

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea Triennale in Fisica

Tesi di Laurea

Anno Accademico 2024/2025

**Resilienza e sostenibilità dei sistemi di pesca del Mare
del Nord: una prospettiva basata su teoria delle reti
complesse**

**Resilience and Sustainability of North Sea Fishery
Systems: A Complex Network-Theoretical Perspective**

Relatore

Prof. Samir Simon Suweis

Laureanda

Greta Petrucco - Toffolo

Indice

Abstract	v
Sommario	vi
1 Introduzione	1
2 Struttura teorica	2
2.1 Teoria delle reti complesse	2
2.2 Sistema risorsa-consumo-commercio	3
2.3 Equazione effettiva di Gao-Barzel-Barbási	5
3 Applicazione del modello	8
3.1 Il caso particolare della pesca nel Mare del Nord	8
3.2 La stima di R_i e la scelta di un'unica specie	8
3.3 La stima di K_i^R e α	11
3.4 La stima di c_i	12
3.5 La costruzione delle matrici di adiacenza	13
3.6 L'equazione effettiva	14
4 Conclusioni	16

Abstract

In this thesis, a mathematical model originally proposed by Suweis et al. (2019) is applied to analyze how the resilience of Atlantic cod (*Gadus morhua*) in the North Sea is influenced by the increasing globalization of the trade system. The model describes the evolution of national fish biomass as a function of ecological parameters (carrying capacity, growth rate) and anthropogenic variables (domestic consumption, trade network). The work is structured in two parts: the first involves reconstructing local dynamics through data collection and analysis; the second consists of applying and testing the aggregated model. The results reveal a loss of resilience and a risk of collapse for the considered species, as well as a correlation with the increasing connectivity of the fish trade network. The limitations of the study—mainly due to considering only a fraction of the global market—highlight the extent of interdependence among countries in different parts of the world and suggest the potential of the model in a broader context.

Sommario

Nel presente elaborato si applica un modello matematico proposto originariamente da Suweis et al. (2019) per analizzare come la resilienza del merluzzo atlantico (*Gadus morhua*) nel Mare del Nord è influenzata dalla crescente globalizzazione del sistema commerciale. Il modello considera l'evoluzione della biomassa ittica nazionale in funzione di parametri ecologici (capacità portante, tasso di crescita) e variabili antropiche (consumo interno, rete di commercio). Il lavoro si articola in due parti: una di ricostruzione delle dinamiche locali attraverso la ricerca e l'analisi dei dati e una seconda di applicazione e test del modello aggregato. I risultati rivelano la perdita di resilienza e il rischio di collasso della specie considerata e la correlazione con l'aumento di connettività della matrice di adiacenza. I limiti dello studio, che risiedono nel fatto di considerare una frazione del mercato globale, fanno emergere la portata dell'interdipendenza tra Paesi in diverse parti del mondo e suggeriscono la potenzialità del modello in un contesto ampliato.

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi decenni si è assistito ad una rapida intensificazione e globalizzazione del sistema commerciale alimentare [27]. Ciò si ripercuote sulle risorse: se in precedenza erano sfruttate solo dalla popolazione locale, successivamente sono state rese accessibili a consumatori in altre regioni del mondo [26]. La conseguenza di questo processo è che la pressione esercitata sulle risorse naturali, alimentari ad esempio, è cresciuta notevolmente in breve tempo: è noto che alcune di queste non siano state in grado di rigenerarsi alla velocità imposta dalla richiesta crescente e siano collassate ad uno stato depauperato. Di fronte al declino delle risorse è diventato cruciale comprenderne la dinamica per lo sviluppo di modelli in grado di guidare decisioni sostenibili [23].

In ecologia si rappresenta un sistema globale di produzione-commercio-consumo come una rete, in cui i Paesi rappresentano i nodi e le connessioni tra essi sono i rapporti commerciali. La connettività (definita come il rapporto tra le connessioni osservate tra i nodi e il numero totale di possibili connessioni tra essi) è il parametro che quantifica il grado di intensità del commercio tra le nazioni. Ciò che si vuole investigare è in che misura la connettività della rete (ovvero la globalizzazione) influenza la resilienza di una certa risorsa. La resilienza è la capacità di assorbire una perturbazione mantenendo inalterata la propria struttura fondamentale, le proprie funzioni e interazioni chiave. Essa è una proprietà degli attrattori dinamici, ovvero stati stabili che attirano le traiettorie del sistema nel tempo [27]. Nel sistema uomo-natura si è interessati alla resilienza di stati sostenibili, che permettono di preservare lo stock entro livelli compatibili con la sua rigenerazione naturale e poterne usufruire in modo duraturo [23]. Il modello che descrive la dinamica di una risorsa sfruttata da consumatori sia locali che globali prevede due stati stabili: uno sostenibile e uno depauperato [27].

L'obiettivo di questa tesi è applicare il modello al sistema della pesca nel Mare del Nord, per studiare la relazione tra la connettività della rete e la resilienza di una specie ittica, il merluzzo atlantico (*Gadus morhua*). Verrà analizzata una risorsa condivisa e sfruttata da più utilizzatori, che, pur appartenendo tutti all'area geografica del Mare del Nord, risultano eterogenei per dipendenza, impatto e ruolo nella rete commerciale. In questo contesto, la globalizzazione non implica necessariamente una distanza geografica tra utilizzatori e risorsa, ma piuttosto una disconnessione funzionale: chi consuma il merluzzo non coincide sempre con chi ne sostiene la pesca o ne subisce le conseguenze. Le dinamiche di scambio e governance rendono il sistema complesso, distribuendo la pressione sullo stock in modo non uniforme e rendendo difficile attribuire responsabilità dirette. Questo indebolimento del legame tra sfruttamento e percezione d'impatto è un fattore cruciale nella perdita di resilienza degli ecosistemi sfruttati collettivamente.

Capitolo 2

Struttura teorica

2.1 Teoria delle reti complesse

Uno strumento per poter studiare enormi quantità di dati è circoscrivere le informazioni di interesse. La teoria delle reti complesse descrive e studia il comportamento di entità in base a come e se sono in contatto tra loro. Questa descrizione si focalizza sulla topologia della rete di connessioni, e dalle sue caratteristiche si possono trarre informazioni sulle funzioni del sistema e sviluppare previsioni. Essendo generale, la teoria è applicabile ad un elevato numero di sistemi che presentano gli stessi pattern, dall'ambito socio-economico, ecologico, di Internet alle neuroscienze.

Un grafo o rete di dimensione S è una coppia di insiemi: l'insieme di S nodi, V , e l'insieme delle connessioni tra di essi, E . Un grafo $G(V, E)$ può essere rappresentato come una matrice detta di adiacenza A_G , dove l'elemento $A_{G,ij}$, corrispondente alla coppia di nodi i, j , è diverso da zero se i due nodi sono connessi. In una rappresentazione più semplice la matrice di adiacenza contiene solo elementi 0,1 ed indica perciò soltanto la presenza o l'assenza di connessione per ciascuna coppia di nodi; in una versione più informativa, invece, ogni elemento rappresenta il 'peso' o l'intensità della connessione: si denoti la matrice siffatta con C_G .

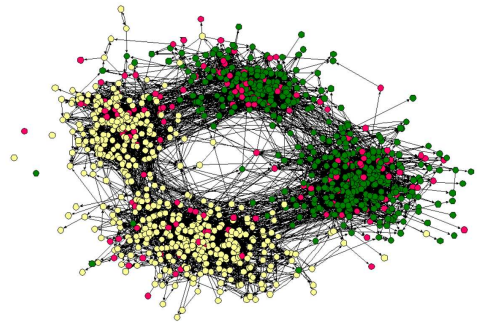
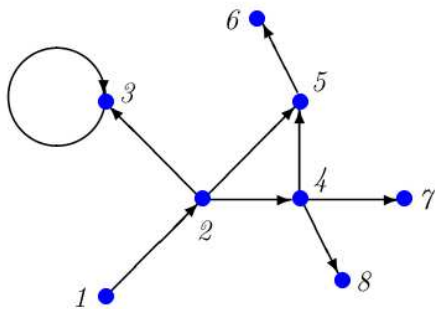


Figura 1: Esempio di rete: rete di amicizie in una scuola [20]



$$A_G = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Le reti possono essere dirette o indirette, a seconda che le connessioni siano direzionali o meno, e semplici se non ammettono connessioni tra un nodo e se stesso. In questa tesi l'interesse sarà su reti dirette e semplici, rappresentate da matrici di adiacenza non-simmetriche e con la diagonale nulla.

Il grado dell' i -esimo nodo, s_i , è definito come il numero di connessioni che lo coinvolgono. Nelle reti dirette si può definire un in-degree e un out-degree e un total-degree che ne è la somma. Si avrà dunque:

$$s_i^{IN} = \sum_{j=1}^S A_{ij} \quad (1)$$

$$s_i^{OUT} = \sum_{j=1}^S A_{ji} \quad (2)$$

All'aumentare di S diventa conveniente studiare le caratteristiche macroscopiche della rete e poco sensibili alla sua dimensione, come il grado medio \bar{s} e la connettività p :

$$\bar{s}^{IN} = \frac{\sum_{i=1}^S s_i^{IN}}{S} = \bar{s}^{OUT} = \bar{s} \quad (3)$$

$$p = \frac{L}{S(S-1)} = \frac{\sum_{ij} A_{ij}}{S(S-1)} \quad (4)$$

La modularità è un'altra proprietà delle reti: coincide col grado in cui una rete è divisa in sottogruppi, detti moduli, in cui i nodi interagiscono preferibilmente tra loro piuttosto che con nodi di altri moduli:

$$Q = \frac{1}{2L} \sum_{ij} [A_{ij} - \frac{s_i s_j}{2L}] \delta_{Q_i Q_j} \quad (5)$$

dove $\delta_{Q_i Q_j}$ è 1 se i, j appartengono allo stesso modulo e 0 altrimenti. Notiamo che questo metodo presenta alcune criticità e metodi alternativi sono stati proposti in letteratura [21].

