

Roberto Bertoni

Laghi e scienza
introduzione alla limnologia

versione ebook - 10 giugno 2018



Roberto Bertoni

Laghi e scienza: introduzione alla limnologia

Versione ebook giugno 2018

*a Cristiana,
Martino,
Filippo.*

Indice

Prefazione alla versione ebook.....	7
Presentazione della prima edizione	8
1. Introduzione	11
2. Storia minima e scopi della limnologia	13
3. Tipi di lago: origine e morfologia dei laghi.....	19
Il ciclo dell'acqua nella biosfera	25
Morfologia e morfometria del lago	26
4. Dinamica delle acque nei laghi.....	30
5. Particolarità fisiche e chimiche dell'acqua	32
6. Radiazione solare ed energia termica.....	36
La trasparenza delle acque lacustri.....	42
Il colore dei laghi	44
7. Le vicende termiche stagionali dei laghi	46
Bilancio termico dei laghi.....	50
8. Movimenti delle acque.....	54
Il moto ondoso	55
Le sesse superficiali	56
Le sesse interne	59
Le correnti (o spirali) di Lagmuir.....	60
Le correnti superficiali di deriva	61
9. Movimenti di materia nelle acque	65
10. Chimica delle acque lacustri	68
L'ossigeno.....	68
L'azoto	74
L'anidride carbonica	74
Il ciclo del carbonio.....	77
Lo spettro ionico delle acque lacustri.....	78
<i>Anioni</i>	78
<i>La conducibilità</i>	80
<i>Il pH</i>	81

<i>Cationi</i>	83
La sostanza organica	94
11. Le zone di un lago	99
12. I popolamenti delle acque interne	100
13. Il plancton	106
Il virioplancton	109
Il batterioplancton	110
Il fitoplancton	119
<i>Abbondanza e composizione del fitoplancton</i>	126
Lo zooplancton	136
<i>I movimenti del plancton</i>	143
<i>I cicli stagionali del plancton</i>	148
14. Il bentos	152
15. Le macrofite acquatiche	160
16. Il necton e il popolamento ittico	164
Il popolamento ittico	164
Temperatura dell'acqua e specie ittiche	166
Concentrazione di ossigeno disciolto e specie ittiche.....	168
Fauna ittica e tipi di lago	172
17. Trasferimenti di materia e di energia nei laghi	179
Modifica dei flussi di materia ed energia ed evoluzione trofica del lago	181
Stato trofico: effetto dei mutamenti climatici in atto	189
18. La paleolimnologia	193
19. Ecologia molecolare e limnologia	199
Filogenesi molecolare	200
Tassonomia molecolare.....	202
Fisiologia molecolare	204
20. Il campionamento dei laghi	207
21. Le acque correnti: torrenti e fiumi	218
Morfologia dei fiumi	218
Ecologia dei fiumi	220
<i>Temperatura e ossigeno</i>	220
<i>Trasporto di materiali</i>	221
<i>Zonazione ecologica dei corsi d'acqua</i>	222
Le sorgenti e il tratto iniziale del fiume.....	224

Il tratto medio ed inferiore del fiume	226
Suggerimenti per l'approfondimento.....	231
Testi di limnologia	231
Riviste di limnologia.....	232
Appendice: Glossario.....	234

Prefazione alla versione ebook

A 12 anni dalla stampa della versione cartacea di questo testo ho deciso di farne una versione ebook, scaricabile gratuitamente, per venire incontro alle richieste del testo o di sue parti spesso avanzate da studenti e docenti. Ho completamente riscritto il capitolo “Ecologia molecolare e limnologia” e ringrazio Cristiana Callieri, Diego Fontaneto e Gianluca Corno che l’hanno rivisto dandomi suggerimenti preziosi per scrivere alcune pagine introduttive su questo argomento. L’evoluzione della biologia molecolare è così rapida da rendere indispensabile la consulenza di chi quotidianamente la pratica. Ho aggiunto il capitolo “Le acque correnti: torrenti e fiumi”. L’assenza di qualche pagina introduttiva sugli ambienti lotici era una lacuna del testo precedente e ringrazio Stefano Fenoglio che mi ha aiutato a colmarla rivedendo questo capitolo. Infine ho rivisto ed aggiornato i “Suggerimenti per l’approfondimento”, eliminando molti collegamenti web ormai obsoleti. Infine, ho aggiornato il capitolo “Storia minima e scopi della limnologia” aggiungendovi un riferimento al piccolo Museo degli strumenti antichi della limnologia “Crypta Baldi” che ho da poco realizzato e che spero vorrete visitare, almeno nella sua versione virtuale.

