



# SCIENZA E SOCIETÀ

## L'Ecologia è il ponte per il futuro

A cura del Consiglio Direttivo della Società Italiana di Ecologia



Questo libro è stato realizzato dal Consiglio Direttivo della Società Italiana di Ecologia in carica nel triennio 2019 – 2021: Elisa Anna Fano, Presidentessa; Antonio Pusceddu, Vicepresidente; Antonio Mazzola, Past President; Consiglieri: Edoardo Calizza, Gianluca Corno, Antonio Finizio, Luciana Migliore, Antonella Penna, Flora Angela Rutigliano, Salvatrice Vizzini.

ISBN: 9791221002539

Layout: Luciana Migliore

Immagine di copertina: Ruyi Bridge/ZZHK Architects, 30/7/18. ArchDaily. Accessed 19 Dec 2021.  
<<https://www.archdaily.com/898505/ruyi-bridge-zzhk-architects>> ISSN 0719-8884

È con grande piacere che vi presento il nostro Quaderno di Ecologia.

Abbiamo cercato di trattare temi di ampio respiro che rendano chiaro a tutti, soprattutto ai non addetti ai lavori, quanto il nostro mondo sia bello ma, soprattutto, quanto sia importante tutelarlo per tutto quello che ci dà gratuitamente, dall'aria che respiriamo, al cibo che mangiamo, all'acqua che beviamo.

Spero che le nuove generazioni siano più rispettose di questo mondo di quanto non lo siamo stati noi e che, leggendo queste pagine, capiscano ancora di più quanto sia bello vivere sulla Terra.

Ringrazio i colleghi che hanno fatto sì che il Quaderno fosse realizzato, in ordine alfabetico: Andrea Binelli, Edoardo Calizza, Gianluca Corno, Antonio Finizio, Marino Gatto, Antonio Mazzola, Luciana Migliore, Antonella Penna, Antonio Pusceddu, Flora Angela Rutigliano e Salvatrice Vizzini.

Un grazie speciale alla nostra Editor, Luciana Migliore.

Con l'augurio che il Quaderno possa esservi utile per il futuro

elisa anna fano

A handwritten signature in dark ink, reading "elisa anna fano". The signature is written in a cursive, lowercase style. The first name "elisa" is followed by "anna" and then "fano". There is a vertical line separating "fano" from the rest of the name.

## INDICE

|                                                                                                                   | Pag. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. L'INCREDIBILE VIAGGIO DELLE PLASTICHE NELL'AMBIENTE                                                            |      |
| di Andrea Binelli e Antonio Finizio _____                                                                         | 1    |
| 2. IL PIANETA BLU: UN TESORO DA PROTEGGERE                                                                        |      |
| di Edoardo Calizza e Antonio Pusceddu _____                                                                       | 12   |
| 3. DA ABUSO A RIUSO: LA GESTIONE DELLA RISORSA ACQUA NEL MONDO CHE CAMBIA                                         |      |
| di Gianluca Corno _____                                                                                           | 23   |
| 4. COME CONIUGARE LO SVILUPPO URBANO E LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE: SOLUZIONI SOSTENIBILI PER CITTÀ INSOSTENIBILI |      |
| di Elisa Anna Fano _____                                                                                          | 32   |
| 5. BIODIVERSITÀ, SERVIZI DEGLI ECOSISTEMI E CAMBIAMENTI GLOBALI                                                   |      |
| di Marino Gatto _____                                                                                             | 41   |
| 6. <i>ECOLOGY IS EVERYWHERE!</i> LE SUCCESSIONI ECOLOGICHE DEI BIODETERIOGENI DELLE PERGAMENE ANTICHE             |      |
| di Luciana Migliore _____                                                                                         | 50   |
| 7. IL PLANCTON MARINO. BIODIVERSITÀ E FUNZIONI IN UN OCEANO CHE STA CAMBIANDO                                     |      |
| di Antonella Penna _____                                                                                          | 63   |
| 8. IL SUOLO: UNA RISORSA PREZIOSA DA TUTELARE                                                                     |      |
| di Flora Angela Rutigliano _____                                                                                  | 75   |
| 9. TRA TERRA E MARE: LE ACQUE DI TRANSIZIONE                                                                      |      |
| di Salvatrice Vizzini e Antonio Mazzola _____                                                                     | 90   |





da: NOAA Photo Library <https://photolib.noaa.gov/Collections/Coral-Kingdom/Other/emodule/752/eitem/32592>

*In pescheria: "Buongiorno, mi dà anche un sacchetto di plastica?"  
"Guardi qui, dovrebbe essere nello stomaco di questo tonno"*

Fabrizio Caramagna

# 1. L'INCREDIBILE VIAGGIO DELLE PLASTICHE NELL'AMBIENTE

**Andrea Binelli<sup>1</sup> e Antonio Finizio<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Dipartimento di Bioscienze, Università degli Studi di Milano

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra, Università degli Studi di Milano Bicocca

## 1.1 Introduzione

Si avvicina lentamente, ma con decisione, convinta di assaporare una “squisitissima” medusa (Figura 1.1); purtroppo, resterà delusa perché è solo un comunissimo sacchetto di plastica!

Non è la prima volta che incontra della plastica girovagante nell'ambiente e, malauguratamente, è in buona compagnia: pensate, è stato stimato che almeno il 52% delle tartarughe marine ha accidentalmente e letteralmente mangiato rifiuti di plastica presenti negli oceani! Per non parlare delle numerosissime altre specie di animali (secondo alcune stime più di 700) che, come le tartarughe, ingeriscono plastica al posto del cibo o restano impigliate in vecchie reti da pesca.



*Figura 1.1. Colazione alla plastica (foto di Binelli e Finizio, 2021)*

Come è possibile che l'inquinamento dei mari e degli oceani sia diventata una delle emergenze ambientali più importanti del nostro tempo, al punto che le Nazioni Unite hanno inserito la conservazione dei mari nell'Agenda 2030 tra i cosiddetti “Obiettivi di sviluppo sostenibile”?

Come è possibile che i mari e gli oceani siano stati letteralmente invasi dalla plastica, tanto da far sì che si siano formate delle vere e proprie “isole di plastica galleggiante”? (per approfondire questo argomento consulta il BOX 1.I).

Ma il problema è rappresentato solo dalle macroplastiche (come i sacchetti della spesa o le reti da pesca abbandonate) o c'è altro di cui dovremmo preoccuparci?

In questo breve capitolo proveremo a rispondere a queste e a tante altre domande. Lo abbiamo organizzato proprio sotto forma di domande e risposte, in modo che possiate anche saltare una domanda e se vi va tornare indietro successivamente, senza perdere il filo del discorso ma, se avrete la pazienza di arrivare fino in fondo e leggerlo tutto, potrete sicuramente saperne di più su quello che abbiamo definito essere “l'incredibile viaggio della plastica nell'ambiente”.

### 1.2 Cosa significa la parola plastica?

Il termine deriva dal greco "πλαστικός" che significa malleabile. Infatti, si riferisce proprio alle caratteristiche di questo materiale ad essere facilmente lavorabile per dare la forma desiderata durante il processo di produzione (Liddell et al., 1940).

#### BOX 1.I – Le isole di plastica negli oceani

I cosiddetti vortici oceanici (in inglese *gyre*: dal greco "rotazione") sono formati da una rete di correnti marine che fanno circolare l'acqua in tutto il mondo. Esistono cinque *gyre* principali (vedi Figura) che sono essenzialmente causati dalla forza di Coriolis. Il movimento circolare dei *gyre* convoglia e fa accumulare i detriti presenti in mare, plastica compresa, verso un'area più calma e stabile collocata al centro del vortice. Una bottiglia di plastica "dimenticata" sulla spiaggia, e sospinta dal vento in mare, potrebbe viaggiare per migliaia di chilometri fino a raggiungere una di queste zone di accumulo. Perché, ricordatelo, la plastica viene degradata solo dopo decine o centinaia di anni, rimanendo a lungo nell'ambiente!



I cinque grandi vortici (*gyre*), formati dalle correnti marine, fanno circolare l'acqua degli oceani in tutto il pianeta. Tuttavia, convogliano detriti di ogni genere (soprattutto plastica) in specifici punti di accumulo.

Le zone di accumulo sono diventate così grandi da meritarsi l'appellativo di "isole di plastica". Non dovete pensare a dei luoghi dove (per quanto poco invitanti) si possa passeggiare, piuttosto dovete immaginare delle vere e proprie zuppe semi-gelatinose (la plastica sotto l'azione dell'acqua e del sole inizia a degradarsi) formate da rifiuti di grandezza variabile e soprattutto di miliardi di piccolissimi frammenti che si disperdono lungo tutta la colonna d'acqua, fino ai fondali. In realtà, queste "isole" non sono facilmente visibili, proprio perché sono costituite da particelle di plastica molto piccole e sospese appena al di sotto della superficie del mare; sono quasi invisibili ad occhio nudo ed è impossibile osservarle dall'aereo o dai satelliti.

A oggi, sono state identificate sei isole di plastica nei nostri oceani. La prima, e la più grande, è conosciuta come "The Great Pacific Garbage Patch" o "Pacific Trash Vortex" (in prossimità del *gyre* n. 1 nella figura) ed è stata descritta per la prima volta nel 1988 in un articolo pubblicato dalla *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Le sue reali dimensioni sono molto incerte. Alcune stime riportano una superficie di circa 700.000 km<sup>2</sup> (l'Italia è 300.000 km<sup>2</sup>), altre addirittura di 15.000.000 km<sup>2</sup>! Recentemente è stata scoperta un'ultima isola di plastica, più piccola rispetto alle altre. Si trova nel mare di Barents, in prossimità del circolo polare artico. Tutti i rifiuti plastici finiti in mare dalle coste europee e dalla costa orientale del Nord America sono andati accumulandosi lentamente proprio al nord della Norvegia.

E il nostro bellissimo Mar Mediterraneo? Sembrerebbe che nel "*Mare nostrum*" non esistano delle vere e proprie isole di plastica (anche se tra l'isola d'Elba e la Corsica c'è un fenomeno ciclico di accumulo). La situazione non è, però, per nulla rassicurante. Secondo alcuni studi, infatti, il Mediterraneo è tra le zone più inquinate da plastica al mondo (in particolare l'Adriatico) e poi riflettete: il Mediterraneo è un bacino quasi del tutto chiuso. Secondo voi le correnti dove portano i rifiuti di plastica? Per rispondere a questa domanda provate a fare una passeggiata lungo le nostre spiagge.....

### 1.3 Quando è iniziato questo "incredibile" viaggio nell'ambiente?

Tutto ebbe inizio dal gioco del biliardo ... da sempre, infatti, le palle da biliardo erano prodotte con l'avorio estratto dalle zanne di elefante! Verso la fine del 1800, però, il declino delle popolazioni di questi animali, causato dalla caccia indiscriminata, portò alla necessità di trovare delle alternative. Così nel 1863, John Wesley Hyatt brevettò la formula della **celluloide**, ottenuta a partire dalla cellulosa (il polisaccaride costituente principale della parete cellulare dei vegetali). Ben presto Hyatt si rese conto che il materiale non era del tutto adatto a sostituire le palle da biliardo, ma che poteva



essere utile per molti altri scopi, per esempio, sostituire materiali più costosi come il corallo, l'ambra, i gusci di tartaruga o la madreperla.

Ma a quel tempo l'era della plastica era solo agli albori. Nel 1907, Leo Baekeland brevettò la **bakelite** (la prima plastica completamente sintetica, ovvero non derivata da molecole già presenti in natura) che aveva il vantaggio di essere molto meno infiammabile rispetto alla cellulosa. Baekeland era alla ricerca di un sostituto sintetico della gommalacca, un isolante elettrico naturale, per soddisfare le esigenze di un paese, gli Stati Uniti, che andava incontro ad una rapida elettrificazione. La bakelite non era solo un buon isolante, era anche duraturo, resistente al calore ed estremamente modellabile (veniva commercializzato come "il materiale dai mille usi"), tanto che, in poco tempo, divenne la materia plastica più diffusa e utilizzata al mondo.

Nel 1912 e 1913 verranno inventati rispettivamente il **polivinilcloruro** (PVC) e il **cellophane** che però saranno sfruttati industrialmente solo molti anni dopo. Negli anni '20 -'40 del 1900 si assiste alla nascita di nuovi polimeri sintetici, come il **polistirene** (una plastica spugnosa usata come isolante), il **nylon** (inizialmente usato durante la seconda guerra per la produzione dei paracadute) e il **polietilene tereftalato** (il **PET**: usato per le bottiglie, le vecchie buste della spesa, e la produzione dei *pile* che ci tengono caldi in inverno). Gli anni '50 furono caratterizzati dall'introduzione sul mercato della **formica** (utilizzata sotto forma di laminati per l'arredamento), ma soprattutto del **polipropilene isotattico**, che valse all'italiano Giulio Natta l'attribuzione del premio Nobel nel 1963. Questo polimero sintetico fu commercializzato con il marchio **Moplen**, rivoluzionando lo stile di vita nelle case di tutto il mondo (se andate su *Youtube* e cercate Gino Bramieri & Moplen potrete vedere delle pubblicità degli anni '60 molto divertenti ... terminavano sempre con la frase: *è leggero e resistente perché è fatto di Moplen!*)

Prima di terminare la risposta alla domanda iniziale, vorremmo essere noi a farvi una domanda, in modo da riflettere su una questione importante: *Secondo voi, tutta la plastica come viene prodotta?* La risposta è semplice: il processo industriale di produzione delle plastiche nasce dal cosiddetto **cracking del petrolio**, utilizzato per rompere le lunghe catene degli idrocarburi che costituiscono il petrolio in modo da produrre i monomeri che verranno poi riaccorpati per produrre i polimeri sintetici che sono la base dei costituenti delle plastiche. Di fatto, quindi, tutto il settore della petrolchimica è strettamente integrato con l'industria petrolifera. Un'ulteriore evidente ragione per riflettere sul fatto che il nostro attuale modello di sviluppo è interamente basato sul petrolio.

#### *1.4 A cosa ci si riferisce quando si parla d'inquinamento da plastiche?*

L'immagine che viene subito in mente quando pensiamo all'inquinamento da plastiche nell'ambiente è quella del sacchetto trasportato dal vento, ma anche a bottiglie, bicchieri, piatti e posate monouso in bella mostra tra l'erba di un parco o di un bosco, oppure su una spiaggia. In realtà, questi rifiuti, chiamati **macroplastiche**, rappresentano solo la punta dell'iceberg di un problema molto più complesso. Infatti, l'aspetto che preoccupa in modo particolare la comunità scientifica è quello relativo alle plastiche di minori dimensioni che si generano dalla frammentazione e degradazione delle macroplastiche (inclusi gli indumenti sintetici che vengono lavati in lavatrice) a causa di numerosi processi fisici e chimici, quali abrasione meccanica, azione dei raggi solari (fotodegradazione), variazioni della salinità e della temperatura, biodegradazione e reazioni ossidative (Figura 1.2). L'insieme di questi meccanismi costituisce la cosiddetta origine secondaria delle **micro- e nano-plastiche**, di cui è stata recentemente suggerita una nuova e più semplice definizione dimensionale (Hartmann et al., 2019): le macroplastiche sono definite come particelle polimeriche sintetiche o semi-sintetiche con una dimensione >10 mm, con **mesoplastiche** si

considerano quelle comprese tra 1 e <10 mm, mentre le **microplastiche** hanno dimensioni nell'intervallo 1 µm e <1 mm. Infine, le **nanoplastiche** sono le più piccole particelle plastiche la cui dimensione maggiore è compresa tra 1 nm e <1 µm.

Oltre all'origine secondaria, che è comunque la fonte principale di microplastiche e nanoplastiche in ambiente, i detriti plastici possono anche essere rilasciati intenzionalmente (origine primaria) negli ecosistemi, soprattutto acquatici, in quanto presenti direttamente in numerosi prodotti di uso comune (es. *scrubs*, cosmetici, dentifrici). Fortunatamente, molti Paesi (Italia compresa) hanno recentemente bandito o limitato l'impiego di micro- e nano-plastiche nei prodotti cosmetici, contribuendo alla parziale risoluzione almeno del problema legato al rilascio in ambiente delle plastiche di origine primaria (Figura 1.2).

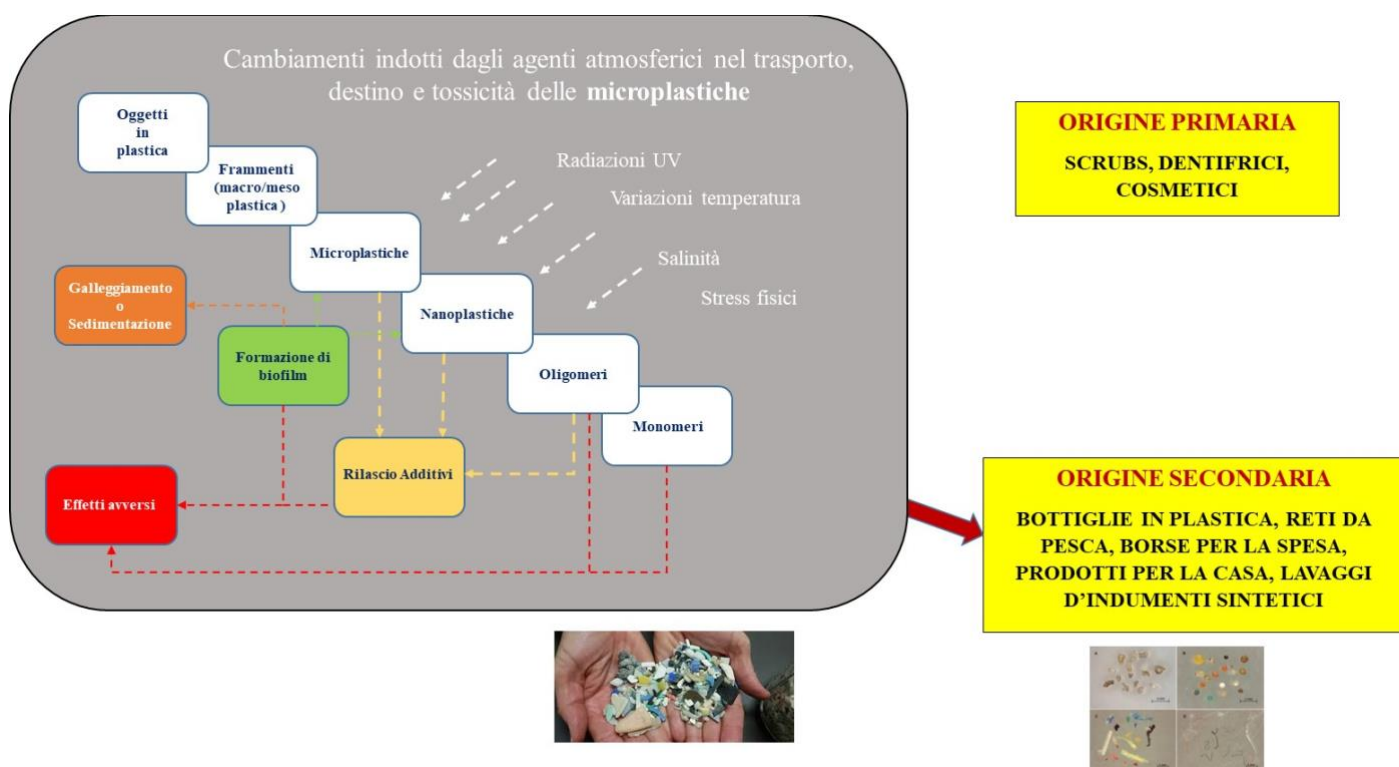


Figura 1.2. Meccanismi di frammentazione dei rifiuti plastici in micro- e nano-plastiche in ambiente e loro classificazione in base all'origine (primaria o secondaria)

Come descritto in precedenza (vedi paragrafo 1.3), il termine plastica è usato genericamente per riferirsi a materiali polimerici sintetici molto differenti. Pertanto, dalla loro frammentazione e degradazione nell'ambiente si originano migliaia di composti diversi.

### 1.5 Quante plastiche vengono prodotte e come possono raggiungere l'ambiente?

È indubbio come l'invenzione della plastica abbia rappresentato una delle più grandi innovazioni tecnologiche in grado di cambiare radicalmente e di migliorare il nostro stile di vita. Le loro caratteristiche uniche hanno reso questi materiali estremamente versatili nella loro applicazione e diffusione in numerosi settori, quali edilizia, trasporti e settore automobilistico, strumentazioni elettriche/elettronica, imballaggi, elettrodomestici, conservazione degli alimenti e cura personale, che rappresentano solo alcuni esempi applicativi dell'utilizzo dei numerosi polimeri plastici prodotti dall'uomo. In virtù dei vantaggi pratici ed economici, la produzione mondiale della plastica ha seguito un andamento crescente, raggiungendo quasi 370 milioni di tonnellate annue nel 2019

(PlasticsEurope, 2020), di cui circa 58 milioni prodotte in Europa. Nel dettaglio, il continente asiatico si pone in testa alla produzione di polimeri sintetici, con il 51% di tonnellate messe in commercio (solo la Cina ne detiene il 31%) nel 2019, seguito dai Paesi del NAFTA (*North American Free Trade Agreement*) e dall'Europa, da cui provengono il 19% e il 16%, rispettivamente, del materiale plastico prodotto nel 2019. In particolare, i due terzi della domanda nell'area europea provengono da soli cinque Paesi, ossia Germania (24,2%), Italia (13,8%), Francia (9,5%), Spagna (7,8%) e Regno Unito (7,1%).

Nonostante l'introduzione della plastica abbia rappresentato una svolta per la società moderna in termini di ricadute tecnologiche e per l'aumento del benessere, l'insieme degli aspetti positivi risulta essere ampiamente controbilanciato dal problema, sempre più esteso, legato alle ricadute ecologiche, come conseguenza dello scorretto smaltimento e del rilascio improprio di prodotti plastici in ambiente. Infatti, se non adeguatamente trattata, la plastica è in grado di rimanere inalterata in ambiente per decine o centinaia di anni, proprio in virtù delle proprietà di resistenza alla degradazione chimica e biologica che la rendono così versatile.

Tale consapevolezza ha spinto numerosi Paesi a intraprendere politiche e campagne di sensibilizzazione che in parte hanno contribuito a una prima limitazione del problema, non sufficiente tuttavia alla sua completa risoluzione. Nonostante, infatti, si sia osservato in Europa un lieve decremento nella produzione complessiva di plastica negli ultimi anni, i dati più recenti evidenziano come solo il 32% del quantitativo di plastica utilizzato sia stato indirizzato alla raccolta differenziata ed effettivamente riciclato (PlasticsEurope, 2019), mentre il 25% circa è stato posto in discarica. Per contro, poco più del restante 40% della plastica raccolta è andata incontro a termovalorizzazione. Inoltre, la problematica legata al corretto smaltimento dei rifiuti plastici è accentuata dalle realtà dei Paesi in via di sviluppo, i quali non dispongono di adeguati sistemi di raccolta e gestione dei rifiuti, così come di legislazioni ambientali solide.

I mari e gli oceani sembrano essere il principale punto di arrivo di questo "incredibile" viaggio delle plastiche nell'ambiente. Un viaggio che, bisogna ricordare, inizia con la produzione industriale, continua con l'utilizzo da parte dei consumatori e con il successivo smaltimento, che porta inevitabilmente alla produzione di rifiuti in plastica. Nel momento in cui la plastica diventa rifiuto (quindi non è riciclata o riutilizzata), se non adeguatamente smaltita, è libera di girovagare per l'ambiente fino a raggiungere il mare e gli oceani e diventare eventualmente il cibo "indigesto" della tartaruga che abbiamo visto nella Figura 1.1. Infatti, a prescindere da quale sia l'origine specifica delle particelle plastiche, esse possono essere trasportate per lunghe distanze dalle correnti marine e atmosferiche, aumentandone la distribuzione anche in aree lontane dal punto d'immissione in ambiente (Figura 1.3), tra cui le aree remote del pianeta (come i ghiacciai e i poli; Zhang et al., 2019).

Dicevamo che i mari e gli oceani rappresentano il principale luogo di accumulo dei materiali di scarto in plastica; proprio per questo, a oggi, la maggior parte degli studi si è concentrata su questi ambienti. Sebbene la maggior parte dei residui di plastica rinvenuti negli oceani provengono dall'industria della pesca (per es., reti da pesca abbandonate) e dalle attività nautiche, occorre ricordare che il viaggio della plastica nell'ambiente, in moltissimi casi, inizia dalla terraferma. Per esempio, le principali fonti di plastica nei mari sono rappresentate dai deflussi urbani (scarichi fognari), smaltimento e gestione inadeguati dei rifiuti, attività industriali, costruzioni e discariche abusive (Figura 1.3).



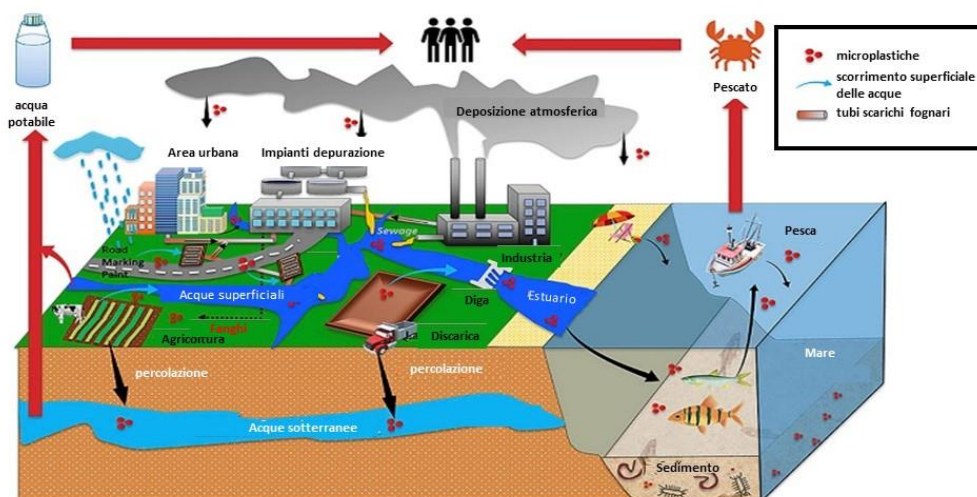


Figura 1.3. Fonti, trasporto e destino delle MP in ambiente (da: Wu et al., 2019, modificata)

È stato stimato che la terraferma e le acque superficiali (fiumi e laghi) contribuiscono per circa l'80% all'inquinamento plastico dei mari, aspetto che evidenzia come questi due comparti ambientali meritino un'altrettanta attenzione scientifica e mediatica. Infatti, nonostante le evidenze relative alle acque superficiali siano ancora limitate, esse suggeriscono un inquinamento preoccupante anche di questi ambienti in quanto, per esempio, recenti studi hanno stimato che lo stato di contaminazione degli ecosistemi terrestri potrebbe essere fino a 20 volte maggiore di quello marino (Horton et al., 2017). In particolare, le acque superficiali, quali laghi e fiumi, fungono da collettori di materiali plastici provenienti dalle attività antropiche localizzate nelle aree urbane e industriali, i cui impianti di depurazione delle acque reflue, per esempio, rivestono un ruolo particolarmente rilevante nel raccogliere i rifiuti di natura plastica e nell'agire involontariamente da sorgenti di inquinamento nei confronti degli stessi corsi d'acqua, non essendo essi progettati per lo smaltimento di contaminanti di questo tipo.

Di fatto, nonostante l'efficienza di rimozione dei materiali plastici da parte dei depuratori possa essere elevata (anche >80-90%), gli enormi volumi di acqua trattata fanno sì che la loro re-immissione in ambiente sia comunque critica. Anche il comparto terrestre risulta essere impattato dall'accumulo di plastica da parte degli impianti di depurazione civili, in quanto in molti Paesi è ancora consentito l'impiego, come ammendanti in agricoltura, dei fanghi di depurazione, che contengono ingenti quantità di particelle plastiche. Recentemente, uno studio pubblicato dall'Università di Milano (Magni et al., 2019) ha indagato tutti questi aspetti in relazione al Depuratore di Milano-Nosedo, il primo e più grande impianto di trattamento delle acque reflue della città di Milano. Sulla base delle particelle che sono state ritrovate e del dato giornaliero di acque reflue trattate dall'impianto (400.000.000 L/giorno) i ricercatori sono riusciti a stimare un numero di particelle plastiche che entra quotidianamente nel depuratore pari a circa 1.000.000.000 e a calcolare che circa 160.000.000 di microplastiche vengono rilasciate ogni giorno dallo scarico del depuratore nel corpo idrico recettore. Un secondo studio legato alla contaminazione da plastiche in ecosistemi acquatici italiani ha riguardato il monitoraggio di quattro laghi subalpini (Binelli et al., 2020). Poiché rappresentano la più estesa risorsa d'acqua dolce italiana, essi possono avere un significativo impatto negativo nella contaminazione ambientale da detriti di natura plastica. Nello specifico, sono stati campionati i laghi Maggiore, Como, Iseo e Garda e il monitoraggio è stato

condotto in collaborazione con Legambiente. Le quantità di microplastiche ritrovate sono risultate ampiamente variabili tra i quattro laghi, così come all'interno degli stessi e ciò può essere legato a diversi parametri, quali la dimensione del corpo idrico, la presenza di impianti di depurazione, la prossimità a centri abitati e ad attività industriali. L'abbondanza media più alta di microplastiche è stata trovata nel L. Maggiore (circa 100.000 microplastiche/km<sup>2</sup>). Dal punto di vista qualitativo la maggior parte dei polimeri trovati sono polietilene e polipropilene (73-100%); in particolare, il primo sembra provenire dalla degradazione di pellicole/lamine riconducibili a vecchie borse della spesa (*shopper*). Infine, è interessante sottolineare come nei campioni prelevati siano stati trovati frammenti esclusivamente di origine secondaria e ciò evidenzia l'impatto del rilascio improprio di materiali plastici in ambiente.

### *1.5 Le plastiche sono pericolose per la salute umana? (o i costi nascosti nel vivere in un "pianeta di plastica")*

A partire dagli anni '70 del secolo scorso, l'aumento della produzione, dell'uso e del consumo di plastica ha sollevato molti dubbi e preoccupazioni di medici e ricercatori in relazione ai potenziali effetti negativi sulla salute umana. L'attenzione era focalizzata in modo particolare su specifiche fasi del ciclo di vita delle materie plastiche, per esempio il rischio dei lavoratori esposti a sostanze potenzialmente cancerogene (es. benzene). Inoltre, destava molta preoccupazione l'esposizione dei bambini agli ftalati (utilizzati per rendere la plastica più morbida) o dei consumatori esposti al bisfenolo A, utilizzato negli imballaggi alimentari.

In realtà, oggi, comprendere l'impatto dell'uso della plastica sulla salute umana richiede una visione più ampia basata sulla valutazione accurata dell'intero ciclo di vita di questi materiali a partire dalla fase di estrazione (ricordate che quasi tutta la plastica è prodotta dai combustibili fossili) fino al momento in cui la plastica raggiunge l'ambiente e si degrada in micro- e nano-plastiche.

Di fatto, l'incredibile" viaggio della plastica inizia nelle piattaforme di trivellazione con l'estrazione del petrolio e si conclude con il girovagare nell'ambiente delle particelle di plastica di varie dimensioni. In ogni fase del ciclo di vita si possono creare delle condizioni di rischio per la salute umana e ciascuno di noi può essere esposto a più fasi di questo ciclo di vita in maniera diretta o indiretta (Figura 1.4):

- **Estrazione e trasporto:** il 99% della plastica è prodotta a partire dai combustibili fossili. Questa fase comporta l'emissione di numerose sostanze chimiche nell'aria, causandone l'inquinamento. Pensate, è stato stimato che nei soli Stati Uniti d'America circa 15,6 milioni di abitanti vivano in prossimità di impianti di estrazione petrolifera (CIEL, 2019);
- **Raffinazione e Manifattura:** analogo discorso può essere effettuato per i processi di raffinazione e manifattura del materiale petrolifero. Secondo l'Agenzia di Protezione per l'Ambiente degli Stati Uniti, le sostanze emesse in atmosfera si classificano come inquinanti quando si conosce o si sospetta che possano causare cancro, interferire sulla riproduzione e causare difetti congeniti (CIEL, 2019). In questa fase del ciclo produttivo della plastica possono essere emessi inquinanti come benzene, stirene, toluene, idrocarburi policiclici aromatici e molte altre sostanze di cui sia ha certezza o il forte sospetto di essere cancerogene o di essere interferenti endocrini.
- **Uso:** Quando si considerano gli impatti della plastica sulla salute umana, è necessario distinguere tra gli impatti di micro- e nano-plastiche e quelli degli additivi chimici o dei plastificanti associati alle particelle di plastica. In passato, la ricerca è stata concentrata soprattutto sul rilascio di additivi e plasticizzanti. Famoso è il caso degli ftalati utilizzati, per esempio, nei biberon, succhiotti, e nei giocattoli per rendere flessibili e morbide le plastiche. Queste sostanze tendono a migrare dalla plastica all'organismo dove si comportano da 'interferenti endocrini'

(interferiscono con gli ormoni, in particolare con gli ormoni sessuali). Pensate ai potenziali effetti negativi di queste sostanze assunte attraverso la suzione (biberon e succhiotti a parte, una delle prime forme di conoscenza per un bambino è portare alla bocca gli oggetti tra cui i giocattoli) da organismi in piena fase di sviluppo ed in cui la corretta funzionalità del sistema endocrino è fondamentale. Oggi, nella UE, queste sostanze sono state bandite o soggette a restrizione nella produzione di giocattoli o negli articoli destinati all'infanzia.

Più recentemente l'attenzione degli studiosi si è appuntata sulla presenza di micro- e nano-particelle di plastica nel cibo che mangiamo o nell'acqua che beviamo, sollevando preoccupazioni circa il loro potenziale impatto sulla salute umana.

- **Alimentazione:** Le plastiche sono resistenti alla degradazione. Alcuni studi di laboratorio hanno dimostrato che le micro- e le nano-plastiche possono essere trasferite lungo le reti alimentari (Farrel e Nelson, 2013; Chae et al., 2018) fino all'uomo con potenziali problemi sulla salute a causa della traslocazione di particelle dal tratto digestivo ad altri tessuti o come conseguenza dell'ingestione di sostanze chimiche come ftalati, bisfenolo A, sostanze polibromurate, agenti antimicrobici e ritardanti di fiamma polibromurati (Thompson et al, 2009; Deng et al, 2017).
- **Gestione rifiuti (inceneritori):** Contrariamente a quanto si possa pensare, solo una piccola frazione dei rifiuti in plastica è riciclata o riciclabile (circa il 9%). È stato stimato che, tra il 1950 e il 2015, circa il 60% di tutta la plastica prodotta si è accumulata in discariche o dispersa nell'ambiente (Geyer et al., 2017; CIEL, 2019). Infine, una quota è stata destinata agli inceneritori. Le emissioni dall'incenerimento dei rifiuti includono metalli pesanti neurotossici (es. mercurio, piombo e cadmio), composti organici potenzialmente cancerogeni (es. diossine, furani, idrocarburi policiclici aromatici, dibenzofurani, policlorobifenili), gas acidi (es. anidride solforosa e acido cloridrico), particolato, ossidi di azoto, monossido di carbonio e anidride carbonica (UNEP, 2007; Heidari et al., 2019).

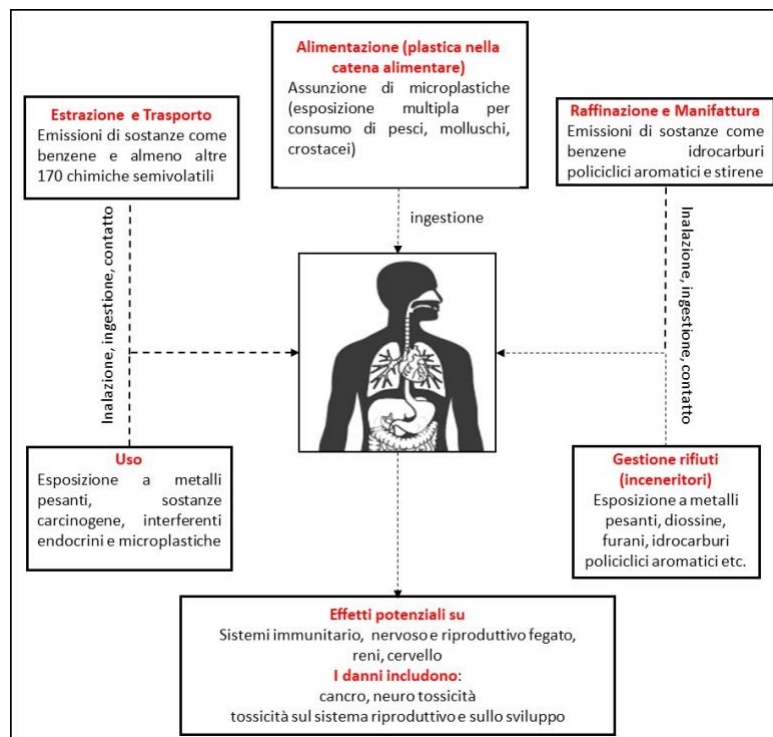


Figura 1.4. Esposizione dell'uomo al ciclo di vita delle materie plastiche

### 1.6 E per la biodiversità?

Tra gli effetti che i detriti polimerici sintetici di maggiori dimensioni (macroplastiche) possono avere soprattutto sugli organismi acquatici sono stati identificati l'intrappolamento, lo strangolamento, il soffocamento, l'annegamento e anche un particolare effetto legato a un falso senso di sazietà, dovuto alla presenza di materiale plastico nel tubo digerente, che spingerebbe gli organismi a non cercare cibo, deperendo inevitabilmente. Altre conseguenze negative delle ridotte dimensioni delle particelle plastiche rilasciate o prodotte in ambiente sono dovute all'ingestione e accumulo nelle cellule e nei tessuti degli organismi, oltre che il passaggio lungo le reti alimentari, fino all'Uomo. Infatti, così come descritto per le macroplastiche, anche le micro- e nano-plastiche possono arrecare danni di natura fisica derivanti dal loro passaggio nel tratto gastro-intestinale piuttosto che da fenomeni di aggregazione in grado di ostacolare i processi digestivi e di eliminazione da parte di tutti gli organismi.

Un aspetto di particolare interesse per la ricerca scientifica è l'elevata capacità delle particelle plastiche di adsorbire sulla propria superficie numerosi contaminanti chimici presenti in ambiente (es. metalli pesanti, pesticidi, idrocarburi, ritardanti di fiamma, diossine, ecc.), così come il fatto di venire colonizzate da numerosi microrganismi, eventualmente anche patogeni per l'uomo (Figura 1.5). Quindi, soprattutto le microplastiche e nanoplastiche possono agire da veicolo di sostanze nocive, agevolandone il trasporto e l'infiltrazione sia a livello ambientale che biologico (effetto "cavallo di Troia"). La conseguenza di ciò è la possibilità che alla tossicità fisica di base di queste sostanze si sommino gli effetti avversi propri delle differenti classi di inquinanti chimici trasportati. È inoltre opportuno sottolineare che nella stessa composizione chimica dei materiali plastici esistono altre sostanze, quali diversi plasticizzanti (es., ftalati e bisfenolo A), che possono incrementare ulteriormente la loro tossicità intrinseca.

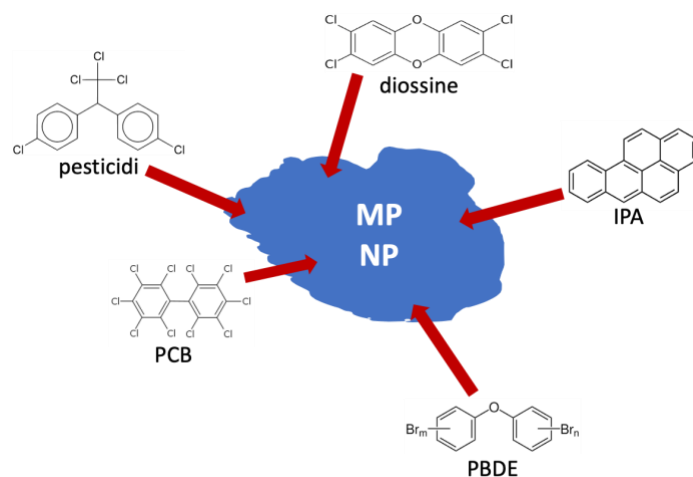


Figura 1.5. Esempi di composti chimici presenti nell'ambiente e in grado di adsorbirsi sulla superficie di microplastiche (MP) e nanoplastiche (NP); IPA = Idrocarburi Policiclici Aromatici, PCB = Policlorobifenili, PBDE = Polibromodifenileteri

### 1.7 Cosa possiamo fare?

Il problema delle plastiche nell'ambiente è il classico esempio per cui ciascuno (**ricercatori, gestori politici e cittadini**) deve essere impegnato a trovare e applicare delle soluzioni. Nonostante la varietà di potenziali effetti avversi, la carenza di informazioni certe circa la reale tossicità delle micro- e nano-plastiche non consente ancora di annoverarli tra i cosiddetti contaminanti prioritari (per i quali è previsto un monitoraggio ambientale obbligatorio). A oggi infatti queste sostanze sono definite "inquinanti emergenti" e sono dunque incluse tra quei contaminanti di cui si conosce ancora poco della loro pericolosità ambientale e tossicità per gli organismi e, pertanto, non ancora inseriti



nelle liste degli inquinanti da ricercare obbligatoriamente durante i monitoraggi ambientali. Inoltre, l'incompleta comprensione del loro destino ambientale e delle interazioni biologiche comporta conseguenze pratiche, quali la difficoltà di sviluppare metodologie ufficiali per il loro monitoraggio. Si tratta di limitazioni che, a loro volta, non facilitano la descrizione e la risoluzione del problema, ma che, anzi, testimoniano l'urgenza di delineare delle procedure standardizzate a livello internazionale, quantomeno al fine di rendere comparabili i dati raccolti dai sempre più numerosi studi pubblicati sull'argomento. **La ricerca**, quindi, dovrà nel prossimo futuro fare uno sforzo ulteriore per comprendere la reale dimensione ecologica del problema della presenza di plastiche nell'ambiente. **La gestione politica** del problema sarà sempre di più importante negli anni a venire. Per esempio, dovremo abituarci a non utilizzare più alcuni oggetti in plastica di uso quotidiano, quali i bastoncini per la pulizia delle orecchie, le cannucce, le aste dei palloncini, le posate e i piatti, i contenitori per *fast-food* e *take-away*, oltre che i contenitori per bevande e le tazze, poiché la recente Direttiva UE 2019/904, più nota come Direttiva SUP (*Single Use Plastic*), presuppone il divieto di utilizzo di specifici prodotti in plastica monouso per i quali esistano valide alternative in commercio a partire dal 3 luglio 2021. Inoltre, la recente Direttiva UE 2020/2184, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano, definisce la necessità di misurare in tale matrice nuovi parametri, tra cui le microplastiche, incentivando la ricerca di un metodo di analisi e identificazione univoco. Inoltre, è in discussione, sempre a livello europeo, la necessità di rivedere i parametri legati alle acque utilizzate ad uso irriguo in campo agricolo, che dovrebbero essere controllate anche per la presenza di microplastiche. Tutte queste nuove normative dimostrano che la Politica sta recependo, anche molto rapidamente, le preoccupazioni espresse dai cittadini di molti Paesi nei confronti di questa emergente problematica ambientale, che potrebbe avere anche ripercussioni nei confronti della salute umana.

Infine, noi tutti, come **cittadini**, dovremmo essere maggiormente coinvolti, tenendo in considerazione il fatto che non è la plastica in sé che è pericolosa, ma il suo scorretto smaltimento o addirittura l'abbandono consapevole dei rifiuti plastici negli ambienti naturali. Un vecchio aforisma recita: *“Se non sei parte della soluzione, allora sei parte del problema”*. Bisognerà che ciascuno di noi partecipi attivamente, magari semplicemente modificando il proprio comportamento, indirizzandosi verso stili di vita più rispettosi del pianeta dove viviamo (questo non vale solo per la plastica!). Ricordate il paradigma del boomerang: tutto ciò che viene gettato come rifiuto nell'ambiente può “ritornare” indietro e danneggiare noi, ma soprattutto la vita su questo pianeta.

### 1.8 Bibliografia

Binelli A, Pietrelli L, Di Vito S et al, 2020. Hazard evaluation of plastic mixtures from four Italian subalpine great lakes on the basis of laboratory exposures of zebra mussels. *Sci Total Envir* 699:134366. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134366>

Chae Y, Kim D, Kim SW, An Y-J, 2018. Trophic transfer and individual impact of nano-sized polystyrene in a four-species freshwater food chain. *Sci Rep* 8:284. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18849-y>

CIEL (*Center for International Environmental Law*), 2019. Plastic & health, the hidden costs of a plastic planet (scaricabile dal sito: [www.ciel.org/plasticandhealth](http://www.ciel.org/plasticandhealth)).

Crawford CB, Quinn B, 2017. Microplastic Pollutants. Elsevier Limited Science, 1<sup>st</sup> Edition, 336 pp. ISBN: 9780128094068

- Deng Y, Zang Y, Lemos B, Ren H, 2017. Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Sci Rep* 7:46687 <https://www.nature.com/articles/srep46687>.
- Geyer R, Jambeck JR, Lavender K, 2017. Law, production, use and fate of all plastics ever made. *Sci Advanc* 3(7):e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
- Hartmann NB, Thorsten H, Thompson RC, et al, 2019. Are we speaking the same language? recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Envir Sci Technol* 53(3):1039-1047
- Heidari M, Garnaik PP, Dutta A, 2019. Plastics to Energy: Fuel, Chemicals, and Sustainability Implications, Elsevier Inc., pp. 295-312. DOI: 10.1016/B978-0-12-813140-4.00011-X
- Horton AA, Alexander W, Spurgeon DJ. et al, 2017. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Sci Total Envir* 586:127-141. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.190
- Liddell, HG, Scott, R, Jones, HS, et al, 1940. A greek-english lexicon/compiled by Henry George Liddell and Robert Scott.
- Magni S, Binelli A, Pittura L, et al, 2019. The fate of microplastics in an italian wastewater treatment plant. *Sci Total Envir* 652:602-610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.269>
- Farrell P, Nelson K, 2013. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Env Pollut* 1:1-3. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.046>
- PlasticsEurope. 2020. Plastics - the Facts 2020. (scaricabile da <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>)
- Rapporto del Gruppo di Lavoro-MIE. Inquinanti emergenti. Quadro delle conoscenze sulla presenza, le tecnologie di contenimento e lo stato della ricerca su microinquinanti e microplastiche nei comparti acquatici lombardi. Settembre 2020. Per scaricarlo registrarsi a: <https://www.eventbrite.it/e/registrazione-registrati-per-scaricare-il-report-inquinanti-emergenti-124567369355>
- Thompson, RC, Moore CJ, vom Saal FS, et al., 2009. Plastics, the Environment and Human Health: Current consensus and future trends. *Phil Trans Royal Soc London, Ser B, Biol Sci* 364(1526):2153-2166. <https://dx.doi.org/10.1098%2Frstb.2009.0053>
- UNEP (*United Nation Environment Program*), 2007. Guidelines on best available techniques and provisional guidance on best environmental practices relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-BATBEP-GUID-GUIDELINES-All.En.pdf> [hereinafter UNEP Guidelines on Art. 5 & Annex C of POPS Convention].
- Wu P, Huang J, Zheng Y, et al, 2019. Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. *Ecotox Environ Saf* 184:109612. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.109612
- Zhang Y, Gao T, Kang S, et al, 2019. Importance of atmospheric transport for microplastics deposited in remote areas. *Environ Pollut* 254:112953. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.121>, 113953.



