori di stress, quali il cambiamento nella composizione della dieta, l'aumento della competizione interspecifica, le attività di pesca, la maggiore pressione predatoria e la mortalità invernale (Bouchard et al., 2017; Dupont et al., 2021).

Le prime fasi del ciclo vitale sono quelle più vulnerabili. Gli embrioni, ad esempio, muoiono al di sopra dei 2 °C (Dahlke et al., 2018), questo significa che anche un piccolo aumento della temperatura può compromettere il successo riproduttivo della specie. La riduzione del ghiaccio marino modifica l'habitat di riproduzione e di sopravvivenza delle uova, che possono essere più esposte ai predatori e influisce sulla disponibilità e sulla qualità del cibo (Wassmann et al., 2006; Soreide et al., 2010; Dahlke et al., 2018; Hop et al., 2021b). Gli individui più giovani e gli adulti presentano aggregazioni segregate spazialmente e verticalmente come osservato nel

Mare di Kara (Borkin, 2008; Dolgov et al., 2011), nei mari di Laptev e Siberia orientale (Glebov et al., 2016) e nel Mare di Beaufort (Geoffroy et al., 2016). Nel Mare di Barents sud-orientale, due meccanismi principali sembrano spiegare la forte variabilità osservata nel reclutamento del merluzzo polare, entrambi legati al ghiaccio marino e alla temperatura (Husebraten et al., 2019). Il primo è un fenomeno di abbinamento/disabbinamento trofico, tipico degli ecosistemi stagionalmente coperti di ghiaccio. Le larve di merluzzo polare si nutrono principalmente degli stadi naupliari del copepode artico *Calanus Glacialis*, che si sviluppano durante le fioriture di fitoplancton associate allo scioglimento dei ghiacci. Negli anni con una copertura ridotta o assente, la fioritura primaverile si verifica invece in anticipo e segue un modello “atlantico”, guidato dalla stratificazione termica più che dal disgelo. Questo disallineamento temporale comporta una minore disponibilità di prede nel momento critico dell'alimentazione larvale, con conseguente aumento della mortalità. Il secondo meccanismo è di natura termica: temperature estive eccessivamente elevate possono spingere le larve oltre la soglia di tolleranza fisiologica, riducendone la sopravvivenza (Husebraten et al., 2019). Analisi a lungo termine mostrano infatti che gli anni più caldi (ad esempio, 1990, 1995, 2000, 2012-2013 e 2016-2017), corrispondono ai periodi di reclutamento più basso della specie.

Le proiezioni climatiche per il Mare di Barents indicano, che entro il 2050 si verificheranno sempre più anni con copertura di ghiaccio ridotta o assente, rendendo l'attuale area di nursery del settore sudorientale, sempre meno adatta al successo riproduttivo del merluzzo polare. Al contrario, le aree più settentrionali come quelle a est delle Svalbard potrebbero mantenere condizioni favorevoli alla deposizione delle uova e alla formazione del ghiaccio, diventando sempre più importanti per il mantenimento degli stock artici nel futuro. Entro la metà del XXI secolo il continuo riscaldamento degli oceani potrebbe portare a una diminuzione dell'abbondanza del merluzzo polare (Steiner et al., 2019), provocando una compressione latitudinale della sua distribuzione. Infatti, l'habitat termico idoneo si sposterà progressivamente verso nord, riducendo la presenza della specie alle latitudini. Nella maggior parte dei mari artici, l'abbondanza relativa del merluzzo polare all'interno della comunità ittica probabilmente fluttuerà in base ai cicli climatici più freddi e più caldi, come osservato nei mari di Bering, Labrador e Barents (Eriksen et al., 2015; Vihtakari et al., 2018; Marsh e Mueter, 2020). Questi risultati mettono in evidenza il ruolo cruciale dei collegamenti biofisici tra temperatura, ghiaccio, e disponibilità di cibo nel determinare il successo del reclutamento del merluzzo artico e, di conseguenza, la stabilità dell'intera rete trofica marina.

In conclusione, data la ristretta tolleranza termica nelle prime fasi di vita alle alte temperature, combinata con ulteriori fattori di stress legati al riscaldamento degli oceani, è possibile che il rischio associato all'aumento della temperatura sia da considerarsi molto elevato per le uova, elevato per le larve e i giovani, e moderato per gli individui immaturi e adulti. Senza la copertura protettiva del ghiaccio marino, gli adulti che nuotano in branchi nelle zone costiere, sono più esposti alla predazione da parte dei mammiferi marini e degli uccelli marini (Welch et al., 1993; Crawford e Jorgenson, 1996). Inoltre, l'aumento della luce sott'acqua migliorerà il campo visivo delle specie planctivore come il merluzzo polare, ma anche la visibilità dei loro predatori (Varpe et al., 2015; Langbehn e Varpe, 2017).

2.2 Acidificazione e variazione di salinità

La salinità gioca un ruolo cruciale per le dinamiche dell'Oceano Artico. La densità delle masse d'acqua artiche è controllata principalmente dalla salinità piuttosto che dalla temperatura (Aagaard e Carmack, 1989), e le acque dolci tendono a stratificarsi sopra quelle più salate. Questa stratificazione della salinità è essenziale per la presenza del ghiaccio marino perché agisce inibendo la convezione termica profonda, cioè il rimescolamento verticale delle masse d'acqua, mantenendo separate le acque superficiali fredde da quelle più calde in profondità (Bulgakov, 1962; Carmack, 2007; Timmermans e Marshall, 2020), e isola il ghiaccio marino artico dalle masse d'acqua più calde di origine pacifica e atlantica presenti in profondità. Inoltre, si ritiene che le variazioni del contenuto di acqua dolce nell'Oceano Artico, possano avere ripercussioni anche su altre regioni oceaniche, attraverso l'esportazione di acqua dolce verso il Nord Atlantico. È stato suggerito che tale esportazione influenzi la stratificazione nelle aree di convezione profonda, e modifichi l'intensità della circolazione meridionale di ribaltamento atlantica (Jahn e Holland, 2013; Karcher et al., 2005; Sévellec e Fedorov, 2016; Wang et al., 2018).

L'acidificazione degli oceani procede oggi più rapidamente nell'Oceano Artico, rispetto alla maggior parte degli altri bacini marini. Questo fenomeno è dovuto principalmente alla perdita di copertura di ghiaccio marino, che favorisce un contatto più diretto tra l'atmosfera e la superficie oceanica, aumentando l'assorbimento di anidride carbonica (CO₂) da parte dell'acqua. A ciò si aggiunge il crescente apporto di acqua dolce, derivante dallo scioglimento dei ghiacci e dai fiumi artici, caratterizzato da una minore alcalinità e capacità tampone, che riduce la capacità dell'oceano di neutralizzare l'acidità in eccesso. I mari marginali dell'Oceano Artico sono fortemente influenzati dagli apporti di acqua dolce, e il riscaldamento globale sta modificando in modo significativo questo equilibrio. Negli ultimi decenni si è registrato un aumento delle precipitazioni nei bacini dei grandi fiumi artici, un incremento dell'acqua proveniente dallo scioglimento dei ghiacciai e un maggiore deflusso fluviale verso l'oceano (Peterson et al., 2002; Hanna et al., 2008; Bintanja e Selten, 2014; Tedesco e Fettweis, 2020). Secondo i rapporti climatici entro la fine del secolo si prevede un aumento del 30% del deflusso artico complessivo, con un anticipo delle piene primaverili e un incremento dei flussi invernali, che ridurranno la stagionalità (Nummelin et al., 2016; Stadnyk et al., 2021). Questi cambiamenti avranno effetti rilevanti sugli ecosistemi marini e sul merluzzo polare. In alcune regioni, l'aumento di acqua dolce potrebbe favorire le schiuse invernali, poiché una maggiore stratificazione della colonna d'acqua può creare condizioni più stabili per le uova e per le larve (Nummelin et al., 2016; Stadnyk et al., 2021). Tuttavia, un deflusso più intenso può ridurre la salinità superficiale (Spall et al., 2013; White-field et al., 2015) e trascinare le uova e le larve lontano dalle aree di nursery, diminuendo così le probabilità di sopravvivenza. Inoltre, un maggiore apporto fluviale può aumentare la torbidità delle acque (Doxaran et al., 2015), ostacolando l'alimentazione delle larve, che sono dei predatori visivi e tendono ad evitare ambienti altamente torbidi (Ponton e Fortier, 1992). L'acqua dolce dei fiumi può anche trasportare inquinanti e sostanze organiche provenienti dalle aree industrializzate (Harms et al., 2000), con potenziali effetti tossici sulle diverse fasi del ciclo vitale del merluzzo polare. La formazione di uno strato superficiale più freddo e meno salato può far affondare uova e larve verso profondità maggiori, dove risultano più protette dai predatori e dai raggi ultravioletti (Bouchard et al., 2021). Tuttavia, questo processo modifica anche la profondità dello strato di mescolamento e la dinamica dell'attività primaria (Oliver et al., 2018; Yamaguchi e Suga, 2019; Hordoir et al., 2022), con