Inoltre una rete può essere eterogenea se presenta una correlazione negativa tra l'in-degree e l'out-degree. Viceversa, è omogenea se la correlazione tra queste quantità è positiva. Può essere quantificata attraverso il parametro h così definito:

$$h = \frac{1}{\bar{s}} \frac{\sum_i |s_i^{IN} - s_i^{OUT}|}{S} \quad (6)$$

dove $h \in [0, 1]$ e $h = 0$ indica una rete completamente omogenea, mentre $h = 1$ corrisponde ad una rete completamente eterogenea.

2.2 Sistema risorsa-consumo-commercio

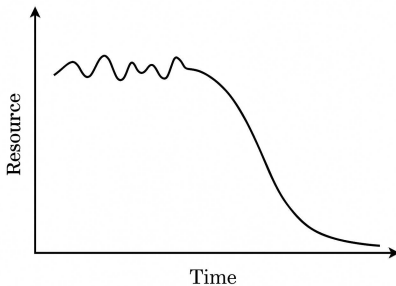


Figura 2: Transizione da uno stato di sfruttamento sostenibile all'esaurimento

La teoria delle reti è ampiamente utilizzata per studiare sistemi ecologici. In ecologia, un tema di massimo interesse è studiare le condizioni di sovrasfruttamento delle risorse naturali, ovvero determinare la soglia oltre la quale una risorsa non è più in grado di rigenerarsi e non è quindi più utilizzabile. Risorse come la biomassa ittica, le foreste e il terreno adibito a pascolo o all'agricoltura sono tutte pronte a transizioni da un equilibrio sostenibile a uno depauperato [3].

In particolar modo, nello studio della sostenibilità si applica il concetto di rete all'insieme di relazioni che sussistono tra risorse naturali e consumatori. Poiché negli ultimi decenni i consumatori sono sempre più sia locali che remoti, è importante capire come la struttura della rete commerciale impatta la resilienza delle risorse e possa indurre la transizione verso il collasso. Una trattazione di questo tipo è stata sviluppata

da Suweis et al. in [27], dove è stata contestualmente applicata e testata nel caso specifico del global food trade network. La struttura teorica del lavoro viene esposto nel presente paragrafo.

Una rete S-dimensionale, in cui a ogni nodo corrisponde una risorsa $R_i(t)$, può essere descritta attraverso il seguente sistema di equazioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dR_1}{dt} = \alpha_1 R_1 (R_1 - c_1) \left(1 - \frac{R_1}{K_1^R}\right) - (E_1 - I_1) \\ \vdots \\ \frac{dR_S}{dt} = \alpha_S R_S (R_S - c_S) \left(1 - \frac{R_S}{K_S^R}\right) - (E_S - I_S) \\ \frac{dL_1}{dt} = r_1 L_1 \left(1 - \frac{L_1}{K_1^L}\right) \\ \vdots \\ \frac{dL_S}{dt} = r_S L_S \left(1 - \frac{L_S}{K_S^L}\right) \end{array} \right. \quad (7)$$

Le prime S equazioni sono dette equazioni di crescita di risorsa con effetto Allee [27], in cui si distinguono tre contributi: la funzione logistica di crescita, che rappresenta la dinamica locale, il termine cubico (effetto Allee) che descrive il fenomeno per cui, in popolazioni molto piccole, la crescita è limitata o negativa (al di sotto di una certa soglia critica, la scarsità di interazioni riduce la probabilità di sopravvivenza e riproduzione) e il termine di flusso della risorsa tra i nodi dovuto al commercio.

Nella funzione logistica, α_i è il parametro di crescita intrinseca ed è pertanto definito > 0 . Il parametro c_i è la soglia dell'effetto Allee, ovvero la dimensione minima dello stock R_i al di sotto della quale la crescita naturale diventa negativa anche in assenza di sfruttamento. In altre parole, se la risorsa scende sotto questa soglia, la popolazione tende al collasso invece di recuperare. c_i rappresenta il consumo locale nel nodo i, mentre K_i^R è la capacità portante, ovvero la massima quantità di risorsa che l'ambiente può sostenere in modo duraturo. La relazione mutua tra questi parametri dovrà quindi essere $0 < c_i < K_i^R$.

Il termine di trade si esplicita come:

$$E_i - I_i = \delta \sum_{j=1}^S C_{ji} L_j R_i - \delta \sum_{j=1}^S C_{ij} R_j L_i \quad (8)$$

E_i corrisponde alla quantità totale di risorsa esportata dal nodo i, mentre, viceversa, I_i a quella importata nel nodo i. La (8) è una funzione di produzione di Cobb-Douglas. Le funzioni di produzione evidenziano come scala un output in relazione al variare di alcune quantità di input. Nella forma più semplice sono del tipo $Y = aX^bZ^c$ e prendono il nome di funzioni di Cobb-Douglas. In questo caso, export e import sono descritti come output della quantità di risorsa e del numero di abitanti dei vari nodi combinati secondo la matrice C ; il fatto che entrambi gli esponenti siano pari a 1 indica che è stata stimata una dipendenza di 'produzione' lineare rispetto a queste grandezze. I contributi sono scalati grazie al parametro di esaurimento δ , che in una funzione di produzione ha il significato di 'efficienza' degli input.

C è la matrice di adiacenza pesata, in cui ciascun elemento $C_{ij} > 0$ se il nodo i importa risorse dal nodo j, quantifica la topologia e l'intensità delle relazioni commerciali tra i Paesi. Essa definisce la struttura della rete di commercio ed è impiegata come indicatore del grado di globalizzazione del sistema. In particolare, reti con alta densità e con valori medi elevati degli elementi indicano un sistema fortemente

globalizzato, caratterizzato da una forte interdipendenza tra le aree. Se \tilde{C}_{ij} è la portata dello scambio, allora:

$$C_{ij} = \frac{\tilde{C}_{ij}}{\sum_{j=1}^S \tilde{C}_{ij}} \quad (9)$$

Le ultime S equazioni sono funzioni logistiche standard applicate alla dinamica demografica, dove L_i è la popolazione nel nodo i , K_i^L è la corrispondente capacità portante e r_i il parametro di crescita. Poichè la dinamica di L_i è molto più veloce di quella della risorsa R_i , L_i assume il valore dell'equilibrio quasi istantaneamente e pertanto si può assumere $L_i \approx K_i^L$. Inoltre, ponendo $c_i = d_i L_i$ dove d_i è il consumo pro capite, si può riscrivere il sistema (1) come:

$$\begin{cases} \frac{dR_1}{dt} = \alpha_1 R_1 (R_1 - d_1 K_1^L) \left(1 - \frac{R_1}{K_1^R}\right) - \delta \sum_{j=1}^S C_{j1} K_j^L R_1 + \delta \sum_{j=1}^S C_{1j} R_j K_1^L \\ \vdots \\ \frac{dR_S}{dt} = \alpha_S R_S (R_S - d_S K_S^L) \left(1 - \frac{R_S}{K_S^R}\right) - \delta \sum_{j=1}^S C_{jS} K_j^L R_S + \delta \sum_{j=1}^S C_{Sj} R_j K_S^L \end{cases} \quad (10)$$

In assenza di connessioni, nel limite cioè $\delta \rightarrow 0$, l'equazione di crescita ha tre equilibri, di cui due stabili, caratterizzati da $\frac{d^2 R_i}{dt^2} < 0$ e uno instabile, con $\frac{d^2 R_i}{dt^2} > 0$. Dei due equilibri stabili, l'uno corrisponde a $R_i^* = 0$, ovvero allo stato depauperato o collassato, mentre l'altro si ha per $R_i^* = K_i^R$, cioè lo stato sostenibile. Lo stato instabile si ha invece per $R_i^* = c_i = d_i K_i^L$, esattamente la quantità di risorsa richiesta dei consumatori, che coincide con la soglia critica tra due dinamiche opposte. Infatti, se $0 < R_i < d_i K_i^L$, la risorsa si trova in regime di sovrasfruttamento: declina progressivamente fino al collasso completo. Invece se $d_i K_i^L < R_i < K_i^R$ la risorsa è sufficientemente abbondante da rigenerarsi: il sistema converge verso il valore della capacità portante.

L'introduzione del commercio tra Paesi modifica profondamente la dinamica del sistema. Mentre nel caso isolato ogni Paese evolve indipendentemente secondo la propria equazione di crescita, l'aggiunta di connessioni tramite la rete di scambio rompe questa indipendenza e introduce accoppiamenti tra le dinamiche locali. Di conseguenza, la stabilità degli equilibri e la traiettoria delle risorse non dipendono più soltanto dai parametri interni di ciascun Paese, ma anche dalle condizioni degli altri nodi della rete. Questo può portare a fenomeni complessi, rendendo l'analisi qualitativa molto più articolata rispetto al caso isolato.

2.3 Equazione effettiva di Gao-Barzel-Barbási

Il sistema finora descritto è in generale un sistema ad alta dimensionalità composto da numerosi elementi che interagiscono attraverso una rete complessa che non è risolvibile analiticamente. Per questo motivo è difficile prevedere gli eventi che portano alla perdita di resilienza attraverso questo modello.

