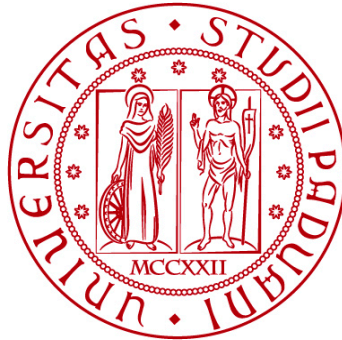


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Biologia



ELABORATO DI LAUREA

Meta-analisi dell'effetto delle variazioni di carichi di nutrienti sugli stock pelagici negli ecosistemi marini

Tutor: Alberto Barausse

Laureanda: Yasmine Cirstea

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

ABSTRACT

Negli ultimi anni sono sempre più discussi i temi della gestione della pesca e dell'eutrofizzazione, forti pressioni umane sugli ecosistemi marini che vengono esercitate soprattutto a livello costiero. La seconda ha un effetto complesso sugli stock demersali, in quanto essi possono beneficiare della maggiore produttività dell'ecosistema che ne deriva, ma risentono invece negativamente dell'ipossia. La relazione fra eutrofizzazione e risorse pelagiche è più chiara secondo i modelli concettuali classici di tipo bottom-up, che propongono una correlazione positiva fra nutrienti e produttività ittica. Tali modelli concettuali tuttavia non sempre riescono a spiegare le evidenze empiriche. Per chiarire tale relazione il presente lavoro ha analizzato dati relativi a stock pelagici in diversi ecosistemi marino-costieri del pianeta per studiare la loro risposta ai cambiamenti di produttività dell'ecosistema (oligotrofizzazione ed eutrofizzazione), mediante ricerca di letteratura e analisi di dataset online.

L'analisi statistica delle serie temporali raccolte, dai nutrienti al plancton fino ai pesci, ha avuto lo scopo di evidenziare la presenza di controlli trofici bottom-up e/o top-down in tali ecosistemi pelagici, contribuendo a una maggior comprensione delle dinamiche ecologiche su larga scala.

INDICE

1.	INTRODUZIONE.....	1
1.1.	Gestione degli ecosistemi marini.....	1
1.2.	Comprensione del funzionamento degli ecosistemi marini.....	2
1.3.	Controllo trofico.....	3
1.4.	Scopo.....	4
2.	MATERIALI E METODI.....	5
3.	RISULTATI.....	6
3.1.	Mare Adriatico.....	7
3.2.	Mar Baltico.....	9
3.3.	Mare Nero.....	10
3.4.	Mare del Nord.....	12
3.5.	Mar di Marmara.....	14
4.	DISCUSSIONE.....	16
5.	CONCLUSIONI.....	20
6.	BIBLIOGRAFIA.....	21

1. INTRODUZIONE

1.1. Gestione degli ecosistemi marini

I mari sono stati fin dall'antichità un'importante fonte di sostentamento per l'essere umano, principalmente come fonte di risorse biotiche per uso alimentare come pesci e invertebrati, ma anche abiotiche, come fonte di gas naturali, minerali ed energia rinnovabile. Negli ultimi anni problemi come l'aumento dell'urbanizzazione delle coste, il maggior sfruttamento delle risorse marine per via della crescita demografica mondiale (Gilbert et al., 2005) ed il rilascio di sostanze chimiche nei mari hanno però portato alla perturbazione degli ecosistemi. Lo sforzo di pesca globale sembra essere aumentato negli ultimi decenni (Bell et al., 2017), inoltre i dati suggeriscono che sia diminuita drasticamente la biomassa dei grandi pesci pelagici (Myers e Worm, 2003), che sono spesso quelli ad avere un maggior prezzo di mercato (Tsikliras e Polymeros, 2014), oltre ad evidenziare un generale sovrasfruttamento di tutte le reti trofiche (Pauly et al., 1998). A sua volta l'eutrofizzazione è un fattore potenzialmente di forte impatto che provoca una crescita anomala del fitoplancton costiero, laddove la concentrazione di nutrienti è incrementata. Questo può portare a diverse problematiche: una produzione primaria maggiore con conseguenze come ipossia e/o anossia dei fondali, la formazione di acido solfidrico a livello bentonico, la formazione di bloom algali tossici con maggior frequenza e un conseguente aumento della mortalità di organismi bentonici e pelagici. Tali effetti sono stati riscontrati anche nel Mediterraneo (Marampouti et al., 2021).

Altre problematiche importanti per l'ambiente marino riguardano l'inquinamento da sostanze chimiche pericolose, talvolta non rimovibili dalle acque (Muir e Miaz, 2023), l'aumento della plastica nell'oceano (Jambek et al. 2015), il riscaldamento globale (Doney et al., 2012), nonché l'utilizzo di pratiche distruttive come la pesca a strascico o monoculture acquicole (Folke e Kautsky, 1992).

Per scongiurare il rischio di impoverimento della biodiversità, di perdita dei livelli trofici, di estinzione di specie e del depauperamento delle risorse che

il mare per millenni ha fornito, è necessaria una corretta gestione degli ecosistemi marini attuando scelte responsabili a livello personale, sociale e politico basate su una corretta comprensione del loro funzionamento socio-ecologico.

1.2. Comprensione del funzionamento degli ecosistemi marino-costieri

Appare dunque evidente la necessità di capire il funzionamento dei sistemi ecologici complessi per poterne preservare i fragili equilibri. La quantità di ricerche scientifiche relative a questo argomento sta crescendo, e man mano che si procede, emergono nuove soluzioni per affinare la gestione del problema. Rimangono tuttavia ancora ignote e scarsamente studiate alcune conseguenze delle pressioni antropiche più rilevanti dell'ultimo secolo. Prima che venissero opportunamente studiati, si riteneva che gli ecosistemi fossero in grado di tornare al loro stato di partenza una volta rimosse le pressioni necessarie. Si scoprì che non sempre è questo il caso e che nella totalità di essi uno stato identico a quello di principio non è mai stato raggiunto, un esempio molto significativo è stato il mancato ritorno ad uno stato iniziale di alcuni mari del Nord Europa dove anche rimuovendo i carichi di nutrienti, l'acqua non era tornata limpida come prima dell'eutrofizzazione. Questo suggerisce che nel frattempo i nutrienti potevano essersi infiltrati nei sedimenti e che potevano essere avvenuti cambiamenti irreversibili, come la morte di filtratori bentonici, contribuendo alla persistenza del problema (Duarte et al., 2008).

Sebbene gli strumenti di analisi statistica possano fornire informazioni sullo stato di un sistema e previsioni relativamente accurate sulle variazioni future di questo, è necessario osservare i dati empirici e trarre conclusioni basandosi sulla totalità delle informazioni a disposizione, in particolare considerando molteplici livelli trofici come cerca di fare questa tesi.

1.3. Controllo trofico

Un approccio utile a comprendere il funzionamento di un ecosistema marino è stimare nel tempo, ad esempio annualmente, lo stato di ogni livello trofico, in quanto le modifiche in un certo livello potrebbero influire sia su quelli superiori che di quelli inferiori (Hairston Jr. e Hairston Sr., 1993). In base al tipo di controllo che avviene in un certo ecosistema esso è definito come: “bottom-up”, quando fluttuazioni dell’abbondanza degli organismi dei livelli trofici più bassi influiscono su quelli più alti, con cui correlano positivamente (in questo caso ciò che origina i cambiamenti è, spesso, la variazione di parametri ambientali come ad esempio un incremento della quantità di nutrienti); “top-down”, quando cambiamenti nell’abbondanza degli organismi dei livelli trofici più alti influiscono su quelli dei livelli più bassi, con cui correlano negativamente, attraverso la predazione; “wasp-waist”, quando fluttuazioni di una specie o gruppo funzionale chiave di livello trofico intermedio, ad esempio determinate dalla variabilità ambientale, influiscono in modo bottom-up e top-down rispettivamente sui livelli trofici superiori e inferiori (Hunter e Price, 1992; Cury et al., 2001).