Foto di Arianna Pansini

*"Frattanto i pesci, dai quali discendiamo tutti,  
assistettero curiosi al dramma collettivo di questo mondo,  
che a loro indubbiamente doveva sembrar cattivo.  
E cominciarono a pensare nel loro grande mare: com'è profondo il mare...."*

Lucio Dalla, Com'è profondo il mare, 1992

## 2. IL PIANETA BLU: UN TESORO DA PROTEGGERE

Edoardo Calizza<sup>1</sup> e Antonio Pusceddu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Biologia Ambientale, Università degli Studi di Roma La Sapienza

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente, Università degli Studi di Cagliari

### 2.1 Gli oceani: l'ecosistema più grande della Terra rischia il collasso

Immaginiamo, per un attimo, che degli alieni arrivassero con la loro astronave nel sistema solare dallo spazio profondo e vedessero il Pianeta Terra per la prima volta. Ammesso che potessero



*Figura 2.1 Un'immagine della Terra da satellite che evidenzia la vastità della superficie oceanica (Credit: NOAA/NASA GOES Project, Wikipedia)*

vedere i colori come li vediamo noi, non potranno non esser attratti dal blu della superficie del terzo pianeta del sistema solare (Figura 2.1). L'enorme superficie blu (360.700.000 km<sup>2</sup>) è costituita dagli oceani, che ricoprono oltre il 71% della superficie del pianeta. Gli oceani non sono una 'semplice' superficie, perché occupano un enorme volume, pari a 1,38 miliardi di km<sup>3</sup>, con una profondità media di circa 3800 m. Per dare un'idea del volume degli oceani consideriamo che per contenere tutta l'acqua degli oceani servirebbero oltre 1 milione di freezer tra i più voluminosi in commercio. Ebbene, questo enorme volume di acqua salata (in media circa 35 g di sale per litro d'acqua), che occupa ben oltre il 90% della biosfera, è per circa la metà confinato oltre i 4000 metri di profondità, negli abissi, l'ecosistema meno conosciuto dall'uomo. Oltre il 90% dello spazio disponibile per la vita sul nostro pianeta, dunque, si trova sott'acqua. Questa enormità di spazio

include un'enormità di organismi differenti. Si stima che gli oceani contengano oltre 1,2 milioni di specie differenti, delle quali, tuttavia, appena 280 mila sono note. Purtroppo, probabilmente molte di queste non saranno mai identificate per via della velocità a cui si sta verificando la perdita di biodiversità (Rockstrom et al., 2009). Anche se attualmente il numero di specie estinte su scala globale negli oceani è relativamente trascurabile (Dulvy et al., 2003), habitat fondamentali per la vita negli oceani, quali le praterie di piante marine (e.g. *Posidonia oceanica*), le barriere coralline, il coralligeno e le popolazioni associate si stanno rapidamente degradando (Worm et al., 2006). **Perché dovremmo preoccuparci della perdita di biodiversità negli oceani?** La biodiversità (cioè l'insieme di tutte le specie animali, vegetali, microbiche che vivono in un sito) è un attributo fondamentale di qualsiasi ecosistema, controlla positivamente il funzionamento ecosistemico, ovvero l'insieme delle funzioni fondamentali per la vita quali: la capacità di produrre sostanza organica e ossigeno tramite la fotosintesi, la capacità di creare biomassa e riciclare materia, energia e nutrienti, nonché la stabilità a fronte di eventi di alterazione naturali o causati dall'uomo. Tipicamente (**Box 2.1**), al crescere della biodiversità cresce anche il funzionamento di un ecosistema, ovvero cresce la capacità dell'ecosistema di fornire beni e servizi per il sostentamento dell'uomo.



### Box 2.1. La relazione tra biodiversità e funzionamento degli ecosistemi.

Nella stragrande maggioranza delle evidenze sperimentali la biodiversità ha un effetto positivo sul funzionamento degli ecosistemi (Loreau et al., 2001). Tuttavia, a causa dei differenti ruoli delle specie, la relazione può essere: **lineare** (Figura 2.2a) quando tutte le specie sono tutte importanti in modo simile, **saturante** (Figura 2.2b) quando all'aumentare delle specie le nuove specie tendono ad avere ruoli ridondanti, **esponenziale** (Figura 2.2c) quando al crescere della biodiversità ogni specie nuova ha un ruolo ancora più importante nel funzionamento dell'ecosistema perché facilita le interazioni e l'attività delle specie già presenti. Un'altra possibilità è che un ecosistema funzioni solo grazie a poche specie (*driver*), mentre tutte le altre sono accessorie (*passenger*). A prescindere dalla forma della relazione è semplice intuire che se si perdono specie, il funzionamento degli ecosistemi viene compromesso. Nel modello lineare, qualsiasi specie scompaia, la perdita in funzionamento sarà simile; nel modello saturante la perdita di una specie è tanto più grave quanto più la biodiversità diminuisce; nel modello esponenziale la perdita di una specie è tanto più grave quando questa si verifica ad elevati livelli di biodiversità. In ogni caso, possiamo affermare che perdendo specie il funzionamento degli ecosistemi si ridurrà, anche se l'entità di tale riduzione dipenderà dal modello considerato.

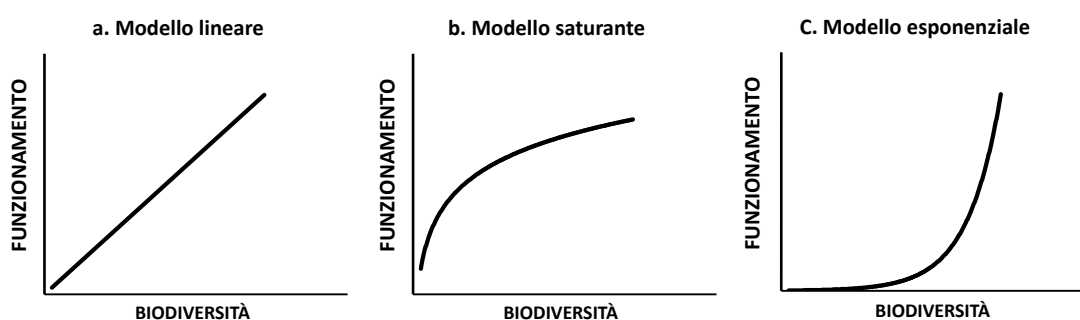


Figura 2.2 Le differenti forme della relazione tra biodiversità e funzionamento di un ecosistema

Sulla base della relazione positiva tra biodiversità e funzionamento ecosistemico possiamo comprendere che se in un determinato ecosistema la biodiversità diminuisce, l'ecosistema perderà funzioni e, a cascata, perderà la sua capacità di produrre beni e servizi. Se, come detto, anche gli oceani subiscono perdita di biodiversità, non possiamo che aspettarci una perdita di beni e servizi.

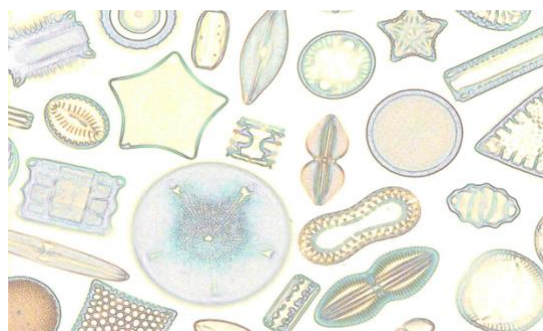
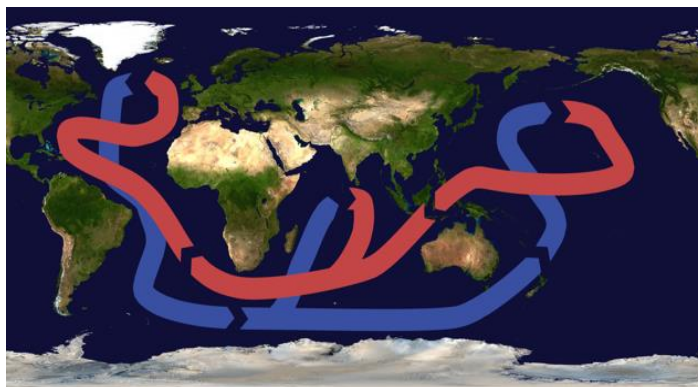


Figura 2.3 Immagine al microscopio di diatomee, microalghe unicellulari, dotate di un guscio (frustulo) siliceo, tra le principali componenti del fitoplancton (da: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diatoms.jpg> oceanico

Gli oceani, l'ecosistema più vasto e "voluminoso" del pianeta, sono i più grandi prestatori di beni e servizi per l'uomo: Il **50% dell'ossigeno** che respiriamo è prodotto da minuscoli organismi unicellulari capaci di fotosintesi (il fitoplancton), come a dire che ogni due respiri che facciamo dobbiamo ringraziare una microalga (Figura 2.3); le correnti oceaniche e la capacità termica degli oceani sono i **principali motori del clima** del nostro pianeta, regolandolo grazie al trasporto di calore (Figura 2.4); gli oceani, chimicamente per dissoluzione e biologicamente grazie alla fotosintesi, sono il principale sistema di **assorbimento di CO<sub>2</sub>**, grazie al quale gli oceani mitigano il riscaldamento globale causato dall'uomo; gli oceani sono i principali fornitori di proteine per il sostentamento della popolazione mondiale, oltre un terzo della quale fa affidamento sulla pesca per il proprio sostentamento; gli oceani rappresentano la principale via di trasferimento di merci del pianeta. L'ammontare economico di tali "forniture" è pressoché inestimabile (**Box 2.II**).



*Figura 2.4 La cosiddetta cintura di convezione oceanica che assicura il trasferimento di masse d'acqua da zone calde a quelle fredde, garantendo lo scambio di calore che fa funzionare il clima sul nostro pianeta (da: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermohaline\\_circulation.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermohaline_circulation.png))*

#### **Box 2.II Quanto valgono gli oceani?**

Il primo tentativo di dare un valore economico agli ecosistemi risale al lavoro pionieristico e seminale di Robert Costanza che, in un articolo su *Nature* del 1997 (Costanza et al., 1997), a fronte di un valore puntuale stimato in circa 100 \$ per ettaro di oceano per anno, aveva stimato un valore complessivo degli oceani pari a circa 21 trilioni<sup>1</sup> di \$ per anno. Nel 1997 lo studio degli ambienti marini profondi (>200 m di profondità) era ancora a livello quasi pionieristico e il reale valore degli oceani profondi era praticamente ignoto. Oggi sappiamo che, considerando beni e servizi degli ecosistemi marini profondi, il capitale naturale globale fornito dagli oceani è assai più elevato. Diventa quindi sempre più pressante l'esigenza, anche alla luce dei numerosi rischi di alterazione che corrono questi ambienti relativamente remoti a causa dell'uomo, di intervenire per salvarli (Barbier et al., 2014).

### *2.2 Il disturbo naturale e antropogenico negli oceani*

Nonostante gli enormi sforzi di conservazione e la continua attuazione di misure di gestione ambientale, volti a preservare la capacità degli ecosistemi marini di produrre i beni e i servizi necessari per il benessere umano, globalmente gli oceani stanno sperimentando tassi di cambiamento senza precedenti, a tutti i livelli gerarchici dell'organizzazione ecologica, dagli individui alle popolazioni, dalle comunità agli ecosistemi (Butchart et al., 2010). Particolare preoccupazione è associata ai tassi di riduzione della biodiversità e perdita di habitat, che stanno progressivamente compromettendo gli ecosistemi marini (Worm et al., 2006; Gibson et al., 2007). Una parte considerevole dell'insieme degli oceani (> 40%) è esposta a molteplici fattori di stress (Halpern et al., 2008); nel solo Mar Mediterraneo, per esempio, inquinamento, pratiche di pesca distruttive (es. pesca a strascico), pesca eccessiva, acquacoltura, diffusione di specie invasive, eutrofizzazione, operazioni petrolifere e di estrazione del gas, ricerca e sviluppo di energie rinnovabili *offshore*, ingegneria e sviluppo costiero oltre, ovviamente, al cambio climatico sono tra i

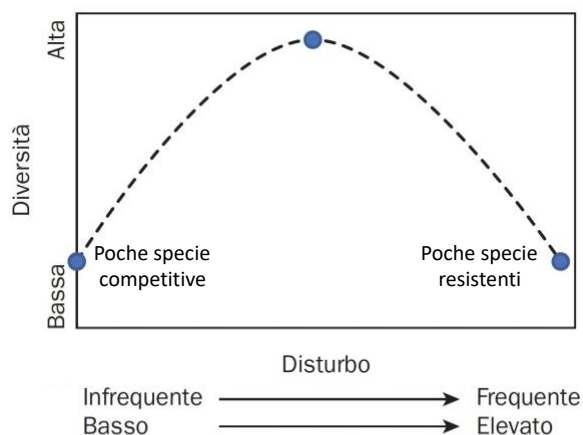
<sup>1</sup> 1 trilione equivale a 1 miliardo di miliardi.

principali impatti responsabili del cambiamento degli habitat marini (Micheli et al., 2013). Questi fattori, descritti in dettaglio più avanti (sezione 2.3), possono agire sinergicamente in modi complessi e variabili, non ancora completamente compresi. Per comprendere le ripercussioni di tali conseguenze su stabilità, resilienza e produttività degli ecosistemi marini e, quindi, sulla loro capacità di fornire beni e servizi di primaria importanza per l'uomo, abbiamo la necessità di comprendere le modalità con cui un ecosistema marino risponde al disturbo.

In ecologia si definisce “**disturbo**” un evento naturale o antropogenico che determina l'alterazione di un processo ecologico (Pusceddu et al., 2020). Comprendere le conseguenze di un disturbo, sia esso naturale sia antropogenico, è assai complesso perché ogni disturbo è caratterizzato da: a) una causa (es. lo sversamento accidentale di petrolio o un'ondata di calore); b) un effetto (es. il soffocamento degli organismi o l'incremento della temperatura corporea degli organismi); c) la risposta degli individui (es. dislocamento dell'areale di dispersione o spostamento della macchina metabolica verso soglie sub-letali); d) la severità dei danni, che dipende da frequenza temporale, intensità, ampiezza e entità del disturbo stesso. Qualsiasi disturbo è in grado di alterare l'ecosistema che lo subisce: tuttavia, una differente frequenza e/o intensità del disturbo può generare risposte differenti da parte dell'ecosistema. Gli ecosistemi sono “abituati” al disturbo, componente essenziale della variabilità dell'ambiente naturale: tutti gli ecosistemi, infatti, posseggono una certa capacità di resistere al disturbo (**resistenza**) e una certa capacità di recuperare uno stato di equilibrio dinamico al cessare del disturbo stesso (**resilienza**). Resistenza e resilienza, tuttavia, non sono ‘infinite’ e il superamento delle loro soglie determina un'alterazione spesso irreversibile e, soprattutto, una perdita netta di capacità di produrre beni e servizi.

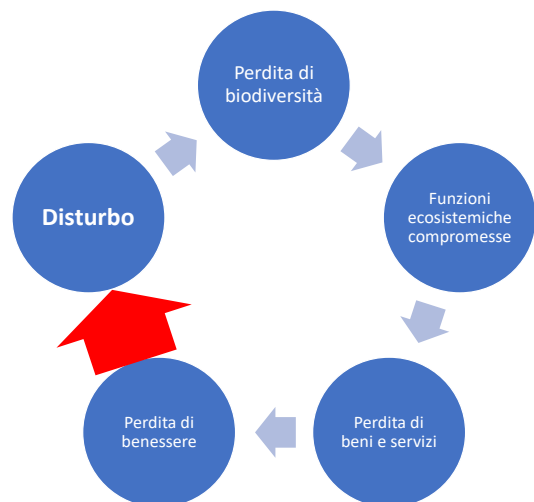
Fintanto che il disturbo non eccede la soglia di resistenza possiamo addirittura prevedere che esso possa avere effetti positivi sugli ecosistemi.

La cosiddetta **teoria del disturbo intermedio** (*Intermediate Disturbance Hypothesis*; Connell, 1978; Figura 2.5) prevede infatti che, entro una certa soglia di intensità o frequenza, il disturbo, agendo negativamente sulle componenti biotiche più competitive, possa determinare un aumento della diversità di specie, una componente della biodiversità. Oltre tale soglia, tuttavia, un ulteriore aumento di intensità e/o frequenza del disturbo agiranno negativamente sulle specie vulnerabili, lasciando spazio alle sole specie più resistenti e, complessivamente, determinando una perdita di biodiversità e, a cascata, di beni e servizi ecosistemici.



**Figura 2.5** La teoria del disturbo intermedio prevede che un disturbo intermedio favorisca la diversità di specie, un disturbo infrequente e/o ridotto favorisca poche specie molto competitive, mentre un disturbo frequente e/o intenso favorisca le specie più resistenti

Se a un ecosistema si ‘impone’ un disturbo che ne altera il funzionamento, assisteremo a un progressivo degrado e a una perdita di capacità di produrre beni e servizi dell’ecosistema stesso e, conseguentemente, una generale diminuzione di benessere delle comunità umane che fruiscono di questi beni e servizi. In assenza di interventi di mitigazione dell’impatto o di eliminazione del disturbo, il meccanismo di degrado si ‘autoalimenterà’ generando, con un meccanismo di retroazione (*feedback*) positivo, un ulteriore aumento del degrado e un’ulteriore perdita di benessere per l’uomo (Figura 2.6). Per poter ‘gestire’ in maniera sostenibile un ecosistema abbiamo la necessità contingente di comprendere quali disturbi possiamo “eliminare” e a quali disturbi dobbiamo o possiamo, invece, “adattarci”.



**Figura 2.6** Il meccanismo di retroazione (*feedback*) positivo innescato da un disturbo non mitigato che eccede le soglie di resistenza e resilienza di un ecosistema esposto a quel disturbo

Per fare questo abbiamo bisogno di sapere quanto

un ecosistema è ‘naturale’ ma, alla luce della presenza di un’impronta umana in tutti gli ecosistemi marini (Jackson, 2001), il concetto di naturalità di un ecosistema è difficile da definire, salvo che su una scala di degrado che va da ambienti meno compromessi ad ambienti più compromessi. Inoltre, non tutti i cambiamenti ecologici sono dovuti ai disturbi antropogenici, sebbene gli effetti del disturbo ‘naturale’ (dovuto alla naturale variabilità di struttura e funzionamento di comunità, habitat ed ecosistemi) tendono ad essere esacerbati dal disturbo antropogenico. Le *chance* di successo delle soluzioni messe in opera per ‘eliminare’ un disturbo o per ‘limitarne le conseguenze’ sono riconducibili a 4 categorie (Tabella 2.1).

**Tabella 2.1** Origine, frequenza e intensità del disturbo e possibilità di risolvere gli impatti generati

| Disturbo                                                                                                                                         | Soluzioni                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Naturale ricorrente</b><br>(cronico) con intensità, durata, e frequenza sufficientemente note o adeguatamente prevedibili (e.g. fluttuazioni) | Possiamo limitare le conseguenze mediante sistemi (adattativi) di prevenzione e/o di mitigazione <i>a posteriori</i>                                                                                                                                                                                |
| <b>Naturale episodico</b><br>con intensità, durata, frequenza ignote e non prevedibili (e.g. tsunami)                                            | Poche <i>chance</i> di intervenire <i>a priori</i> ; possiamo gestire gli ambienti dove è probabile che questi eventi si verifichino in maniera tale da limitare gli eventuali e concomitanti disturbi dovuti all’azione dell’uomo o ricorrere a pratiche <i>a posteriori</i> di restauro ecologico |
| <b>Antropogenico ricorrente</b><br>(cronico) con intensità, durata e frequenza note o prevedibili (e.g. pesca a strascico)                       | Agire <i>a priori</i> riducendo o eliminando le sorgenti del disturbo: proteggendo e/o ricorrendo a mezzi di mitigazione e/o di «restauro» ecologico (dove possibile)                                                                                                                               |
| <b>Antropogenico episodico</b><br>con intensità, durata, frequenza ignote e non prevedibili (e.g. inquinamento puntiforme)                       | Agire <i>a priori</i> abbassando la probabilità di «occorrenza» o aumentando il tempo di «ritorno» mediante scelte politiche e gestionali                                                                                                                                                           |



## 2.2 Le principali cause di disturbo legate alle attività dell'uomo

Le azioni dell'uomo, quando non controllate e non regolamentate, posso avere un impatto fortemente negativo sugli ecosistemi marini. Questi impatti possono essere sia diretti che indiretti, e possono verificarsi sia a scala locale che globale. Qui di seguito sono elencati i principali fattori di minaccia degli ecosistemi marini collegati alle attività umane.

**Il sovra sfruttamento delle risorse ittiche:** molti mari del nostro pianeta sono interessati dal cosiddetto *sovra sfruttamento* delle riserve di pesce. Con questo termine si intende che l'uomo preleva troppi pesci, e troppo rapidamente, rispetto a quelli che ogni anno vengono prodotti dalle popolazioni naturali grazie alla riproduzione. Se la quantità pescata supera quella prodotta, chiaramente col tempo la quantità di pesce presente in mare diminuirà. Per alcune specie particolarmente pescate, questo può portare anche alla scomparsa da intere aree del nostro pianeta. Il sovra sfruttamento è legato allo sviluppo di tecniche moderne di pesca, che consentono di catturare in poco tempo enormi quantità di pesce, grazie all'utilizzo di numerose imbarcazioni e di enormi reti destinate sia alla pesca in superficie che in profondità. La FAO (l'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Alimentazione e l'Agricoltura) ha stimato che il 31% degli stock ittici a scala globale è sfruttato sopra le sue capacità di riproduzione, e un altro 61% è sfruttato al massimo delle sue capacità. Un altro problema legato alla pesca commerciale è quello del *bycatch*. Il *bycatch* consiste nella cattura involontaria di specie prive di interesse economico, che vengono però uccise accidentalmente durante le attività di pesca. Per esempio, squali, delfini e tartarughe spesso restano imprigionati nelle reti utilizzate per la pesca in acque aperte, e grandi uccelli marini come gli albatros restano agganciati agli ami usati per la pesca in superficie, cercando di cibarsi dei pesci che precedentemente erano rimasti agganciati agli ami. Oltre la pesca legale, esiste poi una pesca illegale non regolamentata che rappresenta una minaccia sia per le specie pescate anche legalmente (perché aumenta il pesce prelevato) sia per diverse specie protette, che vengono pescate perché particolarmente richieste su alcuni mercati. Un esempio è lo squalo Mako, la specie di squalo più veloce al mondo, che viene pescato per le sue carni prelibate e per le sue pinne, che vengono vendute a caro prezzo. In ultimo, nelle aree dove la pesca legale e illegale sono intense, anche le reti e gli altri attrezzi da pesca abbandonati o persi in mare possono accumularsi sui fondali, dove inevitabilmente entrano in contatto con molte specie che vi possono restare intrappolate senza via di scampo.

**La pesca a strascico:** l'uomo sfrutta le risorse marine dalla preistoria. Lo ha iniziato a fare in maniera intensiva già dal tardo medioevo: una petizione popolare al Re d'Inghilterra del 1376 recita (libera traduzione) «... *il popolo supplica il Re ... affinché intervenga a risolvere il problema dell'uso delle catenarie che trascinate sul fondo durante la pesca devastano pesantemente la terra sott'acqua ..... con grande danno per i beni comuni del regno...*» (Roberts, 2009). Questa fonte storica ci racconta quanto vecchio sia il problema (e la consapevolezza) dei danni causati dalla pesca a strascico, soprattutto per gli effetti devastanti su struttura, funzioni e biodiversità. L'eccessivo sfruttamento delle risorse marine sulla platea continentale (entro i 200 m di profondità) ha progressivamente spinto la pesca industriale a ricercare risorse in acque sempre più profonde, fin oltre gli 800 m. Se la pesca a strascico è (stata) una pratica devastante negli ecosistemi costieri, danni ben peggiori e persistenti sono generati da questa pratica condotta negli ambienti profondi. Infatti, oltre i 200 m di profondità la vita si basa unicamente sulla "pioggia" di cibo (da piccole particelle fecali prodotte dal plancton animale fino alle intere balene che dopo morte sprofondano) che arriva dalla parte superficiale della colonna d'acqua. Questa "carenza" cronica di energia ha fatto evolvere gli animali marini verso cicli vitali più lunghi, caratterizzati da tempi assai lunghi di raggiungimento della taglia

riproduttiva. Pertanto, prelevare organismi profondi equivale ad esporre le popolazioni ad un maggior rischio di sovrasfruttamento e di superamento delle soglie di sostenibilità del prelievo. Inoltre, in prossimità delle teste sommerse dei canyon sottomarini è particolarmente attiva, in particolare nel Mediterraneo nord-occidentale, la pesca a strascico profonda (fino a 800 m) del gambero rosso. Uno dei canyon più “battuti” è il canyon di Palamos nei pressi di Barcellona, dove lo strascico è stato talmente intenso da avere profondamente modificato la morfologia dei fondali (Puig et al., 2012) causando una fortissima diminuzione della biodiversità bentonica e un rallentamento dei cicli biogeochimici (Pusceddu et al., 2014). Esistono soluzioni a questo deterioramento? Ovviamente appare improponibile per le tecnologie disponibili oggi pensare ad un “restauro” ambientale della testa del canyon, così come appare non percorribile, in termini socioeconomici, proibire la pesca a strascico profonda su scala di bacino, mentre appare percorribile un processo di sostituzione degli attrezzi da pesca dotati di corpi morti trascinati sul fondo con reti “flottanti”, che riducano i danni arrecati.

**Eutrofizzazione e inquinamento:** l'eutrofizzazione è rappresentata dal rilascio in acqua di grandi quantità di nutrienti da parte dell'uomo, principalmente azoto e fosforo. Questi nutrienti provengono dalle attività che l'uomo svolge lungo le coste o in prossimità dei fiumi, che poi trasportano i nutrienti in mare. Le principali sorgenti sono rappresentate dai fertilizzanti agricoli, dai liquami derivanti dagli allevamenti e dagli scarichi dei depuratori urbani e industriali. Normalmente, l'azoto e il fosforo sono presenti in concentrazioni cosiddette *limitanti*, cioè sono presenti in quantità che non consentono al fitoplancton (organismi vegetali unicellulari che vivono nella colonna d'acqua) di accrescersi eccessivamente in numero. Quando l'uomo incrementa le concentrazioni di questi nutrienti, il fitoplancton può accrescersi eccessivamente. Così facendo, il fitoplancton sottrae i nutrienti disponibili per gli altri organismi. Inoltre, quando muore, la grande quantità di materia organica fitoplanctonica viene decomposta da microorganismi, soprattutto batteri, che per svolgere questa funzione consumano ossigeno, riducendone la concentrazione in acqua fino a livelli critici, detti di ipossia (poco ossigeno), che portano alla morte di moltissimi altri organismi anche in tempi molto rapidi.

Oltre all'inquinamento da nutrienti, sono moltissime le sostanze con cui l'uomo inquina i mari. Possiamo suddividerle in alcune principali categorie in base alla via di accesso di tali sostanze nelle acque marine: 1) inquinamento costiero, per esempio gli scarichi dei porti, delle città e delle industrie che sorgono direttamente nelle zone costiere, o di quelle che sorgono lungo fiumi che poi li sversano lungo la costa; 2) l'inquinamento in acque aperte, o *offshore*, (l'inquinamento causato dalle navi, dall'estrazione di petrolio e di risorse minerarie); 3) la deposizione atmosferica (tutte le sostanze inquinanti rilasciate in aria e portate in mare dalle piogge).

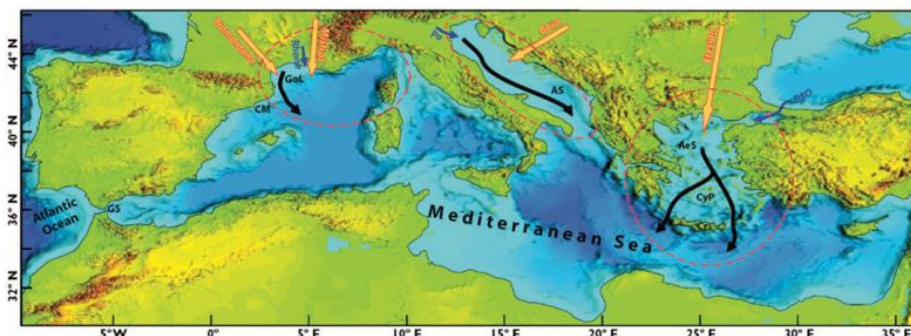
**Introduzione di specie invasive:** si tratta dell'introduzione di specie che naturalmente non sarebbero presenti in determinate aree, ma che vi sono portate dall'uomo in maniera involontaria, per esempio attraverso le acque di sentina delle navi, o volontariamente, per esempio tramite le attività di allevamento di pesci e altri organismi marini. Quando una specie viene introdotta ed è in grado di adattarsi in un nuovo habitat, spesso si ritrova senza i predatori con i quali era costretta a convivere nel suo habitat di origine. Inoltre, le specie invasive di successo sono voraci e capaci di adattarsi bene al consumo di una grande varietà di risorse, entrando in competizione con le specie locali, cosiddette autoctone. Di conseguenza, le specie invasive raggiungono numeri di individui molto elevati, e rappresentano un rischio per la biodiversità autoctona degli ecosistemi invasi, nei quali sono in grado di far addirittura estinguere le specie meno brave a competere.

**Cambiamenti climatici:** gli ecosistemi marini sono particolarmente vulnerabili ai cambiamenti climatici, e gli effetti di questi cambiamenti si osservano più rapidamente in mare che sulla terraferma. Il riscaldamento sia dell'aria che dell'acqua porta allo scioglimento delle piattaforme di ghiaccio, l'innalzamento del livello del mare e a una maggior frequenza e intensità di alcune calamità naturali come tifoni, forti mareggiate e tsunami, con enormi rischi sia per le specie marine che per l'uomo. L'aumento delle temperature costringe alcune specie a migrare verso latitudini maggiori, solitamente caratterizzate da acque meno calde, nel tentativo di continuare a vivere in acque idonee alla loro sopravvivenza. Questo vuol dire che alcune specie spariranno dalle zone soggette a maggior riscaldamento, e che altre potrebbero non trovare nuove aree idonee, quando la loro migrazione è ostacolata da barriere naturali. Oltre all'aumento delle temperature, l'oceano assorbe gran parte della CO<sub>2</sub> rilasciata in atmosfera da parte dell'uomo. Questo produce un abbassamento dei valori di pH nell'acqua di mare, creando di fatto delle acque sempre più "acide". L'acidificazione degli oceani rappresenta uno stress metabolico per gli organismi, e rende particolarmente difficoltosa la formazione dei gusci duri di alcuni organismi, quali bivalvi e gasteropodi.

Tutte queste attività provocano danni irreparabili e variazioni della distribuzione e dell'abbondanza degli organismi, causando gravi perdite alla diversità biologica e quindi ai beni e servizi ecosistemici che essa offre all'uomo. Ciò che l'uomo può fare per limitare i danni dipende principalmente da due fattori: 1) gestire in maniera più sostenibile il prelievo delle risorse prodotte dagli ecosistemi marini, e questo sarà possibile solo se le quantità prelevate terranno conto della capacità reali degli ecosistemi, a scala locale, di produrre e rigenerare tali risorse; 2) ridurre il disturbo arrecato dall'esterno agli ecosistemi marini, inteso sia come inquinamento chimico e biologico (le specie invasive) sia come danni collaterali legati alle attività svolte in mare. In entrambi i casi, questo sarà possibile se oltre a migliorare le tecnologie per lo sfruttamento degli ecosistemi marini, le attività dell'uomo terranno conto dei meccanismi ecologici che ne regolano la struttura e il funzionamento, e quindi la capacità di sostenere la vita e di fornire beni e servizi alla nostra specie.

### *2.3 Gli impatti delle cascate di acque dense di piattaforma: un esempio di disturbo naturale esacerbato dal cambiamento climatico*

Il Mediterraneo è caratterizzato da una circolazione convettiva delle acque attivata dalla formazione, durante l'inverno, di acque fredde e dense (in quanto più salate per effetto dell'evaporazione superficiale) in tre aree specifiche: il nord Adriatico, il Mediterraneo nord-occidentale e il Mar Egeo (Figura 2.7). Le acque dense di piattaforma (*Dense Shelf Waters*; DSW) possono dare luogo, durante inverni particolarmente freddi, a imponenti fenomeni di sprofondamento (*cascading*) che trascinano al fondo enormi quantità di materiale sedimentario ed organico "raspandolo" dalla piattaforma continentale e depositandolo sulla piana batiale adiacente (>1000 m di profondità). Durante gli inverni più miti questo meccanismo contribuisce a rifornire di energia gli ambienti profondi, ma durante gli inverni anomali il



*Figura 2.7 Aree di formazione delle acque fredde e dense di piattaforma che sprofondando alimentano la circolazione profonda nel Mar Mediterraneo (da Pusceddu et al., 2010)*

processo, quando in particolare canalizzato lungo i canyon sottomarini, può portare alla “devastazione” degli ambienti profondi con il soffocamento della fauna e l’accumulo di carichi organici inutilizzati (Canals et al., 2006). Negli anni più miti questo meccanismo non solo è fondamentale nella regolazione delle correnti profonde ma, come accennato, costituisce un importante sistema di rifornimento di cibo per le comunità profonde. Affinché questo trasporto avvenga, tuttavia, il processo di raffreddamento delle acque superficiali deve poter funzionare. Dato che con il cambiamento climatico la temperatura superficiale del Mediterraneo sta progressivamente aumentando, è possibile prevedere che il riscaldamento rallenterà il processo di trasporto di cibo al fondo, rendendo il Mediterraneo profondo progressivamente più “povero”. Inoltre, dato che il cambiamento climatico si associa anche ad un’aumentata frequenza di fluttuazioni anomale del clima, possiamo anche prevedere che ulteriori eventi “estremi”, episodici e non prevedibili, di cascata di acque dense profonde possano localmente devastare ampi tratti del Mediterraneo profondo. Questa fenomenologia di disturbo naturale (esacerbato dal cambiamento climatico causato dalle attività antropiche) non lascia spazio ad alcuna soluzione pratica fatta eccezione che per il tentativo di mitigare le pressioni che alimentano il cambiamento climatico e il riscaldamento (o il raffreddamento anomalo) delle acque superficiali.

#### 2.4 Verso il restauro degli ecosistemi marini degradati per uno sviluppo sostenibile

Se, come anche riconosciuto dalle Nazioni Unite che hanno dedicato la decade 2021-2030 alla Scienza degli Oceani per uno Sviluppo Sostenibile (<https://www.oceandecade.org>), gli oceani richiedono uno sforzo importante per approfondirne conoscenza e per accelerarne il recupero, viene spontaneo pensare che sia giunto il tempo di pensare non solo alla protezione e conservazione degli ecosistemi marini ancora poco degradati dall’uomo ma anche al recupero, anche attraverso tecniche di restauro ecologico, di quegli ambienti già pesantemente compromessi. Non è infatti un caso che le stesse Nazioni Unite, attraverso il programma ambiente, abbiano dedicato la medesima decade 2021-2030 al Restauro degli Ecosistemi (<https://www.decadeonrestoration.org>).

Le pratiche di gestione locale adottate fino ad oggi per mitigare le minacce umane sugli ecosistemi, basate sui principi di protezione e conservazione, possono rappresentare valide soluzioni per invertire il cambiamento dei sistemi naturali causato dall’uomo. Tuttavia, queste potrebbero non essere sufficienti nel prossimo futuro, anche in ragione del rapido cambiamento climatico al quale è sempre più difficile (e complicato) adattarsi. Per questo motivo si ritiene che le azioni di restauro ecologico rappresentino una strategia affidabile ed efficace per riportare gli ecosistemi al loro stato originale in un tempo ragionevole. Il restauro degli ecosistemi marini, a causa delle difficoltà operative insite nelle possibilità operative di manipolare gli ecosistemi acquatici, è ancora agli inizi. Tuttavia, diversi studi recenti indicano che una conservazione ottimale può essere favorita combinando azioni di protezione e adattamento con azioni destinate al ripristino degli



Figura 2.8 Gli ideali collegamenti tra gli effetti del raggiungimento dell’obiettivo 14 (la vita sotto il mare) con numerosi altri obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite



habitat marini degradati. Investire nel restauro di quelle porzioni di oceano degradate non ha valenza unicamente per la conservazione degli oceani stessi, ma anche per garantire un “indotto” di sostenibilità per l’esistenza e la sussistenza della vita sul nostro pianeta, con ricadute importanti e preponderanti anche sulle necessità socioeconomiche di oltre 7 miliardi di esseri umani. Tale importanza diviene palese se consideriamo che il raggiungimento dell’obiettivo 14 (la vita sotto il mare) di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite (<https://sdgs.un.org/goals>) è virtualmente e virtuosamente collegato con numerosi altri obiettivi di sviluppo sostenibile (Figura 2.8).

## 2.5 Bibliografia

- Barbier EB, Moreno-Mateos D, Rogers AD, et al. 2014. Protect the deep sea. *Nature* 505, 475-477
- Butchart SHM, Walpole M, Collen B, et al. 2010. Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science* 328, 1164-1168.
- Canals M, Puig P, Durrieu de Madron X, et al 2006. Flushing submarine canyons. *Nature* 444, pages 354–357
- Connell JH. 1978. Diversity in tropical rain forests and coral reefs: high diversity of trees and corals is maintained only in a non-equilibrium state. *Science* 199, 1302-10.
- Dulvy NK, Sadovy Y, Reynolds JD. 2003. Extinction vulnerability in marine populations. *Fish and Fisheries* 4, 25-64.
- Gibson RN, Atkinson RJA, Gordon JDM, et al. 2007. Loss, Status and Trends for Coastal Marine Habitats of Europe. *Oceanography and Marine Biology* 45, 345-405
- Halpern BS, Walbridge S, Selkoe KA, et al. 2008 A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems. *Science* 319, 948-952
- Jackson JBC. 2001. What was natural in the coastal oceans? *Proceedings of the National Academy of Science of the U.S.A.* 98, 5411-5418
- Loreau M, Naeem S, Inchausti P, et al. 2001. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science* 294, 804-808
- Micheli F, Halpern BS, Walbridge S, et al. 2013. Cumulative Human Impacts on Mediterranean and Black Sea Marine Ecosystems: Assessing Current Pressures and Opportunities. *PLoS One* 8, e79889
- Puig P, Canals M, Company JB et al. 2012. Ploughing the deep sea floor. *Nature* 489, 286-289.
- Pusceddu A, Bianchelli S, Martin, et al. 2014. Chronic and intensive bottom trawling impairs deep-sea biodiversity and ecosystem functioning. *Proceedings of the National Academy of Science of the U.S.A.* 111, 8861–8866
- Pusceddu A, Mea M, Gambi C et al. 2010. Ecosystem effects of dense water formation on deep Mediterranean Sea ecosystems: an overview. *Advances in Oceanography and Limnology* 1, 67-83.
- Pusceddu A, Sarà G, Viaroli P. 2020. *Ecologia*. Utet, 362 pp.
- Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472-75

Worm B, Barbier EB, Beaumont N et al. 2006. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science* 314, 787-79



Scarico a norma di legge, acque non trattate *in deroga* (da: La Stampa Online del 6 gennaio 2016)

*"Water and air, the two essential fluids on which all life depends,  
have become global garbage cans..."*

*"Acqua e aria, i due fluidi essenziali da cui dipende tutta la vita,  
sono diventati bidoni della spazzatura globali..."*

Jacques-Yves Cousteau

### 3. DA ABUSO A RIUSO: LA GESTIONE DELLA RISORSA ACQUA NEL MONDO CHE CAMBIA

**Gianluca Corno**

CNR Istituto di Ricerca sulle Acque, Verbania Pallanza

L'acqua partecipa a quasi tutti i fenomeni, biotici o abiotici, attivi sul nostro pianeta. L'enorme quantità di acqua presente sulla Terra (oltre un miliardo di km<sup>3</sup>, che ricoprono circa il 71% della sua superficie) ci porta spesso a sottostimarne l'importanza, quasi fosse una risorsa illimitata. In realtà oltre il 97% dell'acqua presente sul pianeta è salata e del restante 2.5% quasi il 99% è intrappolato in ghiacciai o scorre nel sottosuolo. In totale, i fiumi ed i laghi non rappresentano che lo 0,1 % dell'acqua terrestre (Shiklomanov, 1993).

Questo dato dà l'idea di quanto sia **limitata** l'acqua dolce utilizzabile dagli organismi terrestri, soprattutto considerando che la stragrande maggioranza delle attività umane utilizza proprio le acque dolci (e quelle marine costiere) depauperandone la qualità e riducendone la disponibilità sia per le popolazioni umane sia per gli organismi e gli ecosistemi terrestri.

Le acque però non sono vincolate ai comparti ambientali che le accolgono perché, grazie all'energia del sole, si spostano continuamente da un comparto all'altro. Una quota delle acque degli oceani e di quelle presenti sulla superficie terrestre, per **evaporazione** (ed evapotraspirazione dalla vegetazione) passa in forma gassosa in atmosfera e viene trasportata dalle masse d'aria in movimento. Durante questo processo il vapore d'acqua si raffredda e torna allo stato liquido per **condensazione**. Le gocce d'acqua formano le nubi da cui, aggregandosi e diventando pesanti, ricadono sulla terra (**precipitazione**) sotto forma di pioggia, neve o grandine. Raggiunto il suolo, le acque meteoriche scorrono sulla superficie terrestre convergendo nel reticolo idrografico, costituito da torrenti, fiumi e laghi, per tornare infine di nuovo ai mari. Questo viaggio di andata e ritorno dell'acqua dalla superficie terrestre all'atmosfera è noto come **ciclo dell'acqua**. Negli ultimi decenni il ciclo dell'acqua è andato incontro a drammatiche alterazioni a causa del cambiamento climatico globale in atto sul pianeta, con effetti devastanti sulla disponibilità, la distribuzione e la qualità dell'acqua (Pascolini-Campbell et al., 2021).

Nelle prossime pagine esamineremo i problemi della risorsa acqua causati dal **cambiamento climatico** a livello globale, e dalle alterazioni dei reticoli geografici a livello locale - entrambi generati dalle **attività umane** - ma anche le soluzioni possibili per garantire la disponibilità e la buona qualità dell'acqua e i possibili scenari futuri per la popolazione umana in presenza o assenza di adeguate politiche di gestione del clima e della risorsa acqua.

#### *3.1. L'impatto delle attività umane sulla distribuzione dell'acqua*

Come già detto, l'acqua non è omogeneamente distribuita sul nostro pianeta. Gran parte della superficie è ricoperta d'acqua marina mentre l'acqua dolce, direttamente utilizzabile dagli ecosistemi terrestri e dall'uomo, è **distribuita in modo irregolare**, con aree geografiche e climatiche ricchissime di acqua dolce (le aree equatoriali, le zone temperate) ed altre che, invece, ne sono quasi



completamente prive (le aree desertiche tropicali e subtropicali, i deserti freddi subpolari) per gran parte dell'anno.

La disponibilità di acqua dolce ha condizionato lo sviluppo delle civiltà umane: le prime grandi civiltà si sono sviluppate in prossimità di grandi fiumi e laghi, dove l'accesso alla risorsa acqua permetteva la crescita degli insediamenti, lo sviluppo dell'agricoltura e delle attività manifatturiere. Già in epoca babilonese ed egizia (III-II millennio a.C.) la specie umana ha iniziato ad alterare l'idrologia delle aree dove era insediata, per facilitare l'accesso all'acqua, principalmente a fini irrigui. È a quelle epoche che risalgono le prime opere di canalizzazione e di alterazione del normale deflusso dei fiumi per portare acqua in aree di interesse agricolo, sottraendola ad altre di minor interesse economico (Berking, 2018).

Con il trascorrere dei secoli questi interventi sono diventati sempre più cospicui. Oltre alle esigenze agricole, l'incremento dell'urbanizzazione ha portato all'edificazione di acquedotti per soddisfare la maggior richiesta di acqua, alla costruzione di canali di difesa per scopi militari, all'ampliamento delle zone coltivabili con l'eliminazione di paludi, foreste ed aree umide, alla realizzazione di vie d'acqua completamente o parzialmente artificiali, per garantire trasporti più rapidi e sicuri. Ma sono stati anche ricavati grandi bacini dove accumulare l'acqua per far fronte a periodi di siccità, dighe per produrre energia, strutture per le attività industriali oppure per mitigare l'effetto di eventi naturali catastrofici (scolmatori e deviazione di corsi d'acqua). Di fatto le zone del mondo a più alta densità abitativa sono zone dove il ciclo idrologico e la distribuzione dell'acqua sul territorio sono stati alterati dall'uomo con conseguenze dirette sulla sua disponibilità e sulla sua localizzazione sul territorio e quindi, data la vastità delle manipolazioni, sul ciclo dell'acqua nel suo complesso.

Studi recenti identificano l'**irrigazione agricola** come il settore di maggior prelievo di acqua superficiale e sotterranea, rappresentando circa il 70% dei prelievi globali di acqua e quasi il 90% del consumo idrico totale (Shiklomanov and Rodda, 2003). Una sintesi delle simulazioni con i *Global Hydrological Models* (cioè modelli che simulano l'idrologia globale e i processi associati) ha permesso di stimare il consumo di acqua per irrigazione in 1250 km<sup>3</sup> per anno, una porzione significativa del totale delle acque dolci presenti sul pianeta (Hoff et al., 2010).

L'ingente utilizzo umano dell'acqua causa una serie di **problemi agli ecosistemi naturali** e, in alcuni casi, anche alle aree antropizzate interessate dalle manipolazioni (Haddeland et al., 2014; Figura 3.1).

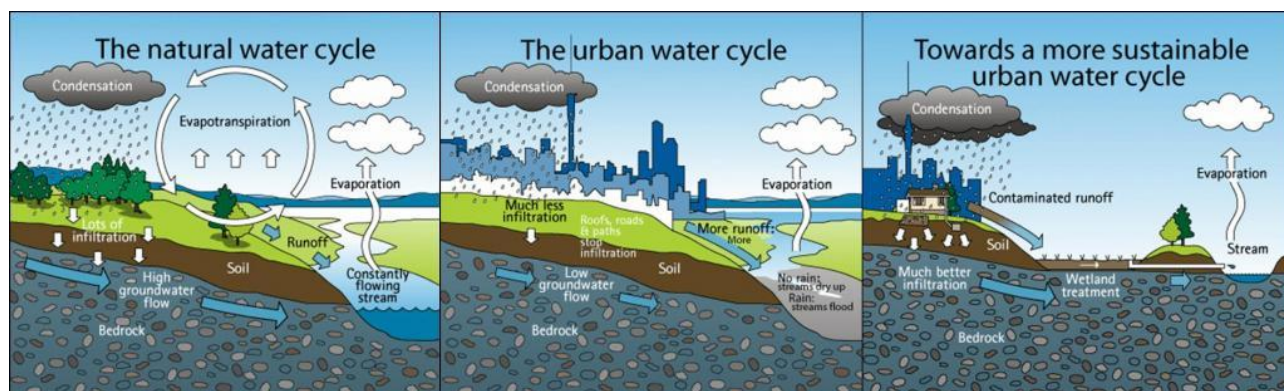


Figura 3.1. Il ciclo dell'acqua e l'impatto dell'uomo. Da: <http://www.sswm.info/category/concept/water-cycle>.