Per sopperire a tale lacuna teorica, Gao, Barzel e Barbási in [7] hanno sviluppato un metodo che permette di identificare i parametri di controllo naturale e di stato di un sistema complesso multi-dimensionale e derivare dinamiche efficaci unidimensionali che ne predicono accuratamente la resilienza. Il quadro analitico proposto separa sistematicamente i ruoli della dinamica del sistema e della sua topologia, riducendo il comportamento di diversi tipi di reti a una singola funzione universale di resilienza. I risultati analitici svelano le caratteristiche della rete che possono migliorare o diminuire la resilienza, offrendo modi per prevenire il collasso di sistemi ecologici, biologici o economici.

L'applicazione del metodo introdotto da Gao et al. al sistema del caso in questione consiste nel collassare il sistema S-dimensionale in una funzione unidimensionale 'effettiva' attraverso medie pesate sui nodi delle risorse R_i e dei parametri caratteristici. Il peso del contributo di ciascun nodo alla media è l'out-degree s_j^{OUT} ridefinito come:

$$s_j^{OUT} = \sum_{i=1}^S C_{ij} K_i^L \quad (11)$$

Esso indica quanto è importante un nodo all'interno della rete e di conseguenza in che proporzione gli altri nodi dipendono dal suo export. Ad esempio, un valore molto alto di s_j^{OUT} individua un fornitore cruciale ma suggerisce anche vulnerabilità della rete e una grande pressione sulla risorsa corrispondente. Il valore effettivo x_{eff} relativo al vettore S-dimensionale \mathbf{x} si può calcolare attraverso l'operatore lineare $\mathcal{L}(\mathbf{x})$ così definito:

$$x_{eff} = \mathcal{L}(\mathbf{x}) = \frac{\frac{1}{S} \sum_{j=1}^S s_j^{OUT} x_j}{\frac{1}{S} \sum_{j=1}^S s_j^{OUT}} \quad (12)$$

Grazie a questo formalismo è possibile dunque ottenere $R_{eff} = \mathcal{L}(\mathbf{R})$, $\alpha_{eff} = \mathcal{L}(\boldsymbol{\alpha})$, $c_{eff} = \mathcal{L}(\mathbf{c})$ e $K_{eff}^R = \mathcal{L}(\mathbf{K}^R)$. Infine, avendo ridefinito il grado di in-flow s_i^{IN} come:

$$s_i^{IN} = \sum_{j=1}^S C_{ij} K_i^L \quad (13)$$

si calcola il parametro di controllo η_{eff} :

$$\eta_{eff} = \gamma_{eff} - \beta_{eff} = \mathcal{L}(\mathbf{s}^{OUT}) - \mathcal{L}(\mathbf{s}^{IN}) \quad (14)$$

Tale parametro incorpora interamente la struttura della rete di scambi commerciali ed è definito in modo tale che un aumento di η_{eff} corrisponde ad una diminuzione di resilienza dello stato sostenibile. Complessivamente l'equazione effettiva risulta essere:

$$\frac{dR_{eff}}{dt} = \alpha_{eff} R_{eff} (R_{eff} - c_{eff}) \left(1 - \frac{R_{eff}}{K_{eff}^R} \right) - \delta \eta_{eff} R_{eff} \quad (15)$$

Si tratta di un'equazione cubica che ammette tre radici reali solo sotto una certa soglia critica di η , pari a:

$$\eta_c = \frac{\alpha_{eff} (K_{eff}^R - c_{eff})^2}{4\delta K_{eff}^R} \quad (16)$$

Per valori di η superiore alla soglia, l'unico equilibrio è quello corrispondente allo stato collassato con $R_{eff}^* = 0$. Le soluzioni di $dR_{eff}/dt = 0$ in funzione di η_{eff} sono visibili in Fig. 3:

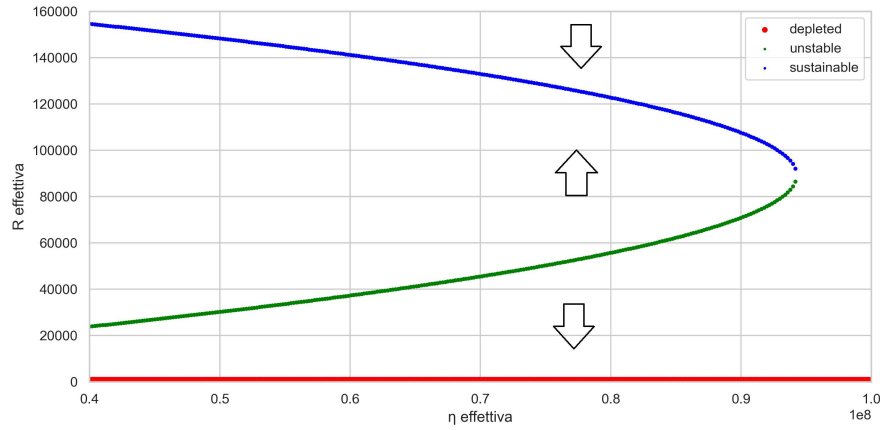


Figura 3: Grafico di biforcazione delle soluzioni con i parametri del Capitolo 3; le frecce indicano le regioni di attrazione dei due equilibri stabili

La curva superiore (in blu) corrisponde all'equilibrio sostenibile, quella inferiore (in verde) all'equilibrio instabile e in rosso è indicata la soluzione con la risorsa esaurita $R_{eff}^* = 0$. Il punto di biforcazione corrisponde a $\eta_{eff} = \eta_c$.

Allo scopo di comprendere la relazione tra la struttura della rete e la resilienza, per mezzo del parametro η_{eff} , sono state testate da Suweis et al. [27] reti teoriche di diversa struttura. In particolare l'interesse risiedeva nel determinare in quali casi l'aumento di connettività della rete corrisponde ad una diminuzione o un aumento della resilienza. I risultati fanno emergere una differenza di comportamento a seconda della struttura: nel caso di reti random, dette anche di Erdős-Rényi, ovvero in cui la probabilità che una coppia di nodi sia connessa è p per ogni coppia della rete, si trova con un aumento di connettività implica un aumento di resilienza. Al contrario, per reti eterogenee le due quantità sono anti-correlate, mentre nel caso di reti omogenee non è stata trovata una correlazione significativa. Questi ultimi due risultati restano validi anche se la rete è modulare.

Capitolo 3

Applicazione del modello

3.1 Il caso particolare della pesca nel Mare del Nord

Se, come è stato esposto in precedenza, il modello può descrivere svariati sistemi ecologici risorsa-consumo-commercio, si può scegliere di applicarlo anche alla pesca e alle risorse ittiche, anche restringendosi ad una certa area. Naturalmente si differenzia molto rispetto alla rete alimentare globale: in primis per scala e complessità dal momento che è limitata ad una sola pool sfruttata da più agenti, pertanto un elemento di molteplicità viene subito meno. In secondo luogo, non si possono fare osservazioni sul tipo di struttura (modulare, eterogenea) perchè il numero esiguo di nodi non lo permette. Cionostante, lo studio della sostenibilità ecologica nel Mare del Nord è ugualmente molto interessante perchè le conseguenze della variazione della resilienza delle risorse ittiche impattano direttamente le popolazioni e le economie locali, nonché l'ecosistema marino.

Nonostante la rete di pesca nel Mare del Nord sia fortemente regolamentata per evitare il sovrasfruttamento delle risorse marine e si eseguano sistematicamente campionamenti per monitorare la quantità di biomassa, sono emerse negli ultimi decenni le conseguenze delle difficoltà dell'utilizzo condiviso delle risorse e della gestione della pressione economico-politica.

Il sistema è rappresentato come una rete di sette nodi-Paesi con accesso al Mare del Nord e fautori della pesca in quest'area: Regno Unito, Danimarca, Paesi Bassi, Norvegia, Germania, Francia e Belgio.

3.2 La stima di R_i e la scelta di un'unica specie

Per prima cosa va definita e stimata la risorsa attribuita ad ognuno dei nodi R_i . I dati disponibili provengono dal Database of Trawl Surveys (DATRAS) [5], che è la piattaforma gestita dall'International Council for the Exploration of the Sea (ICES) che raccoglie, standardizza e pubblica i dati provenienti da survey scientifici condotti con reti a strascico nei mari europei in collaborazione tra vari Paesi. Il tipo di campionamento è eseguito quindi esclusivamente con reti a strascico: ciò implica che i dati forniti sono significativi per la stima di densità di biomassa solo per le specie bentoniche o demersali, ovvero che abitano il fondale marino o la colonna d'acqua appena sopra il fondale. Le specie pelagiche, che vivono in acque più superficiali, vengono ugualmente rivelate ma i dati di densità non sono rappresentativi della biomassa totale. Per queste ultime specie possono essere condotti survey acustici, il più importante dei quali è HERAS (Herring Acoustic Survey), un programma che si concentra sul monitoraggio delle popolazioni di aringa nel Mare del Nord tramite echoscandaglio. Inoltre, secondo IFFO, l'International Fishmeal and Fishoil Organization, le specie pelagiche, dette a tal proposito 'forage fish', sono largamente impiegate per la produzione di fishmeal e fishoil [17, 24, 22]. Sebbene tali prodotti siano utilizzati per mangimi per altri pesci d'acquacoltura, pollame e suini, e quindi indirettamente confluiscono nell'alimentazione umana, la definizione del parametro d_i per queste specie è ambigua. Per tali ragioni si è ritenuto di dover scartare i dati DATRAS relativi alle specie pelagiche e di restringersi alle specie demersali per maggiore accuratezza.