Il sistema marino pelagico prevede un livello base caratterizzato dalla produzione primaria del fitoplancton, la cui crescita è strettamente correlata alla disponibilità di nutrienti, alla temperatura e alla luce solare come fonte di energia primaria; le microalghe permettono la crescita di organismi di piccole dimensioni come lo zooplancton, che di esse si nutrono. L’eccessiva crescita fitoplanctonica, come citato nel capitolo sulla gestione, può essere causa di fenomeni di mortalità di massa, soprattutto a livello bentonico dove le acque diventano anossiche e gli organismi sono sessili (Gooday et al., 2009). Rimane la domanda su cosa accada però alle comunità pelagiche e quali siano le conseguenze, dirette o meno, della variazione nel trend di nutrienti degli ultimi decenni sulle comunità planctoniche e ittiche.

1.4. Scopo della tesi

Il paradigma prevalente per il funzionamento dell'ecosistema pelagico è la prospettiva bottom-up, in cui si assume una correlazione positiva tra i vari livelli trofici: più nutrienti si traducono in un aumento di microalghe, seguito da un incremento di zooplancton e, di conseguenza, una maggiore abbondanza di pesci. Per validare questa concezione su larga scala, questo lavoro ha analizzato diverse serie temporali di dati provenienti da vari ecosistemi marini. Questa analisi ha compreso periodi di aumento (come in caso di eutrofizzazione) e di diminuzione (come in situazioni di oligotrofizzazione) dei nutrienti. Mediante questa indagine, sono state poi esplorate le correlazioni tra i diversi livelli trofici, cercando di chiarire il tipo di controllo trofico presente negli ecosistemi pelagici ed osservando come la concentrazione di nutrienti possa aver influito su questo.

2. Materiali e Metodi

Per poter analizzare gli ecosistemi sono state raccolte diverse serie storiche, ad esempio da database online, ed in particolare sono state digitalizzate quelle provenienti da articoli.

Ogni livello trofico è stato definito come TL (“trophic level”) e numerato in base alla posizione che ha nella catena trofica. I nutrienti sono stati classificati come TL0, il fitoplancton come TL1, lo zooplancton come TL2, i piccoli e grandi pelagici rispettivamente come TL3 e TL4. Nel mar Nero è stato assunto come TL3 la biomassa dello ctenoforo *Mnemiopsis leidyi* in quanto consumatore di zooplancton similmente ai piccoli pesci pelagici.

Vari sono i mari che è stato possibile considerare in questo lavoro sulla base della disponibilità di dati. Il più ampio, il mare del Nord, è situato nell'europa settentrionale, e si estende per oltre 570 000 km². Di seguito, in ordine di grandezza, il mar Nero, presente tra l'Europa sud orientale e l'Asia minore, ampio 436 400km², il Mar Baltico, di 377 000 km², il mar Adriatico, situato tra la penisola balcanica e la penisola italiana, ampio 138 600km². È importante considerare, nel caso del mar Adriatico, come esso sia il punto di sbocco del fiume Po. Esso attraversa tutta la pianura padana, zona costellata da attività agricole e molto popolata, dunque è una fonte di grandi input di nutrienti. Infine il mar di Marmare, piccolo specchio di acqua salata tra mar Nero ed Egeo, ampio 11.472 km².

Le serie del mar Adriatico sono state ricavate da Barausse et. al. (2014) per i nutrienti, da Giani et al. (2012) per il fitoplancton e lo zooplancton, mentre i dati su grandi e piccoli pesci pelagici sono stati ottenuti mediante la Banca Dati della Pesca a Chioggia, dividendo lo sbarcato per la capacità di pesca (ricavato da Sguotti et al., 2022), usata come indicatore dello sforzo di pesca, e calcolando così un indicatore di abbondanza relativa (CPUE o Catch Per Unit Effort, si veda ad esempio Barausse et al., 2014).

Per il mar Baltico i dati sono stati raccolti dal database di ICES (<https://standardgraphs.ices.dk/stockList.aspx>) sottoforma di sbarcato dei pesci misurati in tonnellate³, dal database di HELCOM (http://nest.su.se/helcom_plc/) per i nutrienti misurati in tonnellate all'anno

provenienti da flussi fluviali e da quello di E.U. Copernicus Marine Service Information (<https://doi.org/10.48670/moi-00230>) per il fitoplancton, misurato come milligrammi su metro cubo.

Nel caso del Mare del Nord i dati su carichi di nutrienti sono stati digitalizzati dall'OSPAR Assessment Portal (<https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/intermediate-assessment-2017/pressures-human-activities/eutrophication/nutrients-concentrations/>), dove sono riportati come micromoli all'anno, i dati sulla clorofilla da Xu et al. (2020), mentre i dati su pesci ottenuti dal database ICES, indicati anch'essi sotto forma di sbarcato in tonnellate³ (<https://standardgraphs.ices.dk/stockList.aspx>).

Per il mar Nero i dati sono stati ottenuti da Yunev et al. (2007) per quanto concerne i nutrienti misurati come concentrazioni micromolari nelle aree costiere, da Llope et al. (2011) per lo zooplancton, da Yunev e al. (2017) per piccoli pelagici, mnemiopsis e clorofilla A ed infine da Daskalov et al. (2020) per i grandi pelagici.

Tutti i dati del mare di Marmara sono stati digitalizzati da Demirel et al. (2023).

Una volta ottenute le serie è stato utilizzato l'indice di correlazione R per ranghi di Spearman mediante PAST (Hammer e Harper, 2001) per verificare il segno e la forza dell'associazione dei parametri; a seconda del segno si può dedurre che le relazioni siano bottom-up se positive e top-down se negative. Per ognuno degli ecosistemi, inoltre, i nutrienti considerati sono stati quelli limitanti, di seguito i lavori che li hanno identificati: per il mar Adriatico è considerato il fosforo come suggerito da Barausse et al. (2014), per il mar Nero l'azoto come suggerito da Oguz e Merica (2006) per il mar Baltico l'azoto come indicato da Raudsepp et al. (2019) per il mare del Nord l'azoto come suggerito da Peeters e Peperzak, (1990) e per il mare di Marmara l'azoto, come suggerito da Tüfekçi et. al. (2010).

3. Risultati

Per ogni sistema sono stati creati dei grafici che permettano di visualizzare l'andamento delle variabili di stato dei diversi livelli trofici durante gli anni e di osservare la correlazione tra essi. Le figure nel lavoro rappresentano i grafici delle correlazioni significative (con un p-value maggiore di 0.05).

3.1. Mar Adriatico

Tabella 1. Correlazione di Spearman, livello di significatività (p-value) e numero di punti correlati tra loro per ogni livello trofico (TL) nel mar Adriatico.