possibili ripercussioni sulla disponibilità di nutrienti e, di conseguenza, sulle catene alimentari di cui il merluzzo polare fa parte. Dato che le diverse regioni dell'Oceano Artico variano notevolmente per quantità e origine dell'acqua dolce ricevuta, è difficile generalizzare gli impatti di questi processi. Anche se in base alle conoscenze attuali, si ritiene che i cambiamenti negli apporti di acqua dolce rappresentino un rischio elevato per la sopravvivenza di uova e larve e un rischio moderato per individui giovani, immaturi e adulti.

In sintesi, l'aumento dell'acidificazione e le variazioni di salinità costituiscono due pressioni ambientali strettamente interconnesse che agiscono sia a livello chimico, che fisico, sugli ecosistemi artici. La loro combinazione può modificare la distribuzione, la crescita e la sopravvivenza delle specie artiche come il merluzzo polare, con possibili effetti a cascata sull'intera rete trofica dell'Oceano Artico.

2.3 Pressioni antropiche

Il riscaldamento globale e, in particolare, la riduzione del ghiaccio marino stanno favorendo un aumento delle attività antropiche nell'Artico, tra cui la pesca, la navigazione, l'estrazione di petrolio e gas, e il turismo (Kaiser et al., 2016). Queste attività introducono nell'ambiente artico una serie di nuove pressioni o intensificano quelle già esistenti, modificando le condizioni chimiche e fisiche dell'ecosistema. Queste trasformazioni comportano diverse forme di disturbo per l'ambiente marino, tra cui l'inquinamento chimico, l'aumento del rumore subacqueo e l'illuminazione artificiale, che possono incidere sul comportamento e sul benessere del merluzzo polare. Sebbene il merluzzo polare non sia mai stato una specie bersaglio di grande importanza per il commercio, è stato comunque pescato in passato da Norvegia e Russia nel Mare di Barents, dagli anni 30' fino al 2012. La Norvegia sospese già la sua pesca nel 1975, con una piccola eccezione nel 1981 (circa 100 tonnellate), mentre la Russia continuò l'attività fino al 2012, nelle acque orientali del Mare di Barents, vicino all'arcipelago della Nuova Zemlja tra il 1992 e il 2011 (Boitsov et al., 2013). Come per altri pesci foraggio, lo stock di merluzzo polare nel Mare di Barents mostra forti variazioni annuali nel numero di giovani e una mortalità naturale dovuta alla predazione. La pesca esercitata tra la fine degli anni 60' e la metà degli anni 80' ebbe un impatto negativo evidente su questi stock, tanto che la Russia fu costretta a sospendere le attività tra il 1977 e il 1980 e di nuovo tra il 1989 e il 1992 (Boitsov et al., 2013). Attualmente non esistono pesche commerciali attive per questa specie in Canada o negli Stati Uniti. È inoltre improbabile che il merluzzo polare diventi un bersaglio su larga scala nei prossimi anni, perché le zone in cui vive sono troppo lontane dai principali porti, e il suo valore commerciale è relativamente basso. Tuttavia, può essere catturato in modo accidentale durante altre attività di pesca. Nel Mare di Barents le principali operazioni a strascico nelle aree dove si trova il merluzzo polare, riguardano la pesca del gamberetto boreale (*Pandalus borealis*) (Jacques et al., 2019). Le catture accidentali, meglio conosciute come *bycatch*, devono essere sbarcate solo se superano il 10% del pescato totale, ma negli ultimi anni non sono stati registrati sbarchi di merluzzo polare, questo significa che il *bycatch* oggi è molto basso. Anche in altre regioni come l'Artico canadese orientale e la Groenlandia occidentale, il merluzzo polare viene catturato come *bycatch*, nelle reti a strascico utilizzate per la pesca commerciale dell'ippoglosso nero (*Reinhardtius hippoglossoides*) e del gambero boreale striato (*Pandalus montagui*). Le quantità sono modeste, di solito inferiori alle 50 tonnellate, con un picco massimo di 143 tonnellate nel 1993 (Treble e Nogueira, 2020; Walkusz et al., 2020).

Attualmente la pesca è l'attività marittima più diffusa nei mari artici, principalmente nel Mare di Barents, ma anche nella Baia di Baffin, nella Groenlandia occidentale e nel Pacifico artico meridionale (Aastrup et al., 2018; Protezione dell'Artico Ambiente marino PAME, 2020). Con il cambiamento climatico il progressivo ritiro del ghiaccio renderà accessibili per periodi sempre più lunghi, ampie aree di piattaforma continentale finora inaccessibili, aprendo la strada a una espansione verso nord delle flotte commerciali. Questa espansione riguarda soprattutto specie ittiche boreali come lo scorfano, il merluzzo atlantico, l'eglefino e il merluzzo verde sul lato atlantico e il merluzzo bianco del Pacifico (Haug et al., 2017; Meclemburgo et al., 2018; Sme et al., 2020). Nel Mare dei Ciukci, ad esempio, il merluzzo del Pacifico ha ampliato di recente la propria distribuzione verso nord, raggiungendo le piattaforme artiche, dove la Russia ha già autorizzato alcune pesche sperimentali (Orlotov et al., 2021). Questo scenario ha sollevato preoccupazioni per il futuro, perché l'espansione verso nord delle specie boreali potrebbe aumentare la mortalità accidentale del merluzzo polare,

catturato insieme ai pesci più grandi e commercialmente rilevanti (Christiansen et al., 2014). È probabile che la pesca futura rimanga concentrata sulle piattaforme e sui pendii continentali, dove è possibile l'uso dello strascico. In questo scenario il merluzzo polare continuerà a essere una specie di *bycatch*, soprattutto nella pesca dei gamberetti e dell'ipoglosso. Le reti da pesca commerciali selettive per taglia colpiscono soprattutto gli individui adulti, che vivono in profondità, mentre gli stadi giovanili risultano meno esposti. Con l'esaurimento degli stock ittici nelle regioni meridionali, gli stock artici potrebbero diventare più attraenti per la pesca illegale non dichiarata e non regolamentata (Muir et al., 2010). Le normative sulla pesca all'interno della giurisdizione di un paese sono determinate dal rispettivo paese. Tuttavia, non esiste un meccanismo di *governance* congiunto per la regione artica che crei e attui una protezione al di fuori delle giurisdizioni nazionali (Hossain e Czarski, 2018). Esiste un accordo internazionale temporaneo per la prevenzione della pesca non regolamentata nell'alto mare dell'Oceano Artico centrale che vieta alle navi di pescare ai fini commerciali, e che sottolinea il ruolo della gestione basato sulla scienza (Vylegzhanin et al., 2020). Accanto alle strategie geopolitiche e industriali per sfruttare al meglio un Artico sempre più accessibile (Dadwal, 2014; Heininen, 2020), le comunità della ricerca e della politica chiedono una gestione proattiva coordinata e rapida degli usi umani dell'Artico (Crépin et al., 2017; Huntington et al., 2022; Niiranen et al., 2018; Smieszek et al., 2021).