Il sequestro di acqua a fini agricoli o civili/industriali riduce le portate dei fiumi e i livelli dei laghi con effetti diretti sulle comunità naturali che essi ospitano. Inoltre, la carenza di acqua è spesso causa

di periodi di siccità, di alterazioni geomorfologiche e dell'aumento della concentrazione di inquinanti e nutrienti. Le canalizzazioni accorciano i tempi di deflusso delle acque, velocizzano il loro percorso verso il mare e, insieme alla cementificazione degli argini che riduce i processi di deposito dei sedimenti, causano modifiche nella struttura degli ambienti litorali marini accentuando l'erosione delle spiagge e la desalinizzazione delle acque costiere (Dadson et al., 2017). Infine, altri interventi, come l'apertura di canali di transito per le merci - per es. il Canale di Suez, quello tra il Mare del Nord ed il Mar Baltico e molti altri - hanno consentito a specie animali e vegetali alloctone di colonizzare nuovi ambienti per esse irraggiungibili prima dell'apertura del canale (Katzanevakis et al., 2014).

In questo quadro di estrema manipolazione antropica dell'idrologia del pianeta, si inseriscono con un effetto sinergico negativo i cambiamenti climatici in atto che, attraverso l'aumento delle temperature medie annuali di aria ed acqua e le variazioni meteo-climatiche su piccola-grande scala, creano situazioni di stress in varie zone del pianeta, riducendo la disponibilità dell'acqua con effetti negativi sull'agricoltura e sulla stabilità e biodiversità degli ambienti naturali di primaria importanza, come per esempio le lagune costiere (Zaggia et al., 2017).

Tutti i modelli sviluppati per capire l'evoluzione futura del ciclo dell'acqua sul pianeta ci dicono che l'idrografia cambierà in modo significativo in molte regioni del mondo. A livello globale, l'aumento della temperatura dell'aria causerà maggiore evapotraspirazione, causando problemi di scarsità di acqua anche in quelle aree dove i modelli prevedono un aumento delle precipitazioni nei prossimi 40 anni, con una forte intensificazione di eventi estremi come siccità e inondazioni: nei prossimi decenni **l'aumento della temperatura** determinerà cambiamenti di deflusso delle acque alle basse latitudini, riducendo i flussi fluviali. Invece, alle alte latitudini, l'aumento delle precipitazioni rimarrà la forza determinante con conseguente aumento del deflusso medio rispetto ad oggi, ma con grandi sbalzi tra periodi siccitosi ed eventi di piena (Fekete et al., 2010). Nelle acque interne, fiumi e laghi, le attività umane resteranno il disturbo predominante per i prossimi 40 anni e le attività antropiche in crescita in alcune zone a rapida crescita industriale, come la Cina e l'India, determineranno cali nei deflussi indipendentemente dal cambiamento climatico. Questa situazione non caratterizzerà invece gli ambienti marini dove l'impatto del cambiamento climatico resterà il fattore dominante, ed i principali effetti del riscaldamento globale saranno l'innalzamento del livello del mare e lo scioglimento dei ghiacci polari.

**In Italia** il ciclo dell'acqua è attualmente fortemente alterato dalle attività dell'uomo che da millenni sfrutta la risorsa acqua e la manipola. L'idrografia e il clima dividono l'Italia in due zone delimitate dall'Appennino Tosco-Emiliano. Quella a nord è ricca di precipitazioni e di acque superficiali, quella a sud è caratterizzata da un clima mediterraneo e da disponibilità d'acqua più limitata, con periodi di siccità tanto più prolungati quanto più ci si sposta verso sud (World Resource Institute, 2015). L'utilizzo dell'acqua da parte dell'uomo ha quasi sempre seguito **logiche prettamente economiche** e di convenienza strategica sul breve periodo, creando delle situazioni di criticità nella disponibilità dell'acqua stessa e di serio depauperamento degli ambienti acquatici.

L'abuso nei consumi d'acqua e la cattiva gestione della risorsa hanno creato situazioni che, con il cambiamento climatico in atto, causano problemi estivi di approvvigionamento idrico per scopi agricoli non solo nelle zone più siccitose ma addirittura nel sud della Lombardia, la zona d'Italia più ricca di acque superficiali e sotterranee (Lehner et al., 2006). Un altro esempio di sistema danneggiato da cattiva gestione è l'area lagunare tra il delta del Po e Venezia, dove il ridotto deflusso di alcuni fiumi e l'ingente sviluppo industriale e turistico hanno modificato le correnti intra-lagunari

ed il moto ondoso, mettendo a rischio la città di Venezia e l'intero ecosistema lagunare (Zaggia et al., 2017). Infine, un ultimo esempio è la **cattiva gestione delle reti di distribuzione** dell'acqua potabile, che subiscono perdite medie attorno al 30-40% con punte anche doppie in aree l'acqua è già scarsa (Sicilia, Sardegna), con conseguenti prelievi dall'ambiente anche doppi rispetto a quelli che sarebbero necessari con reti efficienti (Istituto nazionale di statistica, 2019).

### 3.1 L'impatto delle attività umane sulla qualità dell'acqua

La **qualità della risorsa idrica** è valutabile con la misura di variabili fisiche, chimiche e biologiche. Le variabili scelte ed i loro valori di riferimento sono cambiate nel tempo in funzione dell'incremento delle conoscenze e del modificarsi della consapevolezza ambientale della società. La continua ricerca di criteri di qualità oggettivi sulla base dei quali operare scelte gestionali idonee alla salvaguardia degli ecosistemi ha determinato una evoluzione della definizione di "qualità dell'acqua" e delle variabili utilizzate per valutarla.

Se non più di sessanta anni orsono la gestione della risorsa acqua era finalizzata a garantirne la disponibilità, già mezzo secolo fa sono stati introdotti criteri di qualità che prevedono l'assenza di sostanze tossiche per l'uomo e la limitazione di nutrienti "eutrofizzanti" dannosi per l'ecosistema. Oggi vengono anche considerati parametri ambientali e biologici per salvaguardare la biodiversità, per proteggere organismi a rischio, per assicurare la disponibilità dei servizi ecosistemici che un ambiente può fornire (European Commission, 2000).

Fenomeni di inquinamento dei fiumi e dell'aria erano già presenti in epoca romana (Preunkert et al., 2019). Tuttavia l'impatto chimico e microbiologico dell'uomo sulle acque superficiali, sotterranee e costiere è diventato imponente solo con la **rivoluzione industriale** per tre motivi: 1) lo **sviluppo dell'industria** che, inizialmente mossa dal vapore, richiedeva grandi masse di acqua, rilasciate nell'ambiente dopo l'uso veicolando scarti delle diverse produzioni (nutrienti, detergenti, metalli pesanti, prodotti chimici a volte estremamente tossici); 2) **l'urbanizzazione**, con lo spostamento di grandi masse di persone dalle campagne alle zone industriali delle città, dove non esistevano sistemi di trattamento delle acque reflue che venivano scaricate in gran quantità nei corsi d'acqua limitrofi (Figura 3.2); 3) **l'agricoltura intensiva**, sostenuta dall'utilizzo massiccio di fertilizzanti, diserbanti e antiparassitari che in gran quantità finivano nei corpi d'acqua superficiali.



Figura 3.2. *The Silent Highwayman* (1858). Il braccio della Morte sul Tamigi durante il *Great Stink* (Grande Puzza), evento culmine del degrado del fiume degenerato in fogna, che colpisce coloro che non hanno pagato per ripulirlo (da: *Punch Magazine*).

Questa situazione di progressivo depauperamento della risorsa idrica, seppur con alcune limitate operazioni di mitigazione, spesso sollecitate da casi di intossicazione di massa o da epidemie, si è protratta, in Europa e in Nord America, fino al secondo dopoguerra del secolo scorso quando, sulla spinta di sempre maggiori **evidenze scientifiche** e della crescente **consapevolezza sociale** del valore anche economico della fruibilità degli ambienti acquatici, si è iniziato a promulgare leggi che limitassero gli scarichi incontrollati in ambiente e a sviluppare tecnologie di rimozione dei carichi inquinanti dalle acque reflue prima del loro rilascio in ambiente.

Di fatto, il **rilascio incontrollato** in acqua di sostanze tossiche e di grandi quantità di nutrienti, oltre che di batteri patogeni dagli scarichi fognari, interessa ancora oggi, globalmente, l'**80% degli scarichi**, civili o industriali. Il risultato è che oltre 1.8 miliardi di persone hanno accesso solamente ad acque contaminate e oltre 3 miliardi vivono in paesi dove non viene controllata la potabilità dell'acqua (United Nations, 2018). La situazione è molto migliore nelle aree più ricche del pianeta, dove le acque reflue sono oggi trattate per il 70 - 99%, con una forte riduzione dei carichi inquinanti in ambiente ed una conseguente riqualificazione degli ambienti acquatici. In questi paesi la percezione del rischio connesso con l'inquinamento delle acque superficiali ha prodotto un miglioramento qualitativo degli ecosistemi acquatici a partire dagli anni '60-'70 del secolo scorso, quando vennero promulgate le prime leggi sul controllo del rilascio dei nutrienti, causa dell'eutrofizzazione delle acque di laghi e fiumi europei e nord americani. A queste leggi ne seguirono altre, via via più restrittive, per il controllo della presenza di sostanze tossiche e di batteri patogeni e/o fecali negli scarichi. I risultati di queste politiche, affiancate da investimenti per una migliore gestione dei rifiuti, dello scarico dei reflui e dell'utilizzo di fertilizzanti, ha favorito un rapido abbattimento dell'eutrofizzazione e dell'inquinamento chimico e microbiologico nei grandi laghi e fiumi europei e nord americani, che in circa 30 anni sono tornati a caratteristiche qualitative di buona qualità.

Purtroppo anche nelle nazioni più ricche esistono ancora grosse differenze nel trattamento delle acque. Limitandoci all'Italia, si va dal 99.8% di acque trattate in Provincia di Bolzano al 48.3% di quelle della Sicilia. Spesso le aree che soffrono di cattiva gestione della risorsa sono anche quelle (in Europa: i Balcani, la Grecia, il sud di Italia e Spagna) nelle quali la disponibilità di acqua è un importante fattore limitante (Istituto nazionale di statistica, 2019).

Inoltre, è emersa recentemente la presenza di altre sostanze inquinanti, i cosiddetti *Contaminants of Emerging Concern* (CEC), tradotto in italiano come **inquinanti emergenti**, che spesso sfuggono ai sistemi di trattamento tradizionali, andando a concentrarsi in ambiente e negli organismi acquatici (Loos et al., 2018). Fanno parte di questa grande categoria composti organici di vario tipo, inclusi farmaci e i cosiddetti *personal care products* (PPCP), tra cui anche gli interferenti endocrini (EDC), ma anche le sostanze perfluoroalchiliche (PFAS, PFOS) e altre molecole sintetiche di varia origine fino alle micro e nanoplastiche. Molti CEC (come per esempio la gran parte dei cosiddetti *nanomaterials*, EPA 505-F-17-002) non hanno un impatto diretto e critico sulla salute umana ed ambientale ma è stato dimostrato che possono avere effetti anche terribili quando l'esposizione si prolunga nel tempo e diventa cronica. Per questa ragione anche i CEC vanno considerati quando si vuole definire la "qualità" di un corpo idrico.

## 2.2. Nuove sfide e nuove tecnologie per l'abbattimento degli inquinanti dai reflui

Gli **impianti di trattamento delle acque**, insieme alle reti di raccolta e distribuzione, hanno un'importanza fondamentale nell'assicurare una buona qualità delle acque superficiali (interne e

costiere) che è prodromica alla difesa del capitale naturale costituito dagli ecosistemi (siano essi poco o molto impattati dalle attività umane) nei quali viviamo. Infatti una corretta gestione della risorsa (sia in termini di distribuzione che di consumo e di trattamento) è fondamentale per assicurare la disponibilità e l'accessibilità dell'acqua negli ambienti naturali, e quindi per assicurare quei servizi ecosistemici che questi supportano. I sistemi di trattamento sono quindi uno strumento fondamentale per difendere l'accessibilità alla risorsa acqua.

Il loro ruolo diventa ancora più importante nelle condizioni attuali dove il cambiamento globale in atto riduce quasi ovunque la quantità (e la qualità) delle acque disponibili per l'uomo e per gli ecosistemi terrestri e costieri.

Per questa ragione è necessario che si attui un cambio di percezione, da parte della società, del **significato di un refluo** (trattato). Quello che fino a pochi anni fa era un **rifiuto** che doveva essere al meglio *“non troppo impattante sui sistemi riceventi”* oggi può e deve essere visto, in un'ottica di economia circolare (anche ambientale) e di difesa del ciclo dell'acqua globale, come una **opportunità** di una sorgente di acqua di elevata qualità che può sopperire alle altre sorgenti quando queste, a causa del cambiamento climatico globale, perdono in capacità.

Per raggiungere questo obiettivo, indicato esplicitamente dal Regolamento UE 2020/741 sul **riuso delle acque reflue**, è fondamentale assicurare dei sistemi di trattamento in grado di produrre reflui che non solo non siano inquinanti per l'ambiente che li riceve, ma che possano addirittura assicurare al corpo idrico ricevente condizioni più stabili in termini di portata e di diversità microbica, andando quindi a bilanciare e ridurre l'impatto antropico negativo causato da altre sorgenti di inquinamento (dilavamento di strade e terreni agricoli, scarichi non trattati). Attualmente questo obiettivo, con adeguati investimenti non solo in tecnologie ma anche e soprattutto in ricerca, è alla portata almeno delle nazioni più ricche del pianeta, con la speranza che questo faccia da volano ad una economia circolare dei reflui che prenda poi piede anche nel resto del mondo.

I problemi legati al depauperamento della risorsa acqua, una volta che questa è stata utilizzata dall'uomo e rilasciata in ambiente, sono, secondo la legislazione corrente, legati alla presenza di composti tossici, di prodotti chimici di sintesi, di nutrienti (composti di fosforo, azoto e carbonio) e di batteri patogeni. Questi parametri vengono monitorati e la tecnologia dei sistemi di depurazione si è sviluppata **per rendere massima l'efficienza** di abbattimento degli stessi.

Grazie alla ricerca ambientale, negli ultimi vent'anni a questi inquinanti che possiamo definire “storici” se ne sono aggiunti altri, i già citati CEC. I CEC stanno lentamente entrando nelle diverse legislazioni come variabili con limiti di concentrazione da rispettare e come “liste grigie” di parametri da controllare in attesa della definizione dei limiti di tolleranza.

Un esempio molto chiaro di inquinamento di origine antropica fino ad oggi ampiamente sottostimato è la contaminazione da antibiotici. La presenza di antibiotici nelle matrici ambientali è responsabile di una pressione selettiva sulle comunità microbiche naturali che favorisce la diffusione di determinanti di antibiotico-resistenza nelle popolazioni batteriche, sia per trasmissione verticale (ai discendenti, di generazione in generazione), sia laterale (per trasferimento genico orizzontale, ad altri microrganismi). Nell'ultimo mezzo secolo infatti, l'uso **massiccio e indiscriminato di antibiotici**, sia nella clinica sia nelle pratiche agricole e zootecniche, ha determinato la loro **immissione nei comparti ambientali** (acqua, suolo, aria) nella forma nativa e/o come sottoprodotti metabolici, spesso dotati di attività farmacologica. Questa presenza ha permesso la diffusione



dell'antibiotico-resistenza anche in molti batteri patogeni, che sono causa diretta della morte di circa 40.000 persone ogni anno solo nell'UE, delle quali oltre 10.000 in Italia (ECDC, 2020). Questa situazione e le proiezioni che fanno prevedere un aumento a livello mondiale delle infezioni da patogeni resistenti hanno reso l'antibiotico resistenza un'**emergenza sanitaria** a livello globale (O'Neill, 2016), che va combattuta riducendo l'uso di antibiotici sia nella clinica sia nelle pratiche agricole e zootecniche, per evitare che l'ambiente in cui viviamo si trasformi in un **serbatoio di batteri antibiotico-resistenti** e di geni di antibiotico-resistenza da cui: le popolazioni resistenti possono amplificarsi e entrare in comunità in cui prima non erano presenti, i geni di resistenza possono passare da batteri vivi a batteri vivi (disseminazione) oppure i determinanti genici di resistenza rilasciati nell'ambiente possono essere acquisiti (meno comune ma possibile). L'approccio chiamato *one-health*, che include la sorveglianza ambientale in stretta connessione con quella sanitaria, è adesso alla base delle strategie di contenimento delle resistenze a livello globale (Robinson et al., 2016). Di fatto, una delle principali fonti di rilascio nell'ambiente dei determinanti di resistenza (batteri resistenti e geni di resistenza) sono gli **scarichi degli impianti di trattamento** (Corno et al., 2019). E, di fatto, gli ambienti acquatici antropizzati (fiumi, laghi, acque costiere) sono ambienti 'serbatoio' dove i determinanti di resistenza possono persistere per anni integrati nelle comunità microbiche, anche in assenza della pressione selettiva diretta, cioè della presenza di antibiotici (Di Cesare et al., 2015). Considerando che attualmente gli impianti di trattamento sono **del tutto inefficienti** nell'abbattere i determinanti di resistenza che sono abbondanti nei reflui urbani, agricoli e industriali, una grande sfida per la gestione del problema è quella di sviluppare **nuovi sistemi di trattamento** che non colpiscano la comunità microbica nel suo complesso, ma che vadano a colpire specificatamente gli organismi che sono portatori di resistenza (Di Cesare et al., 2016).

Gli approcci classici o anche innovativi di disinfezione hanno dimostrato parziale (radiazione UV) o bassa (disinfezione chimica con cloro o acido peracetico) efficienza, mentre altri trattamenti (ozono) hanno portato a risultati incerti.

Per questa ragione l'**ecologia** si sta affiancando all'ingegneria civile nella gestione del problema: una soluzione potrebbe essere l'uso di **strumenti naturali** che operino tramite **interazioni ecologiche** specifiche (predazione, competizione). Questi trattamenti, in vasche e in zone umide artificiali a fine trattamento, specialmente con la predazione, potrebbero abbassare molto la carica batterica generale (inclusi i batteri resistenti e i determinanti di resistenza), sebbene la loro totale scomparsa sia improbabile, visto che è difficile cancellare geni utili (nelle popolazioni vengono mantenuti a basse frequenze anche i geni che determinano condizioni negative e patologiche) e che negli stessi elementi trasferibili i determinanti sono spesso associati a geni che forniscono vantaggi metabolici. Lasciare che la natura giochi il suo ruolo nel riportare l'acqua reflua alla qualità originaria sembra la via ideale per rendere sostenibile la produzione di acqua reflua di buona qualità, che possa rappresentare una **risorsa ulteriore** per altre attività umane.

### 3.3. *L'uso corretto ed il riuso dell'acqua come unica soluzione*

In attesa che le azioni per combattere il cambiamento climatico vengano avviate e portino a dei risultati, comunque attesi dopo decenni, possiamo analizzare le azioni oggi tecnologicamente possibili per ottimizzare l'utilizzo dell'acqua, preservando gli ambienti acquatici e i servizi ecosistemici che essi offrono.

Come detto, il cambiamento climatico può ridurre la disponibilità dell'acqua. Questo effetto può essere contrastato **riducendo le perdite** delle reti idriche, che in Italia spesso hanno oltre un secolo di vita e in alcuni casi non sono mappate correttamente, e **riducendo i consumi** in agricoltura

utilizzando, quando possibile, tecniche di irrigazione che ottimizzino l'uso dell'acqua (per es. l'irrigazione a goccia).

La disponibilità dell'acqua è però determinata anche dalla sua qualità. Un miglioramento in questa direzione sarebbe possibile con l'**implementazione delle reti fognarie** e la loro miglior gestione, eliminando le perdite e risolvendo così il problema del rilascio in ambiente di acque reflue non trattate. I **sistemi di trattamento** dei reflui potrebbero già oggi produrre un effluente di elevata qualità quasi azzerando l'impatto sul corpo idrico ricevente o, addirittura, esercitando un effetto positivo su di esso se è afflitto da periodiche siccità che determinano riduzione dei volumi d'acqua, abbassandolo a quantità inferiori al minimo necessario per preservare l'ecosistema.

Le acque reflue potrebbero essere **riutilizzate** anche in agricoltura, dove, specialmente nei periodi siccitosi, risolverebbero problemi oggi molto gravi di approvvigionamento. Attualmente, la produzione di acqua reflua con **qualità adeguata al riuso** è minima per i costi di gestione degli impianti di trattamento e per via del fatto che viene ancora considerata un rifiuto e non una risorsa. Se si invertisse questa visione considerando l'acqua reflua un bene utilizzabile sia per l'agricoltura sia per la difesa dagli ambienti acquatici, si potrebbe dare un **valore economico** alla stessa, rendendola la base di un sistema virtuoso di economia circolare.

### 3.4. Bibliografia

- Baquero F, Martínez JL, Cantón R, 2008. Antibiotics and antibiotic resistance in water environments. *Curr Opin Biotechnol* 19:260-265
- Berking J, 2018. Water Management in Ancient Civilizations. Topoi Ed. Freien Universität Berlin and Humboldt-Universität Berlin Pbs.
- Corno G, Yang Y, Eckert EM, et al, 2019. Effluents of wastewater treatment plants promote the rapid stabilization of the antibiotic resistome in receiving freshwater bodies. *Wat Res* 158:72-81
- Dadson SJ, Hall JW, Murgatroyd A, et al, 2017. A restatement of the natural science evidence concerning catchment-based 'natural' flood management in the UK. *Proc R Soc A Math Phys Eng Sc.* 473
- Di Cesare A, Eckert EM, Teruggi A, et al, 2015. Constitutive presence of antibiotic resistance genes within the bacterial community of a large subalpine lake. *Mol Ecol* 24: 3888-3900
- Di Cesare A, Fontaneto D, Doppelbauer G, Corno G, 2016. Fitness and Recovery of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in Urban Wastewaters Exposed to Classical Disinfection Treatments. *Environ Sci Technol* 50:10153-10161
- ECDC, European Centre for Disease Prevention and Control, 2020. Antimicrobial resistance in the EU/EEA (EARS-Net) - Annual Epidemiological Report 2019. Stockholm
- European Commission, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23<sup>rd</sup> October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. *Off J Eur Communities* L327/1
- Fekete BM, Wisser D, Kroeze C, et al, 2010. Millennium Ecosystem Assessment scenario drivers (1970–2050): Climate and hydrological alterations. *Global Biogeochem Cycles* 24:GB0A12
- Haddeland I, Heinke J, Biemans H, et al, 2014. Water, human impacts, and climate change. *Proc Nat Acad Sci USA*, 111:3251-3256

- Hoff H, Falkenmark M, Gerten D, et al, 2010. Greening the global water system. *J Hydrol* 384:177–186
- Istituto nazionale di statistica, 2019. Utilizzo e qualità della risorsa idrica in Italia. ISBN:978-88-458-1976-6
- Katsanevakis S, Wallentinus I, Zenetos A, et al, 2014. Impacts of invasive alien marine species on ecosystem services and biodiversity: a pan-European review. *Aquat Invasions* 9:391–423
- Lehner B, Döll P, Alcamo J, et al, 2006. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Clim Change* 75:273–299
- Loos R, Marinov D, Sanseverino I, et al, 2018. Review of the 1<sup>st</sup> Watch List under the Water Framework Directive and recommendations for the 2<sup>nd</sup> Watch List, EUR 29173 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg
- O'Neill J, 2016. Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations. *The review on antimicrobial resistance*. London
- Pascolini-Campbell M, Reager JT, Chandanpurkar HA et al, 2021. A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019. *Nature* 593:543–547
- Preunkert S, McConnell JR, Hoffmann H, et al, 2019. Lead and antimony in basal ice from Col du Dome (French Alps) dated with radiocarbon: A record of pollution during antiquity. *Geophys Res Lett* 46:4953– 4961
- Robinson TP, Bu DP, Carrique-Mas J, et al, 2016. Antibiotic resistance is the quintessential One Health issue. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 110:377–380
- Russo F, Vazzoler M, Tagliapietra L, et al, 2014. Contaminazione da sostanze perfluoroalchiliche (PFAS) nelle acque ad uso umano – Documento di sintesi. Regione Veneto.
- Shiklomanov I, 1993. World fresh water resources. In *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Gleick PH ed., Oxford University Press, New York
- Shiklomanov IA and Rodda JC, 2003. World Water Resources at the Beginning of the 21st Century. In *International Hydrology Series*. Cambridge University Press, Cambridge
- United Nations, 2018. Ambient Water Quality, Piloting the monitoring methodology and initial findings for SDG indicator 6.3.2. UN Environment on behalf of UN-Water Progress. ISBN:978-92-807-3711-0
- World Resources Institute, 2015. Ranking the World's Most Water-Stressed Countries in 2040. Maddocks A, Young RS, Reig P eds.
- Zaggia L, Lorenzetti G, Manfé G et al, 2017. Fast shoreline erosion induced by ship wakes in a coastal lagoon: Field evidence and remote sensing analysis. *PLoS ONE* 12:e0187210



Foto di E.A. Fano

*"Trees are poems the earth writes upon the sky ..."*  
*Gli alberi sono poemi che la terra scrive nel cielo ...*

Kahlil Gibram

## 4. COME CONIUGARE LO SVILUPPO URBANO E LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE: SOLUZIONI SOSTENIBILI PER CITTÀ INSOSTENIBILI

Elisa Anna Fano

Dipartimento di Scienze della Vita e Biotecnologie, Università degli Studi di Ferrara

### 4.1. Introduzione

In Italia la questione infrastrutturale viene vista da più parti come uno dei motori dello sviluppo nazionale. Contemporaneamente assistiamo ad un lento, ma inesorabile processo di degrado dell'ambiente e del paesaggio, in buona parte dovuto a piani e progetti concentrati sull'opera e non sufficientemente attenti ai suoi rapporti con il contesto e alle trasformazioni in esso indotte, immediate e dilazionate nel tempo. La tragedia del Ponte Morandi a Genova è un chiaro esempio di quanto affermato.

Invece l'atteggiamento che dobbiamo avere è quello di integrare fra loro vari temi: il paesaggio, la biodiversità, lo sviluppo sostenibile, i servizi ecosistemici.

Sviluppo sostenibile significa, infatti, incontro ottimale tra ambiente, economia e società, ma dal punto di vista spaziale lo sviluppo sostenibile presuppone un incontro ottimale tra paesaggio, ecosistema e territorio (inteso come luogo delle decisioni di governo).

Le soluzioni basate sugli elementi naturali (*Nature Based Solutions*, NBS) dovrebbero diventare la strategia

tradizionale per la gestione del territorio: questa dovrebbe essere la via per tradurre in azioni il progetto *Next Generation UE*. L'immagine riportata qui di seguito (Fig. 4.1) è ripresa dal sito dell'Agenzia Europea per l'Ambiente e mostra esattamente il ruolo delle **soluzioni basate sugli elementi naturali**, le **soluzioni naturali**, per implementare l'equilibrio di un territorio.

Questo risulta particolarmente vero se dobbiamo agire sugli ecosistemi urbani, visto che fin dagli anni '60-'70 del XX Secolo è stato stabilito che le città sono a tutti gli effetti degli "ecosistemi" - sebbene siano stati costruiti dall'uomo a proprio uso - e sono assimilabili agli ecosistemi naturali. Per mantenere gli ecosistemi urbani e far vivere al meglio la

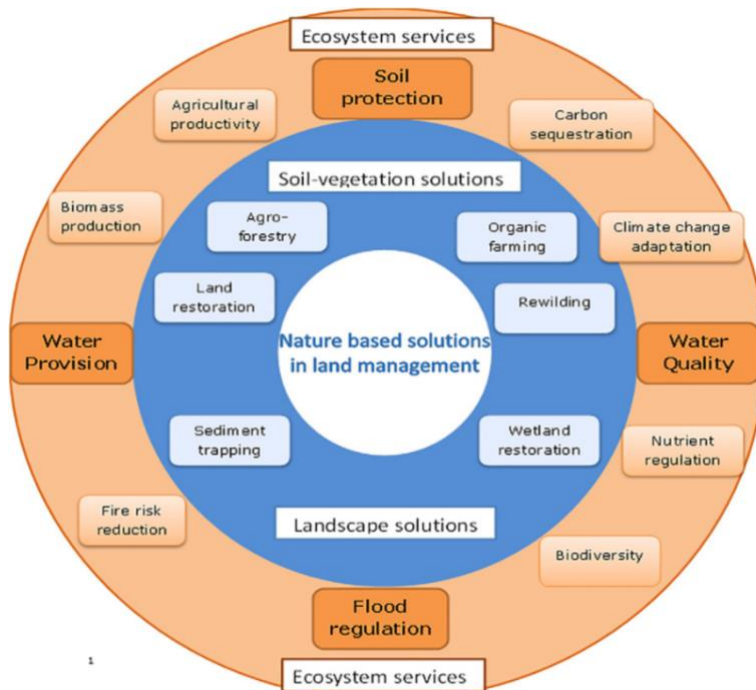


Figura 4.1 Ruolo delle soluzioni naturali (Nature Based Solutions) per implementare l'equilibrio di un territorio (da: European Environmental Agency, <https://www.eea.europa.eu/publications/nature-based-solutions-in-europe>)



popolazione umana che li abita, devono essere “gestiti” come fossero ecosistemi naturali (Duvigneaud, 1974; Wolman, 1975; Odum and Odum, 1976).

La pandemia del SARS Covid 19 dovrebbe averci insegnato che vivere in città sostenibili, per esempio con spazi verdi a disposizione di tutti, rende migliore la vita. La spinta europea è quanto mai forte per rendere le città sempre più sostenibili, utilizzando infrastrutture naturali.

Possiamo riconoscere due tipi di infrastrutture naturali, infrastrutture verdi ed infrastrutture blu, entrambe occupano delle *patch* (porzioni di territorio) all’interno del tessuto urbano, che sarebbe meglio fossero in comunicazione fra loro tramite un sistema paragonabile a **isole e corridoi che le connettono**. Le aree blu sono costituite da canali, fiumi, sponde marine o lacustri che sono all’interno dell’assetto urbano, mentre le aree verdi sono boschi urbani, parchi, orti urbani, strade alberate e anche tetti verdi.

#### 4.2. Infrastrutture verdi

Cosa possiamo considerare come **infrastrutture verdi** del paesaggio urbano e extraurbano? Qui di seguito sono elencate le più importanti:



*Figura 4.2 Esempio di Infrastrutture verdi in città (da: European Environment Agency Report No 01/2021; Foto ©Shutterstock/Goncharovaia)*

- aree protette (ad es. siti Natura 2000);
- ecosistemi sani e aree di alto valore naturalistico al di fuori delle aree protette come pianure alluvionali, zone umide, aree costiere, foreste naturali, ecc.;
- elementi del paesaggio naturale tra cui piccoli corsi d’acqua, macchie boscate, siepi, che possono fungere da corridoi verdi o aree d’appoggio per la fauna selvatica;
- *patch* di aree soggette a ripristino ambientale, interconnesse tramite corridoi naturalizzati, in modo da aumentare la superficie utilizzata dalle singole specie (animali e vegetali) per accrescersi, riprodursi, ecc., con l’obiettivo finale di favorire la diffusione di tutte le specie in tutte le aree, ma anche di agevolare la migrazione/dispersione di tali specie;
- elementi artificiali come gli **ecodotti** o gli **ecoponti**, i corridoi biologici che servono a favorire il trasferimento di specie (soprattutto animali) al di là di barriere insormontabili;
- zone multifunzionali dove incentivare

modalità di utilizzo del terreno che contribuiscano alla conservazione o al ripristino di ecosistemi sani, ricchi di biodiversità;

- aree in cui mettere in atto misure per migliorare la qualità ecologica generale;
- elementi urbani come parchi, pareti e tetti verdi, che ospitano la biodiversità e permettono agli ecosistemi di funzionare ed erogare i propri servizi creando collegamenti tra zone urbane, periurbane e rurali (Fig. 4.2);
- elementi che facilitano l’adattamento ai cambiamenti climatici e la riduzione del fenomeno stesso, come paludi, foreste alluvionali e torbiere (per la prevenzione delle inondazioni, l’immagazzinamento di acqua e l’assorbimento di CO<sub>2</sub>), e che offrono alle specie animali e vegetali uno spazio per reagire alle variazioni delle condizioni climatiche.

Vediamo qualche esempio pratico in città (alcuni anche nel BOX I) con vantaggi e svantaggi.

- a. **Prati naturali** - E' l'applicazione più comune che viene attuata sia nei giardini privati che in quelli pubblici, in cui il giardino viene impiegato anche come spazio ludico e per i suoi valori estetici. Il consumo di acqua per l'irrigazione è elevato soprattutto nei periodi primaverile ed estivo. Lo spessore di substrato relativamente elevato rende le sue prestazioni termodinamiche generalmente buone. Dovrebbe essere gestito con la "rasatura" solo parziale, anche soprattutto quando si parla di spazi urbani a prato, questo garantisce la presenza di piante in fiore che sono il supporto agli insetti impollinatori (Fig. 4.3).



*Figura 4.3 Esempio inglese di prato urbano con una parte del prato lasciato non tagliato per gli impollinatori (Foto di E.A. Fano)*

- b. **Prati a pascolo** – Nelle zone, soprattutto del Nord Europa, dove è molto attivo il pascolo bovino o ovino, molto spesso vasti appezzamenti, anche all'interno dei centri urbani, vengono lasciati a pascolo, e nel periodo estivo di giorno, le mandrie o le greggi, vengono lasciate nei parchi al libero pascolo. La sera gli animali vengono riportati nelle stalle o nei ricoveri (Fig. 4.4).



*Figura 4.4 Mucche al pascolo nei prati al centro di Cambridge, UK (Foto di E.A. Fano)*



- c. **Prati estensivi monospecifici** - E' la soluzione più diffusa nei paesi del Nord Europa. Il genere più utilizzato per questo tipo di applicazione è il *Sedum* (Fig. 4.5), caratterizzato da molte specie ad ampia distribuzione geografica - di preferenza in ambienti temperati e tropicali, ma che data la sua grande capacità adattativa con alcune specie ha raggiunto anche i territori più continentali e nordici. Il genere richiede minimi interventi di manutenzione e nessuna irrigazione. Nei climi di tipo mediterraneo i tappeti di *Sedum*



*Figura 4.5 Il Sedum è un genere di piante succulente che appartiene alla famiglia delle Crassulaceae; è diffuso praticamente in tutti i continenti, tranne che in Australia e Antartide (Foto di E.A. Fano)*

necessitano di una "irrigazione di soccorso nel periodo estivo" se si vuole che mantengano una copertura densa e di una manutenzione frequente poiché gli interstizi fra le piante di *Sedum* non vengono riempiti dal muschio (come nel nord Europa) e vi è una maggiore facilità di aggressione da parte di piante infestanti.

In ogni caso nei nostri climi, lo sviluppo di muschi non è generalmente da considerarsi come un evento positivo; per questo deve essere fatto un diserbo selettivo, a mano per estirpazione, rendendo la manutenzione più onerosa di quanto comunemente si creda.

impiegati insieme con altre tipologie (*Sedum* o prato naturale) per abbattere il vento, creando un microclima più favorevole, e per aumentare la diversità di specie. Molte specie possono vivere in spessori di substrato molto ridotti. Per le coperture intensive gli arbusti costituiscono uno degli elementi più rilevanti dal punto di vista compositivo. In questa categoria rientrano le piante aromatiche usate spessissimo anche nel passato (come nel **Giardino dei Semplici** di Firenze), che possono essere utilizzate per creare soluzioni geometriche come filari o altro. Le piante aromatiche sono particolarmente raccomandate per la loro resistenza alla siccità, per gli aspetti estetici e per i profumi che rilasciano nell'aria.

d. **Arbusti tappezzanti** - Possono essere utilizzati sia per coperture estensive che intensive. Per le estensive possono essere

- e. **Orti urbani** – Questi rappresentano un interessantissimo strumento di sostenibilità che viene spesso utilizzato anche per il forte e positivo impatto che può avere sul tessuto sociale, se non altro dal punto di



*Figura 4.6 Esempio di orto urbano a terra (Foto di E.A. Fano)*

vista psicologico, soprattutto se a curare l'orto sono persone anziane oppure persone con una qualche difficoltà (Fig. 4.6). Richiede un impianto tecnico specifico ma non particolarmente difficile da applicare per garantire una maggiore resistenza dell'elemento di impermeabilizzazione, che altrimenti rischierebbe di venir danneggiato durante le lavorazioni. Lo spessore di substrato è variabile, soprattutto in funzione del tipo di ortaggi che si prevede di coltivare. Possono essere costruiti direttamente a terra oppure in cassoni di legno. L'unica accortezza che si raccomanda al progettista è quella di verificare che il substrato previsto venga prodotto ricorrendo solo a

materie prime naturali e, in ogni caso, che non rappresenti un rischio per la salute.

#### BOX 4.I. – Qualche esempio qua e là nel mondo: Parigi

##### La Coulée verte

La *Promenade plantée* (Passeggiata alberata o Passeggiata fiorita), chiamata anche *Coulée verte René-Dumont*, è un lungo spazio verde adibito a passeggiata pedonale e parco pubblico nel XII arrondissement di Parigi, in Francia. Inaugurata nel 1988, è situata sul tracciato di una vecchia linea ferroviaria sopraelevata dismessa (la *ligne de Vincennes*) e si estende per 4,7 chilometri da Place de la Bastille fino al Boulevard périphérique, sulla Rive droite della Senna. La sua particolarità è quella di scorrere in mezzo alle abitazioni offrendo suggestivi scorci su alcune vie e piazze del centro della città.



Nelle immagini, il percorso della Promenade Plantée a Parigi (Foto di E.A. Fano)

##### Il Parc André Citroën



Il **Parc André Citroën** è un parco pubblico di 35 ettari, situato sulla parte sinistra della Senna nel XV arrondissement di Parigi. Il parco occupa il vecchio sito della fabbrica automobilistica Citroën, e deve il suo nome al fondatore della compagnia, André Citroën. Nel 1915, Citroën costruì sulla banchina della Senna la sua fabbrica, che ha operato fino al trasferimento degli stabilimenti fuori Parigi, nel 1972; la superficie coperta era di 24 ettari, che vennero interamente riqualificati sull'idea del team composto dall'architetto Patrick Berger e del paesaggista Gilles Clément, che avevano vinto il concorso per la riconversione delle aree, nel 1985. Il concorso prevedeva oltre alla realizzazione del vasto parco centrale, anche un'area residenziale con tremila abitazioni, un ospedale e alcuni edifici per uffici e attività commerciali. L'impostazione del concorso imponeva che i team di progettisti concorrenti fossero composti oltre che da

architetti, anche da paesaggisti, in modo da evitare un'impostazione prevalentemente architettonica, piuttosto che paesaggistica e naturalistica, del progetto. L'obiettivo del progetto è stato quello di creare un parco moderno su base geometrica, uno spazio aperto che rappresenti l'integrazione della natura in un paesaggio urbano moderno. Il parco è composto da un ampio spazio centrale, un rettangolo a semplice prato inglese, posto perpendicolarmente alla Senna, che scorre vicino al parco. Venne ufficialmente aperto nel 1992.



Nelle immagini, il Parc Citroën visto dall'alto, ripreso dalla mongolfiera che parte dal suo lato più vicino alla Senna; le fontane che si animano d'estate, dove i bambini giocano e si fanno il bagno (Foto di E.A. Fano)

- e. **Alberi o Siepi** - Queste piante richiedono in genere spessori di substrato consistenti e un grado elevato di manutenzione. Sono quindi essenzialmente legate alle coperture intensive. Queste strutture risultano



particolarmente efficaci quando si utilizza per il rinverdimento terreni mai edificati quindi terreni precedentemente naturali o semi-naturali abbandonati. È opportuno utilizzare sempre piante giovani per farle adattate al meglio alle condizioni locali, sia gli alberi sia gli arbusti è auspicabile che siano autoctoni e adatti al clima della zona geografica considerata. Siepi e alberi conferiscono un elevato valore estetico e paesaggistico alla zona soggetta al rinverdimento.

#### BOX 4.II – Qualche esempio qua e là nel mondo: New York

La **High Line Park** è un parco lineare di New York realizzato su una sezione in disuso della ferrovia sopraelevata *West Side Line*, che faceva parte dell'ampia rete delle *New York Central Railroad*. In particolare, utilizza la sezione meridionale in disuso della *West Side Line*, oltre 2 km, che corre lungo il lato occidentale di Manhattan. Fu inaugurata nel 2009.



Nelle immagini, un ponte sopraelevato, un passaggio fra i palazzi e, se fa troppo caldo, i turisti come Anna Fano e sua figlia trovano refrigerio mettendo i piedi dentro i canali che scorrono lungo la passeggiata. Foto di E.A. Fano.

#### 4.3. Servizi ecosistemici e Infrastrutture verdi

Vediamo ora quali sono i servizi ecosistemici che le **Infrastrutture verdi** offrono **gratuitamente** alla società umana:

- **Filtrazione dell'aria**, è stato dimostrato che il verde urbano cattura grandi quantità di anidride carbonica (tramite la fotosintesi clorofilliana), di ozono e di altri gas che alterano il clima e soprattutto di polveri sottili (Sebastiani et al., 2021a; Capotorti et al., 2020).
- **Regolazione del microclima** al livello della città, è stato dimostrato che il verde urbano, assorbendo grandi quantità di acqua, regola il valore dell'umidità dell'aria e abbatta di molti gradi l'isola di calore che si genera in città (Sebastiani et al., 2021b)
- **Riduzione del rumore**, filari di siepi e di alberi possono fungere da barriere antirumore naturali (Kumar et al., 2019).
- **Drenaggio dello scorrimento superficiale di acqua piovana**, l'intenso assorbimento dell'acqua da parte dell'apparato radicale di siepi ed alberi contrasta gli effetti dell'impermeabilizzazione del suolo, che risulta impenetrabile all'acqua quando è ricoperto di catrame; questo impedisce, soprattutto nell'eventualità di eventi di piogge intense ed improvvise, la trasformazione delle strade in fiumi, come abbiamo visto accadere recentemente in Centro Europa (Maragno et al., 2018).
- **Trattamento dei reflui**, le infrastrutture blu (fiumi, canali, laghetti e simili) con la loro capacità intrinseca a operare la decomposizione e la mineralizzazione del detrito organico, contribuiscono all'abbattimento del materiale organico che vi viene portato per effetto del dilavamento delle strade (Soana et al., 2021).
- **Benessere culturale, ricreativo e sportivo**, è inutile dire che in una giornata di bel tempo fare una passeggiata in mezzo al verde, stare seduti su una panchina in un parco o fare una corsa in un parco, è



molto più rilassante che non fare jogging per la strada alle 6 di mattina per evitare il traffico o stare seduti su una panchina in una strada assolata.

La Tabella 4.1 riassume le caratteristiche delle varie infrastrutture verdi che è possibile utilizzare in ambienti urbani, indicando le caratteristiche necessarie al loro mantenimento e alcuni dei servizi ecosistemici offerti.

*Tabella 4.1 Caratteristiche delle varie infrastrutture verdi che possono essere utilizzate in ambiente urbano, necessità di mantenimento e servizi ecosistemici erogati. Il coefficiente di deflusso (stimato per anno) dipende dal grado di piovosità e dalla permeabilità del sistema e varia fra 0 e 1; 0 = massima capacità di assorbimento dell'acqua piovana da parte del sistema*

| Caratteristiche                                         | Prato fruibile | Tappeto di sedum | Prato - pascolo | Tappeto di perenni | Arbusti e suffrutici | Orto       | Siepi ed alberi |
|---------------------------------------------------------|----------------|------------------|-----------------|--------------------|----------------------|------------|-----------------|
| Spessore substrato (cm)                                 | 15-25          | 8-10             | 12-15           | 10-15              | 15-35                | 25-35      | 35-100          |
| Peso (kg/m2)                                            | 220 – 400      | 120-160          | 160 – 300       | 120-300            | 220-550              | 300/550    | 450/1500        |
| Coefficiente deflusso                                   | 0,35-0,25      | 0,50-0,40        | 0,40-0,30       | 0,40-0,35          | 0,35-0,15            | 0,25-0,20  | <0,20           |
| Manutenzione                                            | Medio alta     | Medio bassa      | Bassa           | Medio bassa        | Medio bassa          | Alta       | Medio alta      |
| Fabbisogno idrico                                       | Alto           | Basso            | Basso           | Medio basso        | Medio basso          | Alto       | Alto            |
| Fruibilità                                              | Alta           | Nulla            | Bassa           | Bassa              | Media                | Media      | Alta            |
| Isolamento termico                                      | Alto           | Basso            | Medio           | Medio basso        | Alto                 | Alto       | Alto            |
| Abbattimento inquinanti (PM10 e 2.5, O3, NOx, CO2, SO2) | Medio          | Basso            | Medio           | Medio basso        | Medio                | Basso      | Alto            |
| Tasso di concimazione                                   | Alto           | Basso            | Basso           | Medio basso        | Medio                | Medio alto | Alto            |

#### 4.4. Tetti verdi

Se vogliamo copiare i Vichinghi possiamo ricorrere ai “tetti verdi”.



*Figura 4.7 Casa con tetto verde alla maniera dei Vichinghi, a Roskilde in Danimarca (Foto di E.A. Fano)*

Come si vede nella Figura 4.7, una casa nella città di Roskilde in Danimarca è coperta da vegetazione sul tetto - alla maniera dei Vichinghi - che usavano questa strategia per rendere le loro abitazioni più calde. Con la scomparsa del popolo dei Vichinghi, assorbiti dalle popolazioni del Nord Europa, questa abitudine venne dimenticata e venne rispolverata solo nel '900 quando, nel 1926, Charles-Edouard Jeanneret-Gris, meglio conosciuto come *Le Corbusier*, e il cugino Pierre Jeanneret scrissero un breve manifesto intitolato “**Cinque punti di una nuova architettura**” in cui erano trattati temi come le finestre orizzontali, per l’illuminazione omogenea degli interni, e i giardini pensili (i giardini sui tetti, *jardins suspendus*), a scopi domestici ma anche come isolamento del tetto. Secondo Le Corbusier, il giardino pensile era fondamentale per avvicinare la natura alle case e, all’interno delle città, poteva portare solo dei miglioramenti positivi. Le Corbusier ha sperimentato una varietà di condizioni spaziali distinte per i giardini pensili: potevano essere in uno

spazio sopraelevato al centro dell'edificio, in una terrazza esterna all'edificio o su un solarium sul tetto. Oggi, è stato confermato che le ricerche di Le Corbusier e i suoi lavori stavano andando nella giusta direzione. Un interessantissimo esempio attuale di tetto verde è quello del termovalorizzatore di Copenaghen (Fig. 4.8). Molti studi recenti, dedicati allo studio dell'impatto dei rumori, dell'inquinamento e del calore sui giardini pensili, sono arrivati alle seguenti conclusioni:

- il verde negli edifici permette la riduzione dell'inquinamento presente nell'aria fino ad un 20%;
- il livello dei rumori si riduce fino a 10 decibel, riducendo il rumore almeno della metà;
- ricoprire un edificio con la vegetazione permette anche di risparmiare una grossa quantità di energia, fino all'8% per il riscaldamento e il raffrescamento. Infatti, l'effetto **isola di calore** presente nelle aree urbane può far salire la temperatura fino ad un massimo di circa 12 °C rispetto alla media temperatura dell'ambiente circostante. Aumentando la presenza di alberi e di giardini, la temperatura si alzerà di al massimo di 2 °C rispetto alla media circostante e non ci saranno più sbalzi termici drastici.