Sarò grato a tutti quelli che mi faranno avere i loro commenti e, se è il caso, le loro correzioni o i loro suggerimenti così da migliorare questo ebook e da renderlo uno strumento utile per chi vuol guardare i laghi e i fiumi con l’occhio della scienza per conservarli al meglio per le generazioni future.

Grazie,
Roberto Bertoni

robe.bertoni@gmail.com

Presentazione della prima edizione

L'Introduzione alla Limnologia che Roberto Bertoni ci propone in questo scorcio di fine 2005 è una bella sorpresa, un regalo prezioso. Anzitutto per chi ha incarichi diretti di insegnamento in questa disciplina, ma anche per chi, come me, assume l'ecosistema lacustre come riferimento di base, per la verifica su casi di studio dei fondamenti concettuali esposti in un corso di ecologia generale. Ma è cosa preziosa soprattutto per gli studenti di limnologia dei nuovi corsi di laurea (in Scienze biologiche, naturali, ambientali...), che finalmente possono disporre di un testo agile, scritto per loro con linguaggio rigoroso, essenziale ed immediatamente comprensibile. Il manuale è calibrato su uno sforzo intenso di aggiornamento scientifico e, nel contempo, di attenzione estrema ai risvolti pratici rilevabili in termini di resa didattica. L'esito decisamente positivo di questo impegno congiunto sui due fronti è riscontrabile sia nell'articolazione coerente della materia trattata per grandi ambiti tematici, sia nella concisione e scioltezza dello stile dell'autore (ma anche nella sobrietà del formato, che non si lascia invadere da eccessi iconografici). Il CD accluso consente per altro di dilatare sensibilmente l'orizzonte dell'informazione bibliografica e della documentazione su risorse web.

È evidente l'ispirazione originaria al modello rappresentato dal "Tonollino", come da tempo è ricordato affettuosamente, e riduttivamente, il volume di Vittorio Tonolli, quella "Introduzione allo studio della Limnologia" su cui si sono formate, a partire dagli anni sessanta, almeno due generazioni di limnologi e idrobiologi italiani. Non poteva che essere così. Quel modello di comunicazione scientifica e di formazione specialistica è stato ed è tuttora da considerare straordinariamente valido e vitale. Roberto potrebbe aprire il capitolo introduttivo di questo manuale con le stesse scarse parole con cui Vittorio Tonolli accompagnò

la presentazione della prima edizione del suo libro: “Questo volume non ha né la veste né le pretese di un trattato. È soltanto un ausilio didattico che viene offerto agli studenti di questa disciplina”. Lasciando poi al lettore la sorpresa di scoprire, pagina dopo pagina, la complessità e congruenza del discorso scientifico, la ricchezza dei contenuti e la qualità e profondità della competenza con cui questi sono trattati.