ADRIATICO	TL0	TL1	TL2	TL3	TL4
TL0	/	rS=0.40 p=0.049 n=25	rS=0.35 p=0.128 n=20	rS=0.44 p=0.003 n=45	rS=-0.02 p=0.919 n=45
TL1		/	rS=0.24 p=0.301 n=20	rS=0.02 p=0.919 n=25	rS=-0.37 p=0.071 n=25
TL2			/	rS=0.80 p=2.5917x10 ⁻⁵ n=20	rS=-0.11 p=0.654 n=20
TL3				/	rS=0.02 p=0.862 n=62
TL4					/

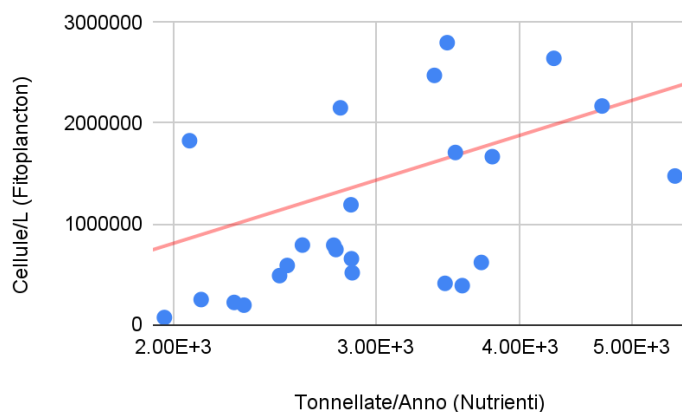
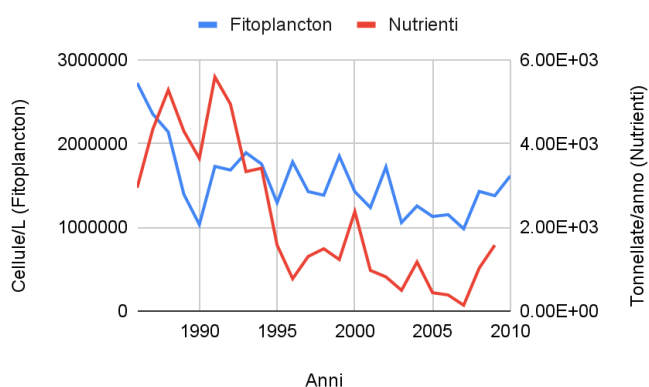


Figura 1. Correlazione tra fitoplancton (espresso in cellule su litro) e nutrienti (espressi in tonnellate all'anno) in Adriatico.

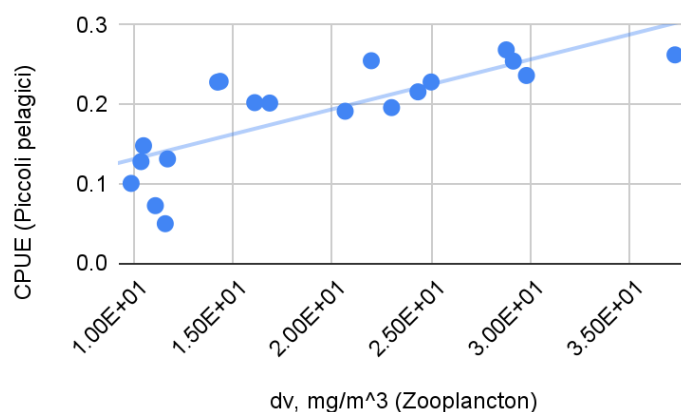
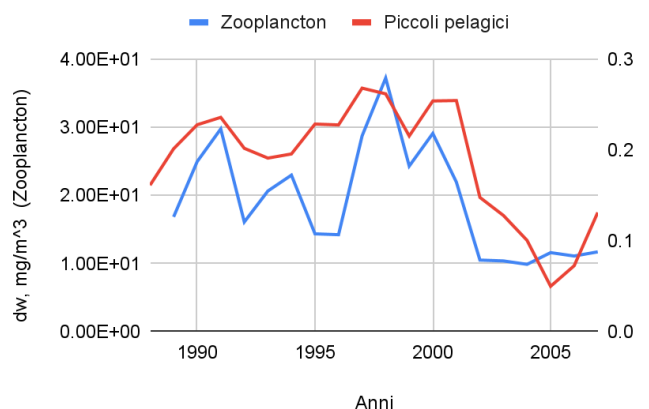


Figura 2. Correlazione tra zooplancton (espresso in milligrammi su metro quadrato, peso a secco) e piccoli pelagici (ottenuti dividendo i sbarcati espressi in tonnellate per lo sforzo di pesca).

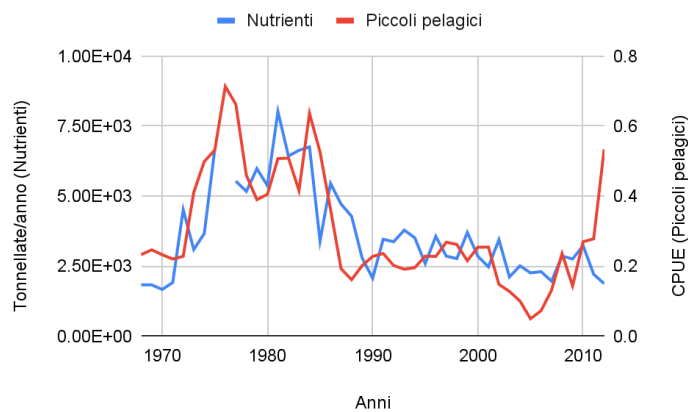
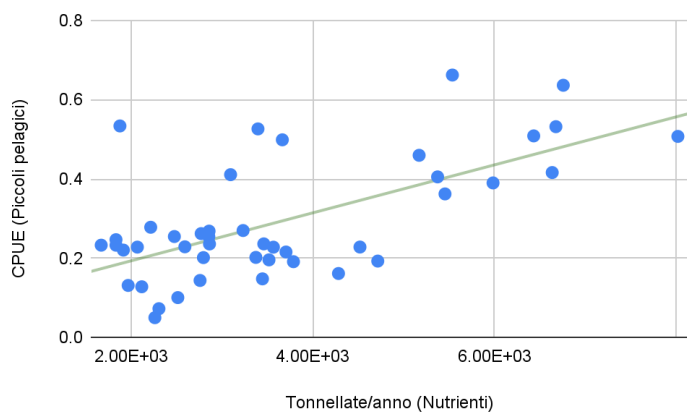


Figura 3. Correlazione tra nutrienti e piccoli pelagici..

3.2. Mar Baltico

Tabella 2. Correlazione di Spearman, livello di significatività (p-value) e numero di punti correlati tra loro per ogni livello trofico (TL) nel mar Baltico.

BALTICO	TL0	TL1	TL2	TL3	TL4
TL0	/	rS=0.05 p=0.815 n=24	Dati non disponibili	rS=-0.28 p=0.184 n=27	rS=-0.32 p=0.122 n=27
TL1		/	Dati non disponibili	rS=-0.27 p=0.185 n=25	rS=-0.37 p=0.069 n=24
TL2			/	Dati non disponibili	Dati non disponibili
TL3				/	Dati non disponibili
TL4					/

Per quanta riguarda il Mar Baltico non è stata osservata alcuna correlazione statisticamente significativa al livello 0.05, ma è stata osservata una correlazione negativa (di tipo top down) al limite della significatività con un p-value di 0.07 tra grandi pelagici e clorofilla.

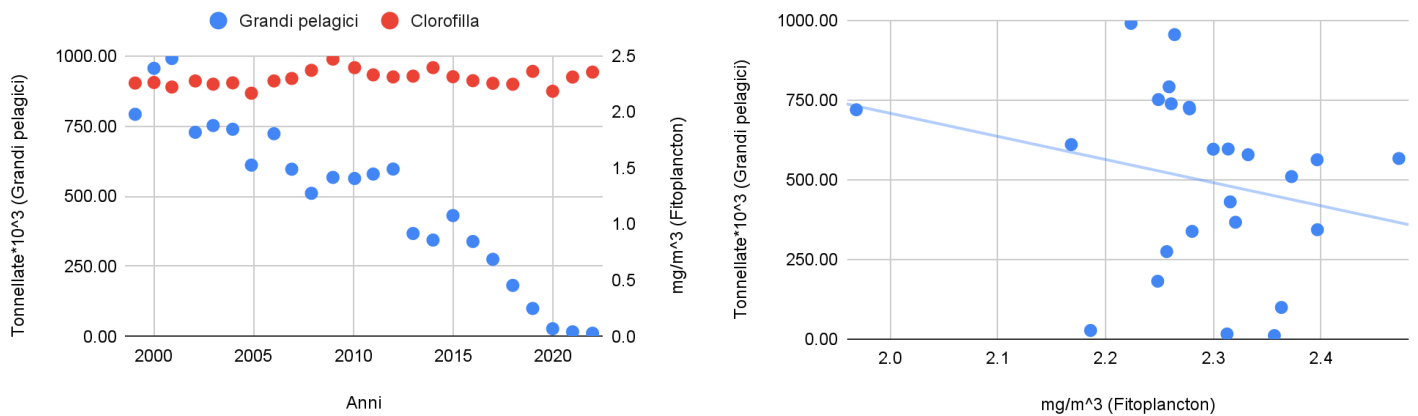


Figura 4. Correlazione tra fitoplancton (espresso in concentrazioni di clorofilla, sotto forma di milligrammi su metro cubo) e grandi pesci pelagici (espressi come tonnellate alla terza, sbarcato).