Riassumendo i vantaggi di un tetto verde rispetto ad un tetto grigio (tetto tradizionale) possiamo dire:

- è un sistema più efficiente di drenaggio e riduzione della percolazione delle acque piovane,
- consente la riduzione dell'uso dell'energia,
- garantisce un adattamento al cambiamento climatico,
- determina la mitigazione dell'isola di calore urbano,
- crea una sinergia fra componente vegetale e possibile componente animale (insetti volatori, uccelli, ecc.) determinando un aumento della biodiversità,
- determina il miglioramento della qualità della aria circostante,
- può essere utilizzato per creare spazi ricreativi: a Copenaghen hanno costruito sul tetto del termovalorizzatore di ultimissima generazione in centro città, un tetto verde che d'estate assorbe calore, rimuove particolato atmosferico e riduce il *runoff* dell'acqua piovana, mentre di inverno si trasforma in una pista di sci,
- il tetto verde determina una maggiore durabilità della copertura rispetto al tetto tradizionale.



*Figura 4.8 Il tetto verde del termovalorizzatore al centro di Copenaghen con la pista da sci estivo e invernale (Foto ANSA 7 ott. 2019)*

In conclusione, se ci rendessimo conto che non siamo i “padroni del mondo” ma siamo una parte di esso, potremmo meglio comprendere e sfruttare tutti i servizi che il Capitale Naturale ci offre gratuitamente e

migliorare anche le performance degli “ecosistemi urbani” dei quali abbiamo costellato la Terra, senza renderci conto che la loro invivibilità si riflette prima di tutto sul nostro malessere.

#### 4.4. Bibliografia

Capotorti G, Bonacquisti S, Abis L, et al, 2020. More nature in the city. *Plant Biosyst* 154(6):1003–1006

Duvigneaud P (Ed), 1974. *Études Écologiques de l'Écosystème Urbain. Bruxellois*. Mémoires de la Société Royale de Botanique de la Belgique. Meise, Belgium.

Kumar P, Druckman A, Gallagher J, et al, 2019. The nexus between air pollution, green infrastructure and human health. *Environ Internat* 133(A):105181

Maragno D, Gaglio M, Robbi M, et al, 2018. Fine-scale analysis of urban flooding reduction from green infrastructure: An ecosystem services approach for the management of water flows. *Ecol Model* 386:1–10

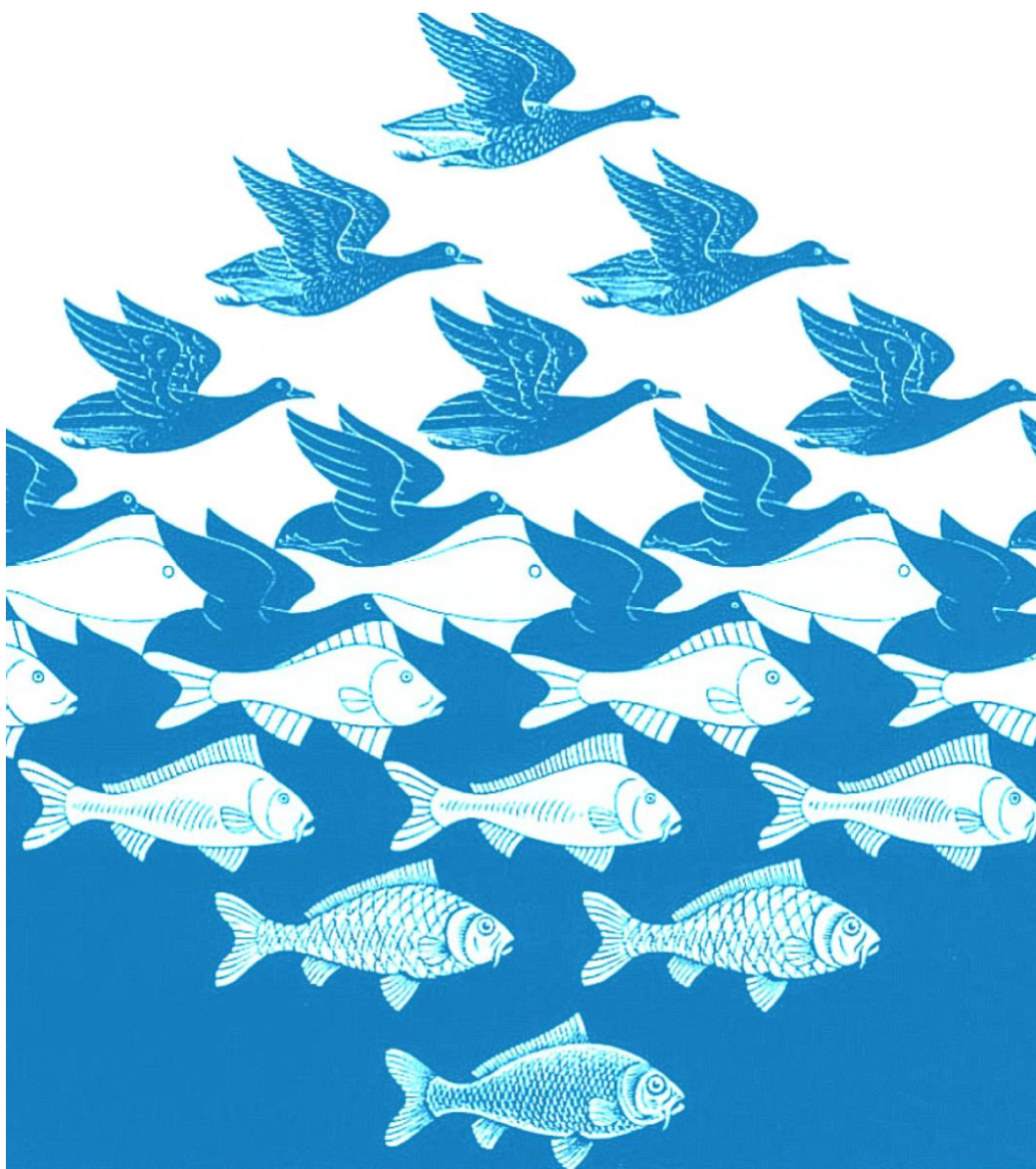
Odum HT and Odum EC, 1976. Energy basis for man and nature. Osti.gov, United States, Web

Sebastiani A, Buonocore E, Franzese PP, et al, 2021a. Modelling air quality regulation by green infrastructure in a Mediterranean coastal urban area: The removal of PM<sub>10</sub> in the Metropolitan City of Naples (Italy). *Ecol Model* 440:109383

Sebastiani A, Marando F, Manes F, 2021b. Mismatch of regulating ecosystem services for sustainable urban planning: PM<sub>10</sub> removal and urban heat island effect mitigation in the municipality of Rome (Italy). *Urban Forestry & Urban Greening* 57:126938

Soana E, Fano EA, Castaldelli G., 2021. The achievement of Water Framework Directive goals through the restoration of vegetation in agricultural canals. *J Environm Manag* 294:113016

Wolman A, 1965. The metabolism of cities. *Sci Am* 213:179-190



da: Cielo e acqua, di Maurits Cornelis Escher, modificata

*“augescunt aliae gentes, aliae minuuntur,  
inque brevi spatio mutantur saecula animantum  
et quasi cursores vitae lampada tradunt.”*

*Aumentano alcune specie, altre declinano,  
e in breve tempo s’alternano le generazioni dei viventi,  
e come corridori si passano la fiaccola della vita.*

Lucrezio, De Rerum Natura, 2: 77-79



## 5. BIODIVERSITÀ, SERVIZI DEGLI ECOSISTEMI E CAMBIAMENTI GLOBALI

**Marino Gatto**

Professore emerito di Ecologia, Politecnico di Milano

### 5.1. Che cosa è la biodiversità

L'impressionante diversità delle forme viventi presenti sul nostro pianeta (biodiversità) e la loro distribuzione sul globo terracqueo hanno sempre destato la meraviglia e la curiosità di molti scienziati e appassionati naturalisti. La **storia della biodiversità** coincide con la storia della vita sulla Terra: il nostro pianeta ha più di 4 miliardi e mezzo di anni, ma per quasi un miliardo di anni la Terra è rimasta priva di vita. Il primo organismo è probabilmente comparso circa 3 miliardi e settecento milioni di anni fa nelle profondità oceaniche con importanti conseguenze sulla fisica del nostro pianeta: non dobbiamo infatti dimenticare che la crosta terrestre e l'atmosfera, così come le conosciamo, sono state conformate dagli organismi in continua evoluzione.

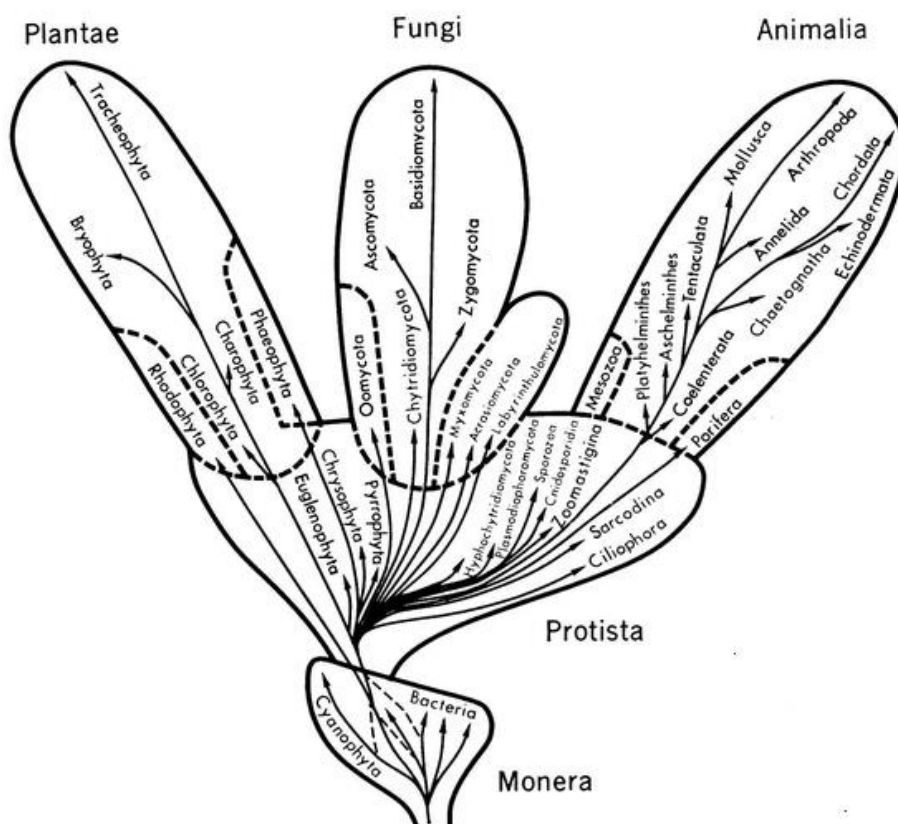
L'atmosfera terrestre era molto diversa: non conteneva praticamente ossigeno, ma c'era molta anidride carbonica. Circa 2 miliardi e 500 milioni di anni fa la graduale evoluzione delle specie marine ha portato alla comparsa di specie in grado di compiere la fotosintesi, cioè di assorbire anidride carbonica, incorporare il carbonio per la produzione di biomassa e rilasciare ossigeno. Quando l'ossigeno ha saturato gli oceani, ha cominciato a filtrare nell'atmosfera. La sua concentrazione in atmosfera è quindi cresciuta fino ai valori attuali (circa il 21%! ). Sotto l'azione dei raggi ultravioletti, che bombardavano la superficie del nostro pianeta, impedendo lo sviluppo della vita sulle terre emerse, si è formato lo strato di ozono stratosferico, che scherma la maggior parte delle radiazioni solari dannose. Le specie hanno così potuto evolversi anche sulle terre emerse aumentando la biodiversità del pianeta. La nostra specie *Homo sapiens* nell'orologio della vita è comparsa solo all'ultimo secondo, circa 150.000 anni fa.

La diversificazione della vita ha come motore il fenomeno della ricombinazione genetica, che è essenzialmente casualità, ma se essa fosse l'unica causa della diversificazione, non osserveremmo strutture organizzate e coerenti nella biosfera terrestre. Invece, l'organizzazione e strutturazione della vita è configurata dal **processo di selezione naturale**, messo in luce da Darwin (1859) nel famoso libro *Sull'origine delle specie*. Dal momento in cui la vita comparve sul nostro pianeta gli organismi sono andati perciò evolvendosi, producendo così un'incredibile ramificazione e diversificazione delle forme viventi, come dimostrato dai sistemi di classificazione tassonomica (Figura 5.1). Inoltre, non dobbiamo dimenticare che nel corso della diversificazione della vita l'evoluzione dei vari organismi è stata vincolata dalla presenza di altri organismi che con essi interagivano ecologicamente: perciò di fatto l'evoluzione è co-evoluzione.

Genetica e tassonomia non sono sufficienti da sole a definire completamente la biodiversità. In realtà si possono distinguere **gerarchie di diversità biologica**. A livello più basso abbiamo la diversità dei genomi all'interno di una medesima specie, a livello intermedio la diversità delle specie o di altre classi tassonomiche all'interno di un ecosistema, e a livello ancora più alto la diversità degli ecosistemi all'interno di un paesaggio o di un bioma (cioè di un territorio caratterizzato dalle medesime condizioni meteorologiche). Tradizionalmente, la diversità delle specie all'interno di un ecosistema (detta anche  **$\alpha$ -diversità**) è il concetto più comunemente usato, ma c'è un crescente

consenso tra i biologi che la diversità delle funzioni svolte dalle specie all'interno di un ecosistema e la diversità di habitat all'interno di un paesaggio giochino un ruolo molto importante e meritino molta più attenzione di quella che è stata loro rivolta fino ad ora (a questo fine si introducono altre dimensioni della diversità ecologica, indicate come diversità  $\beta$  e  $\gamma$ ).

Se poi consideriamo il singolo ecosistema, possiamo, per esempio, prestare attenzione alla sua **struttura trofica** (cioè, chi si nutre di che cosa?) distinguendo produttori primari (piante), erbivori, carnivori e decompositori. Molto spesso è ragionevole studiare la diversità delle specie all'interno di ogni livello trofico o di ogni gruppo funzionale di organismi, cioè quelli che svolgono un ruolo analogo nell'ecosistema. Tuttavia il disegno globale della diversità dell'ecosistema può essere colto solo accoppiando in questi studi l'analisi della struttura della rete trofica con quella dei **flussi di energia e di materia** all'interno di tale rete.

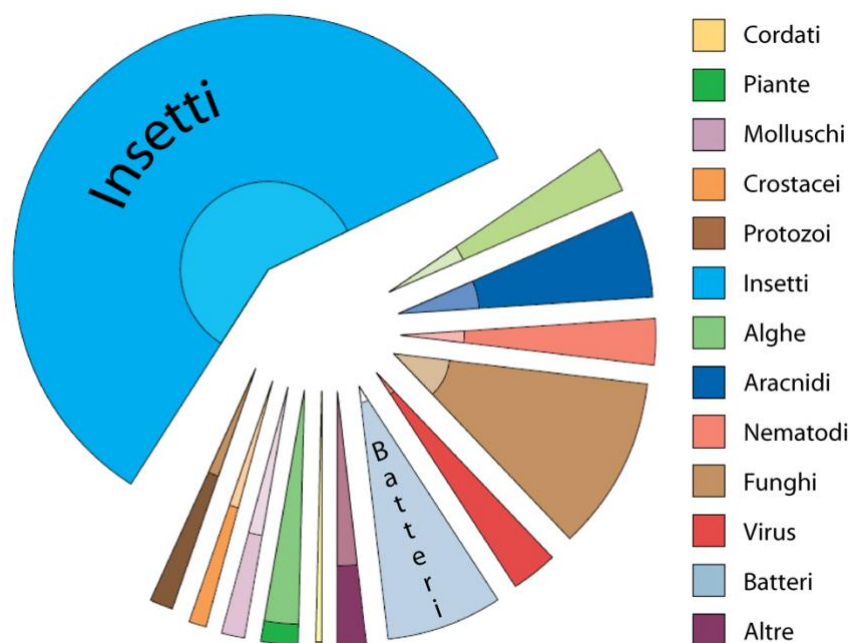


**Figura 5.1.** La ramificazione e diversità della vita come risultante dalla classica classificazione a 5 regni. Questo sistema tassonomico è basato su 3 livelli di organizzazione: organismi procarioti (regno delle monere), organismi unicellulari eucarioti (regno dei protisti) e organismi eucarioti multicellulari (regni delle piante, dei funghi e degli animali; modificato da: Whittaker, 1969)

## 5.2. Configurazione e distribuzione della biodiversità

La domanda più semplice che ci possiamo porre è quanto conosciamo, in termini puramente descrittivi, della biodiversità del nostro pianeta. La risposta più sincera è “molto poco”. Non sappiamo nemmeno quante specie siano ospitate dalla Terra. Le specie descritte finora sono circa 1,8 milioni, ma si stima che il numero totale di specie presenti sul pianeta sia molto maggiore. Metodi statistici forniscono stime molto variabili, fra 3 e 30 milioni. Uno degli studi più attendibili (Mora et al 2011) valuta in circa 8,7 milioni il numero totale di specie eucariotiche (esclusi quindi i procarioti, cioè batteri e archea), delle quali circa 2,2 milioni sono specie marine. Inoltre, la conoscenza della biodiversità totale non è la stessa per i diversi gruppi tassonomici (vedi Figura 5.2):

è molto buona per quanto riguarda uccelli e mammiferi ma, per esempio, molto bassa per quanto riguarda i batteri. Gli insetti sono i veri dominatori della Terra perché si sono diversificati in un incredibile numero di specie.



*Figura 5.2. Come la biodiversità della Terra è probabilmente suddivisa tra diversi gruppi tassonomici. L'area di ciascuna fetta della torta rappresenta il numero di specie che viene stimato esistere in ciascun gruppo; i settori più interni rappresentano quelle specie che sono state effettivamente catalogate (modificato da: Purvis et al., 2000)*

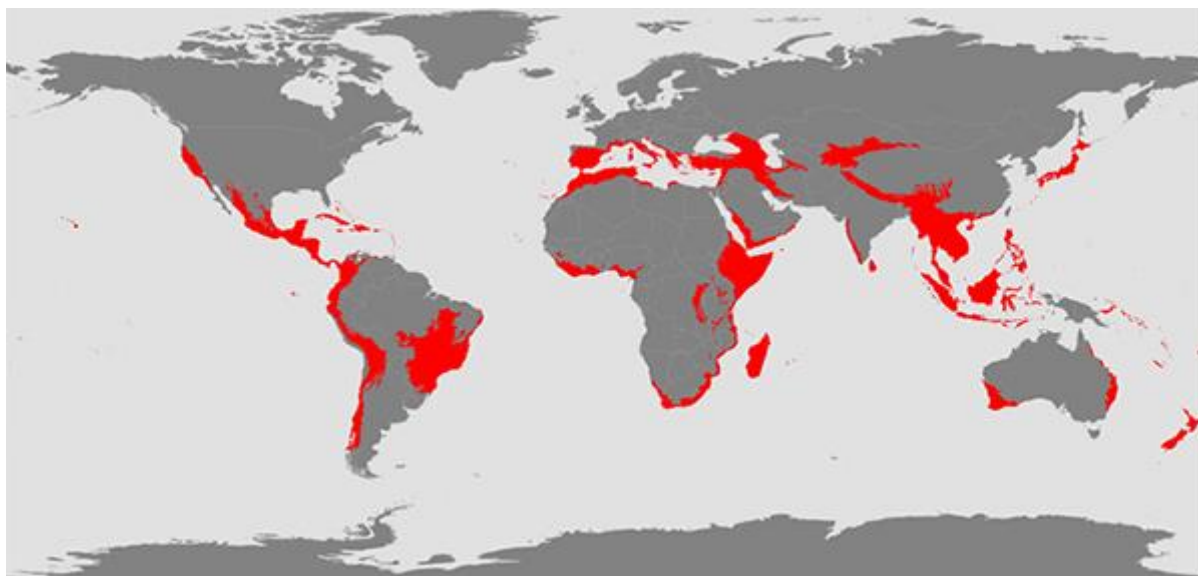
La biodiversità non è distribuita uniformemente sulla Terra. Ci sono alcune regioni che contengono un numero molto alto di specie endemiche, ovvero presenti solo in certe particolari collocazioni geografiche (Figura 5.3). Queste regioni sono state chiamate **punti caldi (hotspot) di biodiversità** da Norman Myers et al. (2000) in un articolo ritenuto fondamentale per l'ecologia della conservazione. Ovviamente, i punti caldi sono molto importanti perché richiedono una particolare attenzione nelle politiche globali che vengono proposte per salvaguardare la biodiversità del nostro pianeta. È importante notare come l'Italia, con la sua grande diversità di paesaggi e di ecosistemi, rappresenti uno di questi *hotspot* e meriti quindi adeguate politiche di conservazione e gestione del suo patrimonio biologico.

### 5.3. La perdita di biodiversità

Il problema della perdita presente e futura di biodiversità è spesso confusa da alcune persone con i "naturali" decrementi di biodiversità che si sono verificati sulle scale di tempo evoluzionistiche. La nostra Terra ha sempre sperimentato perdite di biodiversità fin dall'origine della vita. Per la precisione, sulla scala geologica ci sono stati cinque periodi di estinzione di massa, denominati dalla corrispondente era geologica, seguiti da nuove radiazioni di specie. Attualmente siamo probabilmente all'inizio di una sesta estinzione, quella olocenica, dovuta all'azione dell'uomo. Le cause delle passate estinzioni non sono ben conosciute. Invece, la causa dell'imminente sesta estinzione è ben conosciuta poiché è l'azione dell'uomo. Ecco perché il premio Nobel Paul Crutzen ha denominato l'era presente **Antropocene** (Crutzen, 2002).

Quando gli scettici sostengono che le specie si sono sempre estinte e che non dovremmo preoccuparci delle estinzioni che si stanno verificando, compiono un errore molto comune: non prestano attenzione alle scale temporali e spaziali. Infatti, mentre il tempo medio di vita di una

specie, che viene stimato sui reperti fossili, era dell'ordine di qualche milione di anni, dai tassi di estinzione documentati nel secolo scorso il tempo medio di vita di una specie è stimato essere dell'ordine di qualche decina di migliaia di anni soltanto, quindi con una diminuzione di diversi ordini di grandezza. Dai tassi di estinzione correnti si ricava, sempre con metodi statistici, un tempo di vita medio residuo di qualche secolo per molti uccelli e mammiferi. Il deterioramento della biodiversità ha un forte impatto sul **funzionamento degli ecosistemi** (Cardinale et al., 2012) che, come vedremo, forniscono gratuitamente all'umanità innumerevoli servizi.



*Figura 5.3. Distribuzione degli hotspot di biodiversità secondo la proposta di Norman Myers e colleghi (modificato da: Myers et al., 2000).*

Generalmente quando si parla di specie estinte o a rischio di estinzione il pensiero va a specie esotiche dal fascino indiscusso quali il rinoceronte nero, l'elefante africano, il panda gigante, il dodo. Tuttavia, anche nel nostro territorio nazionale molte sono le specie attualmente a rischio di estinzione oppure che lo sono state nel passato. Tra queste vale la pena di ricordare i casi più conosciuti: il lupo, la lince, l'orso bruno, lo stambecco, il cervo sardo, la foca monaca, la lontra, l'aquila reale, il gipeto, il grifone, il gallo cedrone, la starna. Esempi meno noti sono quello del gobbo rugginoso, una piccola anatra tuffatrice: estinto in tutta l'Europa orientale, in Italia e in Corsica, ne esisteva ancora negli anni '70 una piccola popolazione in Spagna, che fortunatamente è stata posta sotto protezione e si sta riprendendo. Oppure quello dell'aquila di mare, un grande uccello rapace della famiglia degli Accipitridi, che in Italia si riproduceva in Sardegna, dove si è estinta come nidificante nel 1956.

#### *5.4. Le cause di estinzione*

Quali sono i **fattori principali** che portano le specie all'estinzione? Sono state fatte diverse statistiche, per quanto approssimative. La causa principale delle estinzioni finora avvenute è il cambiamento di uso del suolo, che porta alla degradazione e distruzione degli habitat. Ulteriori cause sono l'introduzione di specie esotiche, il prelievo di animali e piante e l'inquinamento. Ci sono molti esempi di **degradazione degli habitat**, ma il più impressionante ai nostri giorni è quello della distruzione delle foreste tropicali. Mentre le foreste dell'Europa sono state distrutte e frammentate nel corso di secoli, per costruire i paesi e le città che fanno parte della nostra cultura, le foreste tropicali vengono distrutte su scale temporali molto più brevi (decine di anni) e fondamentalmente per produrre risorse per quelli che noi chiamiamo i paesi sviluppati. Spesso la frammentazione è legata alla costruzione di strade come nel caso della rete stradale transamazzonica. A volte si ha una



conversione di uso del suolo a favore di coltivazioni agricole intensive, come la soia, prevalentemente destinate all'esportazione. Per questioni strutturali delle foreste tropicali (come la limitatezza dello strato del suolo) la distruzione è sfortunatamente molto rapida e crea un innaturale mosaico di frammenti territoriali a diversa scala ([https://www.nasa.gov/mission\\_pages/landsat/news/40th-top10-amazon.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/news/40th-top10-amazon.html)).

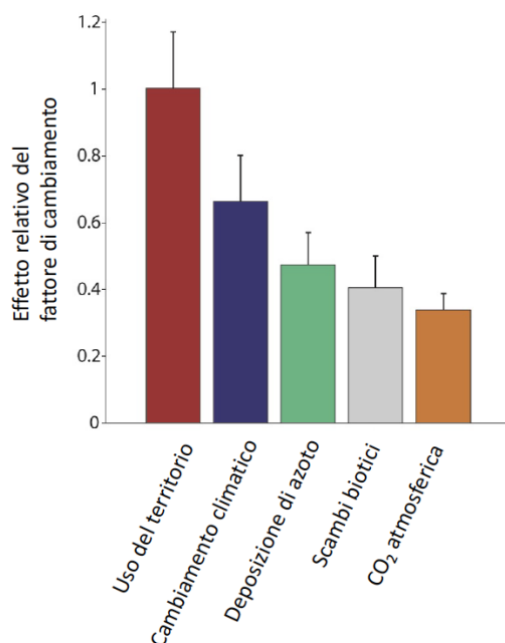
Una causa importante di estinzione, ma poco conosciuta dal grande pubblico, è l'**introduzione di specie non indigene**, cioè specie che non si sono evolute nell'ambiente in cui vengono introdotte e quindi non si sono adattate ad esso né si sono co-evolute con le specie indigene. Spesso hanno un vantaggio competitivo sulle specie autoctone o portano parassiti e malattie, a cui queste non si sono adattate, o agiscono come predatori nuovi verso cui le specie autoctone sono indifese. Gli esempi di queste specie aliene abbondano. Lo scoiattolo grigio (*Sciurus carolinensis*) è stato introdotto dal Nordamerica in Gran Bretagna verso la fine del 1800: nel nuovo ambiente ha pochi predatori naturali ed è più grosso e più atletico della specie autoctona, cioè dello scoiattolo rosso (*Sciurus vulgaris*). La specie americana ha soppiantato quasi dovunque in Gran Bretagna quella europea, il cui areale di distribuzione è ormai ridotto all'isola di Anglesey e a parte della Scozia settentrionale. Lo ctenoforo marino *Mnemiopsis leidyi*, nativo delle coste atlantiche occidentali, è stato introdotto accidentalmente nel Mar Nero nel 1980, probabilmente con le acque di zavorra delle navi mercantili. Poiché *M. leidyi* è un carnivoro che si nutre di uova e larve di pesci pelagici, ha provocato una drammatica diminuzione della pesca nel Mar Nero, soprattutto dell'acciuga *Engraulis encrasicolus*, con notevoli danni economici per i paesi che si affacciano sul Mar Nero. Il pesce persico del Nilo (*Lates niloticus*) è stato introdotto nel Lago Vittoria in Africa Centro-orientale per dare un impulso all'industria della pesca locale. Essendo un grande predatore, ha provocato l'estinzione totale o parziale di più di 200 delle specie di pesci ciclidi che si trovavano solo nel grande lago africano.

Un'ulteriore causa di minaccia per molte specie è costituita dall'**eccessivo prelievo ittico e venatorio** che può costituire la causa determinante dell'estinzione oppure può aggravare situazioni già a rischio per via della degradazione degli habitat. Le specie più minacciate dalla caccia e dalla pesca sono, oltre quelle la cui carne è commestibile (tipicamente la selvaggina e gli *stock* ittici), anche quelle la cui pelle e le cui corna, tessuti e organi hanno un alto valore commerciale (come l'elefante, dalle cui zanne si ricava l'avorio, o il rinoceronte, al cui corno vengono attribuite inesistenti proprietà afrodisiache). La caccia e la pesca non compromettono sempre la diversità di un ecosistema ma divengono una seria minaccia di estinzione se una specie viene sfruttata eccessivamente, cioè ogniqualvolta il tasso di prelievo è maggiore del tasso di rinnovamento della specie.

Grande importanza assume anche l'**inquinamento**. Le attività umane hanno, infatti, alterato profondamente i cicli biogeochimici fondamentali per il funzionamento globale dell'ecosistema. Fonti d'inquinamento sono, oltre alle industrie e agli scarichi civili, anche le attività agricole che, impiegando insetticidi, pesticidi e diserbanti, alterano profondamente i suoli. A questo proposito va ricordato il fenomeno della **biomagnificazione**, che consiste nell'amplificazione della concentrazione di sostanze tossiche all'interno delle reti trofiche, dai livelli più bassi a quelli più elevati. Conseguenza di questo processo è l'accumulo di notevoli quantità di sostanze chimiche nocive (in particolare sostanze chimiche persistenti e metalli pesanti) negli organismi che si trovano in cima alla rete trofica (rapaci, grandi carnivori).

### 5.5. Le minacce future

Oltre ad analizzare le ragioni della perdita di biodiversità nel passato possiamo anche chiederci quali saranno le principali cause di perdita di biodiversità nel futuro. Secondo un gruppo di ricercatori guidato da Osvaldo Sala dell'Università dell'Arizona (Sala et al., 2000), le cause più importanti di impatto sulla biodiversità da adesso al 2100 saranno quelle riportate e confrontate in Figura 5.4. La causa principale sarà ancora il **cambiamento di uso del suolo**, che porta alla degradazione e distruzione degli habitat, seguita dal **cambiamento climatico globale (CCG)**, dall'**alterazione del ciclo dell'azoto**, dall'**introduzione di specie esotiche** (scambi biotici), dall'**aumento dei gas serra**, in particolare dell'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), che agiscono non solo sul CCG, ma anche direttamente, per esempio attraverso l'**acidificazione delle acque oceaniche**. Se consideriamo che il cambiamento climatico globale è dovuto principalmente all'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> e di metano, possiamo dire che **l'aumento di gas serra sarà perciò in futuro la causa principale diretta e indiretta di perdita di biodiversità**, seguita dal cambiamento di uso del suolo in ambiente terrestre e dall'aumento della pressione antropica (pesca e urbanizzazione costiera) in ambiente marino. Gli effetti dei CCG sono oggi particolarmente gravi nei biomi artico, boreale ed alpino, dove il clima è il principale regolatore dell'ecosistema, e saranno sempre più importanti tra 50 anni e oltre nel modificare gli ecosistemi.



*Figura 5.4. Stima per l'anno 2100 dell'effetto relativo sulla biodiversità dei principali fattori di cambiamento; le barre sottili rappresentano la variabilità dell'impatto nei diversi biomi terrestri (modificato da: Sala et al., 2000).*

Il rospo dorato (*Bufo periglenes*) delle montagne del Costa Rica è probabilmente la prima specie che viene ufficialmente dichiarata estinta a causa del CCG. Si stima che il 67% delle 110 specie di rane arlecchino (*Atelopus* sp.), che sono endemiche negli ambienti tropicali americani siano andate incontro al medesimo destino. Altre specie sono sfuggite al CCG muovendosi verso i poli o verso quote più elevate. Altre ancora, con possibili effetti sulla salute dell'uomo, come le zanzare anofeli che portano la malaria, hanno ampliato la loro distribuzione geografica trovando condizioni favorevoli in ambienti che diventano più caldi. Negli oceani le barriere coralline sono gli ecosistemi che albergano la maggior parte della biodiversità. Esse sono molto sensibili alle variazioni di temperatura perché possono sopravvivere solo all'interno di un ristretto intervallo di temperature. Si sono già verificati diversi episodi di sbiancamento dei coralli (una 'malattia' dei coralli),

certamente legati alla crescente temperatura delle acque oceaniche, come documentato dal NOAA-NESDIS (*National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite Data and Information Service*) e dall'UNEP-WCMC (*United Nations Environment Program - World Conservation Monitoring Centre*).

#### 5.6. Il valore della biodiversità e i servizi degli ecosistemi

Una domanda che viene frequentemente posta riguarda i motivi per i quali dovremmo preservare la biodiversità: “E’ davvero così preziosa? Non è forse uno spreco di denaro, un lusso che si possono permettere solo i paesi più ricchi?” Chiaramente, rispondere a questo tipo di domande richiede non solo competenze scientifiche, ma anche **considerazioni di natura socio-economica ed etica**. A questo proposito vanno fatte due considerazioni: la prima è che l’etica va sempre più spostandosi da un paradigma solamente individuale (non nuocere direttamente a ciascuno dei nostri simili) verso un paradigma che include gli aspetti ambientali (non nuocere anche a specie non umane e all’ambiente in cui queste specie e l’uomo convivono); la seconda è che la biodiversità di cui si parla non è un valore generico. Abbiamo precedentemente visto che le specie si sono sempre evolute e si sono adattate ai grandi cambiamenti cui la Terra è stata sottoposta in tempi geologici. Anche tutte le specie di ominidi progenitori della nostra specie (*Homo sapiens*) si sono evolute e si sono adattate nel corso di qualche milione di anni. Gli ecologi non sono preoccupati che la vita scompaia dalla faccia della Terra, che la biodiversità intesa astrattamente sia in pericolo, sono invece preoccupati che questa biodiversità a cui l’uomo si è adattato possa cambiare grandemente e non fornire più ad *Homo sapiens* tutte quelle risorse e quei servizi che l’uomo è abituato a trarre gratuitamente dalla natura. Le due considerazioni si parlano l’una con l’altra, poiché la necessità del cambio di paradigma etico è giustificata dalla necessità di preservare la funzione che gli ecosistemi svolgono per l’umanità tutta.

#### 5.7. I servizi degli ecosistemi

Il **valore degli ecosistemi** è molto grande ed è di varia natura. Le scienze sociali operano una distinzione tra valore diretto (quello che possiamo ricavare direttamente dagli organismi, ovvero cibo, fibra, legname, ecc.), valore indiretto (legato ai servizi che gli ecosistemi rendono gratuitamente all’umanità) e valore intrinseco (estetico, spirituale, ecc.). Mentre il valore diretto della biodiversità non ha bisogno di particolari commenti, è bene soffermarsi sul valore indiretto. A questo proposito cominciamo col dare un esempio molto chiaro del valore dei servizi forniti dagli ecosistemi (Fernando et al., 2005; Beck et al., 2018). Durante lo tsunami che colpì l’Asia Orientale nel dicembre del 2004, nelle aree dello Sri Lanka dove la barriera corallina era ancora intatta, l’enorme onda penetrò solo 50 metri sulla terraferma, senza causare alcuna morte. Sfortunatamente questo non accadde a pochi chilometri di distanza, dove le barriere coralline erano state illegalmente distrutte, lì le morti si contarono a centinaia.

I **servizi forniti dagli ecosistemi** sono innumerevoli. La seguente lista di benefici è certamente incompleta, ma può fungere da guida:

- gli ecosistemi moderano gli eventi meteorologici estremi, contribuendo alla stabilità climatica;
- mitigano gli impatti di piene e di siccità;
- proteggono i corsi d’acqua e le coste dall’erosione;
- mantengono la stabilità dei pendii attraverso la vegetazione radicata;
- riciclano i sali nutrienti;
- purificano l’aria e l’acqua;
- depurano i reflui e decompongono i rifiuti;
- controllano gli organismi nocivi per l’agricoltura;

- regolano gli organismi portatori di malattie;
- disperdono i semi e impollinano la vegetazione agricola e naturale;
- generano e conservano i suoli e rigenerano la loro fertilità.

Mentre agli inizi degli anni 1970 c'era una crescente consapevolezza che la valutazione ambientale è tanto necessaria quanto la valutazione economica (basti pensare alla legislazione sulla VIA, la **Valutazione di Impatto Ambientale**, che fu introdotta in Nord America e in Europa), in tempi più recenti ha ripreso forza la vecchia logica della valutazione economica monetaria che prevale su qualsiasi altra considerazione. Questo nuovo contesto portò l'ecologo Robert Costanza a condurre un ampio studio (Costanza et al., 1997) di valutazione puramente monetaria delle risorse e dei servizi che la biodiversità ci fornisce. Gli autori stimarono che questi servizi valevano 33 trilioni di dollari USA (per dare un'idea dell'imponenza di questa cifra si consideri che il PIL, prodotto interno lordo, dell'intera terra valeva allora 18 trilioni di dollari). Anche se questo approccio è stato criticato (Gatto e De Leo, 2000) poiché non considera tutti quei benefici a cui è impossibile dare un valore puramente monetario, bisogna ammettere che i risultati ottenuti dovrebbero convincere anche l'economista più scettico e più tradizionalista. In altre parole, Costanza e colleghi dimostrarono che conservare la biodiversità si ripaga da sé, poiché i servizi degli ecosistemi valgono almeno due volte il PIL globale. Più recentemente Costanza et al. (2014) hanno aggiornato le stime monetarie valutando che il solo cambiamento di uso del suolo abbia provocato tra il 1997 e il 2011 una perdita di 4,3 trilioni di dollari l'anno.

Occorre sottolineare che ogni volta che perdiamo una specie possiamo avere perso per sempre, per esempio, anche il rimedio ad una delle malattie che devastano l'umanità. Di fatto l'80% della popolazione umana basa le proprie cure su principi attivi di origine naturale: dei 150 farmaci più prescritti negli Stati Uniti, 118 derivano da organismi viventi, 74% da piante, 18% da funghi, 5% da batteri e 3% da un vertebrato (un serpente). Nove dei 10 farmaci più usati derivano da prodotti naturali vegetali. Più di 100.000 differenti specie di animali, tra cui pipistrelli, api, mosche, farfalle e uccelli, forniscono gratuitamente i loro servizi di impollinatori. Un terzo del cibo consumato dagli uomini viene da piante impollinate naturalmente. Il valore dei servizi di impollinazione naturale a livello globale è stato stimato essere più di 350 miliardi di dollari all'anno (Lautenbach et al., 2012). Sono state condotte diverse analisi costi-benefici riguardanti i servizi degli ecosistemi e tutte hanno mostrato che non è vero che la conservazione della biodiversità sia troppo costosa per i paesi in via di sviluppo. In realtà, i costi della conservazione sono largamente compensati dai benefici.

## 5.8. Bibliografia

- Beck MW, Losada IJ, Menéndez P, et al, 2018. The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nature Communications* 9: 2186.
- Cardinale BJ, Duffy JE, Gonzalez A, et al, 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486: 59-67.
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253-260.
- Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al, 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26: 152-158.
- Crutzen PJ, 2002. Geology of mankind. *Nature*, 415:23.
- Darwin C, 1859. *On the Origin of Species*. John Murray, London, U.K.



- Fernando HJS, Mendis SG, McCulley JL, et al, 2005. Coral poaching worsens tsunami destruction in Sri Lanka. *EOS, Transactions American Geophysical Union* 86:301–304.
- Gatto M, De Leo GA, 2000. Pricing biodiversity and ecosystem services: The never ending story. *BioScience*, 50:347-355.
- Lautenbach S, Seppelt R, Liebscher J., et al, 2012. Spatial and temporal trends of global pollination benefit. *PLoS One*, 7(4), e35954.
- Mora C, Tittensor D P, Adl S, et al, 2011. How many species are there on Earth and in the ocean? *PLoS Biology* 9(8):e1001127.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, et al, 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403:853-858.
- Purvis A, Hector A, 2000. Getting the measure of biodiversity. *Nature*, 405:212-9.
- Sala O E, Chapin III FS, Armesto JJ, et al, 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287:1770-1774.
- Whittaker R H, 1969. New concepts of kingdoms of organisms: evolutionary relations are better represented by new classifications than by the traditional two kingdoms. *Science*, 163: 150-160.



da: Migliore et al., 2017

"I've seen things you people wouldn't believe ..."  
Ho visto cose che voi umani ...

Dal monologo del replicante Roy Batty, nel film Blade Runner (1982)

## 6. ECOLOGY IS EVERYWHERE! LE SUCCESSIONI ECOLOGICHE DEI BIODETERIOGENI DELLE PERGAMENE ANTICHE

**Luciana Migliore**

Dipartimento di Biologia, Università degli Studi di Roma 'Tor Vergata'

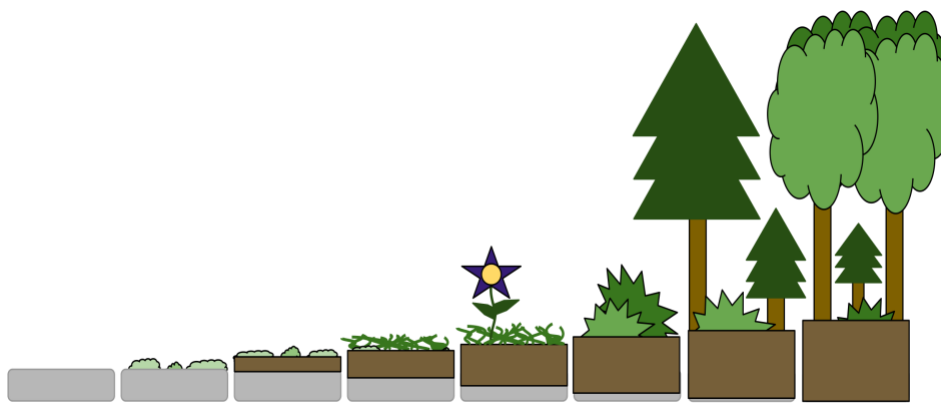
Quella che sto per raccontare è un'avventura divertente e interessante che travalica le discipline, oltrepassa gli steccati, una caratteristica fondamentale dell'Ecologia. Perché l'Ecologia è dappertutto: le dinamiche ecologiche si possono riconoscere in molti contesti e a diverse scale dimensionali, da quelle geografiche più ampie a quelle microscopiche, come accade nella colonizzazione dei beni culturali. Ma in tutti i casi rispondono sempre alle stesse 'regole'!

### 6.1. Le successioni ecologiche

Tra i fenomeni di base delle dinamiche ecologiche ci sono le **successioni ecologiche**: l'idea di successione ecologica nasce all'inizio del XIX Secolo (Henry Chandler) ma si consolida nel XX Secolo con due teorie totalmente contrastanti: **Clemens** nel 1916, definisce la successione una struttura organica, una sorta di organismo che nasce, cresce, matura, muore e si riproduce con fedeltà; invece **Gleason**, nel 1926, afferma che la successione rappresenta a malapena un'unità vegetazionale (perché allora la gran parte degli studi si realizzavano sulla componente vegetale), ma era solo una coincidenza.

La successione ecologica è quel processo con cui si modificano nel tempo sia le componenti strutturali sia i processi ecosistemici di un sito. Tale processo implica, nel tempo, la variazione della struttura in specie e della funzionalità delle comunità. Entrambe dipendono da modifiche dell'ambiente fisico e dalla presenza di agenti biologici responsabili del cambiamento. Il processo procede attraverso una serie di fasi intermedie (*stadi serali* o *sere*) e culmina in un ecosistema stabile detto **climax** (Figura 6.1).

Le successioni vengono classificate in base ai loro aspetti produttivi in successione **autotrofe** o **eterotrofe**, le successioni autotrofe sono quelle in cui la produzione è maggiore della respirazione, mentre quelle eterotrofe, al contrario, sono quelle in cui la respirazione è maggiore della produzione. Le successioni autotrofe nel tempo sono in grado di produrre quantità sempre maggiori di biomassa, e quindi determinano l'insediarsi di comunità sempre più complesse; le successioni eterotrofe sono sostenute dall'energia e dal materiale presente nell'ambiente in cui si origina il processo (una foglia morta, un frutto maturo caduto dall'albero, un cadavere, ecc.) e sono in grado di recuperare e rimettere in circolo la sostanza organica morta, infatti la successione termina quando la sostanza è stata completamente consumata.



*Figura 6.1* Modello di successione ecologica terrestre, nel tempo. Da sinistra verso destra ciascun blocco rappresenta una fase di colonizzazione: dalla roccia nuda, alle comunità intermedie progressivamente più complesse (sere), fino alla comunità climax finale (By Joshfn. Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32862345>)

Le successioni autotrofe (come in Figura 6.1), ci mostrano come si sviluppa la colonizzazione di un substrato mai colonizzato prima (una roccia, una spiaggia, ecc.) fino ad arrivare alla foresta, invece le successioni eterotrofe sono quelle con cui la materia organica morta (Figura 6.2) - che contiene ancora elevate quantità di nutrienti ed energia - viene rimessa in circolo nel sistema come accade per tronchi/foglie morte, frutti, cadaveri, ecc.