L'Oceano Artico nonostante la sua apparente lontananza dalle attività umane è oggi esposto a un'ampia varietà di contaminanti che si accumulano negli ecosistemi marini e influenzano le specie che li abitano, tra cui il merluzzo polare. Tra i principali ci sono: gli inquinanti organici persistenti (POP), come i bifenili policlorurati (PCB) e il diclorodifeniltricloroetano (DDT); i metalli pesanti come il mercurio e la sua forma organica metilmercurio; diversi pesticidi ancora in uso (ad esempio le endosulfan); gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA); e contaminanti più recenti, come le sostanze perfluoroalchiliche (PFAS) (Haukås et al., 2007; Morris et al., 2016; Pedro et al., 2017; Gopakumar et al., 2021; Spataro et al., 2021). La maggior parte di queste sostanze arriva da lontano, trasportata da correnti atmosferiche, oceaniche e fluviali (Macdonald et al., 2000). Una volta raggiunti gli ecosistemi artici, i contaminanti si accumulano negli organismi, e con il passare del tempo la loro concentrazione aumenta man mano che si sale lungo la catena alimentare, un fenomeno noto come biomagnificazione (Atwell et al., 1998; Hop et al., 2002; Borgå et al., 2004). Il merluzzo polare assorbe queste sostanze soprattutto attraverso il cibo, ingerendo piccoli crostacei o pesci già contaminati. L'esposizione varia in base alla taglia del pesce, alla dieta e all'area in cui si alimenta (Loseto et al., 2008; Pedro et al., 2017). In generale le concentrazioni di contaminanti nel merluzzo polare sono piuttosto basse rispetto a quelle misurate nei predatori di livello trofico superiore, come i mammiferi marini (Dietz et al., 2019). Alcuni studi hanno cercato di capire come il merluzzo reagisca all'esposizione a queste sostanze, analizzando parametri biologici come l'attività degli enzimi di biotrasformazione, responsabili della detossificazione dei contaminanti, metaboliti biliari o i danni al DNA. I risultati mostrano differenze tra aree e stagioni (Nahrgang et al., 2010; Jonsson et al., 2010; Tomy et al., 2014; Vieweg et al., 2017), ma queste variazioni sembrano legate soprattutto a fattori naturali, come il periodo riproduttivo o il comportamento alimentare, più che a reali differenze nei livelli di contaminazione.

L'aumento del traffico marino comporta un continuo rilascio di inquinanti come IPA e vernici antivegetative (Svavarsson et al., 2021), mentre la ricerca e l'estrazione di petrolio e gas possono causare sversamenti accidentali, o rilasci di acque di

produzione contaminanti (Beyer et al., 2020). Gli effetti delle fuoriuscite di petrolio sono tra i più studiati. Le prime fasi del ciclo vitale come ad esempio uova e larve, sono le più sensibili, infatti in laboratorio si è osservato che l'esposizione al petrolio riduce la crescita, la sopravvivenza e provoca deformità nello sviluppo (Nahrgang et al., 2016; Laurel et al., 2019). Anche gli adulti mostrano una condizione corporea peggiore e una crescita ridotta in presenza di petrolio (Christiansen e George, 1995; Bender et al., 2018; Nahrgang et al., 2019). Questi effetti peggiorano con l'aumento della temperatura (Bender et al., 2021). Diversi esperimenti hanno valutato la tossicità del petrolio greggio su questa specie (Gardiner et al., 2013; Camus et al., 2015; Bejarano et al., 2017), ma spesso su periodi troppo brevi per rilevare gli effetti più lenti e duraturi. Anche i modelli ecologici che stimano l'impatto delle fuoriuscite (Gallaway et al., 2017; Nevalainen et al., 2017; Fahd et al., 2019; De Vries et al., 2021) tendono a concentrarsi solo sulla mortalità immediata, senza considerare le conseguenze ecologiche a lungo termine. In realtà non sappiamo ancora se gli effetti osservati sugli individui, possano tradursi in danni significativi a livello di popolazione. È probabile che l'impatto dell'inquinamento, dipenda dallo stato generale di salute delle popolazioni di merluzzo e dall'intensità dei fattori di stress ambientali (Durant e Hjermmann, 2017; Dupont et al., 2021). La combinazione tra inquinamento e riscaldamento climatico potrebbe avere effetti più forti, soprattutto sulle prime fasi di vita più delicate e più sensibili (De Vries et al., 2021).

Negli ultimi anni è emersa una nuova forma di contaminazione: le microplastiche. Si tratta di piccole particelle, inferiori a 5 mm, provenienti dalla degradazione dei rifiuti plastici o dai prodotti di uso quotidiano. Sono state trovate nei giovani e negli adulti di merluzzo polare catturati nell'Oceano Artico centrale, nelle Svalbard e nel Mare di Beaufort (Kuhn et al., 2018; Morgana et al., 2018; Moore et al., 2022). Gli effetti delle microplastiche sugli organismi marini sono ancora poco noti, ma si ritiene che possano causare danni fisici, infiammazioni, alterazioni metaboliche e persino trasportare sostanze tossiche o contaminati chimici adsorbiti sulla loro superficie (Diepens e Koelmans, 2018; Halsband e Herzke, 2019).

L'aumento delle attività nell'Artico come la navigazione e l'esplorazione di sorgenti petrolio e gas, che include l'uso di cannoni ad aria sismica o attività di perforazione, sta modificando in modo sensibile il paesaggio sonoro sottomarino (Geoffroy et al., 2023). I suoni prodotti dalle navi o dalle esplosioni sismiche possono avere effetti fisici comportamentali e fisiologici sugli organismi marini, a seconda dell'intensità del rumore e della distanza dalla fonte (Carroll et al., 2017; PAME, 2020). Uno studio condotto nei Territori del Nord-Ovest, in Canada, ha mostrato che durante i mesi estivi i livelli di rumore sottomarino aumentano notevolmente, soprattutto a causa del traffico navale, del vento e delle onde (Halliday et al., 2020). Al momento esiste solo uno studio specifico che abbia analizzato come il rumore delle imbarcazioni influenzi il comportamento del merluzzo polare. I risultati indicano che questi pesci reagiscono alla presenza delle navi facendo movimenti orizzontali per allontanarsi, riducendo così la loro attività esplorativa (Ivanova et al., 2020). Non si sanno ancora quali conseguenze possano avere questi cambiamenti sul lungo periodo, ma il merluzzo polare è una specie che produce suoni sottomarini (Riera et al., 2018), e ogni interferenza acustica potrebbe comportare un costo energetico aggiuntivo, soprattutto se avviene nei momenti cruciali di alimentazione o riproduzione (Ivanova et al., 2020).

Oltre al rumore l'aumento della presenza e attività umana incrementa anche l'inquinamento luminoso, noto come luce artificiale notturna ALAN (*Artificial Light at Night*). Durante la notte polare, quando l'ambiente resta al buio per mesi, anche piccole fonti di luce artificiale possono avere degli effetti significativi. La luce

influisce sul comportamento di molti organismi marini, e nel caso del merluzzo polare può alterare il suo modo di alimentarsi e la disponibilità delle prede (Davis et al., 2020; Geoffroy et al., 2021). Ricerche recenti hanno dimostrato che la luce che proviene da navi o da strutture di ricerca, può modificare il comportamento di pesci e zooplancton fino a profondità superiori a 200 metri (Ludvigsen et al., 2018; Berge et al., 2020). Per il merluzzo polare l'effetto è soprattutto indiretto: la luce può interferire con i movimenti verticali quotidiani dello zooplancton, la principale fonte di cibo della specie (Berge et al., 2009). Cambiamenti nei ritmi di migrazione del plancton possono quindi ridurre le opportunità di alimentazione, soprattutto durante la lunga notte invernale. Sembra che gli effetti dell'ALAN siano per ora limitati alle aree più vicine alle rotte navali e alle infrastrutture illuminate.