3.3. Mar Nero

Tabella 3. Correlazione di Spearman, livello di significatività (p -value) e numero di punti correlati tra loro per ogni livello trofico (TL) nel mar Nero.

In questo caso il livello trofico 3 si riferisce ai piccoli pelagici, mentre il livello trofico 3_M.Leidy si riferisce allo ctenoforo *Mnemiopsis leidyi*, zooplanctivoro e competitore dei piccoli pelagici.

NERO	TL 0	TL1	TL2	TL3	TL4	TL3_M.leidy
TL0	/	rS=0.29 p=0.078 n=36	rS=-0.24 p=0.198 n=29	rS=0.03 p=0.891 n=29	rS=0.80 p=2.11*10 ⁻⁹ n=37	rS=-0.11 p=0.822 n=7
TL1		/	rS=-0.52 p=0.001 n=29	rS=0.30 p=0.060 n=40	rS=0.18 p=0.232 n=48	rS=0.14 p=0.596 n=17
TL2			/	rS=-0.036 p=0.838 n=34	rS=0.19 p=0.259 n=34	rS=0.64 p=0.0237 n=12
TL4				/	rS=0.15 p=0.332 n=42	rS=-0.23 p=0.384 n=17

TL5					/	rS=-0.21 p=0.422 n=18
TL3						/

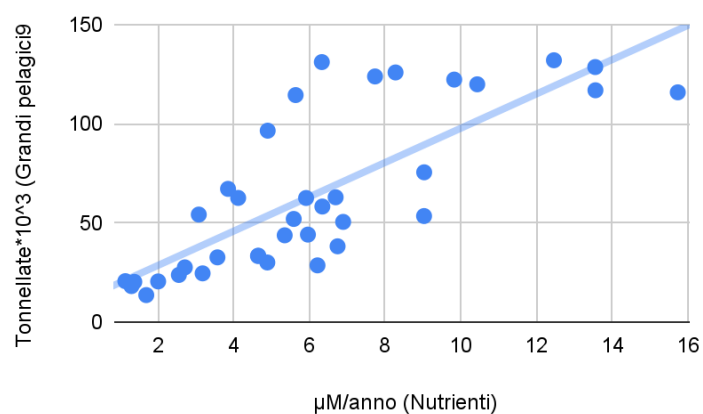
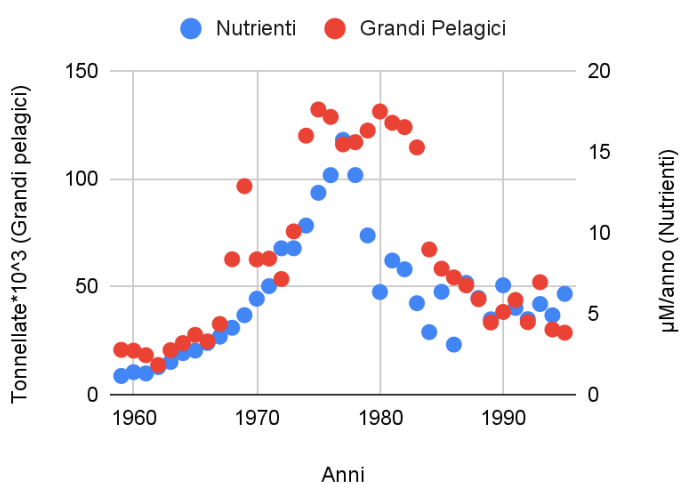


Figura 5. Correlazione tra nutrienti (espressi in μM all'anno) e grandi pesci pelagici (espressi come tonnellate per 10^3).

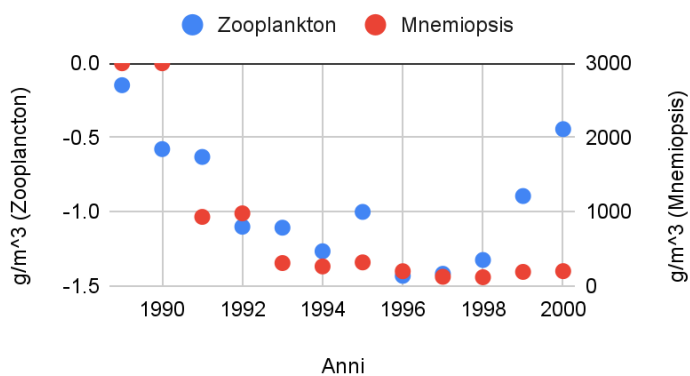
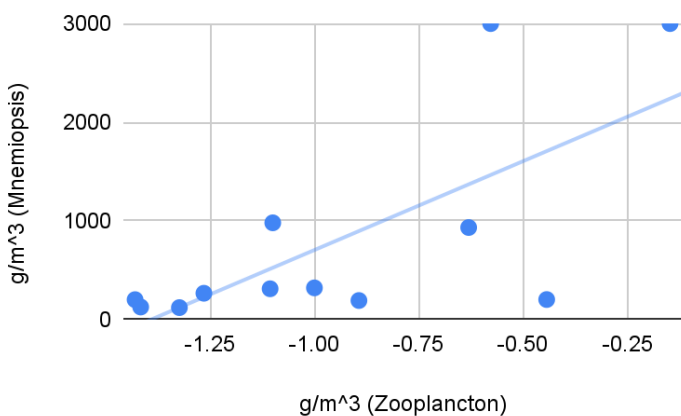


Figura 6. Correlazione tra lo ctenoforo *Mnemiopsis* (espresso come grammi al metro cubo) e zooplancton (espresso in grammi al metro cubo, i

valori sono indicati sotto forma di anomalie rispetto alla media misurata negli anni).

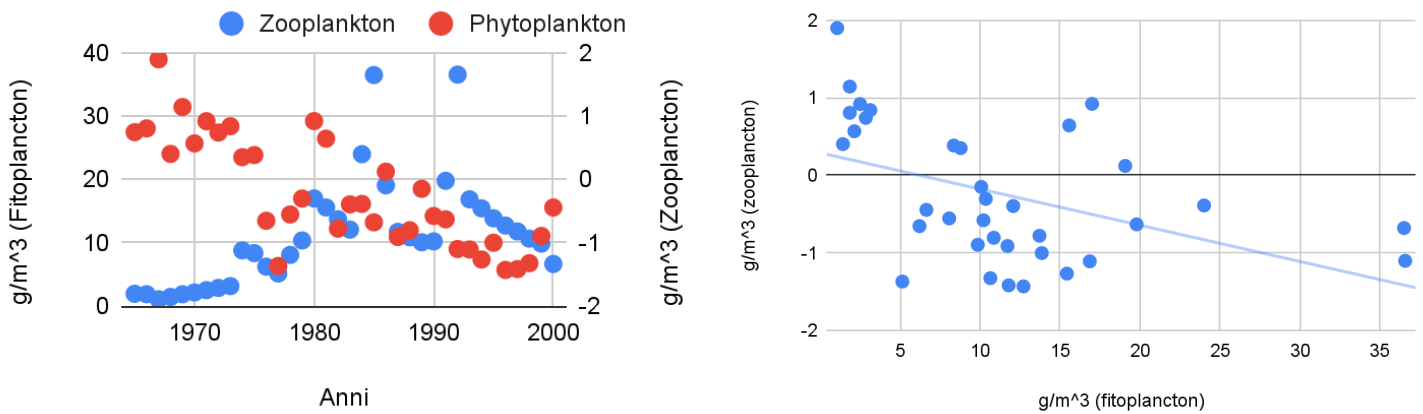


Figura 7. Correlazione tra zooplancton (anomalie, come nella figura 8) e fitoplancton (espresso come grammi al metro cubo).