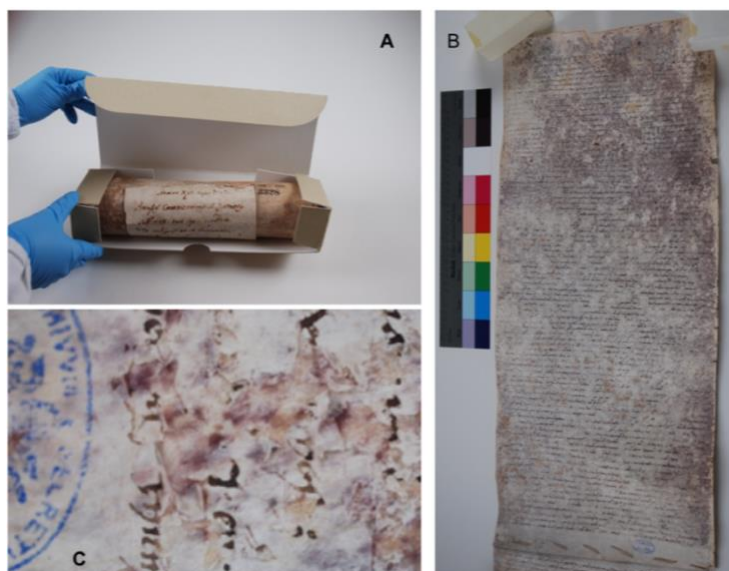


*Figura 6.2* La degradazione di una mela caduta dall'albero è un esempio di successione eterotrofa. Gli organismi che consumano la mela, insetti, funghi, batteri, ecc., usano tutta la materia e l'energia presenti, fino a consumarla completamente. In questo tipo di successione l'energia è massima all'inizio e si riduce gradualmente, man mano che procede la successione (da: Sally V. Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=86021379>)

## **6.2. Le pergamene antiche, un esempio di successione?**

Un esempio di successione eterotrofa è stato identificato in un sistema alquanto bizzarro e soprattutto mai previsto: le **pergamene antiche** attaccate da microrganismi. Lo studio è stato avviato per valutare il deterioramento di un rotolo di pergamena (chiamato **A.A. Arm. I-XVIII 3328**; Figura 6.3), che appartiene al fondo più antico conservato nell'Archivio Apostolico Vaticano (ex Archivio Segreto Vaticano), l'*Archivum Arcis*, che è stato conservato in Castel Sant'Angelo (Roma) fino alla fine del 1700 assieme a una serie di documenti papali molto importanti.





*Figura 6.3 Il rotolo A.A. Arm. I-XVIII 3328 dell'Archivio Apostolico Vaticano: A) nella sua scatola, prima del restauro; B) prima pagina srotolata; C) dettaglio di un'area danneggiata da purple spot che mostra la delaminazione superficiale del 'lato carne' (da: Migliore et al., 2017).*

### 6.3. Lorenzo Loricato

Il rotolo, redatto nel 1244 d.C., contiene gli atti del processo di canonizzazione del **Beato Lorenzo Loricato** che, avendo ucciso involontariamente un uomo, per pagare la sua colpa, nel 1209 si ritira in una grotta vicino Subiaco dove condurrà una vita di continue penitenze e digiuni, indossando una *lorica* (cioè una maglia di ferro) e anelli alle caviglie e ai polsi con punte acuminate che lo ferivano, lo facevano muovere con difficoltà e quasi non lo facevano dormire (Figura 6.4). Non contento delle pene, Lorenzo si fustigava con una certa frequenza e il Venerdì Santo si bruciava la fronte con un ferro arroventato.

Ovviamente il suo stile di vita aveva acceso la curiosità dei contemporanei e molti lo andarono a visitare nella sua grotta, tra questi anche il futuro papa Gregorio IX che gli suggerì di stemperare un po' le penitenze. Inutilmente, Lorenzo continuò questa vita per 34 anni, fino alla morte avvenuta nel 1243. Dopo la sua morte venne avviato il processo di beatificazione, per alcuni miracoli fatti nel corso della vita.



*Figura 6.4 Ritratto di Lorenzo da Fanella noto come Lorenzo Loricato (incisione di G. da Capistrano, 1805), sulla destra; a sinistra, Santa Chelidonia (da: Migliore et al., 2017)*

Il rotolo, lungo 5 metri e formato da otto fogli di pergamena di capra, raccoglie 'vita, morte e miracoli' di Lorenzo Loricato, in forma di deposizioni di 104 testimoni; vi sono descritti 60 miracoli, per la gran parte guarigioni, ma anche una moltiplicazione di pane e vino!

### 6.4. La pergamena

La pergamena è un foglio sottilissimo fatto di pelle animale; è costituito da una matrice proteica (fibre di collagene) e consiste nello strato più esterno del derma. Il processo di manifattura delle pergamene è rimasto praticamente immutato nei secoli; nelle regioni calde meridionali, dove il sale era abbondante ed economico il primo trattamento era la salatura, fatta per evitare la putrefazione della pelle appena prelevata dall'animale. La salatura poteva

essere fatta a secco, cioè spargendo elevate quantità di sale sulla pelle, oppure in salamoia, cioè in una soluzione concentrata di sale (Figura 6.5). Dopo la salatura venivano fatti altri trattamenti, con idrossido di calcio, per rimuovere i peli, con calcio, con pomice e altre sostanze per rendere bianca e levigata la superficie della pergamena e permettere all'inchiostro di attaccarsi.

Salatura a secco



Salatura in salamoia



Figura 6.5 La salatura delle pelli può essere effettuata a secco (a sin.; Foto @N. Perini) o in salamoia (a dest.; J.H.G. von Justi, *Die Kunst Pergament zu machen*, Berlino, 1763; da: Fuchs, 2018)

Dunque, le pergamene sono fatte di collagene e, per la loro composizione organica, sono esposte a quello che viene chiamato **biodeterioramento**, che, per definizione è la *‘perdita irreversibile di valore o di informazioni di un oggetto d'arte a seguito dell'attacco di organismi viventi’*. Quindi per cominciare possiamo dire che anche gli oggetti d'arte, quando sono prodotti con materiale organico, rientrano nel ciclo dei nutrienti. Il biodeterioramento delle pergamene è praticamente sempre lo stesso, anche in documenti di età e provenienza diverse: il danno più frequente è dovuto a macchie violacee, isolate o coalescenti, chiamate in inglese *purple spot* che non solo macchiano il manufatto, rendendolo meno bello, ma determinano la degradazione della matrice di collagene e la delaminazione dello strato superficiale, specialmente dal cosiddetto *‘lato carne’*, più delicato e quello su cui si scrive, con ovvia perdita di leggibilità e di informazioni.

### 6.5. Lo studio dei biodeteriogeni

Anche la pergamena **A.A. Arm. I-XVIII 3328** mostra segni di biodeterioramento da *purple spot* sul lato carne e in qualche zona è delaminata (Figura 6.3C). Le aree macchiate di questo rotolo (non gravemente danneggiato) sono la prima, l'ultima pagina e i bordi delle pagine interne, per uno spessore da 2 a 6 centimetri. Vedremo in seguito il perché.

Lo studio dei biodeteriogeni della pergamena A.A. Arm. I-XVIII 3328 non è stato basato su dati bibliografici, scarni e confusi, ed è stato progettato in partenza con un approccio biotecnologico molto avanzato, quello del *Next Generation Sequencing*, in grado di identificare la struttura e la composizione della comunità microbica del campione, tecnica mai stata utilizzata prima sui beni librari (vedi BOX 6.I). Questa tecnica permette di ottenere ottimi risultati anche con piccolissimi frammenti di pergamena (2-4 mm<sup>2</sup>). Sono stati utilizzati quei frammenti che con il restauro non è possibile ricollocare nel documento originale. La tecnica prevede l'estrazione del DNA dal campione, il suo sequenziamento in grandi laboratori dedicati, e poi elaborazioni e analisi bioinformatiche, con piattaforme specifiche. L'analisi bioinformatica permette di identificare tassonomicamente i microrganismi presenti (che

vengono assegnati alle cosiddette **OTU**, cioè **Operational Taxonomic Unit**) e di confrontare i diversi campioni, per valutarne eventuali somiglianze e differenze (*Unifrac distances*).

#### **BOX 6.1 - Il Next Generation Sequencing e lo studio delle comunità microbiche**

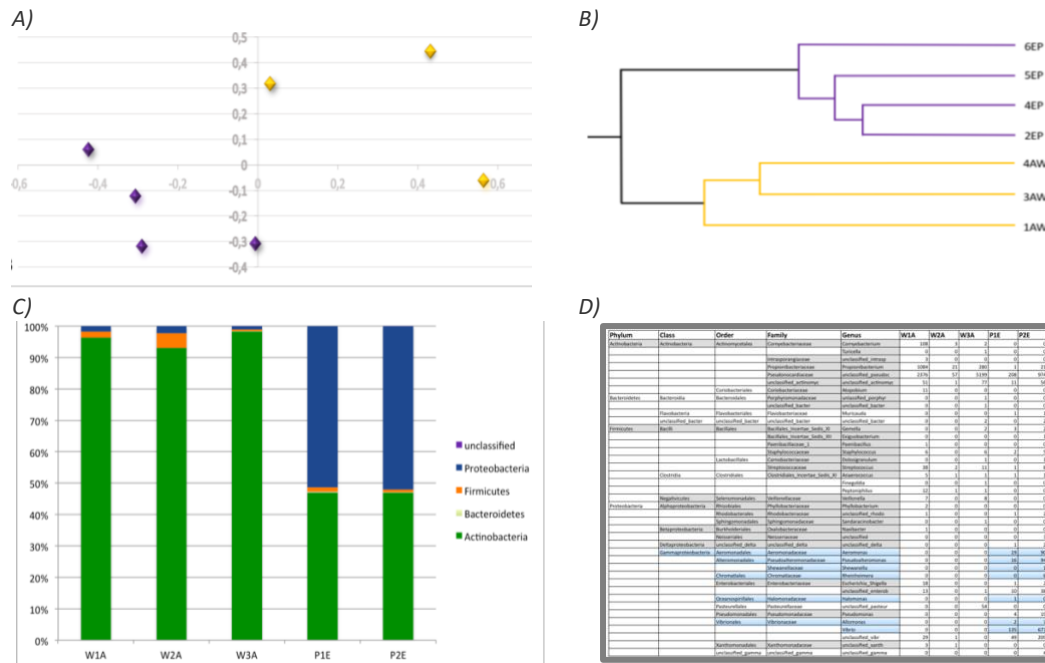
Il **Next Generation Sequencing** è una tecnica che permette di determinare contemporaneamente e in poco tempo la sequenza nucleotidica di molti filamenti di DNA. Ciascun filamento di DNA a doppia elica presente in un campione viene 'srotolato' in modo da ottenere filamenti a singola elica - accessibili all'enzima responsabile della replicazione del DNA, la **DNA polimerasi** - che faranno da stampo nel processo di sequenziamento per sintesi. Ogni volta che la DNA polimerasi inserirà un nucleotide sulla catena in allungamento, verrà immediatamente rilasciato un segnale di fluorescenza specifico per ciascuno dei nucleotidi, la sequenza dei segnali viene poi convertita nella sequenza di nucleotidi. Diverse tecniche si basano su questo stesso principio, come il **454-pyrosequencing** e l'**Illumina**, che si distinguono per il meccanismo di sintesi e per l'efficienza.

Il processo di sequenziamento per sintesi produce migliaia e migliaia di sequenze nucleotidiche, organizzate in forma di specifici file, chiamati FASTA o FASTQ, che possono poi essere elaborati da software bioinformatici dedicati come *Mothur*, *QIIME2*, *Phyloseq (R)*. Questi software "ripuliscono" le sequenze dalle sequenze non biologiche necessarie per l'amplificazione (*linker primer*) e dagli errori avvenuti durante la sintesi (*chimere*) e poi le raggruppano per similarità. Per ciascun gruppo viene scelta una sequenza rappresentativa, che sarà utilizzata nelle successive analisi tassonomiche e statistiche.

Questa tecnologia ha reso possibile lo studio contestuale di intere comunità, il cosiddetto **approccio metagenomico**, cioè lo studio del DNA di tutti i microrganismi presente in un certo ambiente, superando i limiti delle tecniche basate sulla coltura e sull'isolamento dei microbi. L'analisi bioinformatica delle sequenze di DNA microbico permette infatti di valutare **la struttura**, in termini di abbondanza relativa di ciascun gruppo di sequenze, e **la composizione di una comunità**, identificando tassonomicamente il microorganismo a cui appartiene la sequenza. L'identificazione tassonomica delle sequenze microbiche è possibile grazie ai database come *NCBI* o *GenBank* sempre più ampi e completi, perché lì vengono conservate le sequenze geniche che man mano vengono identificate nel tempo dai diversi studi. Questi database sono quindi il risultato dello sforzo collettivo di tutta la comunità scientifica! I software bioinformatici consultano velocemente questi enormi database, confrontando le sequenze presenti nel campione con quelle dei database, individuando la più simile.

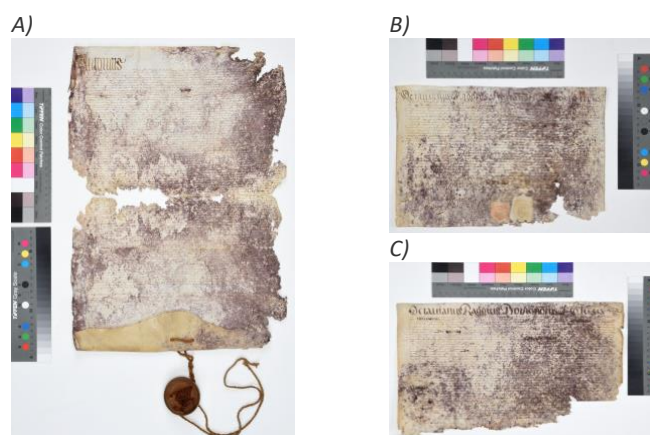
Le prime analisi effettuate su frammenti di aree non danneggiate e di aree danneggiate viola hanno mostrato chiaramente che la struttura delle comunità dei due tipi di campioni era molto diversa (Figura 6.6A e B). Il risultato più interessante e sorprendente è stato trovare nei campioni danneggiati, elevate percentuali di **batteri marini**. In tutti i campioni erano presenti batteri ambientali oppure batteri associati all'uomo o agli animali (*Actinobacteria*), che quindi non potevano essere imputati della produzione delle *purple spot* mentre i *Proteobacteria* (in particolare  $\gamma$ -marini), dovevano essere in qualche modo coinvolti nella produzione delle macchie.

Ma che ci fanno i batteri marini nella pergamena? Non potevano che essere arrivati con il sale utilizzato nelle prime fasi di manifattura della pergamena, con la salatura. Questi batteri entrano fin dentro la struttura della pelle animale e, alle giuste condizioni ambientali possono rianimarsi. Provenendo da saline, i batteri che si trovano nel sale devono essere **alofili o alotolleranti**, cioè rispettivamente batteri che hanno bisogno di elevate o medie quantità di sale per vivere. I batteri di salina sono molto tolleranti, perché soggetti a variazioni sostanziali delle condizioni ambientali; una volta entrati nella pergamena rappresentano una sorta di bomba a orologeria per questi manufatti, perché sono in grado di '*rianimarsi*' anche dopo periodi di tempo molto lunghi (Mormile *et al.*, 2003).



**Figura 6.6** Confronto (A e B) e composizione tassonomica (C e D) delle comunità microbiche rilevate in campioni provenienti da aree non danneggiate e da aree macchiate del rotolo A.A. Arm. I-XVIII 3328. In grigio, i batteri ubiquitari, ambientali o associati a uomo/animali; in azzurro, i batteri marini (da: Migliore et al., 2016, 2017)

E allora che cosa abbiamo fatto per comprendere la dinamica della colonizzazione? Abbiamo continuato a studiare il ‘nostro’ magnifico rotolo a cui abbiamo affiancato anche lo studio di altri tre documenti estremamente danneggiati, provenienti dalla collezione del notaio Patrizi e conservati presso l’Archivio Apostolico Vaticano: atti notarili non particolarmente interessanti nei contenuti, ma scritti su pergamene veramente molto danneggiate (Figura 6.7).



**Figura 6.7** Le tre pergamene del Faldone Patrizi, in avanzato stato di degrado, dovuto alla presenza diffusa di purple spot; è evidente la perdita di parti dei documenti dovuta a biodeterioramento. A) documento denominato “Antonius ...”, datato 1510 d.C. circa; B) documento denominato “Octavianus Raggus Protonotarius Apostolicus”, datato 1640 d.C.; C) documento denominato “Octavianus Raggus Protonotarius ...”, datato 1639 d.C. (da: Migliore et al., 2019)

A tutte le quattro pergamene è stato applicato lo stesso approccio multidisciplinare: *Next Generation Sequencing* per le analisi microbiologiche, analisi chimiche in spettroscopia



Raman e analisi fisiche con una tecnica messa a punto per le pergamene, la *Light Transmission Analysis* (LTA) che valuta la degradazione del collagene.

#### 6.5.1. NGS (Next Generation Sequencing)

Le nuove indagini microbiologiche sul rotolo poco danneggiato hanno confermato i dati precedentemente ottenuti, cioè: i) le comunità delle aree danneggiate e di quelle non danneggiate sono estremamente diverse e ii) nelle aree danneggiate sono presenti batteri marini del genere *Vibrio*, che non possono essere considerati responsabili delle *purple spot* perché non producono pigmento viola (Figura 6.8).

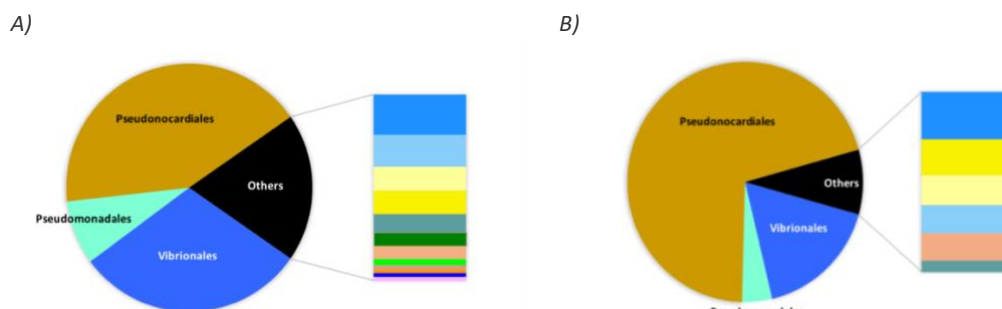


Figura 6.8 Composizione delle comunità microbiche presenti in: A) aree macchiate e B) aree non danneggiate del rotolo A.A. Arm. I-XVIII 3328 (da: Migliore et al., 2019)

Nel rotolo non abbiamo trovato tracce del DNA dei microorganismi alofili, come *Halobacterium salinarum*, un Archaea che vive ancorato ai cristalli di sale e può produrre macchie *purple* perché il suo involucro cellulare contiene elevate quantità di **batteriorodopsina**, una proteina transmembrana estremamente stabile di colore violaceo (Figura 6.9).

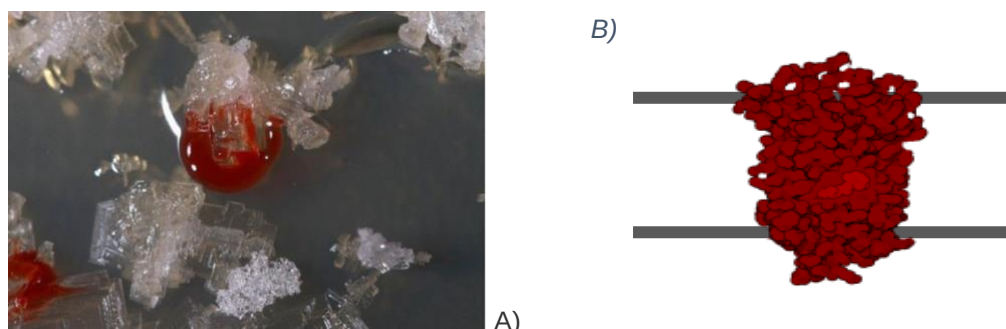
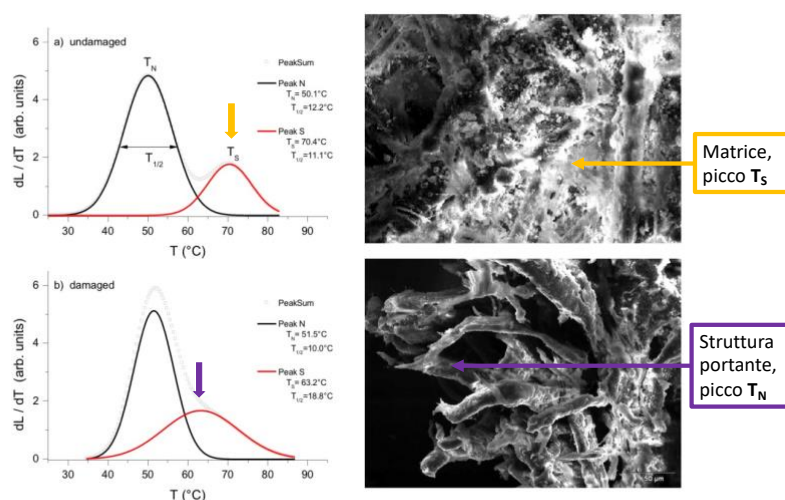


Figura 6.9 *Halobacterium salinarum*. A) crescita su terreno saturo di sale (da: <https://microbiologysociety.org/publication/past-issues/real-superheroes/article/the-immortal-halophilic-superhero-i-halobacterium-salinarum-i-a-long-lived-poly-extremophile.html>); B) batteriorodopsina 4MD1-transmembrana in 3D (da: RCSB PDB <https://pdb101.rcsb.org/motm/27>, modificata)

È stata la spettroscopia Raman, applicata ai campioni macchiati, a dimostrare la presenza di batteriorodopsina e il passaggio degli alobatteri nella pergamena. In più, le analisi con la tecnica LTA hanno dimostrato e quantificato il danno strutturale alla pergamena nelle zone macchiate, valutato come temperatura di *shrinkage*, cioè di collassamento della struttura della pergamena, che è tanto più bassa quanto maggiore è la degradazione del collagene. La pergamena mostra una temperatura di *shrinkage* più bassa nelle zone interessate dalle macchie viola che in quelle non macchiate e, poiché l'LTA permette di fare microfotografie

delle zone analizzate contemporaneamente alle misure termiche, è possibile vedere che nelle aree macchiate l'attacco batterico rimuove la matrice dispersa del collagene, lasciando integre le componenti più strutturate e difficili da attaccare (Figura 6.10).



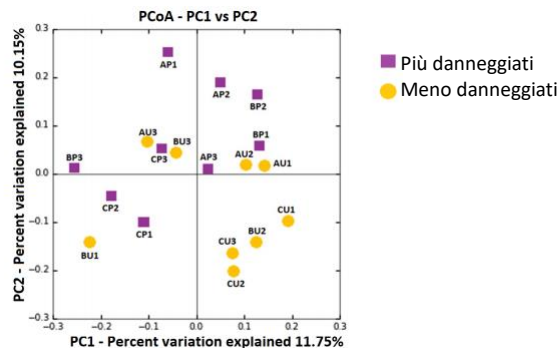
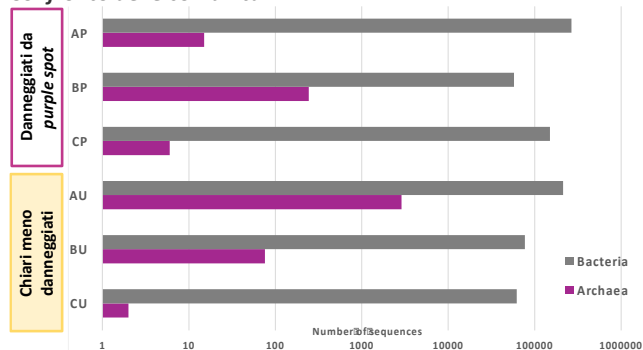
**Figura 6.10** Analisi della temperatura di shrinkage di frammenti di pergamena provenienti da a) aree non danneggiate e b) aree danneggiate del rotolo A.A. Arm. I-XVIII 3328 e immagini delle stesse aree effettuate nel corso dell'analisi termica (da: Migliore et al., 2017)

Dunque, il rotolo poco danneggiato ha confermato che nelle fasi iniziali del processo di colonizzazione delle pergamene: i) i microrganismi nelle *purple spot* sono marini; ii) le macchie sono dovute alla presenza di batteriorodopsina prodotta dagli alobatteri, che dovevano aver colonizzato la pergamena prima dei batteri rilevati nelle aree macchiate; iii) i batteri sono in grado di crescere utilizzando il collagene, danneggiandolo e consumandolo.

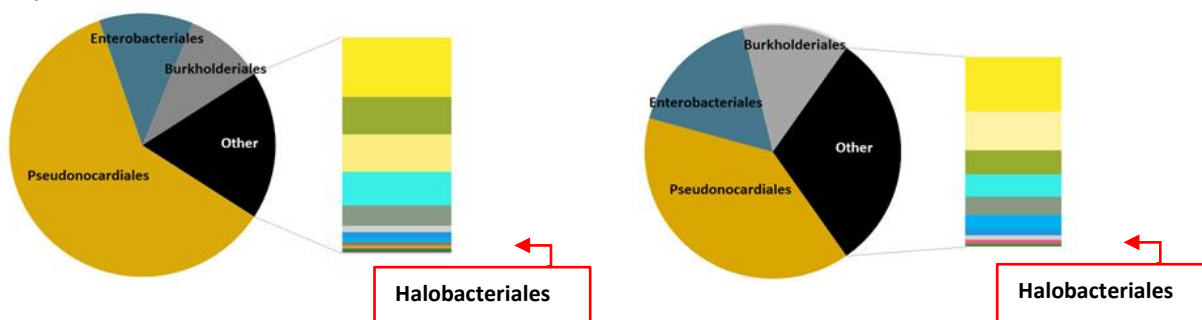
Ma che cosa succede quando il processo di degradazione è molto più avanzato? La risposta a questa domanda ce l'hanno data i documenti del Faldone Patrizi (Figura 6.7): si tratta di documenti estremamente danneggiati, in cui è stato possibile confrontare aree mediamente danneggiate con aree molto danneggiate. L'analisi in NGS ha mostrato una situazione completamente diversa: la distribuzione dei microrganismi nelle comunità delle aree più e meno danneggiate di queste pergamene è sempre la stessa, senza differenze statisticamente significative (Figura 6.11). In entrambi i gruppi di campioni sono presenti Archaea e batteri: gli Archaea sono rappresentati da alobatteri, sempre a bassa frequenza, i batteri sono rappresentati da Actinobacteria e Firmicutes, principalmente dell'ordine Pseudonocardiales. La ragione di queste differenze quantitative la vedremo in seguito.

Il punto più importante è che le sequenze di Archaea corrispondevano ad *Halobacterium salinarum*, con una sovrapposizione del 100% alle sequenze di riferimento. Gli Archaea sono tra le forme di vita più antiche sulla Terra e sono adattati a condizioni estreme: per esempio, l'*Halobacterium salinarum*, che è un aloarchaea, per vivere ha bisogno di concentrazioni di sale molto elevate. È un organismo a *strategia r*, dunque un pioniere, e si nutre di amminoacidi (principalmente arginina e aspartato), presenti in abbondanza nel collagene delle pergamene. Caratteristica peculiare di questi organismi è la presenza di batteriorodopsina, una proteina transmembrana che contiene un retinale in grado di captare energia luminosa; l'accoppiamento funzionale della **batteriorodopsina** con una **ATP sintasi** permette la conversione dell'energia luminosa captata in energia chimica. Questo fa sì che gli aloarchaea abbiano dell'energia supplementare che permette loro di vivere in ambienti 'difficili' come le pergamene.

### Confronto delle comunità



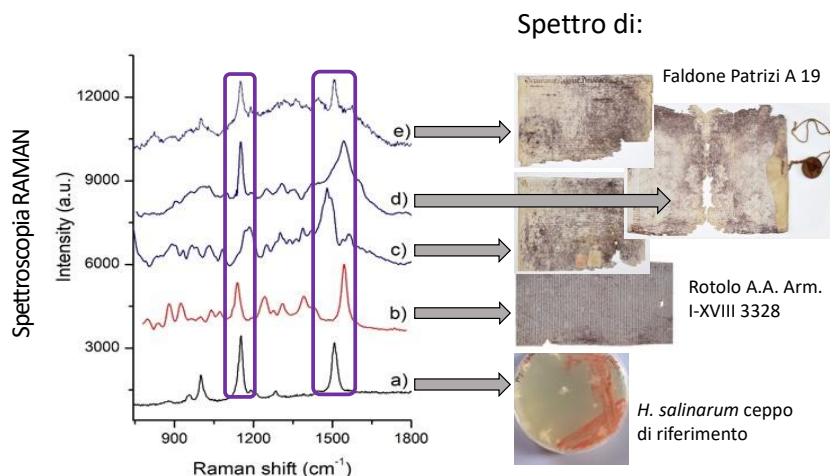
### Composizione tassonomica delle comunità



**Figura 6.11** Confronto tra le comunità dei campioni di pergamena provenienti da aree diversamente danneggiate dei tre documenti del Faldone Patrizi. Confronto delle comunità: numero di batteri e Archaea (a sinistra) e ordinamento delle comunità (a destra), nei campioni provenienti rispettivamente dai documenti A, B e C (P=campioni purple, danneggiati; U=campioni non macchiati, meno danneggiati). Composizione tassonomica delle comunità: distribuzione degli ordini prevalenti nei campioni purple, danneggiati (a sinistra) e dei campioni non macchiati, meno danneggiati (a destra).

### 6.5.2. Spettroscopia RAMAN

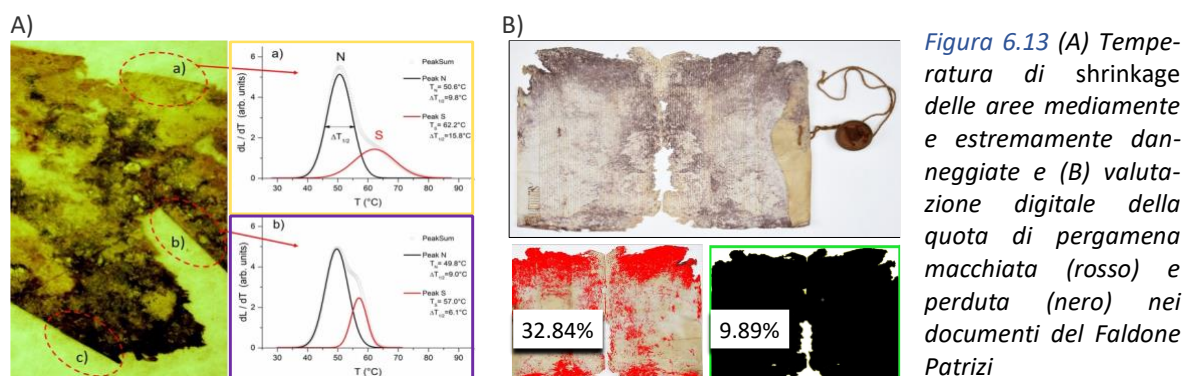
Le analisi **Raman** sul rotolo A.A. Arm. I-XVIII 3328 e sulle tre pergamene del Faldone Patrizi han-no dimostrato la presenza di batteriorodopsina nelle aree macchiate ma, per ulteriore conferma, è stato analizzato anche lo spettro del ceppo di riferimento dell'*Halobacterium salinarum*, fatto crescere su piastra con metodi standard in laboratorio. Gli spettri sono riportati in Figura 6.12 e mostrano come lo spettro del rotolo, quello dei tre documenti molto danneggiati e quello del ceppo di riferimento includano le bande che caratterizzano la batteriorodopsina.



**Figura 6.12** Analisi dei pigmenti purple presenti in: a) *H. salinarum* vivo, coltivato in laboratorio; b) rotolo A.A. Arm. I-XVIII 3328; c), d), e) Faldone Patrizi, rispettivamente i documenti B, A e C. In viola sono evidenziate le bande caratterizzanti della batteriorodopsina (da: Migliore et al., 2019)

### 6.5.3. LTA (Light Transmission Analysis)

Le analisi in **LTA** delle tre pergamene mostrano come, con l'avanzare della degradazione della pergamena, anche la temperatura di *shrinkage* continui ad abbassarsi: come era già evidente dall'osservazione, il collagene di queste pergamene è estremamente più danneggiato rispetto alla pergamena del rotolo e parti di essi mancano, in relazione all'elevata colonizzazione (Figura 6.13).



**Figura 6.13** (A) Temperatura di shrinkage delle aree medianti e estremamente danneggiate e (B) valutazione digitale della quota di pergamena macchiata (rosso) e perduta (nero) nei documenti del Faldone Patrizi

### 6.6. Adesso dobbiamo mettere insieme i pezzi di questo puzzle!

Il primo punto riguarda i **fattori ambientali**, e naturalmente la cosa più importante è la presenza e la concentrazione di sale, che gioca un ruolo fondamentale nel processo di biodeterioramento.

Il secondo punto è che gli alobatteri devono essere stati i **primi colonizzatori**, non solo per le loro caratteristiche ecologiche, ma perché lasciano la macchia quando vengono sostituiti dai  $\gamma$ -Proteobatteri marini: devono aver colonizzato la pergamena prima, visto che non abbiamo trovato traccia del loro DNA ma abbiamo trovato la loro batteriorodopsina.

Il terzo punto riguarda la **struttura della comunità**: all'inizio della colonizzazione le aree macchiate contengono comunità molto differenti da quelle delle aree non macchiate, ma con il progredire del processo dappertutto si trovano gli stessi colonizzatori.

Da ultimo, il **collagene** subisce un progressivo deterioramento sia della matrice, sia delle strutture rigide. Ovviamente la degradazione comincia dalla matrice che è più facile da attaccare.

**I fattori ambientali.** L'umidità, la temperatura e la luce hanno sicuramente avuto un ruolo nella storia delle pergamene. Per esempio, il rotolo (scritto nel XIII Secolo) deve essere stato esposto all'umidità con frequenza e regolarità, visto che nei monasteri le biblioteche spesso erano tenute nei cosiddetti '*armaria*', degli armadi collocati all'esterno, nei chiostri. Questa collocazione fa ipotizzare che analogamente i documenti fossero esposti a regolari variazioni anche della temperatura e della luce. È interessante che il rotolo sia macchiato nella prima, nell'ultima pagina e sui margini: questo dipende da come si legge la pergamena, che deve essere srotolata e arrotolata per essere letta. Quindi certe volte finiva con avere esternamente la prima pagina, altre volte l'ultima. Quindi, oltre all'esposizione durante la lettura, forse le pergamene potevano essere esposte alla luce anche quando erano conservate, favorendo la crescita degli alobatteri nelle zone illuminate (prima, ultima pagina



e margini). Ma la salinità è il punto chiave: la salatura delle pelli appena raccolte determina l'ingresso del sale all'interno dei vari strati dell'epidermide, inclusi quelli utilizzati per fare la pergamena. Insieme al sale, il processo permette l'ingresso di tutti i microbi presenti nel sale (alofili e alotolleranti) che rimangono ben conservati nella pergamena, che non subisce trattamenti forti. Che cosa succede quando i microcristalli di sale presenti all'interno della pergamena sono esposti a un'elevata umidità ambientale? Quando l'umidità relativa arriva a circa il 75%, i cristalli di sale si sciolgono formando una salamoia liquida che ha una salinità elevatissima e **consente la crescita degli aloarchaea**. Però, quando l'umidità ambientale aumenta, la salinità si abbassa; se scende al di sotto del limite di tolleranza degli aloarchaea, i batteri collassano, la loro membrana si disintegra rilasciando il pigmento lì dov'era cresciuta la colonia: questo spiega la forma e la distribuzione delle macchie. La lisi delle cellule rilascia all'interno della struttura della pergamena grandi quantità di nutrienti, le nuove condizioni favoriscono la crescita dei microbi opportunisti, come i *Vibrio*.

### 6.7. Il modello di colonizzazione

Da tutti questi dati è possibile ipotizzare un **modello di colonizzazione a due fasi** (Figura 6.14).

Nella **prima fase** umidità e luce determinano le condizioni di crescita favorevoli per gli aloarchaea e, finché la salinità rimane elevata, permettono la loro crescita nella parte interna della pergamena, dove consumano il collagene. Quando la salinità scende al di sotto della soglia di tolleranza ( $\text{NaCl} < 3\text{M}$ ) le cellule lisano, la membrana fa la macchia mentre il contenuto cellulare viene consumato dai microrganismi alotolleranti, che cancellano così le tracce dei precedenti colonizzatori, incluso il loro DNA. Rimangono solo le macchie perché la batteriorodopsina ha una struttura molto stabile che non viene attaccata da altri microrganismi.

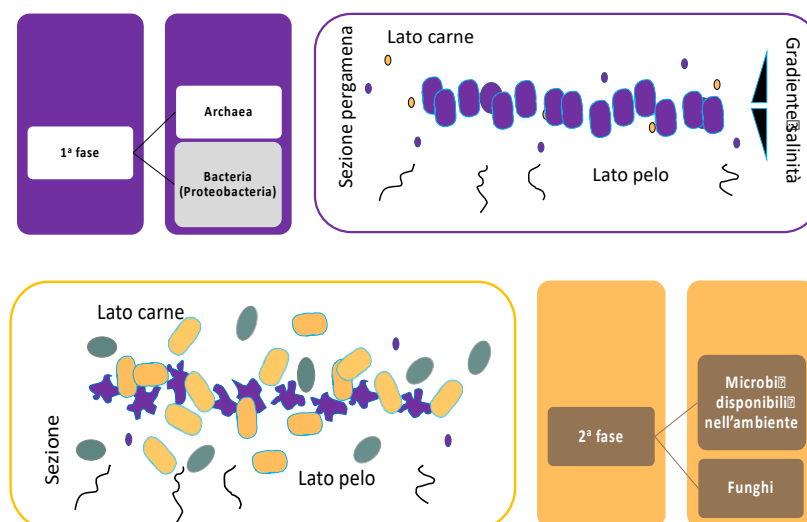


Figura 6.14 Modello di colonizzazione a due fasi delle pergamene (da: Migliore et al., 2017)

La **seconda fase** è completamente diversa: il collagene è già attaccato e danneggiato e così rappresenta cibo disponibile per tutti i microbi presenti nell'ambiente. Ovviamente, i microrganismi ambientali più comuni diventano i colonizzatori più frequenti; ciononostante, studiando specificamente diversi tipi di *Pseudonocardiales* (colonizzatori di seconda fase), abbiamo rilevato che aree a diverso grado di danneggiamento offrono ambienti diversi e

permettono la colonizzazione di specie diverse. In ogni caso, alla fine della seconda fase vengono reclutati anche i funghi, che sono provvisti di set di enzimi litici in grado di completare la degradazione della matrice proteica.

Si conclude così la degradazione della pergamena, perché l'attività di questa seconda comunità riduce il collagene e lo smantella completamente fino a farlo scomparire.

È importante fare a questo punto una considerazione generale sulla prospettiva di lettura e di interpretazione dei risultati del NGS: le diverse comunità di microorganismi che noi troviamo devono essere valutate tenendo conto che si tratta di un processo che avviene nel tempo. Poiché la prospettiva storica è 'appiattita', visto che le comunità più recenti restituiscono DNA meglio conservato e in maggiore quantità rispetto ai primi colonizzatori, la bassa frequenza con cui si ritrova *Halobacterium* non 'sminuisce' il loro ruolo!

### 6.8. La successione ecologica!!!!

I documenti analizzati riassumono il processo di successione responsabile della degradazione del collagene della pergamena: il rotolo, danneggiato poco e solo in alcune zone, dà conto della prima fase del processo mentre i fogli del Faldone Patrizi mostrano la seconda fase, includendo aree mediamente danneggiate, confrontabili con quelle più danneggiate del rotolo, e zone molto più danneggiate (Figura 6.15).

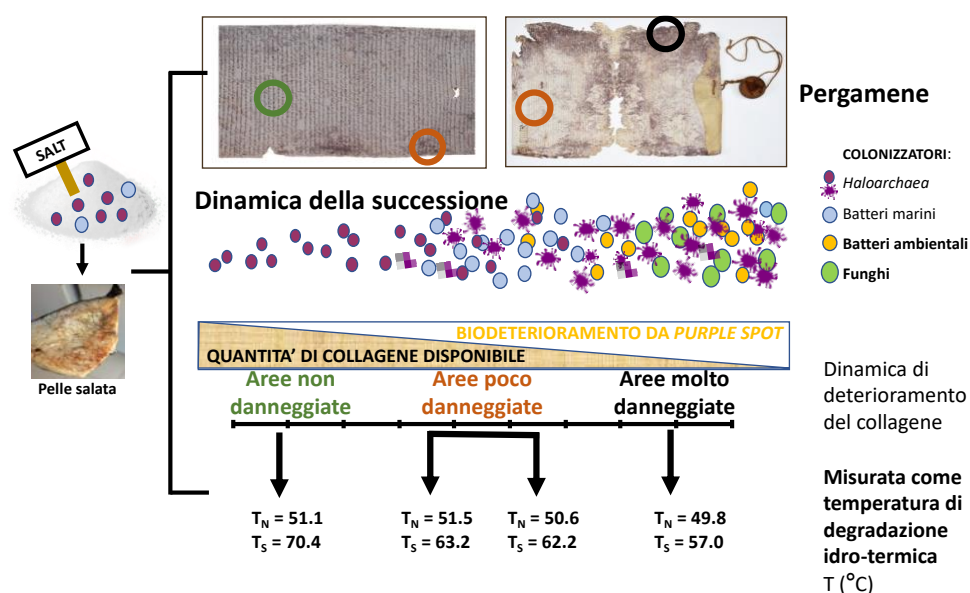


Figura 6.15 La successione ecologica delle pergamene (da: Perini et al., 2020)

La successione si determina per via dei microbi presenti nel sale marino, che entrano nella pelle appena raccolta con il processo di salatura e rimangono silenti all'interno della pergamena fino a che le condizioni ambientali abiotiche non permettono la crescita degli aloarchaea. Quando le condizioni ambientali cambiano gli aloarchaea collassano, vengono soppiantati prima dai  $\gamma$ -proteobatteri marini, poi da altri microrganismi ambientali e in ultimo dai funghi. La vita dei biodeteriogeni dipende dalla quantità di collagene disponibile, che si riduce man mano che procede il biodeterioramento; la dinamica di deterioramento del collagene si può quantificare con la progressiva riduzione della temperatura di *shrinkage*.

Possiamo affermare che il biodeterioramento delle pergamene è una **successione ecologica** perché:

1. mostra variazioni nel tempo della struttura in specie e della funzionalità della comunità;
2. dipende da modifiche dell'ambiente fisico e da agenti biologici di cambiamento;
3. procede attraverso comunità e fasi intermedie;

ed è, ovviamente, una **successione eterotrofa** che consente il riutilizzo di materiale ed energia presenti in una struttura morta.

Il processo che avviene nelle pergamene dà credito a entrambe le **ipotesi classiche** di successione ecologica: la prima fase, in accordo con quanto affermato da **Clemens**, è obbligata e basata sull'attacco del collagene, prima da parte degli aloarchaea e poi dai  $\gamma$ -proteobatteri, come i *Vibrio*. Un processo a struttura rigida, che mostra la fedeltà di certe fasi; la dinamica della seconda fase rende ragione a **Gleason**, perché i colonizzatori (batteri ambientali e funghi) vengono reclutati dall'ambiente e saranno quelli localmente presenti, e quindi dipenderanno da dove era conservata la pergamena.

Per concludere, penso che sia importantissimo che tutti - anche gli ecologi - si occupino dello studio e della salvaguardia del nostro patrimonio culturale, non solo perché è **il nostro patrimonio culturale** (e già questo basterebbe) ma anche perché è una delle nostre risorse economiche più rilevanti.

## 6.9. Bibliografia

- Fuchs R., 2018. The History and Biology of Parchment. In: Karger Gazette, n. 67, Skin, pp. 13-16
- Migliore L, Vendittozzi G, Mejia AY, Mercuri F, Carbonetti C, Thaller MC, Romani M, Cicero C, Orazi N, Pasqualucci A, Marinelli M, Rubechini A, 2016. Il rotolo A.A., Arm. I-XVIII 3328 dell'Archivum Arcis: studi letterari e scientifici, interventi di restauro. *Collect Arch Vat 102*. Dall'Archivio Segreto Vaticano. Miscellanea di testi, saggi e inventari, IX:403-421
- Migliore L, Thaller MC, Vendittozzi G, Mejia AY, Mercuri F, Orlanducci S, Rubechini A (2017) - Purple spot damage dynamics investigated by an integrated approach on a 1244 A.D. parchment roll from the Secret Vatican Archive. *Sci Rep* 7:9521 DOI: 10.1038/s41598-017-05398-7
- Migliore L, Perini N, Mercuri F, Orlanducci S, Rubechini A, Thaller MC, 2019. Three ancient documents solve the jigsaw of the parchment purple spot deterioration and validate the microbial succession model. *Sci Rep* 9:1623. DOI: 10.1038/s41598-018-37651-y
- Mormile MR, Biesen MA, Gutierrez MC, Ventosa A, Pavlovich JB, Onstott TC, Fredrickson JK, 2003. Isolation of *Halobacterium salinarum* retrieved directly from halite brine inclusions. *Environ Microbiol* 5(11):1094-1102 DOI:10.1046/j.1462-2920.2003.00509.x
- Perini N, Mercuri F, Thaller MC, Castiello D, Talarico V, Migliore L, 2019. The stain of the original salt: red heats on chrome tanned leathers and purple spots on ancient parchments are two sides of the same ecological coin. *Front Microb* 10:2459. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02459
- Perini N, Mercuri F, Orlanducci S, Thaller MC, Migliore L, 2020. The integration of metagenomics and chemical physical techniques biodecoded the buried traces of the biodeteriogens of parchment purple spots. *Front Microb* 11:598945. DOI: 10.3389/fmicb.2020.598945



Modificato da: [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.imoca.org%2Ffr%2Fnews%2Fnews%2Fle-plancton-concentre-de-vie-dans-une-goutte-d-eau&psig=AOvVaw0MIV-8QWd0fqYotHTQ3Zp\\_&ust=1640176108492000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCLiR3Kjy9PQCFQAAAAAdAAAAABAR](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.imoca.org%2Ffr%2Fnews%2Fnews%2Fle-plancton-concentre-de-vie-dans-une-goutte-d-eau&psig=AOvVaw0MIV-8QWd0fqYotHTQ3Zp_&ust=1640176108492000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCLiR3Kjy9PQCFQAAAAAdAAAAABAR)

*“In una goccia d’acqua si trovano tutti i segreti di tutti gli oceani”*

Kahlil Gibran



## 7. IL PLANCTON MARINO. BIODIVERSITÀ E FUNZIONI IN UN OCEANO CHE STA CAMBIANDO

**Antonella Penna**

Dipartimento di Scienze Biomolecolari, Università degli Studi di Urbino “Carlo Bo”

### 7.1 Introduzione

Con il termine *plancton* si intende l'insieme di organismi animali e vegetali che vivono in sospensione nella colonna d'acqua e sono incapaci di contrastare la corrente del mare. Il plancton marino mostra una elevata biodiversità: sono presenti virus, batteri, protozoi, microalghe, metazoi, tra cui gli animali gelatinosi come le meduse, ma anche spore, cisti, uova di pesce. Il plancton può essere classificato in base alle sue funzioni, dimensioni e ciclo vitale. La classificazione più nota è quella di **fitoplancton**, organismi autotrofi che fanno fotosintesi, e **zooplancton**, invece costituito da animali di dimensioni da molto piccole fino a molto grandi, tra cui protozoi, anellidi e altri animali come le meduse, i tunicati e i crostacei (Figura 7.1), di cui i copepodi sono la componente più numerosa. Inoltre, si possono classificare diverse categorie di organismi planctonici in base alla loro distribuzione, dalle profondità alla superficie del mare, come l'**adoplancton** delle fosse oceaniche fino al **pleuston** in superficie. Ancora, in funzione del loro ciclo vitale, il plancton è suddiviso in **meroplancton**, cioè gli organismi che vivono solo parte del loro ciclo vitale nella colonna d'acqua (come le fasi larvali degli organismi bentonici), e l'**oloplancton**, che comprende organismi che vivono tutta la vita nella colonna d'acqua.