Negli ultimi anni si sono registrate fioriture di HAB o fioriture algali nocive (dall'inglese *Harmful Algal Blooms*) nel Passaggio Pacifico-Artico, un fenomeno che può influenzare anche lo zooplancton di cui si nutre il merluzzo polare (Anderson et al., 2021). Le HAB producono tossine e sono poco appetibili per lo zooplacton, che tende ad evitarle. Di conseguenza questi organismi non riescono ad alimentarsi adeguatamente e questo comporta, un aumento della mortalità e una riduzione della produzione di uova. Inoltre, se non vengono consumate, le alghe nocive proliferano senza controllo (Sunda et al., 2006). Questi fenomeni sono stati collegati a periodi di riscaldamento anomalo delle acque (Lefebvre et al., 2022), e potrebbero diventare più frequenti con l'aumento delle temperature, sommando i loro effetti alle altre pressioni già in atto.

In generale, se i livelli di inquinamento e di disturbo continueranno a crescere, il rischio per le prime fasi di vita del merluzzo polare, come uova e larve, sarà elevato, poiché queste sono particolarmente sensibili alle sostanze tossiche e ai cambiamenti climatici. Per gli stadi più maturi invece, come gli individui giovani e adulti, il rischio è considerato moderato.

Conclusione

Negli ultimi anni il merluzzo polare è esposto a pressioni ambientali in rapido aumento, a causa del riscaldamento globale e dell'incremento delle attività antropiche. L'ecologia del merluzzo polare è attualmente influenzata da molteplici fattori climatici come il riscaldamento degli oceani, la riduzione del ghiaccio marino, l'aumento dell'apporto di acqua dolce, l'acidificazione, l'aumento della competizione con specie boreali, l'arrivo di nuovi predatori e l'inquinamento. I cambiamenti dell'ecologia del merluzzo polare hanno un impatto su mammiferi marini, uccelli marini e cetacei, in quanto rappresenta la loro principale risorsa alimentare. Per la tutela del merluzzo polare sono state create delle Aree Marine Protette (AMP), zone dove vengono applicate delle regole specifiche per proteggere gli habitat, le specie e i processi ecologici. La loro funzione è quella di ridurre gli impatti delle attività umane e di garantire il mantenimento della biodiversità e del funzionamento degli ecosistemi marini. All'interno delle AMP, si cerca di limitare il traffico marino, ridurre l'inquinamento, mitigare il disturbo acustico generato dalle navi, e preservare le aree sensibili come le nursery, fondamentali per i primi stadi di vita del merluzzo polare. Queste misure, tuttavia, non sono sufficienti a contrastare gli effetti globali del cambiamento climatico (Geoffroy et al., 2023). La vera soluzione consiste nella riduzione delle emissioni di gas serra, responsabili del riscaldamento dell'oceano, e soprattutto, della perdita del ghiaccio marino, l'habitat essenziale per il merluzzo polare.

In conclusione, la sopravvivenza a lungo termine del merluzzo polare, richiede un approccio integrato, coordinamento internazionale, partecipazione delle comunità locali e ricerca scientifica continua. L'unica strategia realmente efficace per contrastare la perdita dell'habitat ghiacciato rimane la riduzione delle emissioni di carbonio. Senza azioni climatiche concrete, la futura stabilità delle popolazioni di merluzzo polare e dell'intero ecosistema artico rimarrà gravemente compromessa. Purtroppo, negli ultimi tempi, le scelte politiche di alcuni paesi hanno disatteso gli impegni sulla salvaguardia dell'ambiente: sembra che l'obiettivo di preservare l'ecosistema, non rappresenti più una priorità nell'interesse collettivo. Si è di fronte ad un indebolimento degli accordi internazionali, che minacciano il raggiungimento degli obiettivi globali a tutela della natura e degli uomini stessi.

Bibliografia:

A.S. Baranenkova, V.P. Ponomarenko, N.S. Khokhlina. (1966). Distribution, size, and growth of larvae and fry of the polar cod in the Barents Sea. *Vopr. Ikhtiol.* pp. 498-518.

Aaagard K., Camarck E.C. (1989). The role of the sea ice and other fresh water in The Arctic circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 14485-14498 .

Aastrup P., Ackrén M., Allard M., Archambault P., Arendt K., Barrette C., Bélanger S., Bell T., Berteaux D., Bjella K. (2018). *AMAP 2017. Adaptation actions for a changing Arctic: Perspectives from the Baffin Bay/Davis Strait Region.* Oslo, Norway: Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP).

Andriashev A. (1954). Fishes of the Arctic seas of the USSR. *Guide to Identification of USSR Fauna of the Zoological Institute of the USSR Academia of Sciences* (53).

Andriashev A.P., Mukhomedyarov B.F., Pavshikovs E.A. (1980). On great amounts of cryopelagic gadid fishes (*Boreogadus saida* and *Arctogadus glacialis*) in near-pole Arctic regions, in Vinogradov, ME, Melnikov, IA eds., *Biology of the Central Arctic Basin.* Moscow, Russia: Nauka: 196–211.

Antonov N.P., Kuznetsov V.V., Kuznetsova E.N., Tatarnikov V.A., Belorustseva S. A., & Mitenkova L.V. (2017). Ecology of Arctic cod *Boreogadus saida* (Gadiformes, Gadidae) and its fishery potential in Kara Sea. *Journal of Ichthyology.* 57(5), 721-729.

Aronovich T.M., Doroshev S.I., Spectorova L.V., Makhotin V.M. (1975) Egg incubation and larval rearing of navaga (*Eleginus navaga* Pall.), polar cod (*Boreogadus saida lepechin*) and arctic flounder (*Liopsetta glacialis* Pall.) in the laboratory.

Atwell L., Hobson K. A., Gallese LUI. (1998). Biomagnification and bioaccumulation of mercury in an Arctic marine food web: insights from nitrogen stable isotope analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(5):1114–1121.

Aune M., Raskhozheva E., Andrade H., Augustine S., Bambulyak A., Camus L., Carroll J., Dolgov A.V., Hop H., Moiseev D., Renaud P.E., Varpe O. (2021). Distribution and ecology of polar cod (*Boreogadus saida*) in the eastern Barents Sea: A review of historical literature. *Marine Environmental Research.* 166: 105262.

Bender M.L., Giebichenstein J., Teisrud RN., Laurent J., Frantzen M., Meador J.P., Sørensen L., Hansen BH., Reinardy HC., Laurel B., Nahrgang J. (2021). Combined effects of crude oil exposure and warming on eggs and larvae of an arctic forage fish.

Benoit D., Simard Y., Fortier L. (2014). Pre-winter distribution and habitat characteristics of polar cod (*Boreogadus saida*) in southeastern Beaufort Sea. *Polar Biology* 37(2): 149–163.

Benoit D., Simard Y., & Fortier L. (2008). Hydroacoustic detection of large winter aggregations of Arctic cod (*Boreogadus saida*) at depth in ice-covered Franklin Bay (Beaufort Sea). *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 113(C6).

Boitsov V.D., Dolgov A.V., Krysov A.I., Seliverstova E.I., Shevelev M.S(eds) (2013)

Polar cod of the Barents Sea. PINRO Press, Mur-mansk.

Boitsov V., Dolgov A., Krysov A., Seliverstova E., Shevelev M. (2013). *Polar cod of the Barents Sea*. Murmansk, Russia: PINRO Press.

Borgå K., Fisk A., Hoekstra P., Muir D. (2004). Biological and chemical factors of importance in the bioaccumulation and trophic transfer of persistent organochlorine contaminants in Arctic marine food webs. *Environmental Toxicology and Chemistry* 23(10): 2367–2385.