3.4. Mare Del Nord

Tabella 4. Correlazione di Spearman, livello di significatività (p -value) e numero di punti correlati tra loro per ogni livello trofico (TL) nel Mare del Nord.

NORD	TL0	TL1	TL2	TL3	TL4
TL0	/	$rS=-0.01$ $p=0.799$ $n=23$	Dati non disponibili	$rS=0.51$ $p=0.010$ $n=24$	$rS=0.49$ $p=0.014$ $n=24$
TL1		/	Dati non disponibili	$rS=0.10$ $p=0.60$ $n=6$	$rS=-0.34$ $p=0.046$ $n=36$
TL2			/	Dati non disponibili	Dati non disponibili
TL3				/	$rS=0.09$ $p=0.535$ $n=45$
TL4					/

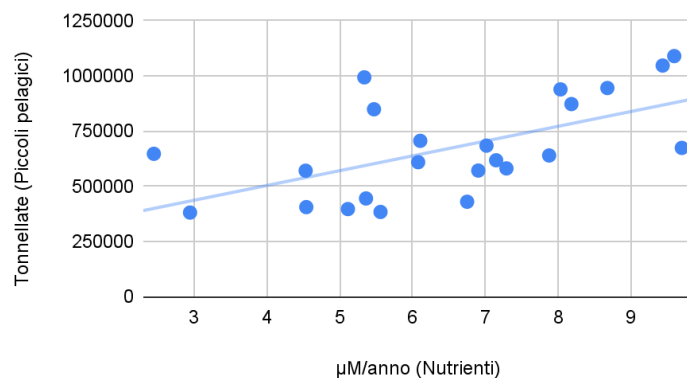
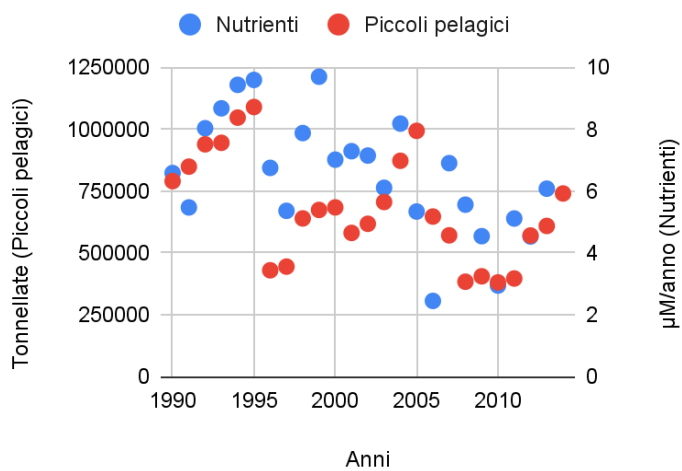


Figura 8. Correlazione tra nutrienti (espressi in concentrazione di μM all'anno) e piccoli pesci pelagici (sotto forma di sbarcato, espressi in tonnellate)

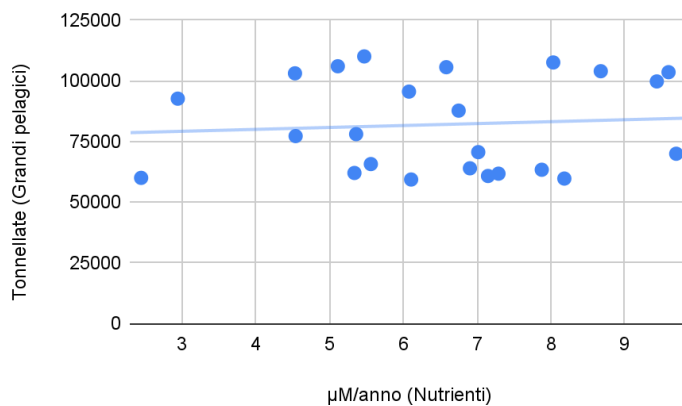
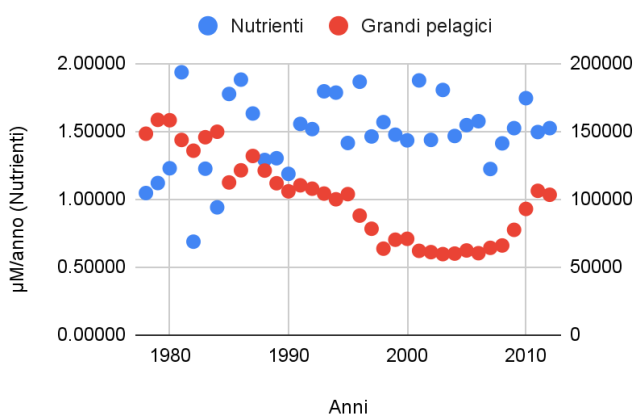


Figura 9. Correlazione tra nutrienti e grandi pelagici (anch'essi espressi in sbarcato in tonnellate)

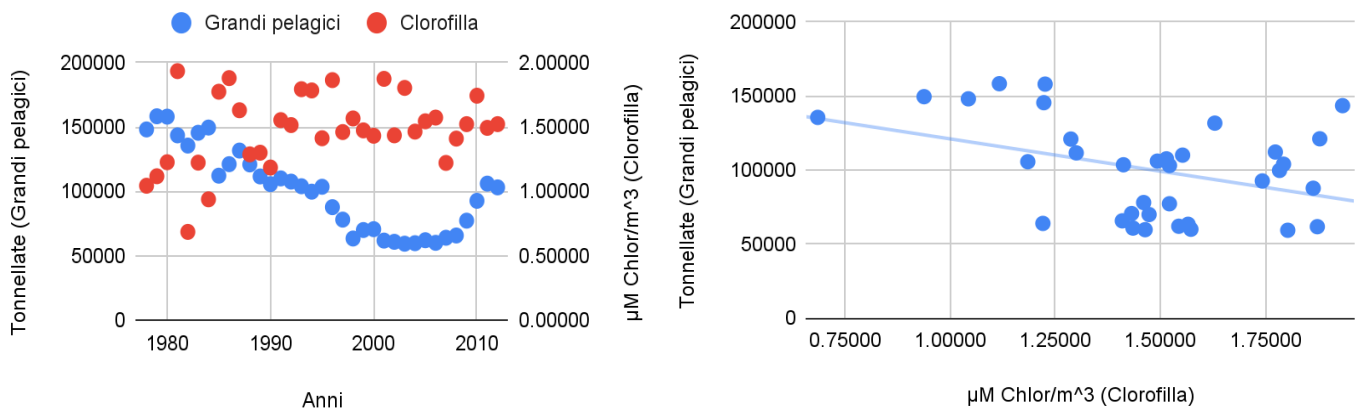


Figura 10. Correlazione tra grandi pelagici e fitoplancton (sotto forma di clorofilla, espressa in μM di clorofilla su metro cubo)

3.5. Mar di Marmara

Tabella 5 . Correlazione di Spearman, livello di significatività (p-value) e numero di punti correlati tra loro per ogni livello trofico (TL) del mare di Marmara.