Il dataset riporta i dati di ogni specie trovata nei campionamenti per un totale di centinaia di specie diverse, ma vengono considerate 'specie standard', cioè di effettivo valore commerciale, solo nove di queste. Esse rappresentano la quasi totalità dei pesci pescati (ad esclusione della pesca accidentale), consumati e commerciati in modo significativo. Poichè una risorsa è tale in relazione all'interesse allo sfruttamento, si è ritenuto che le specie non standard non rientrassero nella definizione di R_i . Di queste nove specie, solo cinque sono demersali.

È evidente dunque che le possibilità sono due: una trattazione aggregata tra le cinque specie demersali 'standard' oppure testare il modello su una specie singola. Le specie in questione sono: *Gadus morhua*, *Melanogrammus aeglefinus*, *Merlangius merlangus*, *Pleuronectes platessa* e *Pollachius virens*. Tuttavia una di queste, il merlano, non possiede un codice di mercato proprio, pertanto non ne sono tracciabili gli scambi commerciali.

Specie	kg pro capite/anno
Merluzzo atlantico	2,06
Eglefino	0,28
Pollack	0,33
Platessa	0,15

Tabella 1: Consumo apparente in live weight delle specie demersali più significative

agli stock di interesse perché su EUMOFA viene indicato solo il nome comune e non sono perciò distinte né le specie precise né l'origine FAO. Per tutte le ragioni finora esposte si è deciso di testare il modello sulla sola specie del *Gadus morhua*. Questa scelta è dettata dal fatto che si tratta della specie maggiormente consumata e commerciata e dunque più tracciabile.

Per quanto riguarda le altre specie, si riporta in Tabella 1 per ogni specie la media del consumo apparente pro capite annuale in live weight in Europa, risultato della media degli anni dal 2010 al 2022 ottenuta dai dati di EUMOFA, European Market Observatory for Fisheries and Aquaculture products. L'apparent consumption è definito come [(total catches - industrial catches) + aquaculture + imports] - exports. Bisogna notare però che le quantità riportate non si riferiscono

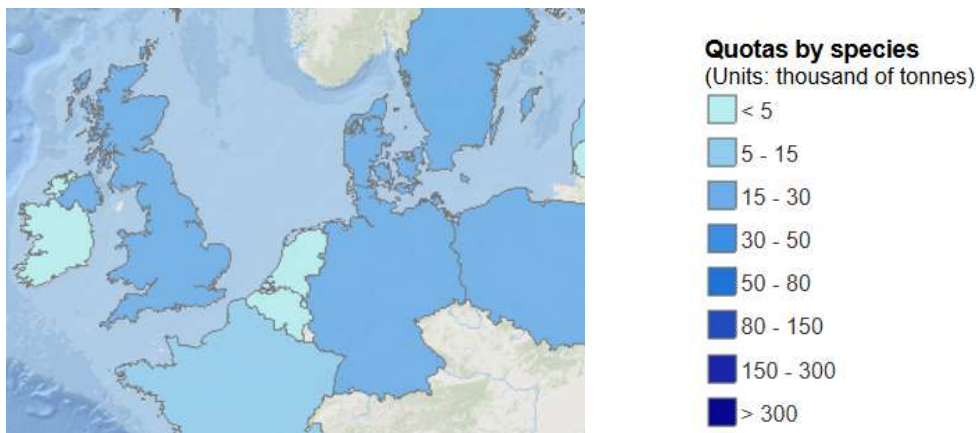


Figura 4: Quote di alcune nazioni per la pesca del merluzzo nell'Atlantico nord-orientale (zona FAO 27) [6]

Una volta individuata la specie più adatta, si è proceduto alla stima della risorsa associata ad ogni Paese R_i . Il primo step è consistito nel risalire dai dati DATRAS alla Total Stock Biomass nel Mare del Nord. A tal scopo sono stati selezionati i dati relativi ai surveys del programma NS-IBTS (North Sea-International Bottom Trawl Survey) effettuati con la rete standardizzata GOV (Grande Ouverture Verticale), in modo da garantire l'omogeneità dei dati, e nel primo trimestre dell'anno, così da eliminare la variabilità stagionale [15].

Nell'ottica del campionamento dell'ICES, il Mare del Nord è suddiviso spazialmente in 250-270 statistical rectangles attivi, definiti come aree di 1 grado di longitudine per 0,5 gradi di latitudine, aventi pertanto superficie decrescente con la latitudine. Il campionamento viene fatto sistematicamente in ciascuno dei rettangoli, in modo da avere l'intera area marina coperta. Le subaree-rettangoli diversi che compaiono nei dati utilizzati sono tuttavia 199. I dati utilizzati si presentano in termini di Catch

Per Unit Effort (CPUE) per length per haul per hour, ovvero il numero di individui di una certa lunghezza, pescati in una calata della rete all'ora, in un determinato anno e rettangolo.

Inoltre sono separatamente disponibili informazioni sui dettagli della strumentazione di numerose prese dati NS-IBTS negli anni: da qui è stato possibile ottenere una media della ground speed, cioè la velocità della rete sul fondale, e della wing spread misurata, l'apertura reale delle ali della rete misurata durante la haul. Dalle due medie si è calcolata la swept area all'ora effettiva. Successivamente i dati sono stati aggregati per anno, subarea e length class mediando il CPUE sulle altre variabili (diverse calate, diversi Paesi che hanno eseguito il survey ecc.) ed è stata associata ad ogni subarea la superficie esatta come $111\text{km} \times 111\text{km} \times \cos(\text{latitudine}[\text{rad}])$. Tramite la length-weight relationship:

$$W = a \cdot L^b, \quad (11)$$

dove i parametri a e b sono propri della specie, è stata associata a ogni length class la massa corrispondente e il CPUE per hour è stato convertito in CPUE per swept area utilizzando il valore medio calcolato in precedenza. Il processo ha infine permesso di risalire alla biomassa presente in ciascun rettangolo e alla biomassa complessiva nel Mare del Nord (Total Stock Biomass) per anno. Due contributi di errore in questa stima sono il fatto che il numero di diversi rettangoli campionati ogni anno oscilla tra 160 e 190 e non coprono tutto il Mare del Nord e che è stata ignorata la catchability, la percentuale di pesci che la rete raccoglie sul totale di individui presenti nel volume spazzato, che è ignota. Si sono considerati i dati della TSB, Total Stock Biomass, per gli anni successivi al 1980, da quando il campionamento è diventato sistematico e il numero di rettangoli stabile (Figura 7).

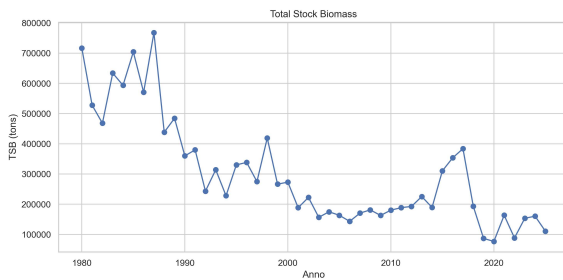


Figura 6: TSB del *Gadus morhua* nel Mare del Nord dal 1980 al 2025

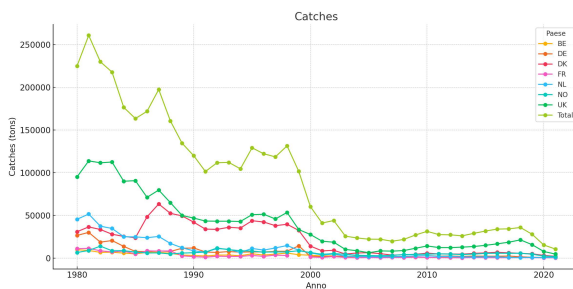


Figura 8: Catches del *Gadus morhua* da parte di BE, DE, DK, FR, NL, NO, UK dal 1980 al 2021

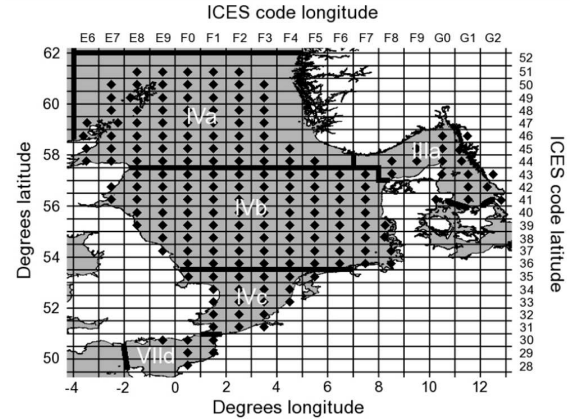


Figura 5: Rettangoli statistici ICES

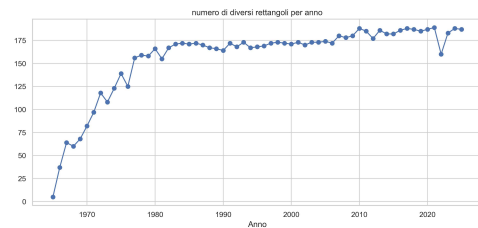


Figura 7: Numero di rettangoli campionati per ogni anno dal 1965 al 2025

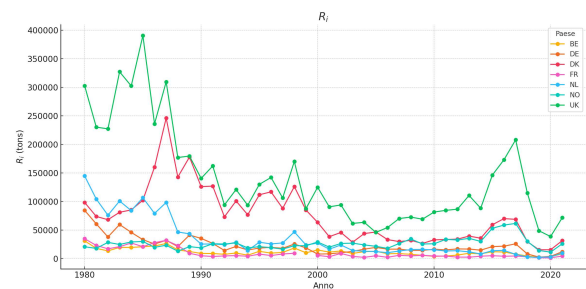


Figura 9: R_i relativa al *Gadus morhua* attribuita a BE, DE, DK, FR, NL, NO, UK dal 1980 al 2021

In base agli stock assessment, ICES ogni anno suggerisce la MSY, Maximum Sustainable Yield, su base scientifica e, di conseguenza, le entità politiche si accordano sulla TAC, Total Allowable Catch, e sulla quota che spetta a ciascun Paese coinvolto. Per questa ragione il metodo per attribuire la porzione di risorsa ad un Paese si deve basare sulle quote piuttosto che sull'estensione delle EEZ, che sono accessibili per la pesca da tutte le entità che ne ottengono il diritto attraverso accordi. Quindi, non essendo disponibili le informazioni sulle quote annuali, il metodo per stimare le R_i si è basato sui dati dei catches di merluzzo nel Mare del Nord da parte dei diversi Paesi. I dati derivano dai dataset di ICES per gli anni 1950-2010 e Eurostat per 2000-2021, da cui si è estratto il periodo 1980-2021 (Figura 8) [9]. Questa scelta introduce un errore dovuto al fatto di ignorare i discards, il pesce pescato e rigettato vivo in mare. Dai catches sono state calcolate le percentuali sul totale per ogni anno ed è stata assegnata ad ogni Paese la risorsa R_i pari alla corrispondente frazione della TSB (Figura 9).