Borkin I.V., Ozhigin V.K., Shleinik V.N. (1987a). Impact of oceanological factors on year classes strength in the Barents Sea polar cod, in *The effect of oceanographic conditions on distribution and population dynamics of commercial fish stocks in the Barents Sea*.

Borkin I.V., Ponomarenko V., Tret'yak V., Shleinik V. (1987b). The polar cod *Boreogadus saida* (Lepechin)—A fish of the polar seas: Reserves and use, in *Biologicheskie Resursy Arktiki i Antarktiki*. Moscow, Russia: Nauka: 183–207 (in Russian).

Bouchard C., Charbogne A., Baumgartner F., Maes S.M. (2021). West Greenland ichthyoplankton and how melting glaciers could allow Arctic cod larvae to survive extreme summer temperatures. *Arctic Science* 7(1): 217–239.

Bouchard C., Fortier L. (2011). Circum-arctic comparison of the hatching season of polar cod *Boreogadus saida*: A test of the freshwater winter refuge hypothesis. *Progress in Oceanography* 90(1–4).

Bouchard C., Fortier L. (2020). The importance of *Calanus glacialis* for the feeding success of young polar cod: A circumpolar synthesis. *Polar Biology* 43(8): 1095–1107.

Bouchard C., Geoffroy M., LeBlanc M., Majewski A., Gauthier S., Walkusz W., Reist J.D., Fortier L. (2017). Climate warming enhances polar cod recruitment, at least transiently. *Progress in Oceanography*. 156: 121–129.

Camarck E.C., Yanatomo -Kawai, M., Haine T. W. N., Bacon S., Bluhm, B. A. (2016). Freshwater and its role in the Arctic marine system: Sources, disposition, storage, export, and consequences. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*.

Camark E.C Polyakov, I., Pandam, L., Fer, I., Hunke, E., Hutchings, J. (2015). Toward quantifying the increasing role of oceanic heat in sea ice loss in the new Arctic. *Bulletin of the American Meterological Society*.

Chen L., De Vrieres A.L., Cheng CHC. (1997). Evolution of antifreeze glycoprotein gene from Typsinogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94:3817-3822.

Chen L., Devries A., Cheng C. (1983). Evolution Antifreeze peptides and glycopeptides in cold-waterA fishes. *Annu Rev PhDeVriesysiol*. 45:245-60.

Chernova N. (2018). Arctic cod in the Russian Arctic: new data, with notes on intraspecific forms. *Journal of Aquaculture & Marine Biology*, 7(1), 00180.

Christiansen J.S. (2017). No future for Euro-Arctic ocean fishes?. *Marine Ecology Progress Series*, 575, 217-227.

- Christiansen J.S., Hop H., Nilssen E.M., Joensen J. (2012). Trophic ecology of sympatric Arctic gadoids, *Arctogadus glacialis* (Peters, 1872) and *Boreogadus saida* (Lepechin, 1774), in NE Greenland. *Polar Biology* 35(8): 1247–1257.
- Christiansen J.S., Mecklenburg C.W., Karamushko O.V. (2014). Arctic marine fishes and their fisheries in light of global change. *Global Change Biology* 20(2): 352–359.
- Copeman L., Spencer M., Heintz R., Vollenweider J., Sremba A., Helser T., Logerwell L., Sousa L., Danielson S., Pinchuk AI., Laurel B. (2020). Ontogenetic patterns in lipid and fatty acid biomarkers of juvenile polar cod (*Boreogadus saida*) and saffron cod (*Eleginus gracilis*) from across the Alaska Arctic. *Polar Biology* 43(8): 1121–1140.
- Craig PC., Griffiths WB., Haldorson L., & McElderry H. (1982). Ecological studies of Arctic cod (*Boreogadus saida*) in Beaufort Sea coastal waters, Alaska. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39(3), 395-406.
- Crawford A., Stroeve J., Smith A., & Jahn A. (2021). Arctic open-water periods are projected to lengthen dramatically by 2100. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 109.
- Dahlke FT., Butzin M., Nahrgang J., Puvanendran V., Mortensen A., Portner HO., Storch D. (2018). Northern cod species face spawning habitat losses if global warming exceeds 1.5°C. *Science Advances* 233–242.
- Darnis G., Robert D., Pomerleau C., Link H., Archambault P., Nelson R.J., & Fortier L. (2012). Current state and trends in Canadian Arctic marine ecosystems: II. Heterotrophic food web, pelagic-benthic coupling, and biodiversity. *Climatic Change*, 115(1), 179-205.
- David C.L., Lange B., Krumpfen T., Schaafsma F., Van Franeker J.A., & Flores H. (2016). Under-ice distribution of polar cod *Boreogadus saida* in the central Arctic Ocean and their association with sea-ice habitat properties. *Polar Biology*, 39(6), 981-994.
- David C.L., Ji R.B., Bouchard C., Hop H., Hutchings J.A. (2022). The interactive effects of temperature and food consumption on growth of larval Arctic cod (*Boreogadus saida*): A bioenergetic model. *Elementa: Science of the Anthropocene*.
- Deary A.L., Vestfals C.D., Mueter F.J., Logerwell E.A., Goldstein E.D., Stabeno P.J., Danielson S.L., Hopcroft R.R., Duffy-Anderson J.T. (2021). Seasonal abundance, distribution, and growth of the early life stages of polar cod (*Boreogadus saida*) and saffron cod (*Eleginus gracilis*) in the US Arctic. *Polar Biology*. 44(11): 2055–2076.
- Dietz R., Letcher R.J., Desforges J.P., Eulaers I., Sonne C., Wilson S., Andersen-Ranberg E., Basu N., Barst BD., Bustnes JO., Bytingsvik J. (2019). Current state of knowledge on biological effects from contaminants on arctic wildlife and fish. *Science of the Total Environment* 696: 133792.
- Difronzo E. *Boreogadus saida* physiological responses under future ocean acidification and warming scenarios. Tesi di laurea magistrale in Marine Biology, Università di Padova, a.a. 2023/24.
- Dolgov A.V., Orlova E.L., Johannesen E., Bogstad B., Rudneva G.B., Dalpadado P., & Mukhina NV. (2011). Planktivorous fish. In *The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation* (pp. 438-454).