MARMARA	TL0	TL1	TL2	TL3	TL4
TL0	/	rS=0.45 p=0.007 n=34	rS=0.17 p=0.616 n=23	rS=-0.08 p=0.637 n=34	rS=-0.27 p=0.118 n=34
TL1		/	rS=0.19 p=0.365 n=23	rS=0.07507 p=0.66822 n=34	rS=-0.18 p=0.294 n=34
TL2			/	rS=-0.28 p=0.183 n=23	rS=-0.34 p=0.107 n=23
TL3				/	rS=0.89 p=4.894*10 ¹³ n=45
TL4					/

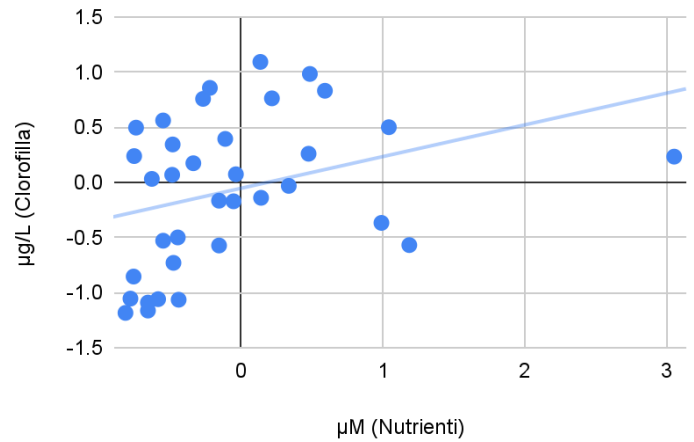
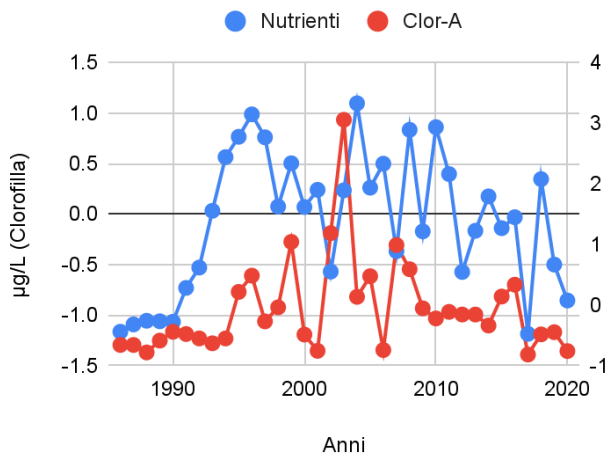


Figura 11. Correlazione di nutrienti (espressi in concentrazione micromolare, μM) e di fitoplancton (sotto forma di clorofilla A, espressa in μg su litro); espressi in anomalie.

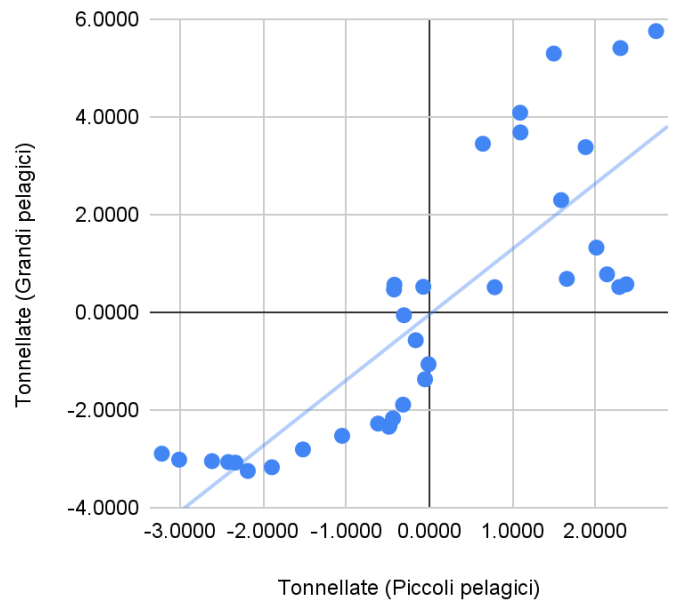
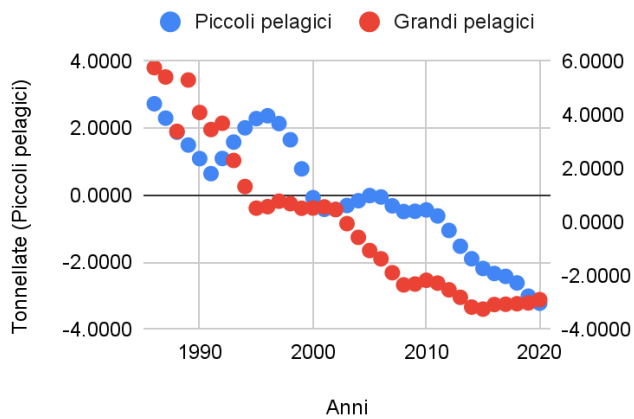


Figura 12. Correlazione tra piccoli e grandi pelagici (entrambi espressi sottoforma di biomassa, espressi in tonnellate; anomalie rispetto alla media).

4.DISCUSSIONE

Nell'esaminare i risultati di questo studio vanno tenuti presenti diversi limiti. Per prima cosa, in diversi casi è stato usato lo sbarcato come indicatore di abbondanza dei pesci, approccio che non è sempre perfetto in quanto le catture e lo sbarcato sono influenzate dal comportamento dei pescatori e del mercato (vedasi ad es. Pauly et al., 2008). Inoltre, è stato considerato un singolo nutriente limitante per ciascun ecosistema marino, mentre esso può invece cambiare nel tempo. Infine, assenza di correlazione non significa assenza di relazione causale, da un lato, e presenza di correlazione non significa presenza di relazione causale. Tale ultima questione può essere chiarita con analisi che vanno a guardare ai meccanismi causali, ad esempio la modellistica ecologica.

La prima cosa che colpisce guardando i risultati delle analisi statistiche è che non tutti gli ecosistemi sono simili tra loro: alcuni presentano numerose correlazioni significative, mentre altri ne mostrano di meno: ciò denota una varietà di fattori che interagiscono con il sistema. Alcuni di essi sembrano seguire una dinamica almeno in parte "bottom-up", altri "top-down", mentre altri ancora combinano entrambi i tipi di funzionamento, portando all'instaurazione di complesse dinamiche. La mancanza di correlazioni indicata nelle tabelle non implica necessariamente l'assenza di controllo trofico, come già detto, ma suggerisce piuttosto la presenza di molteplici processi in atto. Spesso, i dati disponibili potrebbero non essere sufficienti per identificare chiaramente il controllo trofico, e ciò può essere attribuibile alla qualità dei dati stessi e/o a numerosi fattori complessi che operano all'interno dell'ecosistema.

Il mar Adriatico, come riportato nella sezione "Materiali e Metodi", è un bacino relativamente ridotto che accoglie importanti quantità di acque

dolci. Nel mar Adriatico c'è stato un abbassamento del numero dei grandi pesci predatori per via della enorme pressione di pesca esercitata (Barausse et al., 2011, Barausse et al., 2014); la riduzione del numero di questi può aver portato a un scarso controllo dei livelli trofici inferiori, infatti anche osservando la tabella 1 si denota subito la mancanza di controllo top-down da parte dei grandi pelagici verso i piccoli pelagici, probabilmente perché la crescita e la decrescita delle loro popolazioni sono influenzate da fattori che esercitano una maggiore influenza. In particolare, seguendo le correlazioni riportate, c'è una significativa correlazione di tipo bottom-up tra i pesci zooplanctivori e i nutrienti, e ancora più significativa tra i primi e lo zooplancton. Ne si deduce che l'Adriatico, mancando funzionalmente dei livelli trofici più elevati, ha un funzionamento che sembra prevalentemente, ma chiaramente bottom-up.

Il mar Baltico è un bacino più grande e come il mar Adriatico ha grandi input di acqua dolce per via dell'afflusso di cinque grandi fiumi l'Oder, la Vistola, il Njemen, la Daugava e la Neva. L'unica correlazione che osserviamo nella tabella 2, non altrettanto significativa come nel caso di altri bacini, è quella tra fitoplancton e grandi pelagici, di tipo top-down. Si potrebbe intuire che le popolazioni di grandi pelagici sono ancora abbastanza grandi da poter esercitare questo tipo di controllo. D'altra parte, la correlazione potrebbe essere spuria.