3.3 La stima di K_i^R e α

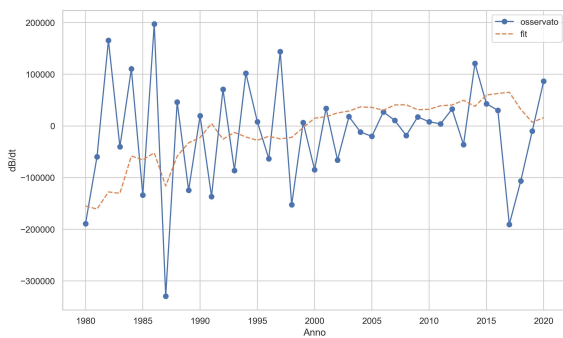


Figura 10: Fit dell'equazione (12) tra il 1980 e 2020 per la stima di K : confronto tra derivata discreta e funzione logistica con $K \approx 920000$ tons

Per quanto riguarda il calcolo della capacità portante, è stato ottenuto un valore totale K relativo all'intera subarea FAO 27.4 come risultato dell'interpolazione del modello di crescita logistico con harvesting $H(t)$:

$$\frac{dB}{dt} = rB(t) \left(1 - \frac{B(t)}{K} \right) - H(t), \quad (12)$$

dove $B(t)$ è la TSB, $H(t)$ è il totale annuale dei catches e r il tasso di crescita. La derivata discreta $dB(t)/dt \approx B(t+1) - B(t)$ è stata stimata tramite differenza in avanti. Il risultato è $K \approx 920000$ tonnellate.

Per assegnare a ogni nodo la propria K_i è stato ritenuto più appropriato un criterio spaziale, in quanto la capacità portante di ogni Paese può essere interpretata come la frazione di risorsa biologica potenzialmente disponibile all'interno della propria area marittima. Questa scelta si basa sull'assunzione che la distribuzione spaziale dello stock sia stabile nel tempo a meno di spostamenti stagionali e che ogni stato possa accedere in modo preferenziale a una certa regione, corrispondente alla EEZ. A partire dagli shapefile di Marine Regions è stata estratta l'intersezione tra la subarea FAO 27.4 e le EEZ dei vari Paesi e se ne è ricavata la percentuale sulla superficie totale del Mare del Nord (Figure 11 e 12) [19]. In modo coerente si è definita K_i come l'adeguata frazione di K totale.

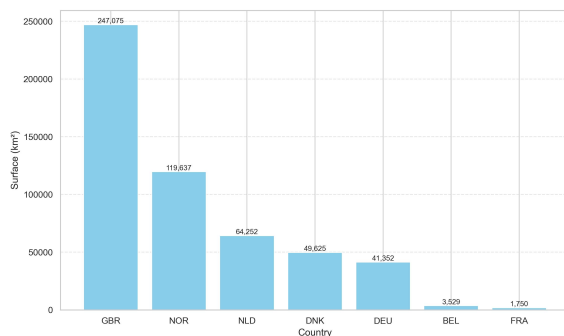


Figura 11: Superficie delle EEZ di BE, DE, DK, FR, NL, NO, UK

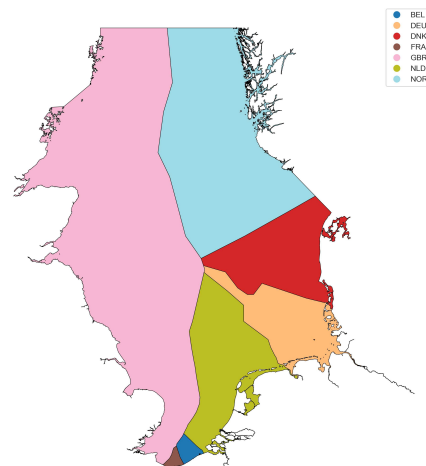


Figura 12: Intersezione EEZ e NS

Dal fit è stato anche ottenuto il tasso di crescita $r \approx 0,45$. Si è scelto di assumere lo stesso valore di $\alpha \equiv r \equiv \alpha_{eff}$ per tutti i Paesi, in quanto si fa riferimento a un unico stock biologico in un'area circoscritta: esso è soggetto a una dinamica demografica comune, indipendentemente dal Paese che lo sfrutta. Inoltre, l'analisi empirica ha mostrato che le curve di disponibilità per Paese sono spesso troppo piatte o rumorose per consentire una stima affidabile dei parametri α_i disaggregati. Pertanto, si è giudicato il valore ottenuto dal fit più robusto e biologicamente significativo.

3.4 La stima di c_i

Ricostruire una stima del fabbisogno pro capite d_i di merluzzo proveniente dal Mare del Nord e delle matrici di adiacenza C_{ij} rappresenta invece un problema più complesso a causa della lunga catena di lavorazione e distribuzione, durante la quale si confondono prodotti di diversa provenienza.

Relativamente a d_i nei Paesi del Mare del Nord, si deve fare una distinzione tra prodotto ittico fresco e processato-surgelato. Nel primo caso si tratta di solito di merluzzo della specie atlantica, più pregiato e di provenienza locale. Tuttavia, tutti i Paesi eccetto Belgio e Paesi Bassi hanno accesso e pescano attivamente anche in altre zone oltre al Mare del Nord, in particolar modo la Norvegia pesca nel Mar di Norvegia e nel Mar di Barents e il Regno Unito nel West of Scotland, due aree che ospitano - o ospitavano in passato - uno stock abbondante. Pertanto, anche conoscendo il consumo medio pro-capite di merluzzo fresco, bisogna considerare che non è interamente proveniente dall'area target. Inoltre, come riportato in Tabella 1, secondo EUMOFA negli ultimi dieci anni il consumo pro-capite annuale di 'merluzzo' è stato in media nel continente di 2,06 kg (in live weight), che corrisponde al 9% del consumo di pesce totale [25]. Si può notare che la richiesta di questa specie di pesce, anche nei soli Paesi considerati, è superiore al totale della biomassa nel Mare del Nord dalla fine degli anni '80. La gran parte è soddisfatta da prodotti surgelati, composti da altre specie di merluzzo, il *Gadus Macrocephalus* e il *Gadus Ogac*, pescati l'uno nel Pacifico e l'altro in Groenlandia. Nonostante che l'Europa sia importatrice netta, il merluzzo atlantico, oltre che al consumo locale, è destinato anche all'esportazione, per via dell'elevato valore commerciale, ad esempio verso gli Stati Uniti. Inoltre, è anche comune esportarlo in Paesi dove la manodopera è poco costosa e dove si trovano grandi impianti industriali, prima fra tutti la Cina, per essere lavorato e poi reimportato. In quest'ultimo processo spesso viene mescolato alle altre specie e se ne perde la tracciabilità. Alternativamente, anche all'interno dell'Europa stessa può, ad esempio, essere pescato da una certa nazione, subire diversi stadi di lavorazione in altri Paesi ed essere infine reimportato o essere distribuito a Paesi terzi [2].

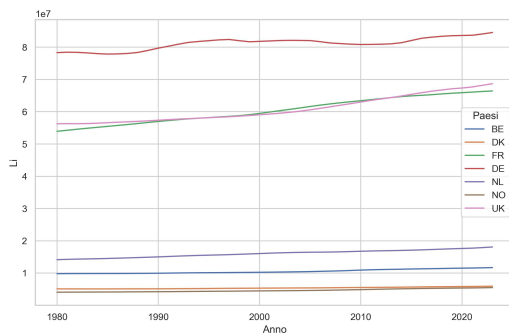


Figura 13: Numero di abitanti L_i dal 1980 al 2023 in BE, DE, DK, FR, NL, NO, UK

Country	CV_{L_i}	CV_{R_i}	s_i
BE	8,1	53,5	6,6
DE	5,2	69,4	13,4
DK	8,3	66,0	8,0
FR	12,8	98,9	7,8
NL	15,7	102,0	6,6
NO	14,1	39,7	2,8
UK	8,3	61,3	7,4

Tabella 2: Coefficienti di variazione di L_i e R_i di BE, DE, DK, FR, NL, NO, UK e corrispondente rapporto

Tutte le precedenti ragioni contribuiscono all'ambiguità di determinare d_i come una frazione di 2,06 kg. È stato preso quindi come riferimento il dataset di EUMOFA 'Household consumption of fresh product' [11], ovvero i dati relativi al consumo domestico pro-capite di prodotto fresco. Nel dataset è riportato il consumo pro-capite al mese per ogni anno dal 2009 al 2025, relativamente ad alcuni Paesi europei, tra cui quelli di interesse eccetto Belgio e Norvegia. Per i cinque Paesi presenti è stato preso indicativamente 12 volte il consumo del mese di aprile ed è stata fatta la media di questa quantità tra

gli anni disponibili. I valori ottenuti variano tra 0,1 kg e 0,4 kg a seconda del Paese, che corrisponde ad una frazione tra il 5% e il 19% del merluzzo totale. Si è deciso allora di prendere d come unica stima per tutti i Paesi pari al 10% di 2,06 kg, ritenendola una stima approssimativa ma ragionevole.