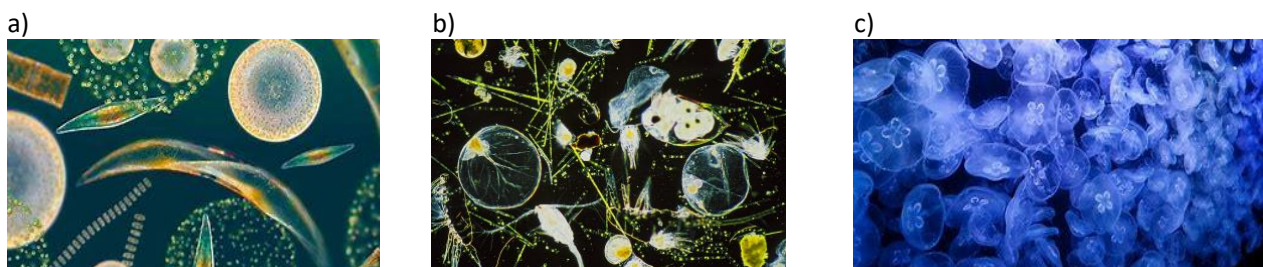


Figura 7.1 Immagini di plancton marino; a) fitoplancton, b) zooplancton, c) meduse (fonte: wikipedia)

La concentrazione delle unità planctoniche diminuisce esponenzialmente all'aumentare della dimensione della taglia: i virus e i batteri possono arrivare a concentrazioni di  $10^8$ - $10^{11}$  cellule per litro di acqua, il fitoplancton ha abbondanze tra  $10^3$  e  $10^5$  cellule per litro, il mesozooplancton arriva fino a  $10^2$  cellule per litro.

La distribuzione del plancton è condizionata da fattori fisici e biologici sebbene il plancton sia in grado di muoversi verticalmente nella colonna d'acqua. Queste migrazioni del macroplancton e del micronecton sono le migrazioni che coinvolgono le maggiori quantità di biomassa animale. Le migrazioni servono per procacciarsi cibo, limitare il dispendio di energia, sfuggire alla predazione, e hanno importanti implicazioni ecologiche.

I tassi di riproduzione delle diverse componenti del plancton variano da poche ore, a giorni, a settimane, a mesi. Il plancton segue una stagionalità nella riproduzione, con picchi più alti in inverno-primavera e autunno per il fitoplancton, e picchi più alti in tarda primavera-estate per lo zooplancton.

Attualmente, la biodiversità e le funzioni ecologiche del plancton marino sono influenzate dai cambiamenti in atto del mare, sia per gli aspetti fisici o abiotici sia per gli aspetti biologici o biotici. In questo capitolo, verranno trattati argomenti che riguardano le interazioni degli organismi planctonici con i cambiamenti degli ecosistemi marini in atto, essenzialmente dovuti agli impatti antropici.

## 7.2. Classificazione del plancton marino

Poiché il plancton è un raggruppamento di organismi molto eterogeneo, vengono utilizzati diversi tipi di classificazione: la distribuzione lungo la colonna d'acqua, il tipo di ciclo vitale o la dimensione degli organismi.

La distribuzione del plancton lungo la colonna d'acqua (Tabella 7.1) non solo fornisce informazioni sui loro adattamenti biologici ma anche sulla loro funzione nella rete alimentare. L'**epiplancton**, che include sia fitoplancton sia zooplancton, è dominato dai copepodi; il **mesozooplancton** è costituito soprattutto da zooplancton e da alcune componenti del mesoplancton, include organismi che in alcune fasi del giorno si spostano in superficie tramite migrazioni verticali; il **batiplancton**, che vive in assenza totale di luce, è dominato da copepodi (diversi da quelli delle zone superficiali), ma include anche meduse e crostacei; l'**abissoplancton** è costituito da chetognati, anfipodi e misidiacei, mentre l'**adoplancton** cioè il plancton delle fosse oceaniche, è composto da anfipodi, ostracodi e copepodi (Danovaro, 2013; Figura 7.2).

*Tabella 7.1 Classificazione degli organismi planctonici in base alla loro distribuzione lungo la colonna d'acqua*

| CLASSI                 | LOCALIZZAZIONE                              |
|------------------------|---------------------------------------------|
| <i>Epiplancton</i>     | tra la superficie e 100/200 m di profondità |
| <i>Mesozooplancton</i> | tra 200 e 1.000 m di profondità             |
| <i>Batiplancton</i>    | tra 1.000 e 3.000 m di profondità           |
| <i>Abissoplancton</i>  | tra 4.000 e 6.000 m di profondità           |
| <i>Adoplancton</i>     | tra 4.000-8.000 m di profondità             |

In base al ciclo vitale, cioè in base agli stadi di sviluppo degli organismi e del periodo di vita che trascorrono allo stato planctonico, il plancton si divide in **oloplancton** (organismi che trascorrono l'intera esistenza in sospensione nella colonna d'acqua) e **meroplancton** (uova, stadi larvali di animali bentonici, cioè legati al fondo marino).



*Figura 7.2 Immagini di zooplancton; a) anfipodi, b) misidiacei, c) ostracodi (fonte: wikipedia)*

Il plancton viene anche classificato in base alle dimensioni (Tabella 7.2), ma questa classificazione non va confusa con la distinzione funzionale tra fitoplancton (autotrofo con attività fotosintetica) e zooplancton (eterotrofo, cioè animali, consumatori primari planctonici). Entrambi i gruppi funzionali includono specie delle diverse classi di dimensioni, anche se nel fitoplancton prevalgono le classi di

dimensioni da *picoplancton* a *microplancton*, mentre tra gli animali prevalgono le classi dal *mesoplancton* al *megaplancton* (Castro e Huber, 2011).

*Tabella 7.2 Suddivisione in base alla dimensione degli organismi planctonici*

| CLASSI               | DIMENSIONI               | GRUPPI FUNZIONALI                                                                       |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Femtoplankton</i> | 0.02 – 0.2 $\mu\text{m}$ | Virus (anche detto <i>virio plankton</i> )                                              |
| <i>Picoplankton</i>  | 0.2 – 2 $\mu\text{m}$    | Archea, batteri eterotrofi, cianobatteri, picofitoplankton, eucarioti di pochi micron   |
| <i>Nanoplankton</i>  | 2.0 – 10 $\mu\text{m}$   | Eucarioti autotrofi ed eterotrofi: microalghe, protozoi                                 |
| <i>Microplancton</i> | 20 – 200 $\mu\text{m}$   | Microalghe (che costituiscono il <i>microfitoplankton</i> ), protozoi                   |
| <i>Mesoplancton</i>  | 0.2 – 20 mm              | Animali (crostacei copepodi; anche detto <i>mesozooplankton</i> )                       |
| <i>Macroplancton</i> | 2 – 20 cm                | Animali (policheti, anfipodi; anche detto <i>macrozooplankton</i> )                     |
| <i>Megaplancton</i>  | 20 – 200 cm              | Animali (meduse, ctenofori, sifonofori gelatinosi; anche detto <i>megazooplankton</i> ) |

### 7.3. Ecologia del plancton marino

#### 7.3.1 Produzione primaria

Il dominio epipelagico (tra la superficie e i 200 m di profondità) è caratterizzato dai processi di fotosintesi/produzione primaria del fitoplancton. Il fitoplancton sostiene più del 95% della **produzione primaria** oceanica, che equivale a quasi la metà della produzione primaria della Terra, e fornisce quasi il 50% di tutto l'ossigeno presente nell'atmosfera. In questa porzione di colonna d'acqua i componenti principali e di maggiori dimensioni del fitoplancton sono diatomee e dinoflagellati: le diatomee sono abbondanti nelle regioni temperate e polari, in acque ricche di nutrienti, sono presenti in oceano aperto e lungo le coste; i dinoflagellati sono presenti prevalentemente nelle regioni temperate in acque costiere e oceaniche, prediligono acque calde e stratificate, sono organismi spesso eterotrofi, adattati a condizioni di scarsa disponibilità di nutrienti.

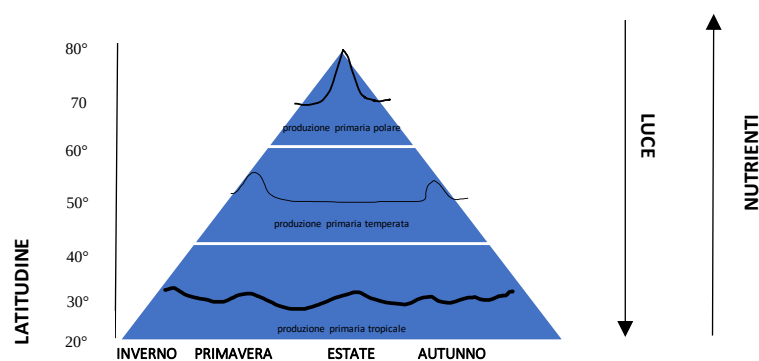
I fattori abiotici che determinano l'efficienza del fitoplancton sono l'intensità della radiazione solare, la profondità della zona eufotica (cioè la porzione della colonna d'acqua ben illuminata in cui la fotosintesi è maggiore della respirazione), il rimescolamento della colonna d'acqua, la disponibilità di nutrienti e, come fattore biotico, il pascolo da parte dello zooplankton.

Per quel che riguarda la disponibilità di nutrienti, la formula di Redfield,  $\text{C}_{106} \text{N}_{16} \text{P}_1$ , indica il rapporto in moli degli elementi necessari al fitoplancton per produrre una mole di sostanza organica. In mare, la concentrazione delle sostanze non è mai omogenea e il fosforo è spesso il fattore limitante della crescita del fitoplancton e quindi della produzione primaria. Quando la disponibilità di azoto e fosforo si allontana dal rapporto di Redfield ( $\text{N:P} = 16$ ), le condizioni diventano limitanti per la crescita del fitoplancton. È per questo che, in linea generale, vista la bassa disponibilità di azoto e fosforo (regioni oligotrofiche), nelle acque oceaniche i valori di produzione primaria sono bassi, ma in alcune zone oceaniche il fenomeno dell'*upwelling* (risalita di nutrienti) permette una produzione primaria molto elevata, fino al 50% della produzione primaria globale. In queste aree, la rete trofica mostra tassi massimi di produttività ed è per questo che sono zone molto ricche di pesci e cetacei (mammiferi). Oltre all'*upwelling*, anche immissioni fluviali terrigene e antropiche dei nutrienti possono contribuire alla disponibilità di nutrienti.

Luce, temperatura e disponibilità di nutrienti influenzano i tassi di produzione primaria, che perciò variano nelle varie regioni del globo. La latitudine gioca un ruolo determinante nella produzione primaria che, nelle aree temperate, segue il ciclo stagionale ed è caratterizzata da variabilità, due

picchi o fioriture ad alta biomassa in primavera e in autunno, bassa produzione nel periodo estivo; nelle aree tropicali, in cui le acque sono calde e stratificate, la produzione primaria è bassa tutto l'anno; ai poli, la presenza di luce solo nel lungo giorno polare (che dura fino a 6 mesi) dà origine ad una singola fioritura microalgale (Figura 7.3).

La produzione primaria si valuta come variazione della quantità di biomassa (misurata come quantità di carbonio per volume di colonna d'acqua nell'unità di tempo, in genere espressa come  $\text{mg C m}^{-3} \text{giorno}^{-1}$ ), oppure del pigmento clorofilla *a* ( $\mu\text{g l}^{-1}$ ) contenuta negli organismi fitoplanctonici, o con la conta diretta del numero di cellule fitoplanctoniche in un volume noto di acqua di mare.



**Figura 7.3** Produzione primaria alle diverse latitudini nell'emisfero boreale. In azzurro, le porzioni di triangolo indicano le quantità di biomassa prodotta e la variazione stagionale: nelle aree tropicali la produzione è pressoché costante nel corso dell'anno e piuttosto bassa, nelle aree temperate presenta due picchi, uno in primavera e uno in autunno, mentre la produzione polare ha un solo picco estivo. Le frecce indicano le differenze di illuminazione e disponibilità di nutrienti alle differenti latitudini (modificata da Kaiser et al., 2005)

### 7.3.2. Produzione secondaria

La **produzione secondaria** è sempre riferita ai consumatori eterotrofi e rappresenta velocità di immagazzinamento di materia ed energia da parte degli eterotrofi al netto di ciò che viene utilizzato per le funzioni metaboliche, cioè quanto consumato per respirazione, escrezione, ecc.

La sostanza organica prodotta dagli autotrofi viene utilizzata dagli erbivori dello zooplancton, per sopravvivere, crescere e riprodursi. Lo zooplancton erbivoro costituisce l'elemento essenziale di congiunzione tra i produttori primari, il fitoplancton, e il resto del sistema pelagico. Gli animali epipelagici più grandi non riescono a nutrirsi del microscopico fitoplancton, ma traggono nutrimento dallo zooplancton erbivoro, primo consumatore, che si ciba del fitoplancton. Quindi lo zooplancton erbivoro è fondamentale per la rete alimentare epipelagica, che si sostiene sul flusso di energia e materia che si stabilisce tra il fitoplancton e lo zooplancton erbivoro. I copepodi sono i principali organismi erbivori epipelagici e costituiscono circa il 70% della comunità dello zooplancton.

Sulla relazione trofica fitoplancton-zooplancton erbivoro si articola una complessa rete alimentare, con diversi livelli trofici. Tanto più complesse sono le connessioni all'interno della rete alimentare, tanto maggiore sarà il numero dei livelli trofici: è così che si aggiungono alla rete consumatori di secondo e terzo ordine, i carnivori più grandi, consumatori e predatori al vertice (tonni, squali, balene). Inoltre, il meso- e il macro-zooplancton includono, oltre lo zooplancton erbivoro, che si nutre di fitoplancton, anche lo zooplancton carnivoro, che si nutre di altro zooplancton o di larve di pesci, lo zooplancton detritivoro, che si nutre di detrito organico particolato, e lo zooplancton onnivoro che si nutre di vegetali, animali e detrito.

La produzione secondaria è influenzata da diversi fattori, quali la disponibilità di cibo, il tipo di metabolismo e la velocità di riproduzione degli organismi. Quest'ultima caratteristica è intrinseca a ciascuna specie, mentre gli altri fattori dipendono dall'ambiente esterno e sono i fattori che



regolano la produzione secondaria in mare. Lo zooplancton segue gli andamenti temporali del fitoplancton, ma con un ritardo temporale di qualche settimana. Nelle aree temperate sono generalmente evidenti due picchi di produzione dello zooplancton, più alti in estate, e più bassi in inverno. L'aumento dello zooplancton dipende dall'accrescimento del fitoplancton ma ne controlla anche l'abbondanza, secondo la dinamica preda-predatore.

#### 7.4. Eutrofizzazione, fioriture algali e fioriture algali nocive

Il cambio di colore delle acque è un fenomeno naturale dovuto alla proliferazione del fitoplancton in condizioni eutrofiche, cioè di elevata disponibilità di nutrienti (azoto e fosforo), questo fenomeno si definisce **eutrofizzazione**. L'eutrofizzazione è stata definita in vari modi, ma il concetto centrale è che l'arricchimento dell'acqua da parte dei nutrienti provoca un aumento della biomassa algale totale, spesso dominata da una o più specie o gruppi, che a sua volta determina un disturbo indesiderato dell'equilibrio degli organismi presenti nell'acqua e della qualità dell'acqua. L'eccesso di nutrienti nella colonna d'acqua può dipendere da processi naturali, per eventi di risospensione e risalita dei sali nutritivi dai fondali, che assieme ad altre condizioni abiotiche, come irradianza, temperatura e stabilità idrodinamica della colonna d'acqua possono originare **bloom** (fioriture) algali. Ma l'eccesso può anche dipendere da immissioni fluviali o scarichi che portano composti organici e inorganici in mare che incrementano le concentrazioni soprattutto di azoto e fosforo. Gli apporti fluviali sono spesso di origine antropica, derivanti da attività agricole, industriali e urbane. Le fioriture microalgali sono accompagnate da consumo di ossigeno con fenomeni di ipossia delle acque e, in casi estremi, di anossia (mancanza di ossigeno) che si propaga dal fondo fino in superficie, portando a morte organismi bentonici e pesci. Nelle fioriture algali ad elevata biomassa il trasferimento di energia ai livelli trofici più elevati è scarso, poiché nei *bloom* algali le specie non vengono consumate in modo efficiente, con conseguente riduzione del trasferimento di carbonio e altri nutrienti agli stock ittici (GeoHAB, 2006; Figura 7.4).

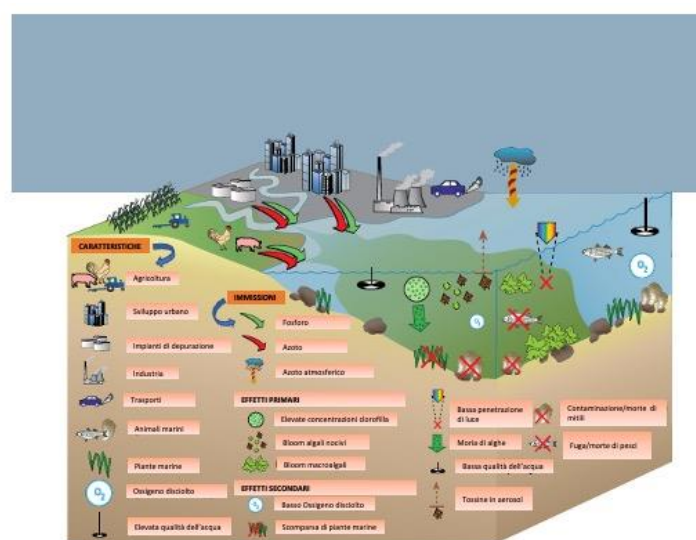


Figura 7.4 Diagramma concettuale del processo di eutrofizzazione (da: Integration and Application Network, University of Mayland, [www.ian.umces.edu](http://www.ian.umces.edu), 2006, modificata).

L'eutrofizzazione delle acque costiere è il risultato della crescita della popolazione umana e della produzione di cibo (agricoltura, allevamenti zootecnici e acquacoltura) ed energia, ed è considerato uno dei maggiori problemi di inquinamento a livello globale. Crescita demografica e aumento della produzione alimentare portano a importanti cambiamenti del paesaggio, con acque reflue, scarichi e deflussi da terreni coltivati e abitati. Oltre che dalla crescita della popolazione, l'eutrofizzazione

deriva anche dal grande aumento dell'uso di fertilizzanti chimici iniziato negli anni '50 dello scorso secolo e che si prevede continuerà ad aumentare in futuro se non si interverrà limitandone l'utilizzo (Glibert et al., 2006). Infatti, le nuove normative europee (poi recepite dai singoli Stati dell'Unione Europea), da anni stanno cercando di intervenire sulla limitazione degli inquinanti immessi in acque dolci e costiere, con buoni risultati. I composti di azoto e fosforo sono quelli maggiormente coinvolti nei processi di eutrofizzazione, ma soprattutto l'azoto merita più attenzione perché alla base dei fertilizzanti chimici più usati in agricoltura e perché in molte nazioni nel mondo è già stata applicata una restrizione sull'uso del fosforo, per esempio nei detersivi (Viaroli et al., 2018).

Fioritura di fitoplancton, fioritura di microalghe, di alghe tossiche, maree rosse o alghe nocive, sono tutti termini che indicano fenomeni naturali (Figura 7.5): le cosiddette fioriture, fenomeni di proliferazione ad elevata biomassa, talvolta includono fino a 300 specie di microalghe. Quasi un quarto di queste specie è noto per produrre tossine. La comunità scientifica fa riferimento a questi eventi con un termine generico, *Harmful Algal Bloom* (HAB), riconoscendo che, poiché è coinvolta un'ampia gamma di organismi e alcune specie hanno effetti tossici anche a bassa densità cellulare, non tutte le HAB sono 'algali' e non tutte si presentano come 'fioriture'. La proliferazione di microalghe nelle acque marine o salmastre può causare massicce morie di pesci, contaminare i frutti di mare con tossine e alterare gli ecosistemi tanto da farli percepire come dannosi. Un'ampia classificazione degli HAB distingue due gruppi di organismi: i **produttori di tossine**, che possono contaminare frutti di mare o uccidere i pesci anche a basse densità, e i **produttori ad elevata biomassa**, che possono causare anossia e morie indiscriminate degli organismi marini quando raggiungono concentrazioni elevate. Alcuni fenomeni HAB hanno le caratteristiche di entrambi (hab.ioc-unesco; Figure 7.5 e 7.6).



Figura 7.5 Esempi di fioriture algali. a) Fioritura di *Dinophysis* sp. in Norvegia (foto: Institute of Marine Research, [www.algeinfo.imr.no](http://www.algeinfo.imr.no).); b) fioritura di *Noctiluca* sp. in Adriatico (fonte: <https://www.ilrestodelcarlino.it>); c) fioritura di cianobatteri nel Mar Baltico (Photo: K. Kononen).

### 7.5. Cambiamenti climatici, non solo, e conseguenze sul plancton marino

L'evidenza che il clima stia cambiando è ormai accettata, soprattutto ora che è divulgata dai media, sul web e sui social. Gli ecosistemi terrestri e marini rispondono ai cambiamenti veloci e intensi operati dalle attività antropiche, che a loro volta sono il risultato dell'intenso sviluppo tecnologico/industriale e dell'aumento della popolazione umana sulla Terra. Negli ultimi decenni, il clima terrestre si è modificato rapidamente, non solo per cause naturali, ma soprattutto per effetto delle attività antropiche che hanno determinato un enorme aumento della concentrazione di gas serra in atmosfera (anidride carbonica, metano, idrofluorocarburi). L'incremento globale della concentrazione di biossido di carbonio è principalmente dovuto all'uso dei combustibili fossili e ai cambi di uso dei suoli, mentre quello del metano è principalmente dovuto all'agricoltura e alla zootecnia (IPCC, 2007).

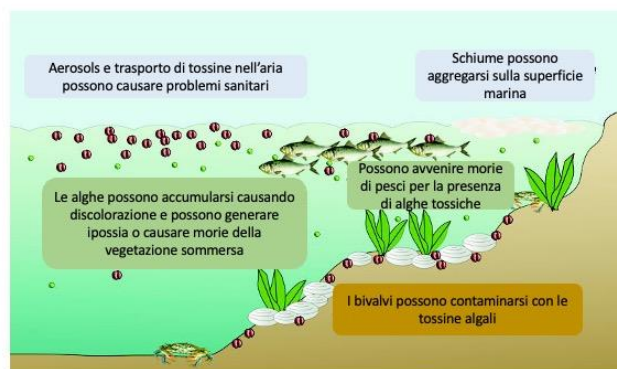


Figura 7.6 Schema di proliferazione di microalghe tossiche e impatto sull'ambiente e sull'uomo (fonte <http://hab.ioc-unesco.org>, modificata).

Il Mar Mediterraneo è un **hotspot di biodiversità** (letteralmente un 'punto caldo' di biodiversità, cioè una regione geografica con una significativa presenza di biodiversità) che contiene circa il 7,5% di tutte le specie descritte finora, oltre a un ricco patrimonio di specie endemiche, perché le acque sono calde e permettono di ospitare specie di ambienti temperati e intertropicali. Purtroppo, le basse profondità medie e l'elevato tasso di endemismo favoriscono il rischio di gravi alterazioni dovute al cambiamento climatico, con impatti evidenti e rapidi come: a) l'innalzamento del livello del mare, b) innalzamento della sua temperatura superficiale, c) l'alterazione del regime idrologico, d) l'acidificazione delle acque, e) il cambio dei cicli vitali degli organismi. L'innalzamento delle temperature superficiali favorisce la migrazione di specie meridionali verso nord: come la dispersione di specie aliene o esotiche che provengono da altri mari, in particolare dal Mar Rosso; queste sono spesso specie invasive, che tendono a soppiantare le specie endemiche mediterranee. Un esempio è la presenza di specie esotiche planctoniche che si manifesta anche con fioriture microalgali tossiche (es. *Ostreopsis ovata*) o di meduse pericolose (es. *Carybdea marsupialis*, anche se quest'ultima è probabilmente un endemismo mediterraneo; Bordehore et al., 2020).

Perché ci ritroviamo più meduse d'estate? Perché a volte il mare si colora di bruno-rossastro, o di giallo o verde? Sono evidenze che il mare può essere in sofferenza, soprattutto quando questi fenomeni sono frequenti e intensi. Le ragioni sono complesse, varie e non immediatamente chiare, ma proviamo a chiarirle.

Innanzitutto, va detto che il Mar Mediterraneo è un **mare oligotrofico** (povero di nutrienti) e semi-chiuso, e questo comporta un limitato ricambio di masse d'acqua; ha una profondità media ridotta, e un limitato apporto di acque dolci, per la prevalenza del fenomeno dell'evaporazione; inoltre presenta una ridotta escursione di marea e elevati livelli di concentrazione di ossigeno. Proprio queste peculiarità rendono il Mediterraneo un bacino sensibile agli effetti dei cambiamenti globali, con risposte più rapide e evidenti rispetto agli altri mari, su scala globale (Danovaro, 2017). Ancora, le risorse ittiche sono sempre di più depauperate dalla pesca intensiva, e i cambiamenti climatici contribuiscono a diminuire ulteriormente gli stock ittici. Si ritiene che il sovrasfruttamento delle risorse ittiche, soprattutto dei grandi predatori apicali, abbia favorito l'aumento delle meduse non limitandone la riproduzione. Inoltre, la crescente tendenza all'oligotrofia delle masse d'acqua di alcune aree del Mediterraneo, che dipende dal ridotto apporto di nutrienti proveniente dai fiumi locali (Giani et al., 2012), e il riscaldamento delle acque superficiali contribuiscono alla diminuzione della funzione di regolazione *top-down* dei grandi pesci pelagici, che lasciano "spazio ecologico" a meduse e altri carnivori gelatinosi (Boero, 2013), che sono anche favoriti dalle elevate temperature.

Sostanzialmente, non ci sono competitori o predatori apicali nella rete trofica, ed ecco il successo del macrozooplancton gelatinoso.

Inoltre, il clima controlla i parametri fondamentali che regolano la crescita delle alghe: dalla temperatura dell'acqua ai nutrienti, dalle precipitazioni e dagli input fluviali, alla luce. Il cambio climatico e la sua variabilità possono determinare variazioni della composizione in specie, della struttura trofica e della funzione degli ecosistemi marini. L'apporto di nutrienti è legato all'apporto di acqua dolce che, a sua volta, dipende dalla variabilità regionale del clima. L'immissione di nutrienti determina in larga misura i picchi di produzione primaria primaverile, e i carichi di nutrienti possono essere correlati alla variabilità e instabilità del tempo atmosferico stagionale (forti piogge, periodi lunghi di siccità ecc.). L'alterazione delle precipitazioni, con il conseguente aumento delle portate fluviali è uno scenario previsto con il cambiamento climatico, l'aumento della portata dei fiumi può determinare localmente la riduzione della salinità e la maggiore abbondanza di taxa fitoplanctonici che proliferano in acque a bassa salinità, compresa la formazione di fioriture di acqua dolce dovute a cianobatteri o altre specie di piccola taglia, che possono anche essere trasportate al largo o lungo costa, causando una potenziale esposizione di nuove aree alle fioriture di questi organismi.

#### BOX 7.1 Il macrozooplancton gelatinoso

Il macrozooplancton gelatinoso include animali quali sifonofori, idrozoi, scifozoi (le meduse) e ctenofori. Sono carnivori che catturano le prede utilizzando organi urticanti, le **nematocisti**, in cui è presente un filamento che viene espulso e inietta una tossina neurotossica nel corpo della preda causandone la morte o stordimento, oppure, come nel caso degli ctenofori, utilizzano lunghi tentacoli muniti di particolari cellule adesive, i **colloblasti**, che secernono sostanze adesive a cui rimangono attaccate le prede.



Il sifonoforo  
*Physalis physalia*  
(da: Wikipedia)



Da sinistra a destra, gli scifozoi *Pelagia noctiluca*, *Chrysaora hysoscella* e *Cotylorhiza tuberculata* (da: Wikipedia)



Lo ctenoforo  
*Mnemiopsis leidyi*  
(da: marinespecies.org)

Le meduse rivestono un importante ruolo ecologico nell'ecosistema marino, costituendo una componente centrale delle reti trofiche marine: negli oceani vengono consumate da un'ampia gamma di predatori marini, tra cui pesci, uccelli, tartarughe e vari invertebrati, tra cui polpi, cetrioli di mare, granchi e anfipodi. Nonostante la loro bassa densità energetica, il contributo delle meduse ai bilanci energetici dei predatori può essere molto maggiore di quanto ipotizzato per via della rapida digestione, dei bassi costi di cattura, e della disponibilità. Le meduse rappresentano anche un sito protetto per lo sviluppo di fasi larvali e giovanili dei pesci che le usano sia come protezione dai predatori sia come fonte di cibo, contribuendo a ridurre la mortalità dei pesci e aumentarne il reclutamento. Gli stadi giovanili dei pesci possono nutrirsi dello zooplancton trascinato dagli impulsi natatori delle meduse, quello catturato dai loro tentacoli, o anche dei parassiti dei crostacei, ospiti sulle meduse. Però è noto che questi carnivori planctonici gelatinosi competono con altri animali: le meduse possono competere con i pesci per le risorse alimentari o nutrirsi di uova e larve di pesce, riducendo la sopravvivenza e il reclutamento delle specie ittiche. Ma non solo, negli ultimi decenni, molti studi hanno documentato che le fioriture delle meduse hanno avuto conseguenze pronunciate per l'attività umana: impatto sul turismo costiero, intasamento delle reti da pesca o blocco delle prese d'acqua di raffreddamento delle centrali elettriche, che contribuiscono a dare una percezione complessivamente negativa delle specie gelatinose.



#### BOX VII.I segue. Il macrozooplancton gelatinoso

La maggior parte del macroplankton gelatinoso è innocuo per gli esseri umani, anche se esistono alcune specie pericolose, come la **caravella portoghese** o fisalia (*Physalia physalis*), un sifonoforo molto pericoloso, talvolta mortale per l'uomo. Le fisalie possono generare sciame lunghi chilometri che impongono la chiusura di spiagge. La cubomedusa *Carybdea marsupialis*, la **vespa di mare**, di piccole dimensioni e difficile da osservare, è in rapida espansione in Mediterraneo; provoca ustioni, a volte gravi, anche se non ai livelli mortali delle cubomeduse dell'Oceano Indiano. La *Pelagia noctiluca* è una delle meduse più comuni, il suo veleno è fra i più urticanti e dolorosi, ed è una specie che potrebbe diventare invasiva nelle zone costiere italiane.

Invece, specie note dei nostri mari sono: *Aurelia aurita*, la **medusa quadriglia**, innocua; *Chrysaora hysoscella*, abbastanza frequente e urticante; *Cotylorhiza tuberculata*, la **cassiopea mediterranea**, innocua per l'uomo e spesso associata a pesci o crostacei che la adottano come rifugio; *Rhizostoma pulmo*, il **polmone di mare**, la medusa comune più grande del Mediterraneo, non urticante, e la *Cassiopea andromeda*, urticante, entrata nel Mediterraneo dal canale di Suez, che rivolge i tentacoli verso l'alto per via della simbiosi con le zooxantelle (microalghe), che vivono nei tentacoli e hanno bisogno di luce per la fotosintesi. Ancora, in Mediterraneo si trova una specie di medusa molto rara, la *Drymonema dalmatinum*, forse la medusa più grande esistente, che ha un ombrello che arriva fino a quasi 1 m di diametro (Baya e Dawson 2010); questa medusa si ciba di altre meduse, come *Aurelia* sp., ma recentemente, nel Golfo di Trieste, è stato osservato un caso di predazione anche su meduse più grandi, come *Rhizostoma pulmo*.

Medusa mediterranea



*Drymonema dalmatinum*  
(da: Wikipedia)

Meduse, potenziali colonizzatrici del Mediterraneo



*Phyllorhiza punctata* (da: Wikipedia)



*Cassiopea andromeda* (da: Cemal Turan)

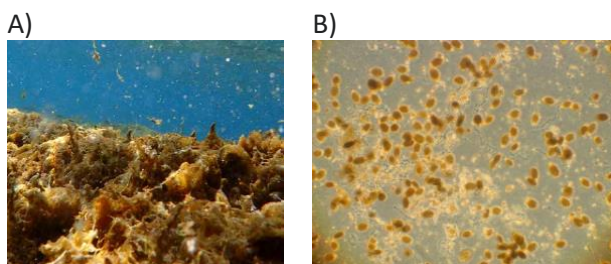
Nel Mar Mediterraneo il riscaldamento globale, con l'innalzamento della temperatura media delle acque, favorisce la riproduzione delle meduse e l'ingresso di specie tropicali aliene e/o invasive che vengono avvistate lungo le coste prevalentemente nei periodi estivi come la *Phyllorhiza punctata*, originaria dell'Oceano Pacifico occidentale e la già citata *Cassiopea andromeda*, originaria del Mar Rosso.

#### 7.6. Bioinvasioni: specie invasive e specie aliene

Una specie alloctona o **specie aliena** è una specie (animale o vegetale) che va a colonizzare nuove aree, diverse da quelle di origine, riuscendo a riprodursi e anche a disperdersi. La causa della dispersione della specie alloctona può essere naturale o mediata dell'azione dell'uomo. Quando la specie alloctona, per le sue elevate capacità competitive, compromette le relazioni di comunità e l'ecosistema stesso, si definisce **invasiva** (Galil et al., 2015, 2018). La definizione IUCN, concordata anche dalla Convenzione sulla Diversità Biologica, definisce come specie aliene invasive (*Invasive Alien Species*, IAS), quelle "specie – animali o vegetali - che vengono introdotte accidentalmente o deliberatamente in un ambiente naturale o semi-naturale, dove normalmente non si trovano, con gravi conseguenze negative per il loro nuovo ambiente, e che rappresentano una grave minaccia per le specie autoctone e la diversità biologica nativa" (IUCN, 2017). Una specie aliena però, può sia

convivere sia entrare in competizione con le specie autoctone e prendere il sopravvento, portando a volte le popolazioni autoctone persino all'estinzione. Uno dei motivi più frequenti del vantaggio delle specie aliene su quelle autoctone è l'assenza di predatori e parassiti specifici che possano frenare la loro crescita. Anche le specie del plancton marino possono disperdersi, andare a colonizzare nuove aree e proliferare nel nuovo ambiente, lontano da quello di origine. Spesso la conquista di nuovi areali da parte di queste specie è favorita dalle attività antropiche e dalle temperature superficiali in aumento in questi ultimi decenni, favorevoli per i nuovi colonizzatori. Il Mar Mediterraneo è collegato a 3 mari tramite stretti o passaggi quali, lo Stretto di Gibilterra, lo Stretto dei Dardanelli e il Canale di Suez. La sua natura chiusa lo rende suscettibile all'introduzione di specie aliene, minacciando così la ricca biodiversità del bacino. Il Mediterraneo è considerato l'ecosistema marino più esposto alle invasioni, sia per le intense attività antropiche sia per l'aumento delle temperature superficiali dell'acqua del mare (Ghabooli et al., 2013).

Risulta alquanto difficile dare una definizione di specie aliena alle specie di fitoplancton marino in quanto, per definizione, il fitoplancton è considerato cosmopolita, ovvero disperso su tutti i mari e gli oceani. Le eccezioni riguardano soprattutto i taxa di aree tropicali e polari, in cui gli ecosistemi sono particolarmente caratteristici per cicli di irradianza e temperatura, in relazione alla collocazione latitudinale. Per quel che riguarda il Mar Mediterraneo, gli studiosi spesso non sono d'accordo sulla definizione di specie fitoplanctoniche aliene e invasive (Marapouti et al., 2020; Gomez e Galil, 2021) ma negli ultimi anni una specie bentonica microalgale, che si riscontra anche in colonna d'acqua durante le fioriture stagionali, il dinoflagellato *Ostreopsis ovata*, viene da alcuni considerata specie invasiva. Infatti, alcuni studiosi ritengono che quest'alga "tropicale", che causa intensi *bloom* tossici in molte aree costiere del Mediterraneo a partire dal 2005, sia stata introdotta dall'Oceano Pacifico Orientale mentre altri ritengono, anche sulla base di analisi filogeografiche, che sia endemica del Mediterraneo (Penna et al., 2010; Marapouti et al., 2020; Gomez e Galil, 2021). *Ostreopsis* compare in estate o a fine estate, predilige temperature estive o tardo estive e origina le fioriture lungo costa, dapprima su substrati di varia natura (macroalghe, sassi, rocce, fanerogame, gusci di bivalvi) e poi si ritrova per risospensione nella colonna d'acqua (Totti et al., 2010). Le fioriture di *Ostreopsis* sono associate spesso sia a effetti dannosi sulla salute umana per via della produzione di potenti tossine immesse nell'aerosol marino e della contaminazione di bivalvi eduli, sia alla mortalità di organismi bentonici marini. Le tossine prodotte da *Ostreopsis* sono composti della palitossina, una delle più potenti tossine marine non proteiche finora conosciute (Ciminiello et al., 2006). Non è facile determinare la relazione tra fattori ambientali e fioriture algali tossiche in Mar Mediterraneo: la temperatura sembra giocare un ruolo, anche se non chiaro, nello sviluppo e nell'espansione di *Ostreopsis*, che potrebbe essere collegato al cambiamento climatico globale e in particolare, all'aumento della temperatura media superficiale (Gladan et al., 2019; Figura 7.7).



**Fig. 7.7** A) Aggregati mucillaginosi di *Ostreopsis ovata* che galleggiano in prossimità della superficie del mare durante una fioritura (da: Berdalet et al., 2017); B) Immagine al microscopio ottico di una fioritura di *Ostreopsis* (foto: A. Penna).

### 7.7. Un segnale di attenzione

È evidente che, già solo considerando gli effetti di cambiamenti climatici globali, sovrasfruttamento della pesca e immissione di inquinanti in mare, le problematiche relative alla riduzione della

biodiversità e dei servizi ecosistemici che il mare ci offre non potranno che esacerbarsi nel prossimo futuro: la funzionalità degli ecosistemi marini potrà cambiare con importanti conseguenze anche sulla nostra salute e benessere, e questo sarà particolarmente importante per le generazioni future. Per evitare conseguenze irrimediabili bisogna continuare ad intervenire su vari fronti: la ricerca per acquisire nuove conoscenze e i modelli previsionali, per comprendere quale sarà lo scenario futuro degli oceani. La *governance* politica dovrà definire e applicare norme, da aggiornare continuamente, per la protezione e la mitigazione degli impatti antropici: già sono in vigore normative che tutelano e difendono il mare dalle immissioni di inquinanti (WFD 2000/60/EU; MSFD 2008/56/EU; BWD 2006/7/EU). Ma i cittadini, e soprattutto i giovani, i futuri “governanti” del pianeta Terra, dovranno costantemente essere sensibilizzati e aggiornati sugli effetti provocati dalla crescita continua, che ancora segue un modello esponenziale, e dall’attuale modello di antropizzazione, attuando comportamenti virtuosi e diversi per il rispetto dell’ambiente.

## 7.8 Bibliografia

- Bayha KM., Dawson MN. 2010. New family of allomorphic jellyfishes, Drymonematidae (Scyphozoa, Discomedusae), emphasizes evolution in the functional morphology and trophic ecology of gelatinous zooplankton. *Biol Bull.* 219: 249–267.
- Berdalet E, Tester PA, Chinain M, Fraga S, Lemée R, Litaker W, Penna A, Usup G, Vila M, Zingone A. 2017. Harmful algal blooms in benthic systems: Recent progress and future research. *Oceanography* 30: 36–45.
- Boero F, 2013. Review of Jellyfish Blooms in the Mediterranean and Black Sea, in GFCM Studies and Reviews, vol. 92.
- Bordehore C, Fonfría ES, Alonso C, Rubio-Tortosa B, Acevedo MJ, Canepa A, et al, 2020. Effects of environmental variables on the distribution of juvenile cubomedusae *Carybdea marsupialis* in the coastal Western Mediterranean. *PLoS ONE* 15 (6): e0230768.
- Castro P, Huber ME, 2011. *Biologia marina*. Ed. McGraw-Hill, Stampa Vincenzo Bona Torino, pp. 517.
- Ciminiello P, Dell’Aversano C, Fattorusso E, Forino M, Magno GS, Tartaglione L, Grillo C, Melchiorre N, 2006. The Genoa 2005 outbreak. Determination of putative palytoxin in Mediterranean *Ostreopsis ovata* by a new liquid chromatography–tandem mass spectrometry method. *Anal Chem* 78: 6153–6159.
- Danovaro R, 2017. Vulnerabilità degli ecosistemi marini. Focus sul Mediterraneo. *Equilibri* (ISSN 1594-7580) 2: 323-336.
- Danovaro R, 2018. *Biologia marina*. Ed. Città Studi, Milano, pp. 451.
- Galil B, Marchini A, Occhipinti-Ambrogi A, 2018. Histories of Bioinvasions in the Mediterranean pp 21-49. *Mare Nostrum, Mare Quod Invasitur—The History of Bioinvasions in the Mediterranean Sea*. Springer, Ed. Ana Isabel Queiroz, Simon Pooley.
- Galil B, Boero F, Campbell ML et al., 2015. Double trouble: the expansion of the Suez Canal and marine bioinvasions in the Mediterranean Sea. *Biol Inv* 17: 973–976.
- GEOHAB, 2006. Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, Harmful Algal Blooms in Eutrophic Systems. P. Glibert (ed.) IOC and SCOR, Paris and Baltimore, 74 pp.
- Ghabooli S, Shiganova TA, Briski E, Piraino S, Fuentes V, Thibault-Botha D, Angel DL, Cristescu ME, MacIsaac HJ, 2013. Invasion pathway of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in the Mediterranean Sea. *PLoS One* 8(11): e81067.

- Giani M, Djakovac T., Degobbi D, Cozzi S, Solidoro C, Fonda Umani S, 2012. Recent changes in the marine ecosystems of the northern Adriatic Sea. *Estuar Coast Shelf Sci* 115: 1–13.
- Gladan ZN, Arapov J, Casabianca S, Penna A, Honsell G et al., 2019. Massive occurrence of the harmful benthic dinoflagellate *Ostreopsis* cf. *ovata* in the Eastern Adriatic Sea. *Toxins* 11: 300.
- Glibert PM, Burkholder JM, 2006. The Complex Relationships Between Increases in Fertilization of the Earth, Coastal Eutrophication and Proliferation of Harmful Algal Blooms. *Ecology of Harmful Algae*. pp. 341-354.
- Gomez F, Galil B, 2021. Comments on the “Mediterranean alien harmful algal blooms” by Marampouti et al, Environ. Sci. Pollut. Res. 2021. *Environ Sci Pollut Res* 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12954-2>
- <http://hab.ioc-unesco.org/>
- IPCC 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IUCN (International Union for Conservation of Nature) 2017. Issues brief: invasive alien species and climate change. <https://www.iucn.org/theme/climate-change/events/iucn-unfccc/2015-paris>. Accessed July 2019
- Kaiser M, Attrill M, Thomas D, Barnes D, Polunin N, Raffaelli D, Williams P. 2005. Marine Ecology. Ed. Oxford, pp 557.
- Marampouti C, Buma AGJ, de Boer MK 2021. Mediterranean alien harmful algal blooms: origins and impacts. *Environ Sci Pollut Res* 28: 3837-3851.
- Penna A, Fraga S, Battocchi C, Casabianca S, Giacobbe MG, Riobó P, Vernesi C, 2010. A phylogeographical study of the toxic benthic dinoflagellate genus *Ostreopsis* Schmidt. *J Biogeogr* 37: 830–841.
- Totti C, Accoroni S, Cerino F, Cucchiari E, Romagnoli T, 2010. *Ostreopsis ovata* bloom along the Conero Riviera (northern Adriatic Sea): relationships with environmental conditions and substrata. *Harmful Algae* 9: 233–239.
- Viaroli P, Soana E, Pecora S, Laini A, Naldi M, Fano EA, Nizzoli D. 2018. Space and time variations of watershed N and P budgets and their relationships with reactive N and P loadings in a heavily impacted river basin (Po River, Northern Italy). *Sci Total Environ* 639: 1574–1587.





Modificata da: [https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/soil\\_biodiversity\\_brochure\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/soil_biodiversity_brochure_en.pdf)

*‘Sappiamo più del movimento dei corpi celesti che del suolo sotto i piedi’*

Leonardo da Vinci

## 8. IL SUOLO: UNA RISORSA PREZIOSA DA TUTELARE

**Flora Angela Rutigliano**

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Ambientali, Biologiche e Farmaceutiche, Università degli Studi della Campania *Luigi Vanvitelli*

Passeggiando in un bosco o in un prato raramente rivolgiamo la nostra attenzione a ciò che stiamo calpestando, essendo maggiormente attratti dagli organismi macroscopici, come le piante o i molti animali. Eppure il suolo, che è sotto i nostri piedi, pullula di vita! Ma andiamo a scoprire come è fatto, come funziona e, ancora più importante, qual è il suo ruolo negli ecosistemi terrestri.

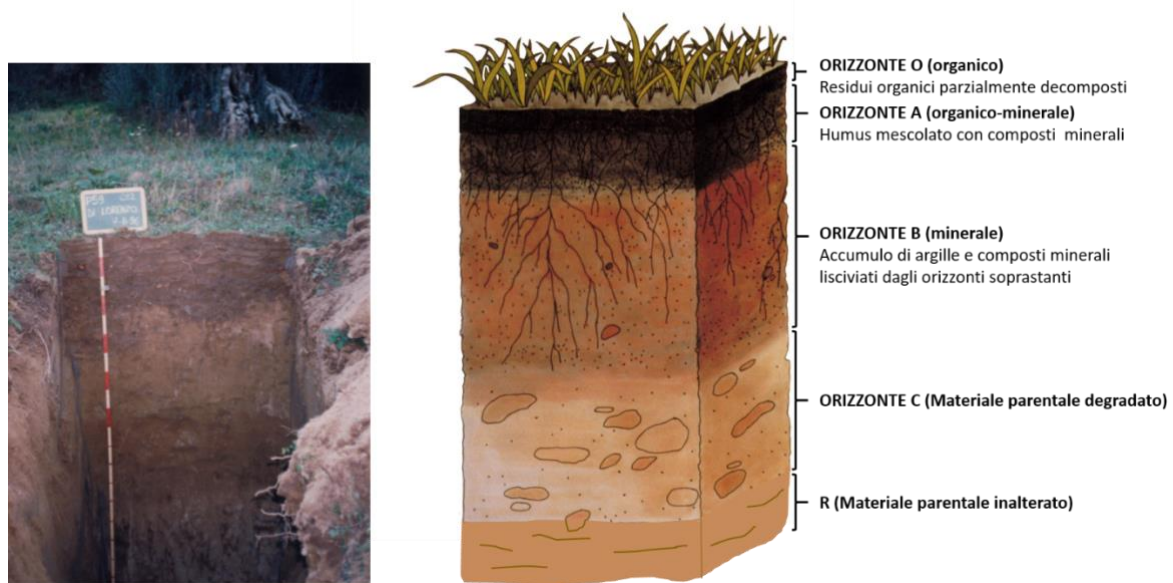
### *8.1. Il suolo: una componente chiave degli ecosistemi terrestri*

Il suolo costituisce lo strato più superficiale della crosta terrestre ed è parte integrante degli ecosistemi terrestri. È composto da materiali minerali, sostanze organiche, aria e acqua e rappresenta il prodotto dell'azione combinata di clima, topografia e organismi viventi sul materiale parentale (roccia e minerali originari) nel corso del tempo. Ospita una cospicua parte della biodiversità della terra, regola la maggior parte dei processi che si svolgono negli ecosistemi terrestri, tra i quali la produzione primaria, i cicli dell'acqua e dei nutrienti, e fornisce un supporto fisico alle piante e agli animali, oltre che alle attività umane.