Il mar Nero è un bacino idrico abbastanza isolato, in cui gli agenti esterni che agiscono su esso sono molti meno rispetto a mari comunicanti con oceani o bacini più grandi in cui la diluizione delle concentrazioni di nutrienti è maggiore. Il sistema è comunque complesso, in quanto altre pressioni come pesca, eutrofizzazione e l'introduzione di specie aliene hanno alterato il regime presente decine di anni fa. I dati nella tabella 3 sono in accordo con la letteratura del lavoro di Daskalov, 2002. In questo viene descritta una cascata trofica, questa ipotesi suggerisce che nel caso di una riduzione di grandi predatori per via della pesca intensiva, i piccoli pesci consumatori di zooplancton aumentano in numero. Conseguenza che il

controllo dello zooplancton sul fitoplancton viene di meno, portando ad un aumento delle microalghe nell'acqua. Dalla tabella si nota che le correlazioni non sono solo di tipo bottom-up, che sono però le più numerose (come nel caso di TL2 e TL3 ovvero zooplancton e *Mnemiopsis leidyi*, e ancora di più nel caso di TL0 e TL4, cioè tra i nutrienti e in grandi pelagici, che non è stato riscontrato in nessun altro bacino analizzato fuorché nel mare del Nord; questa ultima particolarità è interessante in quanto i due bacini idrici sono molto diversi sia per quanto riguarda attributi geografici che per quanto riguarda i fattori atmosferici che agiscono su essi). Si sottolinea che una correlazione positiva fra due livelli trofici non contigui ma di distanza pari a 2 è compatibile anche con una dinamica di tipo top-down (si veda la cascata trofica in Daskalov, 2002). I casi più significativi di correlazione di tipo top-down sono tra lo zooplancton e il fitoplancton, indicando che i livelli del primo sono ancora sufficienti da tenere sotto controllo le popolazioni del secondo.

Il mare del Nord ha numerosi affluenti dei quali il flusso è però compensato dalle correnti dell'oceano Atlantico con cui esso comunica. Nonostante ci si possa aspettare un numero limitato di correlazioni per via delle dimensioni di esso e della numerosità di parametri che potrebbero interagire nel controllo dei livelli trofici, alcune correlazioni statisticamente significative sono state riscontrate, come osservabile nella tabella 4. In questo mare i controlli sembrano essere di tipo misto, diversamente da come accade in mari fortemente eutrofizzati e privati di grandi predatori come l'Adriatico. Significativa la correlazione tra pesci (sia grandi che piccoli pelagici) con i nutrienti, ciò potrebbe indicare che essi sono comunque un fattore di grande impatto nella crescita delle specie: questa ipotesi è rinforzata da come la correlazione tra TL0 e TL3 è più forte che quella tra TL0 e TL4, in quanto si tratta nel primo caso di livelli trofici più vicini. Tra di loro, grandi predatori e piccoli pelagici non sono direttamente correlati, il che è inaspettato; ciò probabilmente è dato da fattori esterni, più impattanti sulla biologia della singola specie che sui livelli trofici in sé,

come ad esempio l'intensa pesca che avviene in tale ecosistema. TL4 sembra anche correlare con TL1, ovvero le microalghe. Ci sono molte possibili spiegazioni, una potrebbe essere un'eventuale azione "bottle-neck" dello zooplancton, ovvero un effetto di tipo bottom-up su piccoli pelagici e di tipo top-down sulla clorofilla; è necessario ottenere dati su zooplancton per poter valutare il suo effetto.

Il mare di Marmara è il bacino idrico meno esteso nella lista di sistemi analizzati, esso è alquanto influenzato dall'input di acque, e dunque di nutrienti derivanti dal mar Nero con il quale è collegato mediante lo stretto del Bosforo; i due mari sono però molto diversi, in quanto il mare di Marmara presenta una ossigenazione maggiore rispetto al mar Nero e una concentrazione di nutrienti generalmente minore. La Tabella 5 mostra che non abbiamo la prevalenza di un tipo di regime, ma una serie di controlli misti. La correlazione più evidente e significativa è di tipo bottom up tra piccoli pesci e grandi pesci, che è anche l'unica nei sistemi presi in considerazione; questo potrebbe essere una diretta conseguenza dell'isolamento di questo bacino e dalla sua dimensione.. L'altra relazione che sembra essere di particolare importanza è di tipo bottom up tra nutrienti e fitoplancton, probabilmente per via di un accumulo facilitato di nutrienti, similmente al mar nero, all'interno del sistema.

5.CONCLUSIONI

I mari sono ecosistemi alquanto complessi; cercare di dedurre in base ad un numero così limitato di parametri il loro funzionamento è riduttivo, nonostante ciò possono essere fatte diverse considerazioni. Questa tesi mostra che l'effetto delle variazioni di nutrienti negli ecosistemi marini pelagici non ha un effetto sempre chiaro sui livelli trofici superiori, pertanto essa evidenzia che il paradigma del funzionamento bottom-up è una semplificazione del funzionamento reale di tali ecosistemi con degli evidenti limiti. Infatti esso dimostra non solo quanto diverse le variabili siano per ogni sistema, ma anche come le relazioni tra esse possano variare a seconda di un insieme di fattori, a volte noti, a volte ignoti. Per permettere una migliore comprensione delle interazioni degli organismi tra di loro o con fattori abiotici è necessario approfondire il singolo specchio d'acqua, creando una libreria di dati più completa sia per quanto riguarda la quantità di variabili considerate sia il loro numero, quindi utilizzando serie temporali più lunghe ed eventualmente con dettaglio spaziale. In alcuni ambienti ciò può risultare difficile per via della mancanza di dati o per via dell'incompletezza di essi. Una considerazione d'interesse generale è che in mari fortemente eutrofizzati ed ancora soggetti ad un insostenibile regime di pesca come l'Adriatico le dinamiche sembrano riflettere un funzionamento prettamente bottom-up, nel quale i grandi pelagici hanno un ruolo ormai marginale per via della loro numero ridotto di individui e perché fortemente influenzati dai livelli trofici inferiori. Risulta però cruciale lo svolgimento di una raccolta e un'analisi di serie molto più completa, integrando ad esse anche parametri atmosferici e bentonici. Infine, appare di fondamentale importanza per una migliore comprensione del funzionamento di ogni specifico sistema, osservare gli andamenti associati ai diversi eventi ecologici e confrontarli negli anni e tra ambienti differenti, portando alla creazione di modelli generali che possano

descrivere in completezza il funzionamento attuale e predirne quello futuro.

6.BIBLIOGRAFIA

- Barausse, A., Correale, V., Curkovic, A., Finotto, L., Riginella, E., Visentin, E., & Mazzoldi, C. (2014). The role of fisheries and the environment in driving the decline of elasmobranchs in the northern Adriatic Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 71(7), 1593–1603. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fst222>
- Barausse, A., Michieli, A., Riginella, E., Palmeri, L., & Mazzoldi, C. (2011). Long-term changes in community composition and life-history traits in a highly exploited basin (northern Adriatic Sea): The role of environment and anthropogenic pressures. *Journal of Fish Biology*, 79(6), 1453–1486. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2011.03139.x>
- Bell, J. D., Watson, R. A., & Ye, Y. (2017). Global fishing capacity and fishing effort from 1950 to 2012. *Fish and Fisheries*, 18(3), 489–505. <https://doi.org/10.1111/faf.12187>
- Burson, A., Stomp, M., Akil, L., Brussaard, C. P. D., & Huisman, J. (2016). Unbalanced reduction of nutrient loads has created an offshore gradient from phosphorus to nitrogen limitation in the North Sea. *Limnology and Oceanography*, 61(3), 869–888. <https://doi.org/10.1002/lno.10257>