Proprio la fedeltà al modello del “Tonollino” ha potenziato vigorosamente e ha reso particolarmente efficace il lavoro di aggiornamento e “ammodernamento”. Evidente è l’innovazione riscontrabile negli approcci allo studio delle peculiarità fisiche e chimiche dell’acqua, dalla radiazione solare fotosinteticamente attiva alla composizione dimensionale e qualitativa della sostanza organica nei sistemi acquatici; nell’analisi della struttura e dinamica delle comunità biotiche, in particolare della componente planctonica; nei risultati delle ricerche sui cicli biogeochimici e sui flussi energetici come base informativa essenziale per valutare e prevedere l’evoluzione di stato trofico dei laghi. Speciale attenzione è rivolta, ovviamente, ad aspetti tecnico–metodologici di più stretta attinenza alle linee di ricerca in ecologia microbica coltivate dall’autore: un capitolo è dedicato alle tecniche di ecologia molecolare mirate allo studio della biodiversità delle popolazioni microbiche naturali e, in prospettiva, alla valutazione dell’attività metabolica dei popolamenti batterici. Il capitolo sulla paleolimnologia rimanda a un filone di ricerche di solida tradizione presso l’Istituto di Pallanza e si connette al tema attualissimo dei cambiamenti climatici e delle loro ripercussioni sul funzionamento dei sistemi lacustri. Un tema che, a sua volta, si inserisce nell’orizzonte etico della sostenibilità, sollecitando l’esigenza del diffondersi di prassi di gestione dell’ecosistema lago che lo preservino come risorsa di cui possano fruire le generazioni future.

Un’ultima riflessione. Cui mi lascio andare confidando nell’amicizia e nel buon carattere di Roberto Bertoni. La voglio

dedicare alla sua passione e alla sua tenacia, delle quali il manuale è un indicatore di bella evidenza. Roberto a me pare uomo apparato, per dirla con un ossimoro, di inappariscnte solidità... Non so se ciò dipenda da una scelta ragionata o da una sua vocazione esistenziale, da una sua intima tendenza ad evitare i primi piani... Molte volte ho avuto la sensazione che egli tenda a minimizzare la sua visibilità, a cancellare le orme che lascia dietro i suoi passi... È come se si identificasse con gli esserini minutissimi di cui si occupa da sempre, con l'alacrità incessante del loro lavoro misconosciuto, con le funzioni invisibili che esercitano nei corpi d'acqua (e in tutti i sistemi ambientali della biosfera). Dalle quali poi tutto dipende: i trasferimenti dell'energia, i movimenti della materia, le dinamiche della vita... Alla fine uno come lui, con la sua bustocca caparbietà, è destinato ad emergere come nodo chiave della rete in cui è strutturata la nostra piccola comunità di studiosi di ambienti lacustri.

Ireneo Ferrari
Dipartimento di Scienze Ambientali
Università di Parma

1. Introduzione

Il lago è un ecosistema particolare: ha dei confini definiti e, allo stesso tempo, è fortemente influenzato dal territorio dov'è situato e che ad esso convoglia l'acqua. Tra l'ecosistema lago e gli ecosistemi confinanti c'è spesso un limite netto: facendo un passo in una direzione si entra nell'ecosistema lago e facendolo nella direzione opposta si entra in un ecosistema terrestre. Eppure il lago dipende enormemente dall'apporto di sostanze che le acque affluenti raccolgono quando attraversano l'ecosistema terrestre per arrivare al lago. Inoltre il lago è un sistema complesso perché è influenzato da molte variabili: il suo contenuto in soluti dipende dalle caratteristiche chimiche delle rocce e dei suoli che formano il suo bacino, il clima della regione che lo ospita determina i suoi scambi di materia e di energia con l'atmosfera e, infine, gli organismi che lo abitano sono influenzati dal clima e dal chimismo delle acque del lago che, però, possono in qualche misura alterare.

Questa complessità fa sì che quando lo studio di un lago è realizzato utilizzando le competenze derivanti da una singola disciplina porta spesso a conclusioni fuorvianti o, addirittura, errate sullo stato e sul funzionamento di un particolare lago. È, purtroppo, abbastanza frequente il caso di piani di gestione di un lago clamorosamente falliti perché basati soltanto su uno studio idraulico o chimico o biologico dell'ecosistema, ignorando le influenze reciproche e le interazioni che nel lago reale legano le quantità che sono, individualmente, oggetto di studio dell'ingegneria idraulica, della chimica o della biologia. In altre parole, lo studio di un lago anche quando è condotto per indagare un aspetto specifico, utilizzando i particolari strumenti di una determinata disciplina, non permette di trarre conclusioni sul lago nel suo complesso se non è condotto in modo interdisciplinare, cioè tenendo conto anche delle informazioni ottenute da altre di-

scipline. Ad esempio, l'evoluzione dei popolamenti algali può essere compresa bene soltanto tenendo in conto gli apporti chimici di nutrienti dal bacino di drenaggio, l'effetto delle condizioni meteorologiche, l'effetto dell'idrodinamica che modifica le possibilità di scambio tra le alghe e l'ambiente circostante, ecc.