- Drost H.E., Lo M., Carmack E.C., Farrell A.P. (2016). Acclimation potential of Arctic cod (*Boreogadus saida*) from the rapidly warming Arctic Ocean. *Journal of Experimental Biology* 219(19): 3114–3125.
- Dupont N., Durant J.M., Gjørseter H., Langangen Ø., Stige LC.(2021). Effects of sea ice cover, temperature and predation on the stock dynamics of the key Arctic fish species polar cod *Boreogadus saida*. *Marine Ecology Progress Series* 677: 141–159.
- Falk-Petersen I.B., Frivoll V., Gulliksen B., Haug T. (1986). Occurrence and size/age relations of polar cod, *Boreogadus saida* (Lepechin), in Spitsbergen coastal waters. *Sarsia* 71(3–4): 235–245.
- Forster C.E., Norcross B.L., Mueter F.J., Logerwell E.A., Seitz A.C. (2020). Spatial patterns, environmental correlates, and potential seasonal migration triangle of polar cod (*Boreogadus saida*) distribution in the Chukchi and Beaufort seas. *Polar Biology* 43(8): 1073–1094.
- Gaston A. J., Gilchrisit, H. G., Hipfner, J.M. (2003). Climate change, ice conditions and the breeding of thick-billed murre (Uria lomvia) in the Arctic: A multidecade study. *Arctic*.
- Geffroy M., Bouchard C., Flores H., Robert D., Gjørseter H., Hoover C., Hop H., Hussey N.E., Nahrgang J., Steiner N., Bender M., Berge J., Castellani G., Chernova N., Copeman L., David C.L., Deary A., Divoky G., Dolgov A.V., Duffy-Anderson J., Dupont N., Durant J.M., Elliot K., Gauthier S., Goldstein E.D., Gradinger R., Hedges K., Herbig J., Laurel B., Loseto L., Maes S., Mark F.C., Mosbech A., Pedro S., Pettitt-Wade H., Prokopchuk I., Renaud P.E., Schembri S., Vestfals C., Walkusz W., (2023). The circumpolar impacts of climate change and anthropogenic stressors on Arctic cod (*Boreogadus saida*) and its ecosystem. *Elementa : Science of the Anthropocene* volume 1:1-32.
- Geoffroy M., Majewski A., LeBlanc M., Gauthier S., Walkusz W., Reist J.D., Fortier L. (2016). Vertical segregation of age-0 and age-1+ polar cod (*Boreogadus saida*) over the annual cycle in the Canadian Beaufort Sea. *Polar Biology* 39(6).
- Geoffroy M., Daase M., Cusa M., Darnis G., Graeve M., Santana Hernández N., Berge J., Renaud P.E., Cottier F., Falk-Petersen S. (2019). Mesopelagic sound scattering layers of the High Arctic: Seasonal variations in biomass, species assemblage, and trophic relationships. *Frontiers in Marine Science* 6: 364.
- Gjørseter H., Huserbråten M., Vikebø F., & Eriksen E. (2020). Key processes regulating the early life history of Barents Sea polar cod. *Polar Biology*, 43(8), 1015-1027.
- Gopakumar A., Giebichenstein J. Raskhozheva E., Borgå K. (2021). Mercury in Barents Sea fish in the Arctic polar night: Species and spatial comparison. *Marine Pollution Bulletin* 169: 112501.
- Gradinger R.R., & Bluhm B.A. (2004). In-situ observations on the distribution and behavior of amphipods and Arctic cod (*Boreogadus saida*) under the sea ice of the High Arctic Canada Basin. *Polar Biology*, 27(10), 595-603.
- Haug T., Bogstad B., Chierici M., Gjørseter H., Hallfredsson E.H., Høines A.S., Håkon-Hoel A.H., Ingvaldsen R.B., Jørgensen L.L., Knutsen T., Loeng H., Naustvoll L.J., Røttingen I., Sunnanå K. (2017). Future harvest of living resources in the Arctic Ocean north of the Nordic and Barents Seas: A review of possibilities and constraints.

Fisheries Research 188: 38–57.

Herbig J., Fisher J., Bouchard C., Niemi A., LeBlanc M., Majewska A., Gauthier S., Geffroy M. (2023). Climate and juvenile recruitment as drivers of Arctic cod (*Boreogadus saida*) dynamics in two Canadian Arctic seas. *Elementa: Science of the Anthropocene*.

Hochacka P.W., Somero G.N. (2002). Biochemical adaptation: Mechanism and process in physiological evolution. Oxford University Press.

Hop H., Borgå K., Gabrielsen G.W., Kleivane L., Skaare J.U. (2002). Food web magnification of persistent organic pollutants in poikilotherms and homeotherms from the Barents Sea. *Environmental Science & Technology* 36(12): 2589–2597.

Hop H., Gjørseter H. (2013). Polar cod (*Boreogadus saida*) and capelin (*Mallotus villosus*) as key species in marine food webs of the Arctic and the Barents Sea. *Marine Biology Research* 9(9): 878–894.

Hop H., Trudeau V.L., Graham M. (1995). Spawning energetics of Arctic cod (*Boreogadus saida*) in relation to seasonal development of the ovary and plasma sex steroid levels. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52(3): 541–550.

Hop H., Graham M. (1995). Respiration of juvenile Arctic cod (*Boreogadus saida*): effects of acclimation, temperature, and food intake. *Polar Biol* 15, 359–367 (1995).

Hop H., Tonn W.M., & Welch, H.E. (1997). Bioenergetics of Arctic cod (*Boreogadus saida*) at low temperatures. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54(8), 1772-1784.

Hop H., Vihtakari M., Bluhm B.A., Daase M., Gradinger R., Melnikov I.A. (2021a). Ice-associated amphipods in a pan-Arctic scenario of declining sea ice. *Frontiers in Marine Science* 8: 743152.

Hop, H., Wold, A., Meyer, A., Bailey, A., Hatlebakk, M., Kwasniewski, S., et al. (2021b). Winter-spring development of the zooplankton community below sea ice in the Arctic Ocean.

Huserbråten M.B.O., Eriksen E., Gjørseter H., Vikebø F. (2019). Polar cod in jeopardy under the retreating Arctic sea ice. *Communications Biology* 2(1): 407.

I.G. Yudanov. (1976). Zoogeography of polar cod in the Arctic ocean. *Priroda i khoziaistvo severa* (nature and economy of the north). Murmansk: Murm. Knizhn. Izd., 4 (1976), pp. 111-113.

Ivanova S.V., Kessel S.T., Espinoza M., McLean M.F., O'Neill C., Landry J., Hussey N.E., Williams R., Vagle S., Fisk A.T. (2020). Shipping alters the movement and behavior of Arctic cod (*Boreogadus saida*), a keystone fish in Arctic marine ecosystems. *Ecological Applications* 30(3).

Jacques N., Herrmann B., Larsen R.B., Sistiaga M., Brčić J., Gökçe G., Brinkhof J. (2019). Can a large-mesh sieve panel replace or supplement the Nordmøre grid for bycatch mitigation in the northeast Atlantic deep-water shrimp fishery? *Fisheries Research* 219.

Jonsson H., Sundt R.C., Aas E., Sanni S. (2010.) The Arctic is no longer put on ice: Evaluation of Polar cod (*Boreogadus saida*) as a monitoring species of oil pollution in cold waters. *Marine Pollution Bulletin* 60(3): 390–395

Karamushko L.I., Raskhozheva E., V. & Karamusko O.V. (2021). Population structure and growth of polar cod *Boreogadus saida* in the Sea of Laptev. *Journal of Ichthyology* volume 61 pp 564-575.

Klumov, S. K. (1937). The Arctic Cod (*Boreogadus saida* Lepechin, 1774) and Its significance for Some Life Processes in Arctic. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Biol*, (1), 175-195.

Koenker B.L., Copeman L.A., Laurel B.J. (2018a). Impacts of temperature and food availability on the condition of larval Arctic cod (*Boreogadus saida*) and walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*). *ICES Journal of Marine Science* 75(7): 2370–2385.

Koenker, B.L., Laurel, B.J., Copeman, L.A., Ciannelli, L. (2018b). Effects of temperature and food availability on the survival and growth of larval Arctic cod (*Boreogadus saida*) and walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*). *ICES Journal of Marine Science* 75(7): 2386–2402.

Kohlbach D., Schaafsma F.L., Graeve M., Lebreton B., Lange B.A., David C., Vortkamp M., Flores H. (2017). Strong linkage of polar cod (*Boreogadus saida*) to sea ice algae-produced carbon: Evidence from stomach content, fatty acid and stable isotope analyses. *Progress in Oceanography* 152: 62–74.

Kono Y., Sasaki H., Kurihara Y., Fujiwara A., Yamamoto J., & Sakurai Y. (2016). Distribution pattern of Polar cod (*Boreogadus saida*) larvae and larval fish assemblages in relation to oceanographic parameters in the northern Bering Sea and Chukchi Sea. *Polar Biology*, 39(6), 1039-1048.

Kunz K.L., Claireaux G., Portner H.O., Knust R., Mark F.C. (2018). Aerobic capacities and swimming performance of polar cod (*Boreogadus saida*) under ocean acidification and warming conditions. *Journal of Experimental Biology* 221(21).