- Clodia database, 2020. Database of Fishery Data from Chioggia, Northern Adriatic Sea <http://chioggia.biologia.unipd.it/banche-dati/>
- Coll, A. S. M., Palomera, I., & Enrico Arneri. (s.d.). Ecosystem assessment of the North-Central Adriatic Sea: Towards a multivariate reference framework. 2010. <https://doi.org/10.3354/meps08800>
- Cury, P. M., Shannon, L. J., & Shin, Y.-J. (s.d.). *The functioning of marine ecosystems*.
- Daskalov, G. M., Demirel, N., Ulman, A., Georgieva, Y., & Zengin, M. (2020). Stock dynamics and predator–prey effects of Atlantic bonito and bluefish as top predators in the Black Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 77(7–8), 2995–3005. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa182>
- Daskalov, G. (2002). Overfishing drives a trophic cascade in the Black Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 225, 53–63. <https://doi.org/10.3354/meps225053>
- Demirel, N., Akoglu, E., Ulman, A., Ertor-Akyazi, P., Gül, G., Bedikoğlu, D., Yıldız, T., & Yilmaz, I. N. (2023). Uncovering ecological regime shifts in the Sea of Marmara and reconsidering management strategies. *Marine Environmental Research*, 183, 105794. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105794>
- Doney, S. C., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J. P., Chan, F., English, C. A., Galindo, H. M., Grebmeier, J. M., Hollowed, A. B., Knowlton, N., Polovina, J., Rabalais, N. N., Sydeman, W. J., & Talley, L. D. (2012). Climate Change Impacts on Marine

Ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4(1), 11–37.

<https://doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611>

- Duarte, C. M., Conley, D. J., Carstensen, J., & Sánchez-Camacho, M. (2009). Return to Neverland: Shifting Baselines Affect Eutrophication Restoration Targets. *Estuaries and Coasts*, 32(1), 29–36. <https://doi.org/10.1007/s12237-008-9111-2>
- E.U. Copernicus Marine Service Information, *Global Ocean Chlorophyll-a trend map* <https://doi.org/10.48670/moi-00230>
- Folke, C., & Kautsky, N. (1992). Aquaculture with its environment: Prospects for sustainability. *Ocean & Coastal Management*, 17(1), 5–24. [https://doi.org/10.1016/0964-5691\(92\)90059-T](https://doi.org/10.1016/0964-5691(92)90059-T)
- Giani, M., Djakovac, T., Degobbis, D., Cozzi, S., Solidoro, C., & Umani, S. F. (2012). Recent changes in the marine ecosystems of the northern Adriatic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 115, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.08.023>
- Gilbert, P. M., Seitzinger, S., Heil, C., Parrow, M. W., Codispoti, L. A., & Kelly, V. (2005). The Role of Eutrophication in the Global Proliferation of Harmful Algal Blooms. *Oceanography*, 8, nr 2.
- Gooday, A. J., Jorissen, F., Levin, L. A., Middelburg, J. J., Naqvi, S. W. A., Rabalais, N. N., Scranton, M., & Zhang, J. (2009). Historical records of coastal eutrophication-induced hypoxia. *Biogeosciences*, 6(8), 1707–1745. <https://doi.org/10.5194/bg-6-1707-2009>
- Hairston, N. G., & Hairston, N. G. (1993). Cause-Effect Relationships in Energy Flow, Trophic Structure, and Interspecific

Interactions. *The American Naturalist*, 142(3), 379–411.

<https://doi.org/10.1086/285546>

- Hammer, Ø., & Harper, D. A. (2001). Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electronica*, 4(1), 1.
- HELCOM Pollution Load Compilation database (HELCOM PLC database), 2023 http://nest.su.se/helcom_plc/
- Hunter, M. D., & Price, P. W. (s.d.). Playing Chutes and Ladders: Heterogeneity and the Relative Roles of Bottom-Up and Top-Down Forces in Natural Communities. 1992, 72 nr 3, 724–732.
- ICES Stock Assessment Database. Copenhagen, Denmark, 2023 <https://standardgraphs.ices.dk>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Jones, J. B. (1992). Environmental impact of trawling on the seabed: A review. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 26(1), 59–67. <https://doi.org/10.1080/00288330.1992.9516500>
- Llope, M., Daskalov, G. M., Rouyer, T. A., Mihneva, V., Chan, K.-S., Grishin, A. N., & Stenseth, N. Chr. (2011). Overfishing of top predators eroded the resilience of the Black Sea system regardless of the climate and anthropogenic conditions: BLACK SEA SHIFTS

MODELLING. *Global Change Biology*, 17(3), 1251–1265.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02331.x>

- Marampouti, C., Buma, A. G. J., & De Boer, M. K. (2021). Mediterranean alien harmful algal blooms: Origins and impacts. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(4), 3837–3851.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-10383-1>
- Muir, D., & Miaz, L. T. (2021). Spatial and Temporal Trends of Perfluoroalkyl Substances in Global Ocean and Coastal Waters. *Environmental Science & Technology*, 55(14), 9527–9537.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08035>
- Myers, R. A., & Worm, B. (2003). Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature*, 423(6937), 280–283.
<https://doi.org/10.1038/nature01610>
- Oguz, T., & Merico, A. (2006). Factors controlling the summer *Emiliana huxleyi* bloom in the Black Sea: A modeling study. *Journal of Marine Systems*, 59(3–4), 173–188.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.08.002>
- Peeters, J. C. H., & Peperzak, L. (1990). Nutrient limitation in the North Sea: A bioassay approach. *Netherlands Journal of Sea Research*, 26(1), 61–73.
[https://doi.org/10.1016/0077-7579\(90\)90056-M](https://doi.org/10.1016/0077-7579(90)90056-M)
- Raudsepp, U., Maljutenko, I., Kõuts, M., Granhag, L., Wilewska-Bien, M., Hassellöv, I.-M., Eriksson, K. M., Johansson, L., Jalkanen, J.-P., Karl, M., Matthias, V., & Moldanova, J. (2019). Shipborne nutrient dynamics and impact on the eutrophication in

the Baltic Sea. *Science of The Total Environment*, 671, 189–207.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.264>

- Sguotti, C., Bischoff, A., Conversi, A., Mazzoldi, C., Möllmann, C., & Barausse, A. (2022). Stable landings mask irreversible community reorganizations in an overexploited Mediterranean ecosystem.

Journal of Animal Ecology, 91(12), 2465–2479.

<https://doi.org/10.1111/1365-2656.13831>

- Shin, Y. (2001). Interactions trophiques fondées sur la taille et dynamiques des communautés de poissons marins: Exploration à l'aide d'un modèle spatial individus-centré. *Aquatic Living Resources*, 14(2), 65–80.

[https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(01\)01106-8](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(01)01106-8)

- Tsikliras, A. C., & Polymeros, K. (2014). Fish market prices drive overfishing of the 'big ones'. *PeerJ*, 2, e638.

<https://doi.org/10.7717/peerj.638>

- Tüfekçi, V., Balkis, N., Beken, Ç. P., Ediger, D., & Mantikçi, M. (2010). Phytoplankton Composition and Environmental Conditions of the Mucilage Event in the Sea of Marmara. *Turkish Journal of Biology*.

<https://doi.org/10.3906/biy-0812-1>

- *Winter Nutrient Concentrations in the Greater North Sea, Kattegat and Skagerrak*. (s.d.).

<https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/intermediate-assessment-2017/pressures-human-activities/eutrophication/nutrients-concentrations/>

- Xu, X., Lemmen, C., & Wirtz, K. W. (2020). Less Nutrients but More Phytoplankton: Long-Term Ecosystem Dynamics of the Southern North Sea. *Frontiers in Marine Science*, 7, 662.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00662>
- Yunev, O. A., Carstensen, J., Moncheva, S., Khaliulin, A., Aertebjerg, G., & Nixon, S. (2007). Nutrient and phytoplankton trends on the western Black Sea shelf in response to cultural eutrophication and climate changes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74(1–2), 63–76.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.030>
- Yunev, O. A., Velikova, V., & Carstensen, J. (2017). Effects of changing nutrient inputs on the ratio of small pelagic fish stock and phytoplankton biomass in the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 197, 173–184.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.08.033>