Per quanto riguarda L_i , ovvero il numero di abitanti per Paese nel tempo, sono stati utilizzati i dati di ourworldindata [4], riportati in Figura 13. Per giustificare l'assunzione $L_i \approx K_i^R$ sono stati comparati i coefficienti di variazione della popolazione con la risorsa (Tabella 2).

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100 \quad (13)$$

$$s_i = \frac{CV_{R_i}}{CV_{L_i}}$$

Dal momento che $s_i > 1$, le fluttuazioni della risorsa sono maggiori di quelle del numero di abitanti e L_i si può considerare costante.

3.5 La costruzione delle matrici di adiacenza

Analogamente, la complessità della rete commerciale ha implicazioni nella costruzione della matrice di adiacenza \tilde{C}_{ij} . Idealmente, tale matrice dovrebbe rappresentare i flussi effettivi di risorsa da un Paese esportatore j , a cui appartiene, ad un Paese importatore i , dove è destinata al consumo, e con riferimento al solo stock dell'area in analisi. Tuttavia, nella pratica, i dati disponibili non permettono tale precisione: la sovrapposizione di flussi re-importati, le trasformazioni internazionali, e la categorizzazione, che è commerciale e non biologica, non permettono di filtrare le informazioni desiderate. Sono stati utilizzati i dati di UN Comtrade [28] relativi agli anni disponibili 1990-2024.

Le matrici \tilde{C}_{ij} sono dunque state composte basandosi sulla massa netta di importazione a cui è stata sottratta l'importazione dichiaratamente destinata all' 'inward processing', dove presente. I dati utilizzati sono aggregati tra il *Gadus morhua* e le altre due specie di merluzzo menzionate e relativi a ogni forma finita o step della catena di lavorazione. Pertanto, le matrici \tilde{C}_{ij} , espresse in tonnellate, costituiscono una stima quanto più possibile vicina al flusso effettivo di merluzzo proveniente dallo stock target, ma tuttavia grezza. A causa delle difficoltà nel distinguere la specie esatta, lo stock di origine e il Paese di consumo finale, non possono essere interpretate come una misura diretta della pressione esercitata sullo stock specifico di ciascun Paese. Infatti, pur essendo costruite sulla base di flussi osservabili tra i nodi della rete, incorporano indirettamente anche pressioni provenienti dall'esterno, ad esempio da Paesi non inclusi esplicitamente nel modello, ma che partecipano al commercio

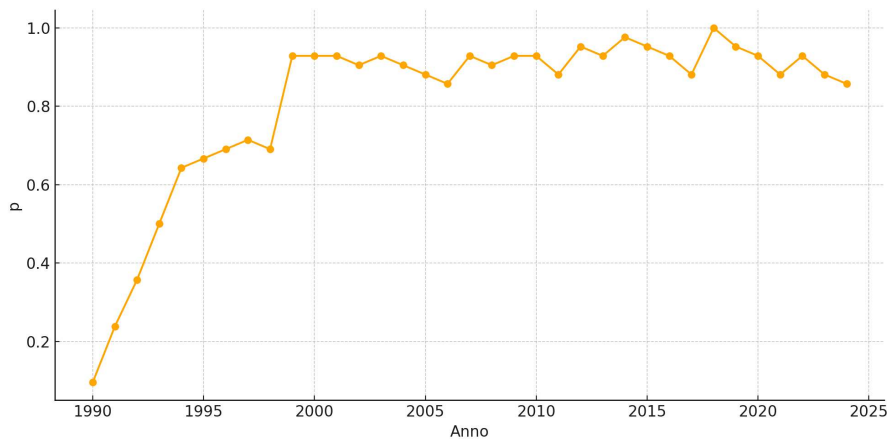


Figura 14: Andamento della connettività p della rete di scambio di merluzzo tra BE, DE, DK, FR, NL, NO, UK dal 1990 al 2024

del merluzzo del Mare del Nord. Questo effetto riflette il carattere globale e interconnesso del mercato ittico, in cui esportazioni, trasformazioni e riesportazioni possono propagare la pressione ecologica ben oltre i confini geografici dello stock.

A maggior ragione, le matrici normalizzate C_{ij} non rappresentano un flusso materiale, ma una relazione strutturale che riflette la probabilità di connessione commerciale tra i Paesi, e che può essere interpretata come una forma indiretta di pressione potenziale esercitata sullo stock. Mentre \tilde{C}_{ij} è utile a descrivere il commercio osservabile, C_{ij} è utilizzabile nel modello per rappresentare come lo sfruttamento di uno stock si propaghi nella rete commerciale di cui costituisce una proxy strutturale.

Per quantificare l'intensità dell'interconnessione della rete è possibile calcolare la connettività p , definita come nell'equazione (4). In Figura 14 si può osservare un rapido e deciso aumento dell'interconnessione negli anni '90: ciò può essere ricondotto alla maggiore facilità di scambio dovuta all'entrata in vigore del Mercato Unico europeo nel 1993 e, successivamente, alla sostanziale liberalizzazione del commercio ittico anche tra UE e Norvegia alla fine degli anni '90.

Dagli anni 2000 la connettività si è stabilizzata su valori prossimi a 1 a indicare la complessità della rete commerciale: poichè non è stato possibile isolare i soli flussi Paese originario - Paese consumatore, nelle matrici compaiono necessariamente anche gli scambi intermedi e quasi sempre sia C_{ij} che C_{ji} sono non nulle.

3.6 L'equazione effettiva

Infine sono stati calcolati i parametri effettivi secondo le equazioni (12), (14), (16).

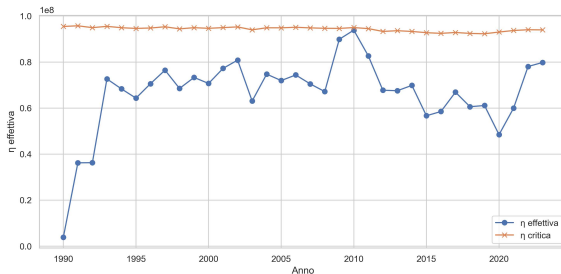


Figura 15: Confronto η_{eff} e η_c tra 1990 e 2023

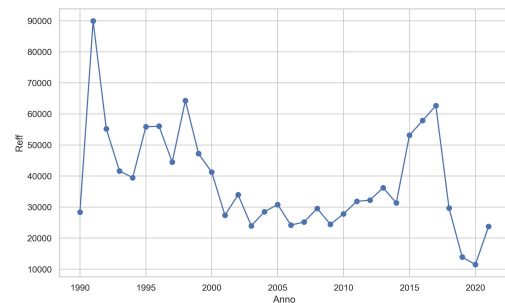


Figura 16: Andamento di R_{eff} tra 1990 e 2021

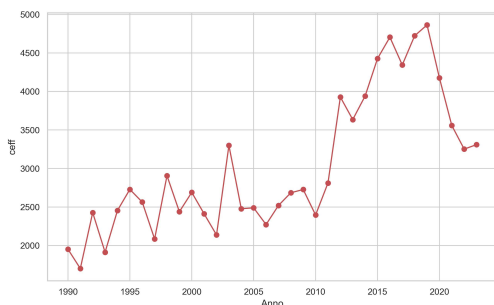


Figura 17: Andamento di c_{eff} tra 1990 e 2023

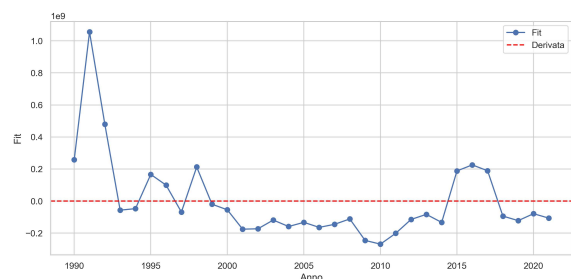


Figura 18: Fit dell'equazione (15) tra il 1990 e il 2021 per la stima di δ : confronto tra la derivata lineare e l'equazione cubica di crescita con i parametri effettivi R_{eff} , η_{eff} , c_{eff} , K_{eff}^R e $r \equiv \alpha_{eff}$

Il parametro di esaurimento δ è stato inferito come risultato dell'interpolazione dell'equazione (15). Dal momento che, come si vede in Figura 16, il deciso andamento decrescente della risorsa non è ben

visibile per il fatto che si sono dovuti selezionare solo gli anni più recenti (per i quali sono disponibili i dati di trade), dR_{eff}/dt è stata stimata come la slope della TSB (Figura 6) calcolata su tutti gli anni disponibili (ovvero dal 1980), ottenuta da un fit lineare. Infatti, se R_{eff} rappresenta la media pesata delle risorse singole, dovrà comunque preservare lo stesso comportamento lineare del totale. Il fit ha restituito $\delta \approx 2 \cdot 10^{-4}/yr$.