Questa importante componente degli ecosistemi terrestri è piuttosto “nascosta” e per studiarla è necessario fare uno scavo, anche di alcuni metri, dal quale risulta evidente la presenza di diversi strati di colore diverso (detti **orizzonti**) che costituiscono complessivamente il **profilo del suolo** (Figura 8.1). In un suolo maturo, ossia in uno stadio avanzato del processo di formazione del suolo (detto **pedogenesi**, dal greco “*pedon*” = suolo e “*genesis*” = nascita), è possibile osservare diversi orizzonti (Figura 8.1). Tuttavia il profilo del suolo non può essere generalizzato in quanto può variare molto in base al tipo di suolo: in alcuni suoli alcuni orizzonti possono mancare del tutto mentre in altri possono differenziarsi strati di transizione tra gli orizzonti principali.

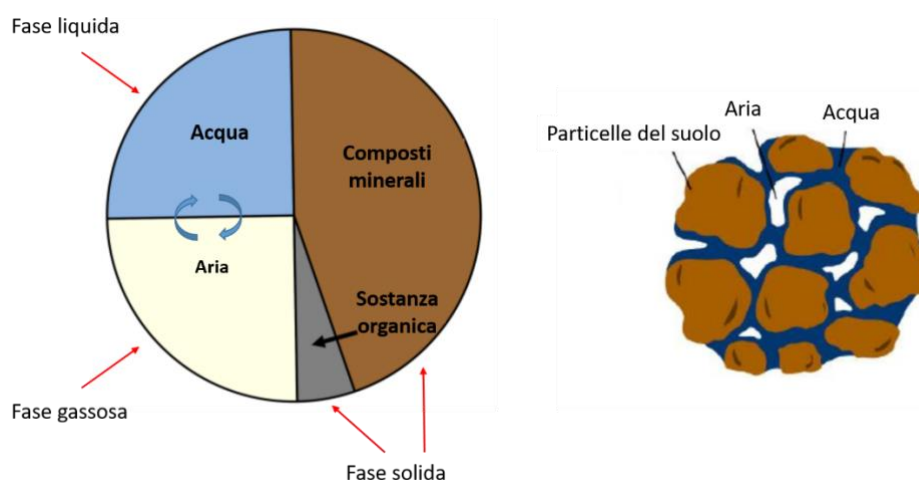
Il processo di pedogenesi, a partire dal materiale parentale, può richiedere diverse migliaia di anni ed è il risultato di complessi processi fisici, chimici e biologici che si realizzano simultaneamente all'evoluzione della componente epigea degli ecosistemi terrestri. Come già riportato, il processo è regolato da diversi fattori ambientali naturali, quali il clima, gli organismi viventi, la topografia, il materiale parentale e il tempo, ai quali molto spesso si aggiunge l'attività antropica, che può modificare ciascuno dei fattori naturali.

**Il suolo è un sistema trifasico.** Esso comprende una parte solida, una liquida e una gassosa (Figura 8.2). La parte solida è prevalentemente minerale, ma contiene anche, in misura minore, una componente organica. La componente minerale più grossolana (particelle con diametro maggiore di 2 mm) costituisce lo **scheletro** del suolo, mentre le particelle più piccole (diametro minore di 2 mm), che corrispondono alla **terra fine**, vengono classificate, in base alla dimensione, in sabbia, limo e argilla, che sono progressivamente più piccole.



**Figura 8.1** Il profilo del suolo; a sinistra: foto di un suolo di Aliano (MT) in cui sono evidenti strati di diverso colore (foto di E. Coppola), a destra: schema di profilo di un generico suolo con l'indicazione dei diversi orizzonti (da: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/edu>; modificata).

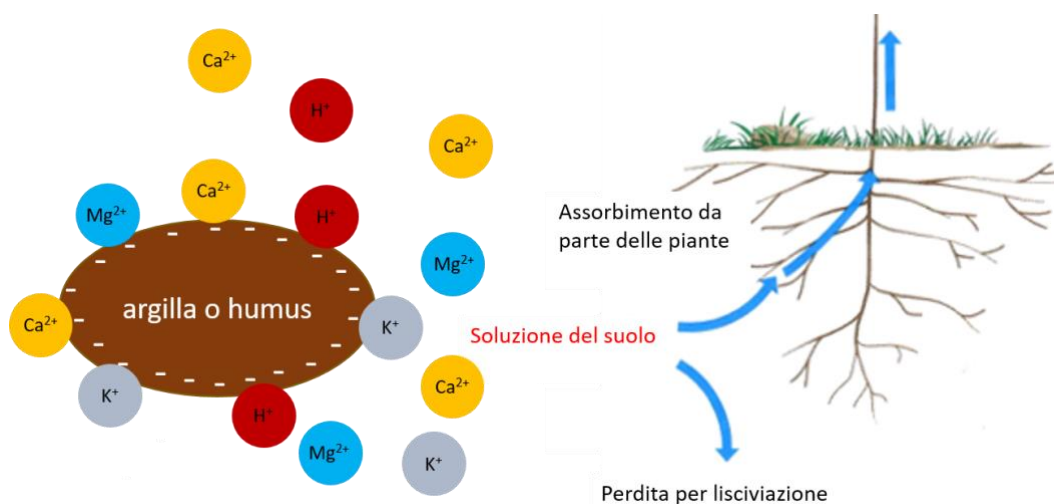
La percentuale delle tre frazioni granulometriche nella terra fine, detta **tessitura** del suolo, rappresenta un'importante proprietà del suolo in quanto da essa dipende la **porosità** del suolo, che a sua volta influenza la **disponibilità di acqua e aria per gli organismi che vivono nel suolo**. Un suolo sabbioso è caratterizzato da pori relativamente grandi, dai quali l'acqua si allontana velocemente sotto l'azione della forza di gravità (e per questo è detta **acqua gravitazionale**) e che saranno prevalentemente occupati da aria e quindi ben ossigenati. Al contrario un suolo argilloso presenta pori molto più piccoli, nei quali l'acqua viene fortemente trattenuta da forze capillari (ed è quindi detta **acqua capillare**), e l'aria tende a scarseggiare. Pertanto in un suolo sabbioso l'acqua è un fattore limitante per le piante e per gli organismi edafici, mentre in un suolo argilloso è l'ossigeno ad essere principalmente limitante. Un suolo limoso ha caratteristiche intermedie. Un suolo con un'equilibrata presenza di particelle di sabbia, limo e argilla (detto **suolo franco**) è ideale per gli organismi viventi perché conterrà sia pori occupati dall'acqua che pori pieni d'aria.



**Figura 8.2** Le tre fasi del suolo (a sinistra) e loro interazione nello spazio (a destra). I pori lasciati liberi dalle particelle solide del suolo vengono occupati da acqua (pori più piccoli) o da aria (pori più grandi). (rispettivamente da: [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/7thru12/?cid=nrcs142p2\\_054330](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/7thru12/?cid=nrcs142p2_054330), modificata e <https://extension.unr.edu/publication.aspx?PubID=3066>, modificata).

L'acqua presente nel suolo è importante non solo come risorsa direttamente usata dagli organismi viventi, ma anche come mezzo nel quale sono presenti, in forma immediatamente disponibile, i nutrienti minerali, derivanti sia dalla degradazione delle rocce che dalla decomposizione della sostanza organica. Inoltre, è nella frazione liquida del suolo che si svolgono molti processi extracellulari in cui sono coinvolti i microrganismi.

I nutrienti solubili in acqua sarebbero facilmente lisciviati verso gli strati sottostanti se non si verificasse nel suolo un importante processo detto **scambio cationico** (Figura 8.3): i cationi possono legarsi reversibilmente alle cariche negative superficiali presenti sia sulle particelle di argilla sia su quelle di **humus**, la sostanza organica molto complessa che si accumula nell'orizzonte A del suolo (Figura 8.1). I cationi legati possono poi passare nella soluzione acquosa del suolo, a seguito di uno "scambio" con altri cationi sui siti di legame. Quindi un maggior contenuto di argilla e humus nel suolo corrisponde ad una maggiore capacità di legare reversibilmente i cationi (detta **capacità di scambio cationico**) ed evitarne la lisciviazione.



*Figura 8.3* Processo di scambio cationico: i cationi si legano alle cariche negative superficiali di argilla e humus in modo reversibile, così da poter essere rilasciati in soluzione in seguito allo scambio con altri cationi e da essere disponibili per le piante, ma evitando, al tempo stesso, perdite eccessive per lisciviazione (da: Smith e Smith, 2007, modificata).

La componente solida organica è estremamente eterogenea; essa include sostanza organica a diversi stadi di decomposizione e **humus**, una sostanza di neo-sintesi nella quale non è possibile riconoscere più il materiale originario. L'humus deriva prevalentemente dall'idrolisi di macromolecole di origine vegetale (quali carboidrati strutturali, grandi proteine, ecc.) e dalla ri-polimerizzazione dei monomeri prodotti.

**La sostanza organica del suolo include anche una miriade di organismi viventi.** Un grammo di suolo può contenere milioni di batteri, diverse migliaia di metri di filamenti (dette "ife") di funghi e diverse migliaia di ciliati (Orgiazzi et al., 2016). È stato stimato che il suolo ospita il 25 % della biodiversità mondiale! ([https://ec.europa.eu/environment/soil/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm)).

Gli **organismi del suolo** (indicati complessivamente con il termine latino **edaphon** o **organismi edafici**, dal greco *edafos* = suolo) comprendono archei, batteri, protisti (eucarioti unicellulari, quali flagellati, ciliati, alghe), funghi e **pedofauna** (ossia fauna del suolo). A questi organismi si aggiungono naturalmente le radici delle piante! Gli essudati radicali attraggono una moltitudine di organismi intorno alla radice in una zona definita **rizosfera**. Nel suolo sono rappresentati tutti i ruoli trofici:



sono presenti **autotrofi**, ossia organismi in grado di produrre sostanza organica a partire da molecole inorganiche usando, come fonte di energia la luce (**fotoautotrofi**, quali cianobatteri e alghe) o reazioni chimiche (batteri **chemioautotrofi**) ed **eterotrofi** (batteri eterotrofi, funghi, e animali), ossia organismi che usano, come fonte di energia, la sostanza organica prodotta dagli autotrofi. Gli organismi edafici vengono generalmente classificati in base alle dimensioni corporee, in quanto queste riflettono il loro ruolo funzionale. Secondo tale classificazione, che non ha una base tassonomica, l'edaphon è distinto in microrganismi, microfauna, mesofauna, macrofauna e megafauna (Fig. 8.4; Orgiazzi et al., 2016). I microrganismi (organismi più piccoli di 10 micrometri ( $\mu\text{m}$ ), non visibili ad occhio nudo ma solo con l'ausilio di un microscopio) e la microfauna vivono principalmente nelle pellicole d'acqua interstiziali e hanno un ruolo importante nel processo di decomposizione della materia organica morta e nella degradazione del materiale parentale. La mesofauna vive nelle cavità piene di aria e partecipa alla trasformazione della sostanza organica, triturandola e aumentando così la superficie di attacco per i microrganismi. La macrofauna include detritivori, ma anche erbivori e predatori, che si muovono attraverso il suolo aumentandone la permeabilità all'acqua e l'aerazione, ma anche creando nuovi habitat per i microrganismi (sono gli ingegneri del suolo, come i lombrichi). Le loro feci sono *hotspot* di biodiversità e attività microbica. Infine la megafauna crea eterogeneità sulla superficie del suolo e lungo il suo profilo con i suoi spostamenti (FAO, ITPS, GSBI, CBD and EC, 2020).

L'insieme degli organismi edafici dà vita ad una complessa **rete alimentare** all'interno del suolo (Figura 8.5) e sulla sua superficie, partecipa quindi ad una varietà di interazioni biotiche, dalla competizione per le risorse alimentari, alla predazione e al parassitismo, fino alle interazioni mutualistiche che forniscono beneficio ai partner interagenti. Tra queste, i mutualismi tra funghi e alghe (i cosiddetti **licheni**) che conferiscono un'elevata abilità nella colonizzazione di vari tipi di ambienti, grazie alla capacità di assorbire nutrienti anche direttamente dal materiale parentale, i mutualismi tra radici delle piante e funghi (detti **micorrize**), che facilitano l'assorbimento dei nutrienti da parte delle piante, e quelli tra radici delle piante e batteri azoto-fissatori, che rendono disponibile per il partner vegetale l'azoto atmosferico "fissato" dai batteri.

Gli organismi del suolo hanno un ruolo chiave nel ciclo dei nutrienti. Infatti i microrganismi (principalmente batteri e funghi), coadiuvati dalla pedofauna, decompongono la materia organica morta, liberando via via elementi minerali (es. N, P, K, ecc.) in una forma direttamente utilizzabile dalle piante. Essi inoltre contribuiscono alla produzione di humus. L'humus si decompone molto lentamente, rappresentando una riserva di carbonio e di altri nutrienti che viene trattenuta a lungo nel suolo; inoltre, come già detto, l'humus è in grado di legare reversibilmente cationi sulla sua superficie e di trattenere l'acqua, conferendo fertilità al suolo.

## 8.2. I servizi ecosistemici forniti dal suolo

Il suolo, grazie alle sue proprietà, svolge funzioni indispensabili per il rifornimento dei servizi ecosistemici, dai servizi di approvvigionamento (per es., cibo e materiali) a quelli di regolazione (la regolazione del ciclo dell'acqua e dei nutrienti) e finanche ai servizi culturali (per es., estetici, ricreativi, ecc.; Figura 8.6).

Circa il 95% del cibo che l'uomo usa è direttamente o indirettamente prodotto dai suoli della Terra ([https://ec.europa.eu/environment/soil/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm)). I suoli forniscono all'uomo materiali da costruzione e costituiscono la base strutturale per le attività antropiche. Sono fonte di principi attivi di molti farmaci, come gli antibiotici penicillina e streptomicina, prodotti, rispettivamente da funghi

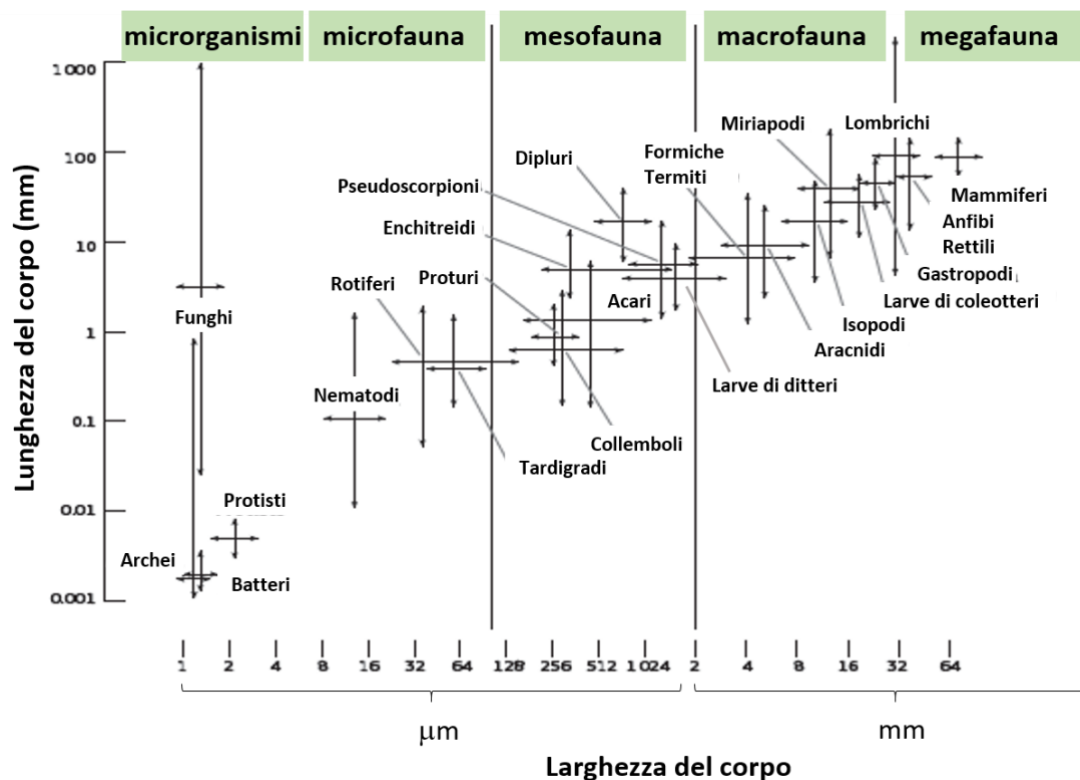


Figura 8.4 La classificazione degli organismi del suolo sulla base delle dimensioni corporee (da Orgiazzi et al., 2016, modificata)

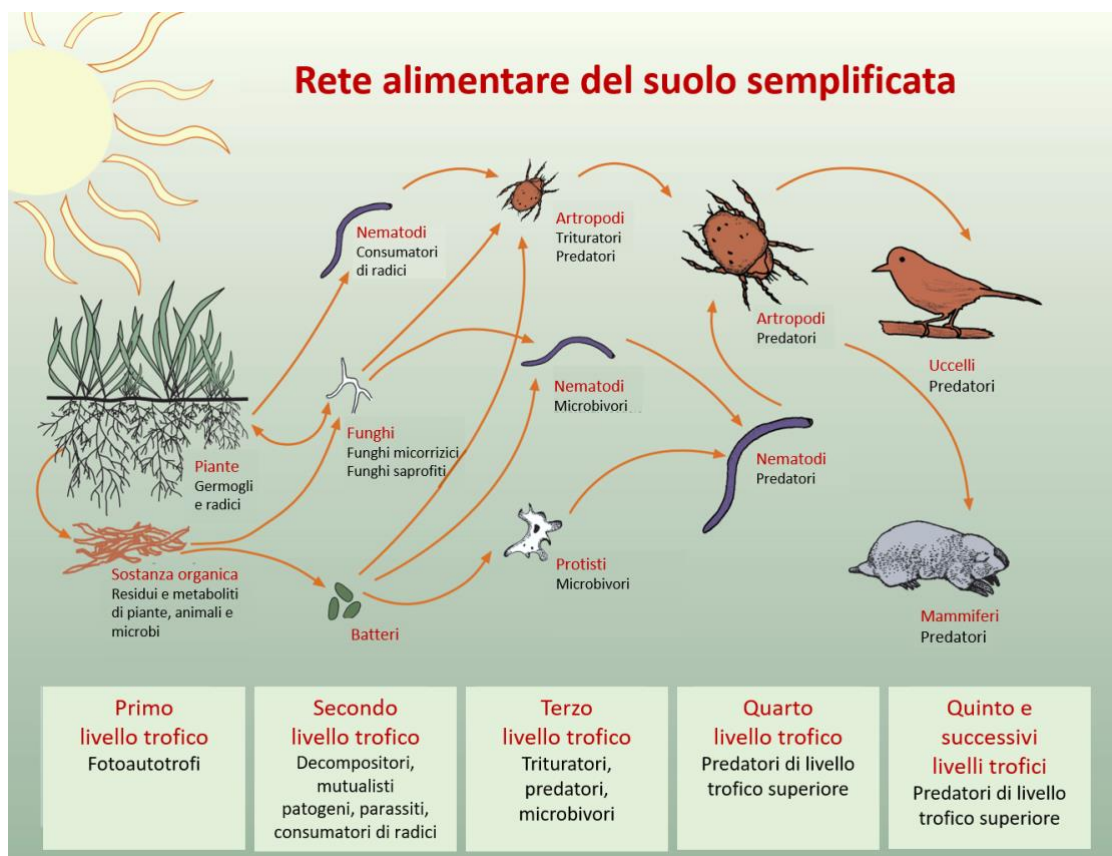


Figura 8.5. Una rete alimentare del suolo, semplificata (da: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/photogallery/soils/health/biology/gallery/?cid=1788&position=Promo>, modificata)

del suolo del genere *Penicillium* spp. e dall'actinomicete *Streptomyces griseus*. Forniscono habitat a milioni di specie (Jónsson et al., 2017).

I suoli filtrano e purificano l'acqua, rendendola potabile, regolano il flusso dell'acqua e prevengono le inondazioni. Senza il suolo l'acqua piovana allagherebbe tutto! È quello che vediamo spesso nelle nostre città dove il suolo è scomparso quasi del tutto sotto un manto di asfalto o cemento!

I suoli regolano il clima grazie al sequestro del carbonio. I suoli della Terra contengono circa il doppio della quantità di carbonio presente nell'atmosfera e circa 3 volte la quantità di C presente nella vegetazione ([https://ec.europa.eu/environment/soil/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm)).

Grazie alla loro comunità biotica, ed in particolare alla componente microbica, i suoli regolano il ciclo dei nutrienti. I microbi del suolo, insieme ai minerali e alla sostanza organica umificata, sono anche in grado di filtrare, tamponare, degradare, immobilizzare e detossificare sostanze inquinanti immesse dall'uomo, e così facendo depurano anche l'acqua che via via penetra nel suolo e in parte raggiunge la falda freatica (la fonte più preziosa di acqua potabile per l'uomo!).

I suoli sono pertanto cruciali per la mitigazione del cambiamento climatico e l'adattamento ad esso, per la produzione agricola e la sicurezza alimentare, per la conservazione della natura e della biodiversità e sono alla base della nostra salute e del nostro benessere.

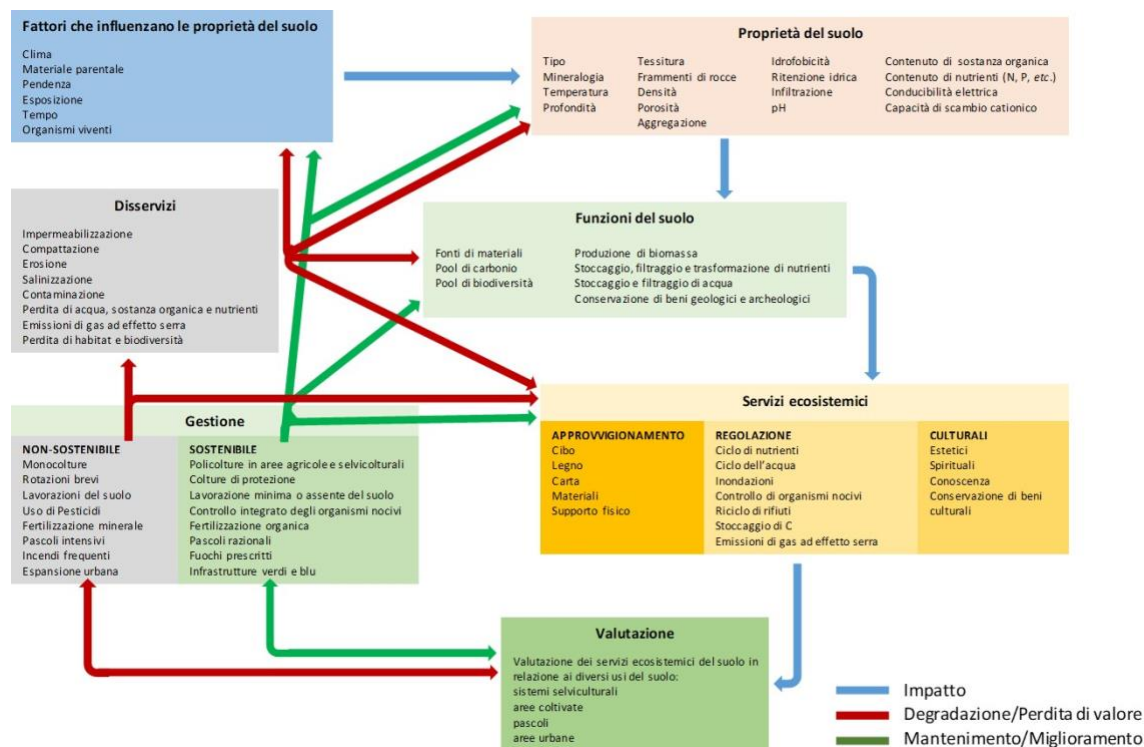


Figura 8.6 Proprietà e funzioni del suolo, servizi ecosistemici ed effetto su di essi dei sistemi di gestione (da: Pereira et al., 2018, modificata)

I suoli hanno anche una funzione culturale. Essi ci raccontano la nostra storia attraverso i reperti archeologici sepolti, offrono attività ricreativa e rappresentano una parte fondamentale delle religioni (Jónsson et al., 2017). La Sacra Bibbia recita "Allora il Signore Dio plasmò l'uomo con polvere del suolo, e soffiò nelle sue narici un alito di vita, e l'uomo divenne un essere vivente" (Genesi, 2,7).

Ai servizi ecosistemici in cui è coinvolto il suolo è attribuito un elevato valore economico. Secondo una delle prime quantificazioni del valore economico dei servizi ecosistemici (Costanza et al., 1997),

complessivamente stimato pari a oltre 33.000 miliardi di dollari all'anno, oltre 17.000 miliardi di dollari all'anno sono associati al servizio di riciclo dei nutrienti, nel quale gli organismi edafici svolgono un ruolo di primo piano! Recentemente In Italia il Comitato per il Capitale Naturale (istituito con la Legge n. 221/2015) ha valutato che il servizio di produzione di biomasse agricole del nostro Paese, dovuto al sistema pianta-suolo, ammonta a circa 900 milioni di euro all'anno! (Terzo Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale in Italia, 2019). Tuttavia la fornitura di servizi ecosistemici da parte del suolo può essere compromessa se tale risorsa viene gestita dall'uomo in modo non sostenibile, alterandone proprietà e funzioni (Figura 8.6).

Perché il suolo possa fornire servizi ecosistemici all'umanità è necessario che esso si trovi in "buona salute". È possibile valutare lo stato di salute del suolo, o *soil health* (anche indicato come qualità del suolo o *soil quality*), che è definito come la capacità del suolo di funzionare come sistema vivente che sostiene piante, animali e uomini. Diverse proprietà del suolo (come il contenuto in sostanza organica e nutrienti, la biomassa e l'attività dei microrganismi del suolo, ecc.) possono essere misurate e i loro valori possono essere utilizzati per l'elaborazione di indici di qualità del suolo (Marzaioli et al., 2010).

### 8.3. Effetti dell'attività antropica sulla risorsa suolo

La risorsa suolo, come molte altre risorse che costituiscono il capitale naturale, sta subendo gravi minacce dovute alla crescente domanda di materie prime da parte della popolazione umana, che cresce in modo esponenziale, con un incremento di 81 milioni di persone all'anno! (stima del 2020; <https://www.worldometers.info/world-population/>).

L'impatto antropico sul suolo si può far risalire addirittura a 13.000 anni fa, ma è diventato progressivamente più marcato a partire dalla prima rivoluzione agricola (Pereira et al., 2018).

A causa dell'uso del suolo (es. attività agro-pastorale e selvicolturale) e dei cambiamenti di uso del suolo (per esempio la deforestazione per ottenere aree agricole e pascoli), così come dell'attività industriale, degli incendi e del cambiamento climatico indotto dall'uomo, il suolo sta subendo ingenti e talora irreversibili alterazioni quantitative (perdita di suolo) e qualitative (degradazione del suolo).

#### 8.3.1. Perdita di suolo

L'impermeabilizzazione del suolo, causata dalla copertura permanente con manufatti (edifici, strade, parcheggi, ecc.; Figura 8.7), determina una perdita di suolo generalmente irreversibile (a meno che questo non venga prima rimosso e utilizzato altrove), solo in parte compensata da interventi di recupero (attraverso demolizione dei manufatti, de-impermeabilizzazione del suolo, rinaturalizzazione dell'area). Il bilancio tra la perdita di suolo dovuta alla copertura del suolo, e l'aumento di superfici agricole, naturali e semi-naturali naturali, per effetto di interventi di recupero, viene definito **consumo netto di suolo** (Munafò, 2021). Tale consumo va di pari passo con il **consumo netto di terre** (EC, 2012) o "*net land take*" (con *land* si intende un sistema produttivo biologico terrestre che include suolo, vegetazione e altro biota, assieme ai processi idrologici ed ecologici che in esso avvengono; United Nations Convention to Combat Desertification – UNCCD, 1994).

In Europa (EU-28) tra il 2000 e il 2018, il consumo netto di terre è stato circa 710 km<sup>2</sup> per anno (EEA, 2019; <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/land-take-and-net-land>), che corrispondono a un totale di 12.760 km<sup>2</sup> (di cui 916 km<sup>2</sup> in Italia). Anche se la velocità di consumo netto di terre in Europa sta diminuendo (dai circa 920 km<sup>2</sup> per anno del periodo 2000-2006 ai 440 km<sup>2</sup> per



anno del periodo 2012-2018), siamo ancora ben lontani dall'obiettivo comunitario di **consumo netto di terre = zero** da raggiungere entro il 2050 (EU Environm. Action Progr. to 2020 - 7th EAP).



*Figura 8.7 Esempio di consumo di suolo agricolo nella città di Milano: l'area dell'EXPO 2015 nel 2001 (a sinistra) e nel 2014 (a destra); immagini da Google Earth (17/09/2021).*

Un'altra grave minaccia per la risorsa suolo è la perdita di suolo causata dal processo di **erosione**, che consiste nella perdita degli strati più superficiali (Figura 8.8), principalmente dovuta all'azione dell'acqua piovana e del vento, ma in alcuni casi anche all'asportazione di suolo con il raccolto.

L'erosione del suolo è favorita dalla mancanza o dalla carenza di vegetazione (che si verifica spesso nelle aree coltivate in modo intensivo), che lascia il suolo completamente o parzialmente nudo per lunghi periodi di tempo e quindi più esposto all'azione erosiva dell'acqua e del vento. Essa determina una perdita di sostanza organica e nutrienti, con gravi ripercussioni sugli organismi edafici e sulle piante. In Europa il tasso medio di erosione idrica in aree agricole, forestali e seminaturali è stimato in 2,46 tonnellate per ettaro per anno ( $t\ ha^{-1}\ anno^{-1}$ ), con una perdita complessiva di 970 milioni di tonnellate per anno (Panagos et al., 2015). In questa stima l'Italia ha un triste primato, con un tasso di erosione medio di  $8,46\ t\ ha^{-1}\ anno^{-1}$ ! L'erosione del suolo purtroppo non è compensata dalla pedogenesi, che in Europa è in media pari a  $1,4\ t\ ha^{-1}\ anno^{-1}$  (Panagos et al., 2015). Nel 12,7 % delle colture europee sono stati calcolati tassi di erosione ( $> 5\ t\ ha^{-1}\ anno^{-1}$ ) ben più alti dei tassi di pedogenesi!



*Figura 8.8 Erosione del suolo visibile in un'area coltivata (nocciueto, a sinistra) e in un'area a pascolo (gariga, a destra) della Campania, Italia (Foto di F.A. Rutigliano)*

All'erosione idrica si aggiunge l'erosione dovuta al vento, in media pari a  $0,53\ t\ ha^{-1}\ anno^{-1}$  nelle aree coltivate dell'Unione Europea (Borrelli et al., 2017), e quella causata dall'asportazione di suolo con

il raccolto. Nel periodo 2000-2016, le sole colture di barbabietola da zucchero e patate (che coprono il 3,8 % delle terre coltivate dell'Unione Europea - EU-28) hanno contribuito all'erosione con 0,13 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>, con una quantità di suolo totale persa ogni anno di 14,7 milioni di tonnellate (Panagos et al., 2019).

### *8.3.2. Degradazione del suolo e desertificazione*

La degradazione del suolo è definita come un cambiamento dello stato di salute del suolo che comporta una ridotta capacità degli ecosistemi di fornire beni e servizi all'umanità (<http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/en/>).

La degradazione del suolo include un insieme di processi, tra i quali rientra ovviamente anche l'erosione del suolo che rimuove gli strati superficiali, più fertili e ricchi di vita.

Il fenomeno della degradazione del suolo consiste in complesse alterazioni fisiche, chimiche e biologiche dovute all'attività antropica: dal cambio di uso, all'uso del suolo per attività agro-silvo-pastorali, alle attività industriali e agli incendi.

L'**uso del suolo** e il **cambiamento di uso del suolo**, da aree naturali o semi-naturali a pascoli e aree coltivate, può esporre il suolo a fenomeni erosivi più intensi, per via della rimozione (anche parziale) della vegetazione; a questo effetto si aggiungono altre alterazioni specifiche che dipendono dal tipo di attività che si avvia.

Per esempio, la deforestazione in ambiente tropicale corre ad una velocità netta di 5,5 milioni di ettari l'anno (secondo una stima relativa al periodo 2010–2015; Veldkamp et al., 2020), e produce profonde alterazioni viste le caratteristiche del suolo in quelle aree. Infatti, molti suoli tropicali sono poco fertili, in quanto i nutrienti minerali, derivanti dalla rapida decomposizione della sostanza organica morta (favorita dalle alte temperature e dalle abbondanti precipitazioni che favoriscono l'attività dei decompositori), sono rapidamente assorbiti dalle piante e immobilizzati nella biomassa vegetale. Questo rapido riciclo garantisce la conservazione dei nutrienti nell'ecosistema; al contrario la distruzione della vegetazione espone il suolo a intensi fenomeni erosivi, dovuti proprio alle abbondanti precipitazioni, con un ulteriore impoverimento del suolo. Per questo i cambiamenti del suolo legati alla deforestazione nelle foreste tropicali/equatoriali possono durare per tempi molto lunghi e interessare anche gli strati più profondi del suolo. Essi includono la riduzione della riserva di nutrienti e sostanza organica, e quindi l'alterazione dei cicli biogeochimici, ma anche la riduzione della riserva idrica del suolo e della capacità di drenare e filtrare l'acqua (Veldkamp et al., 2020).

L'attività di **pascolo** prolungata nel tempo e con un carico di bestiame eccessivo (il **sovra-pascolo**) può alterare profondamente il sistema suolo-piante. Uno dei principali effetti del sovra-pascolo è la **compattazione** del suolo, che consiste nell'aumento di densità del suolo causato dalla riduzione o addirittura dalla perdita di porosità del suolo. La compattazione del suolo aumenta la resistenza alla penetrazione delle radici e influenza negativamente gli organismi del suolo poiché la loro presenza è limitata a pori sufficientemente grandi. Inoltre riduce la capacità di infiltrazione dell'acqua, favorendo così i processi di erosione, in particolare in aree collinari e montane. La riduzione di porosità riduce anche la disponibilità di ossigeno, limitando la crescita di piante e organismi edafici. La compattazione del suolo può interessare anche le **aree coltivate**, in tal caso essa è dovuta principalmente all'uso di macchinari pesanti. È stato stimato che circa il 23 % dei suoli dell'Unione Europea (EU-28) ha elevate densità (Stolte et al., 2016). Dal momento che la compattazione del suolo riduce l'infiltrazione dell'acqua, questa, in ambienti pianeggianti, può accumularsi dando luogo a fenomeni di **saturazione idrica** e quindi a condizioni di anossia, riducendo la crescita delle piante e rendendo quindi i suoli meno produttivi e, di conseguenza, anche più esposti all'erosione.

Alla degradazione del suolo contribuisce anche l'apporto sia locale sia diffuso di **sostanze inquinanti** per effetto dell'attività antropica. Fonti di inquinanti per il suolo sono rappresentate da emissioni industriali, residui di pesticidi, fertilizzanti minerali (principalmente nitrati e fosfati), alcuni ammendanti organici (alcuni compost, letami e fanghi di depurazione), conservanti per il legno e prodotti farmaceutici. Le sostanze inquinanti (che includono elementi in traccia e composti organici persistenti) possono entrare nella catena alimentare, con possibili rischi per la salute dell'uomo (Rutigliano et al., 2019). Nell'Unione Europea EU-28, attività urbane e industriali potenzialmente inquinanti localmente si verificano in 2,8 milioni di siti, ma solo il 24 % di questi siti è stato inventariato! (EEA, 2019). Mentre dal 1990 si sta riducendo la contaminazione diffusa dei suoli dovuta alle deposizioni atmosferiche, in controtendenza, alcuni elementi in traccia - come rame (ampiamente usato come fungicida) e cadmio (principalmente presente nei fertilizzanti minerali contenenti fosforo) - assieme a residui di pesticidi organici di sintesi si stanno accumulando nei suoli coltivati. Questo desta molta preoccupazione in quanto possono accumularsi sia nelle colture che nelle acque sotterranee usate come acqua potabile (EEA, 2019), ma la contaminazione del suolo può avere ripercussioni anche su altri comparti ambientali, attraverso fenomeni di dilavamento.

In aree coltivate un'altra causa di alterazione del suolo è l'uso eccessivo di **fertilizzanti minerali**, reso necessario dal progressivo impoverimento dei suoli agricoli, causato sia dalla rimozione del raccolto (che impedisce la naturale restituzione dei nutrienti attraverso la decomposizione della sostanza organica morta) sia dai processi erosivi. Dal 1961 ad oggi la quantità di fertilizzanti in agricoltura è aumentata di 9 volte (IPCC, 2019). L'eccesso di fertilizzazione rende le colture più appetibili per i loro parassiti/erbivori, richiedendo un più massiccio uso di pesticidi, che possono accumularsi nel suolo, oltre che essere trasferiti alle colture. L'uso eccessivo di fertilizzanti minerali crea squilibri nel suolo che possono modificare la composizione della comunità edafica e possono avere ripercussioni anche in altri comparti ambientali. L'aggiunta di nitrato al suolo, in eccesso rispetto alle esigenze delle piante e in condizioni di anossia, è responsabile dell'aumento delle emissioni di protossido di azoto (un gas serra), in quanto favorisce il processo di denitrificazione, cioè la trasformazione del nitrato in protossido di azoto e azoto molecolare, in condizioni anaerobiche. L'eccesso di fertilizzazione ha anche un impatto sui corpi idrici vicini: infatti i nitrati e i fosfati dilavati dai suoli vengono trasportati dalle acque di ruscellamento verso i corpi idrici determinandone l'eutrofizzazione (dal greco *eutrofia* = buono stato di nutrizione), cioè l'arricchimento in sostanze nutritive, che causa l'eccessivo accrescimento di alghe e piante. Tale crescita esuberante, non essendo compensata dal consumo da parte degli erbivori, determina, a sua volta, un aumento della biomassa vegetale e, alla morte di alghe e piante, un accumulo di detrito. Questo, a sua volta, innesca un'elevata degradazione microbica, con la conseguente riduzione della concentrazione di ossigeno nell'acqua e la morte di molti organismi, con il conseguente degrado dell'ambiente.

Un altro fenomeno che contribuisce alla degradazione del suolo è la **salinizzazione**, cioè l'accumulo di sali solubili in acqua nella parte superficiale del suolo, che limita la crescita delle piante. Tale processo, dovuto all'irrigazione di suoli coltivati con acqua ricca di sali, in Europa si verifica principalmente nelle regioni mediterranee, dove le condizioni idriche stagionalmente limitanti determinano un'elevata evaporazione di acqua e un conseguente accumulo di sali nella parte superficiale dei suoli. Il 25 % dei suoli coltivati irrigati in area mediterranea si trova in condizioni di moderata o elevata salinizzazione; in Italia il problema è particolarmente rilevante in Campania e Sicilia (Stolte et al., 2016).

In condizioni idriche limitanti, il processo di degradazione del suolo può culminare nella **desertificazione**, definita dalla Convenzione delle Nazioni Unite per Combattere la Desertificazione (UNCCD, 1994) come *"la degradazione delle terre in regioni aride, semi-aride e sub-umide secche risultante da vari fattori, che includono le variazioni climatiche e le attività antropiche"*. A livello mondiale, 1,5



miliardi di persone risentono direttamente di questo problema. Ogni anno, 12 milioni di ettari di terre diventano improduttive e 75 miliardi di tonnellate di suolo sono perse per sempre (Stolte et al., 2016). In Europa, è stato stimato che l'8% del territorio delle regioni meridionali, centrali e orientali (circa 14 milioni di ettari) ha una sensibilità alla desertificazione alta o molto alta. Questa stima sale a oltre 40 milioni di ettari se si includono le aree a moderata sensibilità (EEA, 2010). Molte aree della Penisola iberica e del Sud Italia versano già in condizioni critiche (Figura 8.9): esse mostrano livelli di sostanza organica del suolo al di sotto di una soglia critica, oltre la quale anche un'ulteriore piccola perdita determina un forte peggioramento di tutte le altre proprietà del suolo (Grilli et al., 2021).



*Figura 8.9 Aree a elevato rischio di desertificazione in una gariga a Lampedusa, Italia (a sinistra) e in una dehesa spagnola fortemente degradata dal pascolo (a destra; foto di S. Castaldi).*

Il **cambiamento climatico** in atto rende questo problema sempre più grave, in particolare nelle aree dove si sta verificando, oltre ad un aumento di temperatura, anche un incremento di aridità. Quest'ultimo rende le terre degradate, già poco produttive, progressivamente sempre meno produttive, lasciando il suolo sempre più nudo, fino ad assumere un aspetto desertico anche in climi che non dovrebbero ospitare questo tipo di ecosistema. Se da un lato si assiste ad una riduzione delle precipitazioni dall'altro, a seconda della localizzazione geografica, si assiste ad un aumento di fenomeni piovosi estremi, che hanno un maggior poter erosivo. Da diversi modelli risulta che il cambiamento climatico determinerà un aumento dell'erosione del suolo dovuto all'incremento del potere erosivo delle precipitazioni (IPCC, 2019). D'altra parte la degradazione del suolo può, a sua volta favorire il cambiamento climatico, non solo riducendo l'accumulo di C nel suolo, ma anche favorendo le emissioni di anidride carbonica e altri gas ad effetto serra, quali il protossido di azoto e il metano, attraverso pratiche agricole che stimolano i processi microbici che li producono. Nel periodo 2007-2016, complessivamente, l'agricoltura, la selvicoltura e altri usi del suolo hanno contribuito a circa il 23 % delle emissioni antropogeniche di anidride carbonica, metano e protossido di azoto insieme (espressi come equivalenti di CO<sub>2</sub>; IPCC, 2019).

Il cambiamento climatico insieme ai cambiamenti d'uso del suolo sta determinando un incremento della frequenza e dell'intensità degli **incendi**. Solo nel corso del 2019 oltre 430.000 ettari di aree naturali e semi-naturali europee sono state percorse dal fuoco (il 48 % in siti Natura 2000), di cui 36.000 ettari in Italia, principalmente nell'Italia meridionale e insulare (27.000 ettari; San-Miguel-Ayanz et al., 2020). Questo tipo di perturbazione rappresenta una grave minaccia per il suolo: la distruzione della vegetazione favorisce l'erosione e quindi la rimozione dei nutrienti minerali presenti nelle ceneri lasciate dal fuoco sulla superficie del suolo. Inoltre, quando il fuoco si propaga



sulla superficie del suolo (oltre che da chioma a chioma), non solo mineralizza la sostanza organica morta, abbondante negli strati superficiali, con conseguente depauperamento della sostanza organica nel suolo e alterazione della comunità edafica, ma determina anche un incremento di emissioni di anidride carbonica in atmosfera, che si protraggono anche per lunghi periodi dopo la fine della perturbazione (Rutigliano et al., 2002).

#### 8.4. Protezione del suolo

Data l'importanza del suolo per l'umanità e le minacce che questa risorsa sta subendo, molte politiche/accordi globali riguardano direttamente o indirettamente anche il suolo. Senza suoli sani e un uso sostenibile delle terre non possono essere raggiunti molti dei 17 obiettivi (*goal*) stabiliti dall'**Agenda 2030 delle Nazioni Unite per lo Sviluppo Sostenibile** (EEA Signals 2019; Figura 8.10).

Anche nella **Strategia dell'UE sulla biodiversità per il 2030** è stato sottolineato che il suolo è una risorsa non rinnovabile estremamente importante, vitale per la salute dell'uomo e l'economia, così come per la produzione di alimenti e nuovi farmaci. Pertanto, il Piano dell'UE di ripristino della natura include l'obiettivo di arginare il consumo di terre e ripristinare i suoli degradati, con particolare attenzione alla protezione della fertilità del suolo, alla riduzione dell'erosione e all'incremento della sostanza organica del suolo. Inoltre, la Strategia Europea include, tra i 14 impegni chiave per il 2030, quello di realizzare progressi significativi nella bonifica dei suoli.

Dato che un ruolo chiave per garantire il rifornimento di servizi ecosistemici è svolto dalla sostanza organica del suolo, che è più abbondante negli strati più superficiali, la gestione sostenibile degli ecosistemi terrestri non può esimersi dal proteggere o, meglio ancora, dall'incrementare questa importante componente del sistema suolo. Questo si può tradurre, nella gestione sostenibile degli ecosistemi agro-pastorali, in pratiche in grado di ridurre l'erosione del suolo, evitando di lasciare il suolo nudo per lunghi periodi (per esempio, attraverso consociazioni con colture di protezione, minima lavorazione del suolo, riduzione del carico di bestiame, ecc.) e riducendo il ruscellamento dell'acqua piovana in aree collinari e montane (per esempio, con terrazzamenti, siepi, miglioramento delle tecniche di irrigazione), ma anche con pratiche che possano incrementare la quantità di sostanza organica del suolo. Tra queste, vanno annoverate sia le colture di copertura, che possono arricchire il suolo con le parti morte che via via producono e con gli essudati radicali, ma anche l'apporto di fertilizzanti organici, a lento rilascio di nutrienti (per esempio, compost, letame, *biochar*), che stimolano l'attività dei microrganismi del suolo. L'aggiunta di *biochar* al suolo, per esempio, ha stimolato per alcuni mesi l'attività metabolica microbica del suolo in un campo di grano (Rutigliano et al., 2014). L'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), nel suo Report "*Climate change and land*" (IPCC, 2019) sottolinea come le pratiche che incrementano il contenuto di carbonio organico del suolo, riducano l'erosione e migliorino la gestione dei pascoli e delle colture contribuendo anche all'adattamento e alla mitigazione del cambiamento climatico.