Kunz K.L., Frickenhaus S., Hardenberg S., Johansen T., Leo E., Portner H.O., Schmidt M., Windisch H.S., Knust R., Mark F.C. (2016). New encounters in Arctic waters: A comparison of metabolism and performance of polar cod (*Boreogadus saida*) and Atlantic cod (*Gadus morhua*) under ocean acidification and warming. *Polar Biology* 39(6): 1137–1153.

L.N. Pechenik, V.P. Ponomarenko, L.I. (1973). Shepel. *Biologia i promysel saiki v Barentsevom more (Biology and fishery of the Barents Sea polar cod)*. Pishchevay promyshlennost', Moscow, p. 68.

Laurel B.J., Copeman L.A., Spencer M., Iseri P. (2018). Comparative effects of temperature on rates of development and survival of eggs and yolk-sac larvae of Arctic cod (*Boreogadus saida*) and walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*). *ICES Journal of Marine Science* 75: 2403–2412

Laurel B.J., Copeman L.A., Spencer M., & Iseri P. (2017). Temperature-dependent growth as a function of size and age in juvenile Arctic cod (*Boreogadus saida*). *ICES Journal of Marine Science*, 74(6), 1614-1621.

Laurel B.J., Spencer M., Iseri P., Copeman L.A. (2016). Temperature-dependent growth and behavior of juvenile Arctic cod (*Boreogadus saida*) and co-occurring North Pacific gadids. *Polar Biology* 39(6): 1127–1135.

Leo E., Kunz K.L., Schmidt M., Storch D., Pörtner H.O., Mark F.C. (2017). Mitochondrial acclimation potential to ocean acidification and warming of Polar cod

(*Boreogadus saida*) and Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Frontiers in Zoology* 14(1): 21.

Lønne O.J., Gulliksen B. (1989). Size, age and diet of polar cod, *Boreogadus saida* (Lepechin 1773), in ice covered waters. *Polar Biology* 9(3): 187–191.

Loseto L., Stern G., Deibel D., Connelly T., Prokopowicz A., Lean D., Fortier L., Ferguson S. (2008). Linking mercury exposure to habitat and feeding behaviour in Beaufort Sea beluga whales. *Journal of Marine Systems* 74(3–4): 1012–1024.

Macdonald R.W., Barrie L.A., Bidleman T.F., Diamond M.L., Gregor D.J., Semkin R.G., Strachan W., Li Y.F., Wania F., Alae M. (2000). Contaminants in the Canadian Arctic: 5 years of progress in understanding sources, occurrence and pathways. *Science of the Total Environment* 254(2–3): 93–234.

Majewski A.R., Walkusz W., Lynn B.R., Atchison S., Eert J., Reist J.D. (2016). Distribution and diet of demersal Arctic Cod, *Boreogadus saida*, in relation to habitat characteristics in the Canadian Beaufort Sea. *Polar Biology* 39(6): 1087–1098.

Marsh J.M., Mueter F.J., Quinn T.J. (2020) Environmental and biological influences on the distribution and population dynamics of polar cod (*Boreogadus saida*) in the US Chukchi Sea. *Polar Biol* 43: 1055–1072.

Mason G.G., Bryndum-Buchholz A., Placios- Abrantes J., Bandhe R., Morgante I., Bianchi D., Blanchard J.L., Everett J.D., Harrison C.S., Heneghan R.F., Novaglio C., Petrick C.M. (2024). Key Uncertainties and Modeling Needs for Managing Living Marine Resources in the Future Arctic Ocean. *Advancing Earth and Space Sciences*.

Maznikova O.A., Emelin P.O., Baitalyuk A.A., Vedishcheva E.V., Trofimova A.O., Orlov A.M. (2023). Polar cod (*Boreogadus saida*) of the Siberian Arctic: Distribution and biology. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. Volume 208.

Mecklenburg C.W., Lynghammar A., Johannesen E., Byrkjedal I., Christiansen J.S., Dolgov A.V., Karamushko O.V., Mecklenburg T.A., Møller P.R., Steinke D., Wienerroither R.M. (2018) *Marine fishes of the Arctic region*. Akureyri, Iceland: Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF): vol. I: 1–454; vol. II: 455–739.

Melnikov I.A., & Chernova, N.V. (2013). Characteristics of under-ice swarming of polar cod *Boreogadus saida* (Gadidae) in the Central Arctic Ocean. *Journal of Ichthyology*, 53(1), 7-15.

Meredith M.P., Sommerkorn M., Cassotta S., Derksen C., Ekaykin A.A., Hollowed A.B., & Schuur E.A. (2019). Polar regions. In *The Ocean and cryosphere in a changing climate: Summary for policymakers* (pp. 3-1). Intergovernmental Panel on Climate Change.

Michalsen K., Dalpadado P., Eriksen E., Gjosaeter, R.B., Ingvaldsen, E., Johannensen, L.L., Jorgensen, T., Knutsen, D., Prozorkevich, M. (2013). Sherkn-Mauritzen. Marine living resources of the Barents Sea- ecosystem understanding and monitoring in a climate change perspective. *Mar. Biol.* pp 932.

Morris A.D., Muir D.C, Solomon K.R., Letcher R.J., McKinney M.A., Fisk A.T., McMeans B.C., Tomy G.T., Teixeira C., Wang X. (2016). Current-use pesticides in seawater and their bioaccumulation in polar bear–ringed seal food chains of the Canadian Arctic. *Environmental Toxicology and Chemistry* 35(7): 1695–1707.

- Moskalenko B. (1964). On the biology of the polar cod (*Boreogadus saida*). *Voprosy of Ikhtiology*, 4, 435-443.
- Muir M.A.K. (2010). Illegal, Unreported and Unregulated Fishing in the Circumpolar Arctic. *Arctic*, 63(3), 373–378.
- Nahrgang J., Varpe O., Korshunova E., Murzina S., Hallanger I.G., Vieweg I., Berge J. (2014). Gender specific reproductive strategies of an Arctic key species (*Boreogadus saida*) and implications of climate change.
- Nelson R.J., Bouchard C., Fortier L., Majewski A.R., Reist J.D., Præbel K., & Divoky G.J. (2020). Circumpolar genetic population structure of polar cod, *Boreogadus saida*. *Polar Biology*, 43(8), 951-961.
- Notz D., & Community, S. I. M. I. P. (2020). Arctic sea ice in CMIP6. *Geophysical Research Letters*, 47(10), e2019GL086749.
- Notz D., & Stroeve J. (2018). The trajectory towards a seasonally ice-free Arctic Ocean. *Current climate change reports*, 4(4), 407-416.
- Nummelin A., Ilicak M., Li C., Smedsrud L.H. (2016). Consequences of future increased Arctic runoff on Arctic Ocean stratification, circulation, and sea ice cover. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121(1): 617–637.
- Orlov A.M., Rybakov M.O., Vedishcheva E.V., Volkov A.A., Orlova S.Y. (2021). Walleye Pollock *Gadus chalcogrammus*, a species with continuous range from the Norwegian Sea to Korea, Japan, and California: New records from the Siberian Arctic. *Journal of Marine Science and Engineering* 9(10): 1141.
- Orlova E.L., Dolgov A.V., Rudneva G.B., Oganin I.A., Konstantinova L.L. (2009). Trophic relations of capelin *Mallotus villosus* and polar cod *Boreogadus saida* in the Barents Sea as a factor of impact on the ecosystem. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(21–22): 2054–2067.
- Overland J.E., & Wang M. (2013). When will the summer Arctic be nearly sea ice free?. *Geophysical Research Letters*, 40(10), 2097-2101.
- Pedro S., Fisk A.T., Tomy G.T., Ferguson S.H., Hussey N.E., Kessel S.T., McKinney M.A. (2017). Mercury and persistent organic pollutants in native and invading forage species of the Canadian Arctic: Consequences for food web dynamics. *Environmental Pollution* 229: 229–240.
- Polyakov, I. V., Beszczynska-Möller, A., Carmack, E. C., Dmitrenko, I. A., Fahrbach, E., Frolov, I. E., Timokhov, L. A. (2005). One Arctic Ocean. *Science*.
- Ponomarenko V. (2000a). Eggs, larvae, and juveniles of polar cod *Boreogadus saida* in the Barents, Kara, and White Seas. *Journal of Ichthyology* 40(2): 165–173.
- Ponomarenko V. (2000b). Seasonal changes in feeding of the Barents Sea polar cod *Boreogadus saida* (Lepechin) (based on materials of 1956-1964), in *Marine hydrobiological investigations*.
- Ponomarenko V.P. (1968). Some data on the distribution and migrations of polar cod in the seas of the Soviet Arctic.
- Ponton, D., Fortier, L. (1992). Vertical distribution and foraging of marine fish larvae under the ice cover of southeastern Hudson Ecology Progress Series.