Una volta inferiti tutti i parametri dell'equazione (15), è stata calcolata la η_c , soglia critica di pressione imposta dal mercato, e le soluzioni di $dR_{eff}/dt = 0$ in funzione di η_{eff} . Figura 15 rappresenta $\eta_{eff}(t)$ a confronto con il valore critico: in anni recenti η_{eff} si è trovata costantemente in prossimità di quest'ultimo, mostrando quindi come la crescente globalizzazione ha spinto la sostenibilità del pescato al limite.

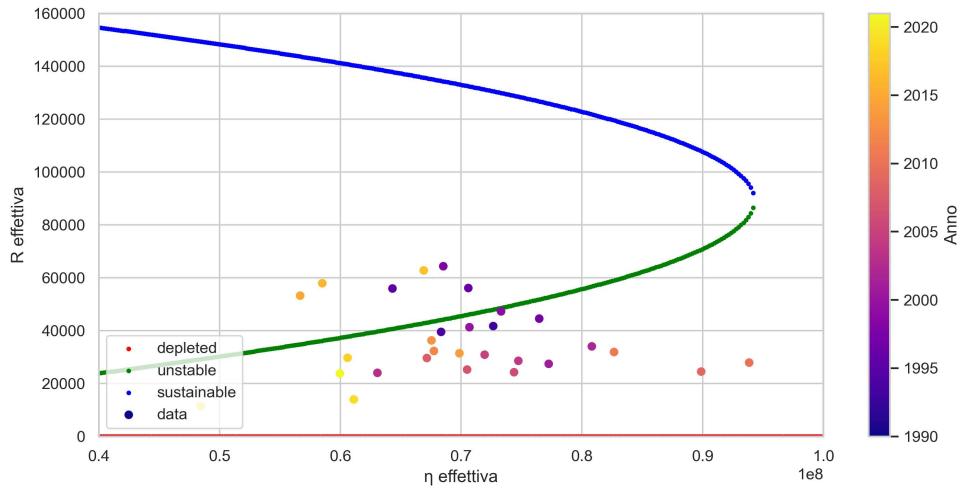


Figura 19: Confronto tra il grafico di biforcazione delle soluzioni con i parametri calcolati e i dati empirici $(R_{eff}(t), \eta_{eff}(t))$

In Figura 19 sono rappresentati infine i punti reali $(R_{eff}(t), \eta_{eff}(t))$ rispetto alle soluzioni dell'equazione con i parametri empirici. La maggior parte dei punti si trova nella zona compresa tra la curva che rappresenta l'equilibrio instabile e la retta $R_{eff} = 0$, ovvero nella regione di attrazione dello stato depauperato. Fatta eccezione per i tre punti degli anni 2015-2016-2017, in cui si è osservata un aumento di R_{eff} e valori relativamente più bassi di η_{eff} , tutti gli altri anni più recenti si posizionano criticamente nei pressi di $R_{eff} = 0$.

Capitolo 4

Conclusioni

Dalle Figure 6 e 16 emerge una diminuzione critica dello stock durante gli anni '90 e 2000 e una relativa ripresa tra il 2010 e 2017, seguita da un nuovo declino. Questo risultato è perfettamente in accordo coi report annuali dell'ICES, che documentano come a partire dagli anni '90, lo stock di merluzzo del Mare del Nord abbia subito un declino progressivo, dovuto al sovrasfruttamento degli anni precedenti [12, 14, 13, 16]. Durante questo periodo, la mortalità da pesca ha superato sistematicamente i livelli biologicamente sostenibili, in un contesto di gestione frammentata e orientata al breve termine, che ha portato lo stock al di sotto delle soglie di sicurezza biologica già all'inizio degli anni 2000. Di fronte a questa crisi, l'UE e la Norvegia hanno implementato, a partire dal 2004, un piano congiunto di ricostituzione dello stock, basato sulla riduzione delle TAC, sull'introduzione di attrezzature selettive (es. maglie più larghe), e su chiusure spaziali e temporali delle aree di pesca. A partire dal 2010, queste misure hanno mostrato effetti tangibili: lo stock è aumentato in biomassa fino al 2017, sostenuto da una riduzione della mortalità da pesca, da condizioni ambientali favorevoli (temperature moderate, maggiore disponibilità di prede), e da un miglioramento generale della compliance e del monitoraggio, grazie anche al miglioramento dei modelli di stock assessment. Tuttavia, a partire dal 2018, lo stock ha ricominciato a declinare in modo preoccupante. Le cause principali sono da ricercare in un reclutamento persistentemente debole, legato al cambiamento climatico e all'instabilità ambientale; in una pressione di pesca dell'ordine di decine di tonnellate, nonostante le raccomandazioni ICES per 'zero catch' dal 2019 in poi; e in una mortalità accidentale elevata per via della pesca non selettiva. Il risultato è che, dal 2019, l'ICES classifica nuovamente lo stock come al di sotto del limite di biomassa B_{lim} , e a rischio di collasso biologico, in assenza di misure drastiche. I risultati ottenuti rappresentano pertanto dinamiche reali [1, 8, 10, 18].

I risultati riportati in Figura 19 confermano ulteriormente che si sta assistendo al collasso dello stock di merluzzo nel Mare del Nord. Il modello qui proposto per la dinamica della risorsa impone una struttura bistabile e, nel caso in analisi, si può osservare che da tre decenni i punti che descrivono lo stock hanno oltrepassato la soglia di instabilità (curva verde) e occupano la regione del secondo attrattore dinamico, che corrisponde al collasso della specie in quell'area, $R_{eff} = 0$ (curva rossa). Ciò significa che la resilienza dello stock è attualmente intaccata: nonostante lo stock di merluzzo del Mare del Nord conservi teoricamente una capacità intrinseca di recupero, questa appare oggi fortemente compromessa. Il sistema biologico ha già mostrato in passato la possibilità di ricostituirsi, come evidenziato dal parziale recupero tra il 2010 e il 2017. Tuttavia, il reclutamento debolissimo e persistente, osservato ormai da diversi anni, indica che i meccanismi naturali di rigenerazione sono in uno stato di fragilità strutturale. A ciò si aggiungono fattori ambientali sfavorevoli – come l'aumento della temperatura delle acque e la variazione nella disponibilità di prede – che alterano l'habitat riproduttivo e la sopravvivenza giovanile. Inoltre, la pressione di pesca residua (anche in assenza di pesca diretta, a causa delle catture accessorie) contribuisce a impedire il raggiungimento di soglie critiche per la ripresa. Il sistema si trova così in una regione dinamica in cui la resilienza è ridotta: il recupero è ancora possibile, ma sempre più difficile, e richiederebbe condizioni ambientali favorevoli e

misure di gestione radicali, che finora non si sono verificate in modo coerente. In questo contesto, la traiettoria dello stock rischia di permanere stabilmente nella regione collassata.

L'obiettivo della tesi era testare il modello di Tu et al. nel contesto della pesca del mare del Nord, ovvero isolando un sottoinsieme nella pesca del *Gadus morhua* nell'Atlantico nord-orientale, del merluzzo in generale delle varie sottospecie a livello globale o, in senso ancora più ampio, alla pesca mondiale. Il modello rileva una correlazione tra perdita di resilienza di uno stock e l'aumento della connettività della rete. Tuttavia, la validità dei risultati è limitata poiché l'aumento di connettività nella sotto-rete considerata deriva da un aumento della connettività a più livelli della rete più ampia cui appartiene, dai rapporti interni a un Paese stesso a quelli di portata globale, e della complessità del sistema commerciale.

Infatti, in primo luogo, il sistema in analisi riguarda Paesi che hanno tutti accesso alla risorsa in questione, ma una buona parte della pressione economica deriva dal fatto che consumatori non locali siano arrivati negli ultimi settanta-ottant'anni a poterne usufruire. Questo è sia il caso di Paesi dell'Europa senza sbocco sui mari settentrionali, sia di mercati extra-europei target di questo specifico mercato (Stati Uniti, Brasile). In secondo luogo, il lungo e dipanato processo di lavorazione apporta ricchezza in ognuno dei suoi vari step, in modo che molte altre persone, oltre ai semplici pescatori, dipendono da questo tipo di economia e ciò contribuisce alla pressione sulla risorsa.

D'altra parte, la richiesta di merluzzo, fresco o processato, resta alta in Europa e i livelli di biomassa nelle acque dell'Atlantico nord-orientale non consentono di soddisfarla pienamente, a causa dello stato di collasso o grave rischio in cui versano gli stock sovrasfruttati del Mare del Nord, Skagerrak e Kattegat, West Scotland e Mar Celtico. Nonostante la pesca sia considerata sostenibile nelle acque delle Isole Faroe, dell'Islanda e del Mare di Barents, la produzione complessiva di queste aree non è sufficiente, da sola, a coprire l'intera domanda europea, soprattutto se si considerano le perdite fisiologiche legate alla trasformazione industriale, le esportazioni verso altri mercati e la necessità di mantenere i prelievi entro limiti biologicamente sostenibili. Una quota significativa del merluzzo pescato in Islanda o Norvegia viene inoltre lavorata in Paesi terzi, come la Cina, per poi essere reimportata in Europa sotto forma di prodotto trasformato. Sebbene questo non implichi un'origine extraeuropea del pesce in termini biologici, evidenzia la forte interdipendenza delle filiere produttive globali e la vulnerabilità del sistema europeo rispetto a dinamiche esterne di natura economica, logistica o geopolitica.