**Figura 8.10** La protezione del suolo è indispensabile per il raggiungimento di molti degli obiettivi stabiliti dall'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile (EEA Signals 2019, modificata).

Ridurre l'incidenza di incendi violenti è un altro obiettivo da perseguire per proteggere il suolo, oltre che la vegetazione e la popolazione umana. Questo può realizzarsi utilizzando un fuoco controllato, il cosiddetto **fuoco prescritto**, realizzato in specifiche condizioni (dette "prescrizioni") con lo scopo principale di ridurre la quantità e la continuità del combustibile vegetale in modo da rallentare o bloccare la propagazione delle fiamme, qualora si inneschi un incendio (Figura 8.11).



**Figura 8.11** La pratica del fuoco prescritto applicata in una pineta del Vesuvio per ridurre la quantità di combustibile e quindi il rischio di incendi violenti, allo scopo di proteggere la popolazione umana ma anche il sistema suolo-vegetazione (Foto di F.A. Rutigliano)

Questa pratica, diffusa in Australia, Stati Uniti e Sud Africa in aree in cui il fuoco è una componente naturale degli ecosistemi, ma solo recentemente sperimentata in Italia (Ascoli et al., 2012), non ha determinato effetti negativi, se non di breve durata, né sul suolo di diversi ambienti boschivi dell'Italia meridionale, né sulla vegetazione (Esposito et al., 2014; Catalanotti et al., 2018; Giuditta et al., 2019). Inoltre in alcuni casi il fuoco prescritto può contribuire alla conservazione di habitat di interesse comunitario (ai sensi della Direttiva "Habitat" 92/43/CEE), come l'**habitat 6210** [Formazioni erbose secche seminaturali e facies coperte di cespugli su sustrati calcarei (*Festuco-Brometalia*) (\*notevole fioritura di orchidee)] del Parco Nazionale del Cilento, Vallo di Diano e Alburni (Ascoli et al., 2012).

## 8.5. Bibliografia

- Ascoli D, Catalanotti AE, Valesse E, Cabiddu S, Delogu G, Driussi M, Esposito A, Leone V, Lovreglio R, Marchi E, Mazzoleni S, Rutigliano FA, Strumia S, Bovio G, 2012. Prescribed burning experiences in Italy: an integrated approach to prevent forest fires. *Forest@* 9:20-38. DOI: 10.3832/efor0686-009
- Borrelli P, Lugato E, Montanarella L, Panagos P, 2017. A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach. *Land Degrad Develop* 28: 335–344. DOI: 10.1002/ldr.2588
- Catalanotti AE, Giuditta E, Marzaioli R, Ascoli D, Esposito A, Strumia S, Mazzoleni S, Rutigliano FA, 2018. Effects of single and repeated prescribed burns on soil organic C and microbial activity in a *Pinus halepensis* plantation of Southern Italy. *Appl Soil Ecol* 125:108-116. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.12.015
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260
- EEA, 2010. The European environment - State and outlook 2010. Soil. EEA and JRC. Luxembourg: Publications Office of the European Union. [www.eea.europa.eu/soer](http://www.eea.europa.eu/soer)
- EEA, 2019. The European environment - state and outlook 2020. Knowledge for transition to a sustainable Europe DOI: 10.2800/96749
- EEA signals 2019. Land and soil in Europe. Why we need to use these vital and finite resources sustainably. DOI: 10.2800/779710
- EC, 2012. Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing DOI:10.2779/75498
- Esposito A, Ascoli D, Croce A, Giordano D, Catalanotti AE, Mazzoleni S, Bovio G, Salgueiro A, Palheiro P, Loureiro C, Rutigliano FA, 2014. Experimental prescribed burning in Turkey oak forest of Cilento and Vallo di Diano National Park (Southern Italy): effects on vegetation and soil. In: Viegas D.X. (Ed.), *Advances in Forest Fire Research*. Pombalina.uc.pt, digitalis.uc.pt, pp. 536-547. DOI: 10.14195/978-989-26-0884-6\_61
- FAO, ITPS, GSBI, CBD and EC. 2020. State of knowledge of soil biodiversity. Status, challenges and potentialities, Report 2020. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
- Giuditta E, Marzaioli R, Esposito A, Ascoli D, Stinca A, Mazzoleni S, Rutigliano FA, 2019. Soil microbial diversity, biomass, and activity in two pine plantations of Southern Italy treated with prescribed burning. *Forests* 11 (1): 19. DOI: 10.3390/f11010019.
- Grilli E, Carvalho SCP, Chiti T, Coppola E, D'Ascoli R, La Mantia T, Marzaioli R, Mastrocicco M, Pulido F, Rutigliano FA, Quatrini P, Castaldi S, 2021. Critical range of soil organic carbon in southern Europe lands under desertification risk. *J Environ Manag* 287: 112285. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112285
- Jónsson JÖG, Davíðsdóttir B, Nikolaidis NP, 2017. Chapter Twelve - Valuation of Soil Ecosystem Services. *Adv Agron* 142:353-384. DOI: 10.1016/bs.agron.2016.10.011
- IPCC, 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems Shukla PR, Skea J, Calvo Buendia E, et al. (eds.). <https://www.ipcc.ch/srccl/>

- Marzaioli R, D'Ascoli R, De Pascale RA, Rutigliano FA, 2010. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Appl Soil Ecol* 44:205–212. DOI: 10.1016/j.apsoil.2009.12.007
- Munafò M, 2021. Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2021. Report SNPA 22/21. [https://www.snpambiente.it/wp-content/uploads/2021/07/Rapporto\\_consumo\\_di\\_suolo\\_2021-1.pdf](https://www.snpambiente.it/wp-content/uploads/2021/07/Rapporto_consumo_di_suolo_2021-1.pdf)
- Orgiazzi A, Bardgett RD, Barrios E, et al. (Eds.), 2016. Global Soil Biodiversity Atlas. European Commission, Publications Office of the European Union. DOI:10.2788/2613
- Panagos P, Borrelli P, Poesen J, Ballabio C, Lugato E, Meusburger K, Montanarella L, Alewell C, 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environ Sci Policy* 54:438–447. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.08.012
- Panagos P, Borrelli P, Poesen J, 2019. Soil loss due to crop harvesting in the European Union: a first estimation of an underrated geomorphic process. *Sci Total Environ* 664:487–498. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.009
- Pereira P, Bogunovic I, Muñoz-Rojas M, Brevik EC, 2018. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Curr Opin Environ Sci Health* 5:7–13. DOI: 10.1016/j.coesh.2017.12.003
- Rutigliano FA, Fierro AR, De Pascale RA, De Marco A, Virzo De Santo A, 2002. Role of fire on soil organic matter turnover and microbial activity in a Mediterranean burned area. In: Violante A., Huang P.M., Bollag J-M., Gianfreda L. (eds.), Soil Mineral-Organic Matter-Microorganism Interactions and Ecosystem Health. *Developments in Soil Science* 28B:205–215.
- Rutigliano FA, Marzaioli R, De Crescenzo S, Trifuoggi M, 2019. Human health risk from consumption of two common crops grown in polluted soils. *Sci Total Environ* 691: 195–204. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.037
- Rutigliano FA, Romano M, Marzaioli R, Baglivo I, Baronti S, Miglietta F, Castaldi S, 2014. Effect of biochar addition on soil microbial community in a wheat crop. *Eur J Soil Biol* 60: 9–15. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2013.10.007
- San-Miguel-Ayaz J, Durrant T, Boca R, et al., 2020. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2019, EUR 30402. JRC 122115. DOI: 10.2760/468688
- Smith TM, Smith RL, 2007. Edizione italiana (Ambrogi Occhipinti A et al, eds.), Elementi di Ecologia. Pearson.
- Stolte J, Tesfai M, Øygarden L, et al. (Eds), 2016. Soil threats in Europe: status, methods, drivers and effects on ecosystem services. EUR 27607 EN. DOI:10.2788/828742
- Veldkamp E, Schmidt M, Powers JS, Corre MD, 2020. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. *Nat Rev Earth Environ* 1: 590–605. DOI: 10.1038/s43017-020-0091-5





Foto di S. Vizzini

*“Chi ha a che fare con gli ambienti litorali salmastri sa bene che essi sono una forma di paesaggio naturale co-evoluta con la storia dell'uomo, il quale in ognuno di essi ha lasciato la sua orma, più o meno profonda, fin dai tempi più antichi della sua storia”*

Gian Carlo Carrada  
Professore di Ecologia, Università di Napoli Federico II

## 9. TRA TERRA E MARE: LE ACQUE DI TRANSIZIONE

Salvatrice Vizzini e Antonio Mazzola

Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Università degli Studi di Palermo

### 9.1 Introduzione

Un ipotetico e virtuale volo di un drone lungo la fascia costiera di stati e continenti metterebbe in evidenza la presenza più o meno ininterrotta e a contatto con il mare di una serie di ecosistemi acquatici costituiti da **acque salmastre**. Sono gli **ecosistemi di transizione**, dove acque continentali, terraferma, mare ed atmosfera si incontrano, veri e propri filtri naturali tra la terra e il mare, un tempo molto diffusi anche nel nostro Paese, ma che nell'ultimo secolo si sono ridotti globalmente di oltre il 50% (60% in Europa) a causa delle attività antropiche e della scorretta gestione del territorio. Buona parte delle civiltà mediterranee sono nate e si sono sviluppate attorno alle acque di transizione, come per esempio le lagune o le foci dei fiumi, pertanto questi ecosistemi hanno avuto, per secoli, un ruolo importante per le popolazioni locali. Nel tempo, tale rapporto si è deteriorato e gli ambienti di transizione sono stati considerati poco vivibili a causa della diffusione di insetti fastidiosi e, nei casi peggiori, della **malaria**. In molti, pur decantando l'indubbia bellezza dei luoghi, hanno considerato questi ambienti poco vivibili, con il risultato che parecchi di questi sono stati prima abbandonati e successivamente fatti oggetto di mastodontici piani di colmatatura e bonifica e quindi sono scomparsi. Quelli che oggi sopravvivono, pur essendo particolarmente fragili per le pressioni esercitate dall'uomo, rimangono un vero e proprio **patrimonio culturale dell'umanità**, culle del sapere e delle tradizioni locali, pregni di ricchezza, di valori estetici e spesso anche storico-archeologici e religiosi.

### 9.2 Tipologie

Il processo di **classificazione delle acque di transizione** è stato sempre oggetto di ampio dibattito perché la dislocazione geografica e la loro caratterizzazione, dettata dai **gradienti ambientali** (variazioni progressive di alcune variabili ambientali, come la temperatura e la salinità, lungo l'asse di congiunzione tra le acque continentali e quelle marine), non hanno permesso di unificare le definizioni (Basset et al., 2006). Nella **Direttiva Europea Quadro sulle Acque** (*Water Framework Directive* 2000) questi ambienti vengono presentati come "corpi idrici superficiali in prossimità della foce di un fiume, che sono parzialmente di natura salina a causa della loro vicinanza alle acque costiere, ma sostanzialmente influenzati dai flussi di acqua dolce". Questa definizione però non include tanti altri ambienti, soprattutto mediterranei, che non sempre ricevono acque dolci e in cui il rinnovo delle masse d'acqua avviene attraverso scambi diretti con il mare (per approfondire questo argomento consulta il BOX 9.1).

L'importanza delle acque di transizione è stata riconosciuta anche da un trattato, la **Convenzione di Ramsar del 1971** sulle zone umide di importanza internazionale, sottoscritto da numerosi Paesi. Tale Convenzione ancora oggi rimane la più inclusiva, in quanto usa un'ampia designazione di zone umide, oltre alle lagune, compresi laghi e fiumi, paludi e acquitrini, prati umidi e torbiere, estuari, delta e piane di marea, aree marine costiere, mangrovie e siti artificiali come peschiere, risaie e saline. La Convenzione fa riferimento, infatti, ad "**aree inondate, permanenti o temporanee, con acque ferme o in movimento, sia dolci che salmastre o salate, comprese le aree di acqua di mare, la profondità delle quali a marea bassa non superi i sei metri**". Si potrebbe dire che le acque di transizione comprendono tutti quegli ambienti che determinano il **passaggio naturale tra terra e mare**, spesso con qualche sovrapposizione di categoria con le zone marino-costiere (lagune, tratti

di mare di basso fondo, coste basse rocciose, saline), di estuario (delta, paludi di marea) e palustri (acquitrini permanenti o stagionali, paludi, torbiere). Il denominatore comune di questi ecosistemi è pertanto la **variabilità ambientale**, l'**adattamento delle specie**, nonché la **fragilità alle pressioni antropiche** (Newton et al., 2014).

#### BOX 9.1 – Le tipologie di ambienti di transizione

Non esiste un modello unico di “ambiente di transizione”, ma esistono diverse tipologie e, in più, ogni singolo ambiente di transizione, grazie alle peculiarità geomorfologiche, ecologiche ed antropologiche, è un sistema senza uguali. Di seguito si riportano le definizioni delle tipologie di acque di transizione più comuni nel Mediterraneo (Mazzola et al., 2008).

**Baia:** insenatura costiera che, a differenza del golfo, presenta un’entrata dal mare stretta, che poi si va ad allargare via via che si procede verso l’entroterra.

**Foce ad estuario:** luogo dove il fiume entra nel mare ed è sottoposto all’influenza delle maree.

**Foce a delta:** somma di più rami a estuario.

**Laguna:** bacino costiero in cui entrano sia le acque marine sia quelle continentali, è dominato dalle maree, separato dal mare da un cordone litorale, ma comunica con esso attraverso bocche.

**Lago costiero:** specchio d’acqua salmastra, ben delimitato, piuttosto esteso e profondo, che può comunicare con il mare attraverso bocche permanenti o temporanee.

**Stagno:** specchio d’acqua costiero, separato dal mare da un cordone litorale, ma che può comunicare con esso attraverso bocche o stretti canali più o meno lunghi e tortuosi, caratterizzato da bassi fondali e da contorni ripariali che variano stagionalmente.

**Pantano:** stagno costiero poco profondo che nei mesi estivi può andare incontro a totale disseccamento.

**Palude:** depressione costiera soggetta a fenomeni di inondazione meteorica e/o fluviale e/o marina anche solo stagionalmente.



*Esempi di stagno (Cabras, in Sardegna; a sinistra) e di laguna (Venezia, in Veneto; a destra; Immagini da Google Earth, modificate)*

### 9.3 Generalità e ruolo ecologico

Gli ecosistemi di transizione congiungono l’ambiente marino con quello continentale, rappresentando **zone di interfaccia** che ricevono **apporti sia dal mare che dal continente**. Sono



ambienti costieri di difficile attribuzione, con genesi diversa e funzioni biologiche che dipendono dal tempo di residenza delle masse d'acqua e dal loro rinnovo, dagli apporti dulciacquicoli e dagli scambi con il mare antistante (Tagliapietra et al., 2009).

L'estrema **variabilità delle caratteristiche chimiche e fisiche**, legate all'incontro di acque marine ed acque dolci, e la **vulnerabilità agli impatti umani** rendono questi ambienti fortemente condizionati dai gradienti ambientali e, soprattutto le lagune costiere, dei veri e propri **laboratori naturali** particolarmente interessanti per gli studi ecologici, e oggi importanti per l'analisi dei cambiamenti climatici.

Si tratta di ambienti di confine in cui le **ridotte profondità** (in genere in media intorno ad 1 m) insieme con l'**ingresso di acque dolci e marine**, attribuiscono un'elevata variabilità stagionale, ma anche repentine e frequenti fluttuazioni delle variabili chimiche e fisiche (Basset et al., 2013). Per esempio, la **salinità** gioca un ruolo importante e varia continuamente: presenta un'accentuata variabilità spazio-temporale poiché dipende dal regime degli immissari, dagli apporti meteorici, dall'evaporazione, dai cicli di marea e dall'idrodinamismo. Molto variabile è anche la **temperatura**, infatti le basse profondità fanno sì che la colonna d'acqua di riscaldi e raffreddi velocemente, raggiungendo valori prossimi a quelli dell'atmosfera.

Sono, inoltre, ambienti con elevata **torbidità** a causa dell'azione del vento (**forzante eolica**), che rimescola le acque risospendendo il sedimento nella colonna d'acqua, e dell'immissione di acque dolci, che apportano materiale continentale e molti **nutrienti** (sali di azoto, fosforo, ecc.). L'elevata disponibilità di nutrienti è alla base dell'**alta produzione primaria** che caratterizza gli ecosistemi di transizione e che, nei mesi più caldi, comporta la presenza di ingenti biomasse di alghe e piante su cui si basano le reti trofiche locali.

Un ambiente così variabile diventa selettivo per le specie che vi abitano che sono, infatti, caratterizzate da un'elevata **tolleranza ecologica**, cioè sono in grado di adattarsi all'ampia variabilità e alle fluttuazioni repentine e frequenti delle caratteristiche ambientali, quali per esempio la salinità e la temperatura. A causa di tale variabilità, la **biodiversità** degli ecosistemi di transizione è generalmente inferiore a quella del tratto marino antistante, ma la presenza di questi ambienti determina un incremento della eterogeneità degli habitat contribuendo in maniera significativa alla biodiversità complessiva. Nelle acque di transizione si trovano, inoltre, **specie stanziali** tipiche, ma anche molte **specie migratrici** appartenenti soprattutto a pesci (per approfondire questo argomento consulta il BOX 9.II) e uccelli. In particolare, gli ambienti di transizione sono aree che richiamano una straordinaria quantità di **avifauna**, elemento che caratterizza il paesaggio di questi ambienti. Per questo motivo spesso sono incluse nelle *Important Bird Area* (IBA), individuate dalla *BirdLife International*, organizzazione non governativa che ha lo scopo di proteggere le specie di uccelli, soprattutto quelle più a rischio, e di conservare e ripristinare i loro habitat naturali.

Gli ecosistemi di transizione sono importanti, non solo perché sono divenuti rari e quelli esistenti sono in grave pericolo, ma anche perché svolgono importantissime funzioni, per le peculiarità ambientali che rappresentano, per il loro rilevante patrimonio culturale e anche perché forniscono risorse utili a soddisfare innumerevoli esigenze della popolazione umana (Pérez-Ruzafa et al., 2011).

#### 9.4 Servizi ecosistemici

Il parziale **isolamento dal mare**, le **basse profondità** e l'**elevata produttività** rendono le acque di transizione un habitat ideale per **numeroso specie di flora e fauna** e fornitore di **servizi ecosistemici** per l'uomo (Tabella 9.1), cioè dei "benefici multipli forniti dagli ecosistemi al genere umano" (Millennium Ecosystem Assessment 2005; Haines-Young & Potschin 2018). Infatti, le acque di



transizione sono state a lungo sfruttate dall'uomo che spesso vi ha insediato città, infrastrutture portuali, impianti di acquacoltura e dove, più recentemente, ha sviluppato attività turistiche e ricreative, che però le hanno rese sempre più vulnerabili e degradate (Newton et al., 2018).

#### BOX 9.II – I pesci

Le acque di transizione costituiscono sistemi utilizzati dall'ittiofauna per la riproduzione, l'alimentazione ed il riparo dai predatori e sono abitualmente colonizzate da diversi gruppi di specie ittiche. Si distinguono, infatti, **specie residenti o sedentarie** che svolgono l'intero ciclo vitale all'interno degli ecosistemi di transizione, e **specie transienti o migratrici**, che si riproducono in mare ed occupano gli ecosistemi di transizione unicamente durante la fase giovanile per lo svezzamento (per tale motivo questi ambienti vengono considerati **aree di nursery**).

Le specie residenti sono caratterizzate da piccole dimensioni, cicli vitali brevi, veloce accrescimento, riproduzione precoce (già al primo anno). Alcuni esempi mediterranei sono il nono (*Aphanius fasciatus*), il pesce ago (*Syngnathus abaster*) e il ghiozzo (*Zosterisessor ophiocephalus*). Inoltre, gli adulti producono un numero ridotto di uova ed esercitano cure parentali: nei pesci ago le uova vengono deposte dalle femmine e accolte in un'area specializzata del corpo dei maschi, una tasca incubatrice ventrale in cui vengono protette fino allo sviluppo dei giovanili; i gobidi depongono le uova all'interno di nidi preparati dai maschi che poi provvedono all'ossigenazione delle uova mediante *fanning*, ossia il movimento delle pinne ventrali sopra il nido, ed alla protezione delle uova.

Le specie migratrici hanno dimensioni maggiori, vita media più lunga, raggiungono la maturità sessuale dopo il 2° o 3° anno, producono numerose uova e larve, che però hanno elevata mortalità, non essendo praticate cure parentali. Si tratta di specie di interesse commerciale, in Mediterraneo per esempio sono comuni il cefalo (*Chelon labrosus*), l'orata (*Sparus aurata*) e la spigola (*Dicentrarchus labrax*), oltre all'anguilla (*Anguilla anguilla*).



Esemplari di pesce ago (*Syngnathus abaster*; a sinistra) e di orata (*Sparus aurata*; a destra; Foto di R. Pillon, [www.fishbase.org](http://www.fishbase.org))

I servizi forniti dagli ecosistemi di transizione contribuiscono al benessere umano e alla riduzione della povertà, soprattutto in quei paesi non industrializzati in cui le popolazioni costiere sono fortemente dipendenti dalle risorse direttamente erogate da questi ecosistemi, e il cui degrado le priva dell'importante fonte di sostentamento che proviene da questi ambienti.

La **fornitura di cibo** che deriva dalla pesca e dall'acquacoltura, ma anche dalla selvaggina e dai prodotti agricoli, nonché la disponibilità di legna e foraggio, si legano fortemente con il benessere umano e con l'economia.

*Tabella 9.1. Servizi forniti dagli ecosistemi di transizione e esempi per le varie tipologie*

| Approvvigionamento              |                                                                                                                        |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cibo                            | specie acquatiche edibili (pesci, invertebrati, piante), selvaggina, frutta e cereali, foraggio                        |
| Biocarburanti                   | legna, torba, vegetali per produzione di energia                                                                       |
| Materiali edili                 | materiali vegetali (legna, foglie, ecc.) utilizzati come copertura e isolanti                                          |
| Nutraceutica                    | molecole per integratori alimentari e per la formulazione di medicine                                                  |
| Regolazione                     |                                                                                                                        |
| Regolazione del clima           | serbatoi di gas serra, influenza sulla temperatura locale e regionale, sulle precipitazioni e altri processi climatici |
| Purificazione dell'acqua        | ritenzione, recupero e rimozione dei nutrienti in eccesso e di altri inquinanti                                        |
| Regolazione dell'erosione       | riduzione dell'erosione dei suoli                                                                                      |
| Regolazione dei rischi naturali | controllo delle inondazioni, protezione dalle tempeste                                                                 |
| Impollinazione                  | habitat per gli impollinatori                                                                                          |
| Culturali                       |                                                                                                                        |
| Spirituale e ispiratore         | riferimento spirituale per molte religioni, fonte di ispirazione artistica                                             |
| Ricreativo                      | opportunità per attività ricreative, sport e tempo libero                                                              |
| Estetico                        | bellezza dei luoghi e valore estetico                                                                                  |
| Educazione e ricerca            | opportunità per l'educazione ambientale, la formazione e la ricerca scientifica                                        |

Lagune, laghi e stagni costieri, baie, foci forniscono servizi attraverso le risorse della **pesca** e dell'**acquacoltura** (per approfondire questo argomento consulta il BOX 9.III). Tali attività hanno una tradizione millenaria in questi ecosistemi e hanno contribuito nel tempo, a preservarne le peculiarità, almeno quelli che si sono salvati dalle opere di bonifica (Cataudella et al., 2015). Il loro impiego per l'allevamento ha salvato anche un **irripetibile patrimonio culturale** costituito da architetture, tradizioni, mestieri e strumenti di pesca ed anche di prodotti alimentari e abitudini gastronomiche, di buona qualità e tracciabili, come il caso della bottarga di muggine sarda.

#### **BOX 9.III – La pesca e l'acquacoltura**

La **pesca** e l'**acquacoltura** nelle lagune e nelle valli (parti della laguna in cui nel tempo sono state praticate pesca e acquacoltura nel rispetto delle risorse naturali) hanno una lunga storia e sono attività fondamentali per l'economia locale. Spigole, orate, saraghi, sogliole, cefali, anguille, granchi e mazzancolle sono le specie più diffuse e i pescatori o vallicoltori usano da sempre **metodi tradizionali di cattura**, come il lavoriero, il bertovello, la rete a sparviero e il tramaglio che, sebbene abbiano subito delle innovazioni, mantengono le loro caratteristiche di **sostenibilità**.

Il **lavoriero**, uno sbarramento un tempo costituito da steccati di canne, legno o giunco, più recentemente sostituiti da strutture metalliche, viene posizionato in corrispondenza delle bocche di comunicazione con il mare. La pesca al lavoriero riguarda tutte le specie ittiche della laguna, sia in entrata (giovani), sfruttando la marea e/o il richiamo di acqua dolce per attirare i branchi di giovani verso lo sbarramento, sia in uscita (adulti), quando l'istinto riproduttivo spinge il pesce verso l'esterno della laguna.

Altri attrezzi di cattura sono i **bertovelli** e le nasse, considerati attrezzi più selettivi che catturano anguille, granchi, bavose, latterini e mazzancolle. Dove l'acqua è più profonda si possono utilizzare anche dei tramagli, che sono reti da posta fisse, costituite da tre strati di maglie. Il pescato varia con la stagione e l'attività è praticata in modo sostenibile, nel rispetto delle tradizioni e di storiche regole.

### BOX 9.III segue – La pesca e l’acquacoltura



*Lavoriero (a sinistra) e bertovelli (a destra; Foto di S. Vizzini)*

All’interno degli stessi ambienti, oltre ad una pesca sostenibile, vengono anche condotte attività di acquacoltura nel rispetto della naturalità dei luoghi attraverso pratiche riconducibili all’**allevamento estensivo** in cui non viene fornito alimento (mangime) ai pesci allevati che, invece, si cibano utilizzando le prede naturalmente disponibili e acquisendo quindi un’elevata qualità e valore commerciale. La presenza dell’uomo si limita alla gestione dei giovanili di pesce che entrano naturalmente nella laguna e che prima venivano integrati con il prodotto naturale fornito dai “pescanovellanti”, pescatori che in primavera raccoglievano i “piccoli” lungo le coste per offrirli alla valle da pesca, mentre adesso si basa sulla “semina” di giovanili dalle “avannotterie”, centri di riproduzione controllata di specie come la spigola e l’orata, perché la quantità di quelli che entrano naturalmente nella valle non è sufficiente a sostenere economicamente l’attività. Lo sfruttamento esclusivo della capacità produttiva della valle trae vantaggio dalla naturale ricchezza dell’habitat acquatico e l’accrescimento è affidato esclusivamente alla capacità dei pesci di procacciarsi il cibo in situazione di naturale competitività con gli individui autoctoni presenti nei bacini lagunari. Questo tipo di allevamento ha rappresentato, e ancora oggi rappresenta, un esempio importante di **interazione positiva fra attività produttiva e conservazione ambientale**: il mantenimento ambientale è alla base della redditività nel tempo di questa pesca-acquacoltura. Infatti, l’applicazione di queste pratiche ha precorso il tema dello **sviluppo sostenibile** e rappresenta un **modello moderno di gestione delle risorse naturali** rispettando l’equilibrio tra uomo e natura.



*Aree utilizzate per l’allevamento estensivo (a sinistra) e reti anti-predazione per ridurre l’impatto dell’avifauna ittiofaga sulle specie allevate (a destra; Foto di S. Vizzini)*

Tra i servizi di approvvigionamento possibili va ricordata anche la funzione che hanno le **saline** (per approfondire questo argomento consulta il BOX 9.IV), ambienti costieri che l’uomo ha modificato nel tempo per produrre sale. Sono habitat tipici di specie estremamente tolleranti e spesso possono dar vita a sistemi misti ed integrati di coltivazione di sale e di pesce con pratiche estensive di acquacoltura (Mazzola et al., 2010). Più recentemente i prodotti di salina (sale e fanghi) vengono



anche utilizzati per la cura del corpo e il benessere ma anche per l'estrazione di molecole utilizzate in nutraceutica (Santulli, 2015).

#### BOX 9.IV – Le saline

Le saline rappresentano un **ecosistema artificiale** unico, che risulta dalla trasformazione, in epoca storica, delle zone umide originarie, formate da bassofondi costieri in cui le acque dolci provenienti dalla pianura venivano in contatto con le acque marine. L'uomo ha modificato l'ambiente trasformando un processo naturale in una coltivazione vera e propria. Le saline sono costituite da un ampio bacino più esterno, nel quale si raccolgono le acque marine spinte dalle maree o risucchiate attraverso pompe aspiranti, un tempo azionate dai mulini a vento, e da **vari ordini di bacini** interni (vasche presalanti e salanti), caratterizzati da una graduale riduzione della superficie e della profondità, in cui ha luogo la progressiva precipitazione dei vari costituenti: in sequenza carbonati, solfati e infine cloruri. L'insolazione, il clima estivo arido e il regime dei venti accelerano il processo di disseccamento graduale e la **precipitazione frazionata dei sali**. L'intero processo di precipitazione coinvolge anche la componente biologica. Mentre le vasche esterne ospitano una comunità tipica di acque marine, le forme di vita nelle vasche più interne si restringono a comunità microbentoniche e microbiche, che nelle ultime vasche si riducono alle sole Halobacteriacee. Al di là del ruolo produttivo, le saline rivestono un altissimo interesse biologico in quanto possono considerarsi un mesocosmo nel quale è riassunto un intero gradiente di valori di salinità, e nel quale è possibile uno studio sistemico degli effetti ecologici di questo fattore ambientale.



*Saline dello Stagnone di Marsala in Sicilia (a sinistra) e del Delta del Rodano nel sud della Francia (a destra; Foto di A. Mazzola)*

Gli ecosistemi di transizione controllano il **bilancio dei gas serra** e diversi processi climatici, hanno un ruolo fondamentale nel **ciclo dell'acqua** e nella sua qualità, agiscono attivamente nella **protezione di rischi naturali** e nei controlli idraulici della fascia costiera (Newton et al., 2018). Si comportano come **barriere naturali** contro gli eventi estremi di origine marina, quali inondazioni costiere e mareggiate, principalmente dissipando l'energia del moto ondoso o immagazzinando l'acqua delle piogge in eccesso. Le paludi salmastre rappresentano gli habitat costieri naturali più efficaci per ridurre l'altezza delle onde e l'**erosione costiera** e fungono, allo stesso tempo, da aree di ritenzione e, tramite la vegetazione, anche di frangivento. Sono habitat fondamentali per tante specie di **insetti impollinatori** e hanno un ruolo biogeochimico importante come **sistemi buffer** (tampone) tra i bacini idrografici e il mare fungendo da **trappola di sedimenti** e da **filtro per metalli pesanti e altri inquinanti** (Viaroli et al., 2010). In questi ambienti i nutrienti di origine fluviale vengono trattiene, aiutando così a proteggere il mare adiacente dall'eutrofizzazione e dall'inquinamento.

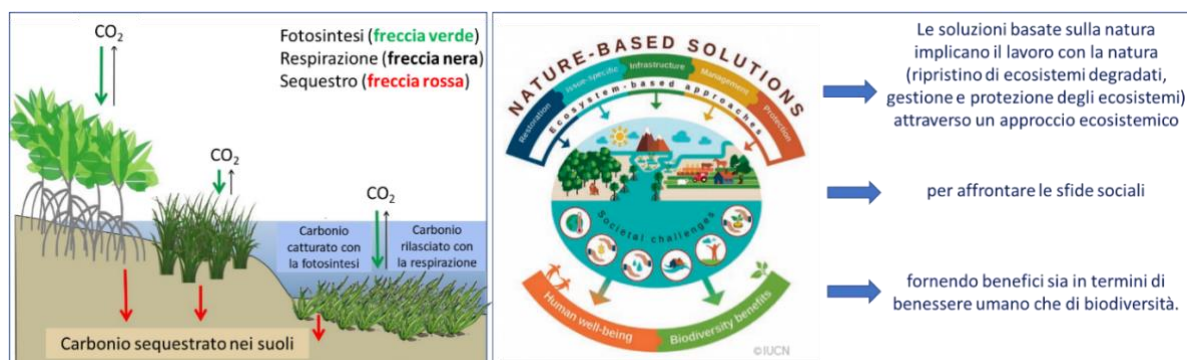
In merito ai **cambiamenti climatici** offrono servizi di **mitigazione** adattandosi all'innalzamento del livello del mare e, quindi, diventando baluardi fisici a protezione delle coste (Seddon et al., 2020),



ma anche **sequestrando attivamente il carbonio** (Rogers et al., 2019; per approfondire questo argomento consulta il BOX 9.V).

#### BOX 9.V – Contrasto al cambiamento climatico e Soluzioni Basate sulla Natura (Nature-Based Solution)

La natura ci offre degli strumenti per contrastare il cambiamento climatico. Per esempio, le piante terrestri assorbono anidride carbonica per effettuare la fotosintesi, e tale processo biologico riduce la concentrazione di anidride carbonica in atmosfera. Anche alcuni habitat vegetati costieri che caratterizzano le aree lagunari, come le paludi salmastre e le praterie di piante marine, svolgono un importante ruolo nel sottrarre anidride carbonica. Il carbonio assorbito viene poi trasferito nelle strutture ipogee delle piante (fusti e radici) dove viene immagazzinato e sequestrato dall'ambiente circostante per periodi lunghissimi (anche millenni). L'azione di **"sequestro" dell'anidride carbonica** viene, inoltre, rafforzata dalla morfologia stessa delle piante che con le foglie attenua l'energia delle onde e delle correnti marine facendo sedimentare le piccole particelle presenti in sospensione che contengono carbonio. Queste particelle vengono quindi accumulate nel sedimento che così diventa un **"serbatoio" di carbonio** e rappresenta un naturale **contrasto al cambiamento climatico**. Le zone marine e costiere che ospitano gli ambienti di transizione sono tra gli ecosistemi più vulnerabili al cambiamento climatico e agli impatti derivanti dalle attività antropiche (urbanizzazione, turismo, inquinamento, pesca, ecc.). Il degrado di questi ambienti ha come effetto, tra gli altri, anche la riduzione della capacità di assorbire carbonio e addirittura può determinare il rilascio del carbonio sequestrato nel tempo. Occorre, pertanto, **proteggere gli habitat e ripristinare quelli degradati** per permettere il continuo sequestro di anidride carbonica, garantendo allo stesso tempo l'incremento della biodiversità. In quest'ottica, il ripristino degli ecosistemi vegetati costieri, spesso associati agli ambienti di transizione, rappresenta una **soluzione basata sulla natura** che contribuisce alla **mitigazione (cioè alla riduzione) del cambiamento climatico** in atto. La **Strategia dell'Unione Europea sulla Biodiversità per il 2030**, pilastro del **Green Deal europeo**, include un piano di ripristino della natura che può promuovere l'adozione di soluzioni *nature-based* che sono, peraltro, messe in evidenza anche nella Strategia dell'Unione Europea sull'adattamento ai cambiamenti climatici. La Commissione Europea ha definito le soluzioni basate sulla natura come "Soluzioni ispirate e supportate dalla natura, convenienti in termini di costi, che forniscono contemporaneamente vantaggi ambientali, sociali ed economici e aiutano a costruire la resilienza. Tali soluzioni apportano caratteristiche e processi sempre più diversificati e naturali nelle città, nei paesaggi terrestri e in quelli marini, attraverso interventi sistemici, efficienti sotto il profilo delle risorse e adattati a livello locale".



Assorbimento di CO<sub>2</sub> con la fotosintesi e sequestro di carbonio nei suoli di ecosistemi vegetati costieri (a sinistra; da: Howard et al., 2017, modificata); ruolo delle soluzioni basate sulla natura (a destra; da: ©IUCN)

In riferimento ai **servizi culturali**, gli ambienti di transizione offrono **opportunità ricreative** per il tempo libero, attraverso il **turismo naturalistico, sportivo e storico-archeologico**, per la valorizzazione del patrimonio dei beni architettonici e dell'**identità dei territori**. Infatti, gran parte degli ecosistemi di transizione sono aree protette e siti della Rete Natura 2000 (SIC: Siti di

Importanza Comunitaria, ZPS: Zone di Protezione Speciale) designati per conservare la biodiversità e in particolare le specie e gli habitat di interesse comunitario, rappresentando luoghi di attrazione per un turismo motivato e competente; spesso sono ambienti di ispirazione artistica e luoghi destinati al benessere della persona, alla talassoterapia, dove è possibile fare sport acquatici. In alcuni casi sono dei laboratori naturali ideali per attività di educazione ambientale e di ricerca, concorrendo all'incremento della consapevolezza e della sensibilità ambientale oltre che all'implementazione della conoscenza scientifica. Essendo aree di concentrazione di antiche civiltà, sono anche patrimonio culturale, siti archeologici e di conoscenze storiche.

Pertanto, gli ecosistemi di transizione soddisfano tante esigenze, fornendo servizi fondamentali e generando **benefici per la società e per il benessere umano**, ma perché questo avvenga, hanno bisogno di collegamenti funzionali con i sistemi terrestri d'acqua dolce e marini adiacenti. Il loro stato di conservazione deve essere quindi garantito e, quando necessario, ripristinato attraverso processi di recupero ambientale.

### *9.5 Cambiamenti globali*

Per la loro collocazione all'interno del paesaggio costiero, gli ecosistemi di transizione sono particolarmente vulnerabili al disturbo generato dall'uomo e rappresentano dei veri e propri **laboratori naturali** particolarmente interessanti per gli studi ecologici, tanto da essere considerati **"sistemi sentinella" nella valutazione degli effetti del cambiamento climatico** (Newton et al., 2012). Gli impatti attesi consistono nell'**estremizzazione delle caratteristiche chimiche e fisiche** (soprattutto salinità, temperatura) a causa delle variazioni del regime idraulico e degli apporti di acqua dolce e del riscaldamento dell'atmosfera. In un contesto di cambiamento climatico, questi ecosistemi sono inoltre a rischio di inondazioni, mareggiate, aumento del livello del mare e subsidenza. Le conseguenze ecologiche, con i relativi risvolti sociali, sono registrabili nella concomitante **perdita di habitat** e comunità naturali e nella **riduzione della biodiversità**.

Gli impatti producono modifiche nel metabolismo degli organismi acquatici, interferenza nelle interazioni biotiche con perdita di specie indigene e **aumento di specie aliene** (Occhipinti-Ambrogi, 2001), effetti a cascata sulle reti trofiche e sui cicli biogeochimici con ripercussioni, anche profonde, sui rapporti tra metabolismo autotrofo ed eterotrofo. Gli effetti del cambiamento climatico sugli organismi che vivono in questi ecosistemi potrebbero causare il loro spostamento, prevalentemente verso zone più settentrionali, e la concomitante invasione da parte di specie aliene, alterando in questo modo la loro unicità ecologica.

La perdita di habitat (aree ricche di piante marine e terrestri lungo le rive) può trasformare questi ecosistemi da serbatoi di carbonio, con importanti capacità di mitigazione delle emissioni, in **sorgenti di anidride carbonica** liberando nell'atmosfera la CO<sub>2</sub> immagazzinata per secoli.

Pertanto, la gestione di questi ambienti nel contesto del cambiamento climatico globale è fondamentale per la protezione e lo sviluppo sostenibile delle acque di transizione.

### *9.6 Minacce, processi di recupero e gestione*

Oltre alle minacce dovute al cambiamento climatico in atto, le acque di transizione sono sottoposte a crescenti pressioni antropogeniche e risultano tra gli habitat più colpiti e degradati. Se ci limitiamo alle superfici che si sono perse nel solo Mediterraneo la stima è pesante. Ampie estensioni sono state prosciugate per una loro riconversione in aree destinate all'agricoltura, a poli industriali o a insediamenti urbani e turistici, tutte attività che, a vario titolo, hanno prodotto successivamente inquinamento e degrado. In altre aree, i regimi idrologici sono stati modificati con la costruzione di manufatti, sbarramenti, argini, canali di deviazione, e la conseguente alterazione del funzionamento e delle condizioni ecologiche. La biodiversità si è gradatamente modificata a causa degli impatti,

spesso per l'introduzione di specie alloctone invasive ma anche per la rimozione della vegetazione, sostentamento alimentare per tante specie, soprattutto per gli uccelli acquatici, che trovano sempre meno opportunità di sosta e pastura durante le migrazioni.

L'applicazione delle pratiche distruttive spesso utilizzate e la conseguenziale perdita di questi ecosistemi è stata dovuta anche alla poca comprensione del loro ruolo sociale. Dalla paura che un tempo incutevano, come fonte di malattie, e quindi dall'ignoranza del loro ruolo ecologico, si è passati all'indifferenza ed all'abbandono. I vincoli imposti in tanti casi, a volte anche molto restrittivi, non supportati da altrettante misure gestionali, hanno portato al disinteresse generale dei decisori pubblici, che hanno visto in questi ambienti più un problema che una risorsa.

Gli sforzi per la loro **valorizzazione, mantenimento e recupero**, dovranno partire proprio dal coinvolgimento delle **parti interessate** e dalla **sensibilizzazione** della società civile e degli amministratori pubblici. Valori di ordine morale, estetico, culturale, scientifico ed economico devono costituire i pilastri delle nuove politiche territoriali, assieme a un ribaltamento completo dell'atteggiamento nei confronti di questi ecosistemi. Occorre procedere con azioni mirate per tentare di mantenere efficienti i servizi ecosistemici erogati, nonostante il cambiamento ambientale indotto dal clima, possibilmente con l'applicazione di tecnologie di recupero e risanamento basate su approcci adattativi (*nature-based*), capaci di fornire contemporaneamente servizi per il benessere umano e benefici per la biodiversità. In ogni caso l'approccio dovrà ridurre la frammentazione causata dal degrado e dall'abbandono, e incrementare la ricucitura del territorio e il ripristino della connettività inter-ecosistemica.

A causa di fenomeni di subsidenza e in conseguenza dell'innalzamento del livello dei mari, molti ambienti di transizione potrebbero, nel prossimo futuro, essere inondati, creando nuovi habitat in sostituzione di quelli attuali che vanno scomparendo (Barbier 2013). Il **riallagamento controllato** delle aree costiere rappresenta anche una delle possibili strategie di adattamento ai cambiamenti climatici (Mazik et al., 2010). Tra le iniziative possibili, vi è pure la **rinaturazione** e il **restauro** attraverso l'aggiunta di sedimenti per innalzare il terreno sotto il livello dell'acqua e permettere alla vegetazione di colonizzarlo naturalmente o attraverso il trapianto attivo (Seddon et al., 2020). In questo modo si potrebbero mantenere attivi sistemi naturali e zone per la coltura o lo sfruttamento di risorse alieutiche, storicamente un valido **strumento di conservazione** di questi ecosistemi, da cui dipende il sistema socioeconomico locale.

Tutte queste azioni devono essere basate su un'ampia **compatibilità ecologica** e tenere in debita considerazione il ruolo che questi ambienti svolgono per la sosta degli uccelli migratori. I valori legati al reddito (pesca, acquacoltura, turismo), saranno quelli che più facilmente entreranno nelle procedure di gestione, perché legati a rendite dirette, mentre per i valori culturali occorrerà un coinvolgimento dei portatori di interesse, perché dipenderanno dalla tipicità dei luoghi e dalle sensibilità individuali.

## 9.7 Bibliografia

Barbier WB, 2013. Valuing ecosystem services for coastal wetland protection and restoration: progress and challenges. *Resources* 2:213-230.

Basset A, Sabetta L, Fonnesu A et al, 2006. Typology in Mediterranean transitional waters: new challenges and perspectives. *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst* 16:441-455.

Basset A, Barbone E, Elliott M, et. al, 2013. A unifying approach to understanding transitional waters: fundamental properties emerging from ecotone ecosystems. *Estuar Coast Shelf Sci* 132:5-16.

Cataudella S, Crosetti D, Massa F, 2015. *Mediterranean coastal lagoons: sustainable management and interactions among aquaculture, capture fisheries and the environment*. Studies and Reviews n. 95. FAO, General Fisheries Commission for the Mediterranean (GFCM) - Session Report, 293 pp.

- Haines-Young RH, Potschin MB, 2018. *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure*. Fabis Consulting Ltd.: Barton, UK.
- Howard J, Sutton-Grier A, Herr D, et al, 2017. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Front Ecol Environ* 15(1):42–50.
- Mazik K, Musk W, Dawes O, et al, 2010. Managed realignment as compensation for the loss of intertidal mudflat: a short-term solution to a long-term problem? *Estuar Coast Shelf Sci* 90:11–20.
- Mazzola A, Bergamasco A, Calvo S, et al, 2010. Sicilian transitional waters: current status and future development. *Chem Ecol* 26:267–283.
- Mazzola A, Vassallo M, Vizzini S, 2008. *Acque di mezzo*. Fabio Orlando Editore, 304 pp.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington DC, 155 pp.
- Newton A, Carruthers TJB, Icely JD, 2012. The coastal syndromes and hotspots on the coast. *Estuar Coast Shelf Sci* 96:39–47.
- Newton A, Icely JD, Cristina S, et al, 2014. An overview of ecological status, vulnerability and future perspectives of European large shallow, semi-enclosed coastal systems, lagoons and transitional waters. *Estuar Coast Shelf Sci* 140:95–122.
- Newton A, Brito AC, Icely JD, et al, 2018. Assessing, quantifying and valuing the ecosystem services of coastal lagoons. *J Nat Conserv* 44:50–65.
- Pérez-Ruzafa A, Marcos C, Pérez-Ruzafa IM, et al, 2011. Coastal lagoons: “transitional ecosystems” between transitional and coastal waters. *J Coast Conserv* 15:369–392.
- Occhipinti-Ambrogi A, 2001. Transfer of marine organisms, a challenge to the conservation of coastal biocoenoses. *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst* 11:243–251.
- Rogers K, Kelleway JJ, Saintilan N, et al, 2019. Wetland carbon storage controlled by millennial-scale variation in relative sea-level rise. *Nature* 567:91–95.
- Santulli A, 2015. Biodiversity as a source of innovation and development: the Trapani and Marsala salt works. In: *Proceedings of the International Conference on Solar Salt Works & The Economic Value of Biodiversity*. EuSalt, 3<sup>rd</sup>–4<sup>th</sup> June 2014, Trapani.
- Seddon N, Daniels E, Davis R, et al, 2020. Global recognition of the importance of nature-based solutions to the impacts of climate change. *Global Sustain* 3:1–15.
- Tagliapietra D, Sigovini M, Volpi-Ghirardini V, 2009. A review of terms and definitions to categorise estuaries, lagoons and associated environments. *Mar Freshw Res* 60:497–509.
- Viaroli P, Azzoni R, Bartoli M, et al, 2010. Primary productivity, biogeochemical buffers and factors controlling trophic status and ecosystem processes in Mediterranean coastal lagoons: a synthesis. *Adv Oceanogr Limnol* 1(2):271–293.
- Water Framework Directive, 2000. *Direttiva quadro sulle acque del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea*. Gazzetta ufficiale delle Comunità Europea 43 (L327), 75 pp.



Finito di stampare nel mese di Dicembre 2021  
a cura della  
Società Italiana di Ecologia