Protection of the Arctic Marine Environment (2020). The Rise of Arctic Maritime Transport (2013–2019). Arctic Maritime Transport Status Report (ASSR) No. 1. Akureyri, Iceland: Arctic Marine Environment Protection Secretariat (PAME).

Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Laaksonen A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications earth & environment*, 3(1), 168.

Rass T. (1968) Spawning and development of polar cod. Rapports et procès-verbaux des réunions International Council for the Exploration of the Sea. Scientific Reports

Riera A., Rountree R.A., Pine M.K., Juanes F. (2018). Sounds of Arctic cod (*Boreogadus saida*) in captivity: A preliminary description. *The Journal of the Acoustical Society of America* 143(5).

Saba G.K., Steinberg D.K., Place A.R (2011). The effects of harmful algal species and food concentration on zooplankton grazer production of dissolved organic matter and inorganic nutrients. *Harmful Algae* 10(3) : 291-303.

Sakurai Y., Ishii K., Nakatani T., Yamaguchi H., Anma G., Jin M. (1998). Reproductive characteristics and effects of temperature and salinity on the development and survival of eggs and larvae of Arctic cod (*Boreogadus saida*). *Memoirs of the Faculty of Fisheries Hokkaido University* 45(1): 77–89.

Savin A., Krinisty M., Osadchiev A. (2024). Improved sea surface salinity data for the Arctic Ocean derived from Smap satellite data using machine learning approaches. *Frontiers in Marine Science*.

Scott W.B., & Scott M.G. (1988). Atlantic fishes of Canada.

Somero, G.N. (2004). Adaptation of enzymes to temperature: Searching for basic strategies. Comparative biochemistry and physiology Part B: biochemistry and molecular biology .

Shleinik V. (1970). *Distribution and migration of polar cod in the eastern Barents Sea*. Copenhagen, Denmark: ICES.

Shimada, K., Kamoshida, T., Ithon M., Nishino S., Camarck E., McLaughlin F., Zimmermann S. (2006). Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*.

Smé N.A., Lyon S., Mueter F., Brykov V., Sakurai Y., Gharrett A. (2020). Examination of saffron cod *Eleginus gracilis* (Tilesius 1810) population genetic structure. *Polar Biology* 43(8): 963–977.

Spataro F., Patrolecco L., Ademollo N., Præbel K., Rauseo J., Pescatore T., Corsolini S. (2021). Multiple exposure of the *Boreogadus saida* from Bessel Fjord (NE Greenland) to legacy and emerging pollutants. *Chemosphere* 279: 130477.

Spencer M.L., Vestfals C.D., Mueter F.J., Laurel B.J. (2020). Ontogenetic changes in the buoyancy and salinity tolerance of eggs and larvae of polar cod (*Boreogadus saida*) and other gadids. *Polar Biology* 43(8): 1141–1158.

Steele M., Erndt, W., Zhang, J. (2011). Modeling the formation and fate of the near-surface temperature maximum in Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*.

- Steffensen J.F. (2002). Metabolic cold adaptation of polar fish based on measurements of aerobic oxygen consumption: fact or artefact? *Artefact! Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 132 : 789-795.
- Svavarsson J., Guls H.D., Sham R.C., Leung K.M., Halldórsson H.P. (2021). Pollutants from shipping—New environmental challenges in the subarctic and the Arctic Ocean. *Marine Pollution Bulletin* 164: 112004.
- Timmermans M. L., & Proshuntinsky A (2014). Artic Ocean sea surface temperature. *Oceanography*.
- Treble M.A., Nogueira A. (2020). Assessment of the Greenland halibut stock component in NAFO subarea 0 + 1 (offshore). NAFO SCR Document 20/038.
- Tynan C.T., & DeMaster D.P. (1997). Observations and predictions of Arctic climatic change: potential effects on marine mammals. *Arctic*, 308-322.
- V.N. Shleinik. (1973). The state of stock and perspectives of polar cod (*Boreogadus saida*) fishery in the Barents Sea. Formirovanie godovykh klassov I ekspluatatsiya zapasov promyslovykh ryb Barentseva I Norvezhskogo morei (Formation year-classes and exploitation of commercial fish stocks in the Barents and Norwegian Seas). Tr. Polar. Nauchno-Issled. Inst. Rybn Khoz Okeanogr, 33 pp. 225-236.
- V.P. Ponomarenko. (1964). Regions and conditions of polar cod spawning in the Barents Sea. Materialy Sessii Uchenogo Soveta PINRO Po Rezul'tatam Issledovaniy 1962–1963 Gg. (Materials of the PINRO Scientific Council Based on the Results of PINRO Research in 1962-1963), vol. 3 pp. 220-226.
- Vaughan D.G., Comiso J.C., Allison I., Carrasco J., Kaser G., Know R. (2013). Observations : Cryosphere. In climate Change 2013: The Physical Science Basis.
- Walkusz W., Paulic J.E., Williams W.J., Kwasniewski S., Papst M.H. (2011). Distribution and diet of larval and juvenile Arctic cod (*Boreogadus saida*) in the shallow Canadian Beaufort Sea. *Journal of Marine Systems* 84(3–4): 78–84.
- Walkusz W., Atchison S., Hedges K., Deslauriers D. (2020). Assessment of potential impacts of bycatch mortality on the Arctic cod (*Boreogadus saida*) populations from the Northern (*Pandalus borealis*) and striped (*Pandalus montagui*) shrimp fisheries in shrimp fishing areas 1, 2, and 3. Canada: Canadian Science Advisory Secretariat (CSAS) Research Document.
- Wathne J., Haug T., Lydersen C. (2000). Prey preference and niche overlap of ringed seals *Phoca hispida* and harp seals *P. Groenlandica* in the Barents Sea. *Marine Ecology Progress Series* 194: 233–239.
- Welch H.E., Bergmann M.A., Siferd T.D., Martin K.A., Curtis M.F., Crawford R.E., & Hop H. (1992). Energy flow through the marine ecosystem of the Lancaster Sound region, Arctic Canada. *Arctic*, 343-357.
- Wienerroither R., Johannesen E., Dolgov A., Byrkjedal I., Aglen A., Bjelland O., Drevetnyak K., Eriksen K.B., Høines A., Langhelle G., Langøy H., Murashko P., Prokhorova T., Prozorkevich D., Smirnov O., Wenneck T. (2013). Atlas of the Barents Sea fishes based on the winter survey. IMR-PINRO Joint Rep Ser, p. 220.
- Wienerroither R., Johannesen E., Dolgov A., Byrkjedal I., Bjelland I., Drevetnyak

K., Eriksen K.B., Høines A., Langhelle G., Langøy H., Prokhorova T., Prozorkevich, D., Wenneck T. (2011). Atlas of the Barents Sea fishes. IMR/PINRO Joint Rep Ser, p. 272.

Zhuang X., Murphy K.R., Ghigliotti L., Pisano E., Cheng C.-H.C. (2018). Reconstruction of the repetitive antifreeze glycoprotein genomic loci in the cold-water gadids *Boreogadus saida* and *Microgadus tomcod*. *Marine Genomics*, Volume 39, pp73-84.