Si può concludere che la diminuzione della resilienza non può essere univocamente ricondotta all'aumento di connettività della sotto-rete perchè suggerirebbe, in base ai risultati dei test teorici di Suweis et al., che essa è eterogenea ma non si può fare un simile ragionamento perchè è troppo limitata e non si può ignorare l'influenza esterna, a maggior ragione dal momento che non è stato possibile isolare neppure il sistema di commercio nelle matrici di adiacenza. Dunque non si può correlare il comportamento della resilienza dello stock alle caratteristiche strutturali di una rete isolata perchè il commercio internazionale è troppo significativo. La validità dei risultati ottenuti risiede nel fatto che η_{eff} aumenta in conseguenza alla pressione proveniente anche dall'esterno sebbene non si possa dire niente sulla struttura della rete totale. Ciò che è visibile dall'analisi è il risultato di un processo più ampio.

Per rendere più significativi i risultati si potrebbe estendere la trattazione ai vari stock di merluzzo nel mondo, che rappresenterebbero tutti i pools di una stessa risorsa, e a tutti i consumatori globali. In tal caso si potrebbe studiare come la globalizzazione influenzi l'accesso alle risorse ittiche e la distribuzione della pressione di pesca tra bacini, e come la connettività commerciale tra regioni produttive e consumatrici modelli la sostenibilità complessiva del sistema. Questo approccio permetterebbe di valutare, ad esempio, in che misura una crisi locale (come il collasso di uno stock) possa essere tamponata o amplificata dal mercato globale, e quali siano i meccanismi che governano la resilienza o la vulnerabilità del sistema alimentare marino nel suo insieme. In una tale trattazione sarebbe anche possibile studiare ampiamente gli effetti di altre caratteristiche strutturali della rete, quali la modularità, l'eterogeneità o omogeneità e la nestedness, sulla resilienza di una specie specifica. Il merluzzo è un caso esemplificativo a causa di un consumo molto diffuso e legato ad un immane sistema di lavorazione e

commercio: studiarne le condizioni e dinamiche che possono portare la specie al collasso è importante non solo per una grande quantità di consumatori ma anche per una vasta classe di lavoratori che dipendono dalla sua economia.

Bibliografia

- [1] Enrico Cecapolli et al. «Unmasking contrasting regime shift dynamics across three substocks of Atlantic cod in the North Sea». en. In: *ICES Journal of Marine Science* 82.3 (mar. 2025). A cura di Rebecca Selden, fsaf021. ISSN: 1054-3139, 1095-9289. DOI: 10.1093/icesjms/fsaf021. URL: <https://academic.oup.com/icesjms/article/doi/10.1093/icesjms/fsaf021/8071672> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [2] European Commission, Directorate-General for Maritime Affairs e Fisheries. *The EU fish market – 2017 edition*. European Commission, 2017. DOI: 10.2771/455963.
- [3] Paolo D’Odorico, Gregory S Okin e Brandon T Bestelmeyer. «A synthetic review of feedbacks and drivers of shrub encroachment in arid grasslands». In: *Ecohydrology* 5.5 (2012), pp. 520–530.
- [4] Our World in Data. «OWID Homepage». en. In: *Our World in Data* (feb. 2024). URL: <https://ourworldindata.org> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [5] *Datras: Download*. URL: https://datras.ices.dk/Data_products/Download/Download_Data_public.aspx (visitato il giorno 11/08/2025).
- [6] *European Atlas of the Seas*. URL: https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/atlas/maritime_atlas/ (visitato il giorno 11/08/2025).
- [7] Jianxi Gao, Baruch Barzel e Albert-László Barabási. «Universal resilience patterns in complex networks». en. In: *Nature* 530.7590 (feb. 2016), pp. 307–312. ISSN: 0028-0836, 1476-4687. DOI: 10.1038/nature16948. URL: <https://www.nature.com/articles/nature16948> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [8] Dø Hjermmann et al. «Spatial analysis of North Sea cod recruitment: concurrent effects of changes in spawning stock biomass, temperature and herring abundance». en. In: *Marine Ecology Progress Series* 480 (apr. 2013), pp. 263–275. ISSN: 0171-8630, 1616-1599. DOI: 10.3354/meps10315. URL: <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v480/p263-275/> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [9] *Home - Eurostat*. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [10] Joe Horwood, Carl O’Brien e Chris Darby. «North Sea cod recovery?» en. In: *ICES Journal of Marine Science* 63.6 (gen. 2006), pp. 961–968. ISSN: 1095-9289, 1054-3139. DOI: 10.1016/j.icesjms.2006.05.001. URL: <https://academic.oup.com/icesjms/article/63/6/961/617928> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [11] *Household consumption of fresh products*. URL: <https://eumofa.eu/household-consumption-of-fresh-products> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [12] ICES. *Benchmark workshop on Northern Shelf cod stocks (WKBCOD)*. en. Rapp. tecn. ICES Scientific Reports, 2024, 47389766 Bytes. DOI: 10.17895/ICES.PUB.22591423. URL: https://ices-library.figshare.com/articles/report/Benchmark_workshop_on_Northern_Shelf_cod_stocks_WKBCOD_/22591423 (visitato il giorno 11/08/2025).
- [13] ICES. *Cod (Gadus morhua) in Subarea 4, Division 7.d, and Subdivision 20 (North Sea, eastern English Channel, Skagerrak)*. Rapp. tecn. ICES Advice: Recurrent Advice, 2024, 1003403 Bytes. DOI: 10.17895/ICES.ADVICE.21406881.V1. URL: https://ices-library.figshare.com/articles/report/Cod_Gadus_morhua_in_Subarea_4_Division_7_d_and_Subdivision_20_North_Sea_eastern_English_Channel_Skagerrak_/21406881/1 (visitato il giorno 11/08/2025).
- [14] ICES. *Cod (Gadus morhua) in Subarea 4, divisions 6.a and 7.d, and Subdivision 20 (North Sea, West of Scotland, eastern English Channel, and Skagerrak)*. en. report. ICES Advice: Recurrent

- Advice, set. 2023. DOI: 10.17895/ices.advice.21840765.v1. URL: https://ices-library.figshare.com/articles/report/Cod_i_Gadus_morhua_i_in_Subarea_4_divisions_6_a_and_7_d_and_Subdivision_20_North_Sea_West_of_Scotland_eastern_English_Channel_and_Skagerrak_/21840765/1 (visitato il giorno 11/08/2025).
- [15] ICES. «SISP 10 ? Manual for the North Sea International Bottom Trawl Surveys». In: (2020). DOI: 10.17895/ICES.PUB.7562. URL: https://ices-library.figshare.com/articles/_/19051361 (visitato il giorno 11/08/2025).
- [16] ICES. *Stock annex: Cod (Gadus morhua) in Subarea 4, divisions 6.a and 7.d, and Subdivision 20 (North Sea, West of Scotland, eastern English Channel and Skagerrak)*. Rapp. tecn. ICES Stock Annexes, 2025, 1592784 Bytes. DOI: 10.17895/ICES.PUB.29356151.V1. URL: https://ices-library.figshare.com/articles/report/Stock_annex_Cod_i_Gadus_morhua_i_in_Subarea_4_divisions_6_a_and_7_d_and_Subdivision_20_North_Sea_West_of_Scotland_eastern_English_Channel_and_Skagerrak_/29356151/1 (visitato il giorno 11/08/2025).
- [17] *Leading the responsible development of marine ingredients — IFFO - The Marine Ingredients Organisation*. URL: <https://www.iffco.com/about-us> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [18] George Lilly. «Decline and Recovery of Atlantic Cod (Gadus morhua) Stocks throughout the North Atlantic». In: *Resiliency of Gadid Stocks to Fishing and Climate Change*. Alaska Sea Grant College Program, 2008, pp. 39–66. ISBN: 9781566121262. DOI: 10.4027/rgsfcc.2008.03. URL: <http://seagrant.uaf.edu/bookstore/pubs/AK-SG-08-01.html> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [19] *Marine Regions*. URL: <https://www.marineregions.org/> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [20] James Moody. «Race, School Integration, and Friendship Segregation in America». en. In: *American Journal of Sociology* 107.3 (nov. 2001), pp. 679–716. ISSN: 0002-9602, 1537-5390. DOI: 10.1086/338954. URL: <http://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/338954> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [21] Tiago P Peixoto. «Bayesian stochastic blockmodeling». In: *Advances in network clustering and blockmodeling* (2019), pp. 289–332.
- [22] Guillaume Péron, Jean François Mittaine e Bertrand Le Gallic. «Where do fishmeal and fish oil products come from? An analysis of the conversion ratios in the global fishmeal industry». In: *Marine Policy*. Coping with global change in marine social-ecological systems 34.4 (lug. 2010), pp. 815–820. ISSN: 0308-597X. DOI: 10.1016/j.marpol.2010.01.027. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X1000028X> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [23] David Seekell et al. «Resilience in the global food system». In: *Environmental research letters* 12.2 (2017), p. 025010.
- [24] Margaret C. Siple, Timothy E. Essington e Éva E. Plagányi. «Forage fish fisheries management requires a tailored approach to balance trade-offs». en. In: *Fish and Fisheries* 20.1 (gen. 2019), pp. 110–124. ISSN: 1467-2960, 1467-2979. DOI: 10.1111/faf.12326. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/faf.12326> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [25] *Studies and reports*. URL: <https://eumofa.eu/market-analysis#yearly> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [26] Samir Suweis et al. «Resilience and reactivity of global food security». In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112.22 (2015), pp. 6902–6907.
- [27] Chengyi Tu, Samir Suweis e Paolo D’Odorico. «Impact of globalization on the resilience and sustainability of natural resources». en. In: *Nature Sustainability* 2.4 (apr. 2019), pp. 283–289. ISSN: 2398-9629. DOI: 10.1038/s41893-019-0260-z. URL: <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0260-z> (visitato il giorno 11/08/2025).
- [28] *UN Comtrade*. URL: <https://comtradeplus.un.org/> (visitato il giorno 11/08/2025).