La scienza che studia i laghi è, quindi, inevitabilmente interdisciplinare ed ha un nome: limnologia, dal greco *limnè*, che significa *lago*. Oggi molte discipline sono avanzate, con il progredire delle conoscenze e delle metodologie, raggiungendo livelli di specializzazione impensabili 50 anni fa e tali da rendere difficile la comunicazione tra specialisti. Ad esempio, difficilmente il fisico che si occupa di scambi tra acque lacustri e atmosfera riuscirà a capire, e a farsi capire, scambiando informazioni con un genetista molecolare che studia i popolamenti planctonici lacustri. Eppure i loro oggetti di studio nell'ecosistema lago interagiscono: la quantità di calore proveniente dall'atmosfera concorre a modulare l'attività del plancton che può, modificando la concentrazione dei gas disciolti in acqua, influenzare gli scambi all'interfaccia acqua-aria.

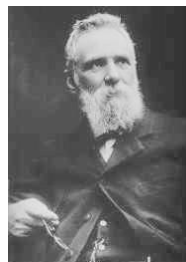
Lo scopo di questo manuale di limnologia è proprio quello di fornire agli specialisti delle diverse discipline, in formazione o già professionalmente attivi, gli elementi di base per capire e valutare gli effetti delle possibili interazioni tra le diverse componenti di un lago, che lo fanno evolvere verso una direzione che è la risultante di varie forze interagenti, quali, ad esempio, la determinante costitutiva imposta dall'idrologia e dalla geologia del bacino, la pressione delle modificazioni climatiche in atto, l'impatto antropico sulla chimica e sulla biologia del lago.

Mi auguro che questo testo possa servire ad aiutare il lettore a comprendere, e quindi a valutare correttamente, la complessità dell'organismo lago. Questo è il presupposto fondamentale per affrontare la sfida dello sviluppo sostenibile: sviluppare prassi di coesistenza tra uomo ed ecosistema che permettano l'uso del lago senza danneggiare la risorsa, anzi preservandola per le generazioni future.

2. Storia minima e scopi della limnologia

È soltanto da un secolo che la LIMNOLOGIA ha assunto la dignità di scienza per opera dello svizzero F. A. Forel. In questo lasso di tempo questa disciplina ha contribuito allo sviluppo dell'ecologia dal punto di vista teoretico ed ha anche fornito elementi importanti per la gestione degli ecosistemi acquatici. La storia della limnologia richiederebbe molte più pagine di quelle disponibili in un manuale introduttivo com'è questo. Mi limiterò perciò a tracciare una succinta e incompleta "linea del tempo" dei personaggi e di alcuni degli eventi che sono stati importanti per la limnologia mondiale e, in particolare, italiana.

François Alphonse Forel (1841–1912), definì la limnologia "oceanografia dei laghi". Nel 1901 pubblicò il primo testo di limnologia basato su 30 anni di ricerche sul Lago di Ginevra (Lac Léman). Tra il 1892 e il 1904 pubblicò "Lac Léman: Monographie Limnologique".



Stephen Alfred Forbes (1844–1930), direttore del Illinois Natural History Survey, pubblicò nel 1887 "Lake as a Microcosm" ove formulò il concetto di lago come "superorganismo".



Edward A. Birge (1851–1950) e Chancey Juday (1871–1944) studiarono la limnologia comparata di centinaia di laghi USA fondando la scuola di limnologia del Wisconsin. Cercarono di trovare un criterio di classificazione dei laghi basato sul chimismo del territorio e del bacino imbrifero.



August Thienemann (1882–1960) fondò nel 1922 con C.L. Naumann (1891–1934) la *Societas Internationalis Limnologiae* (SIL). Studiarono i nutrienti, il loro ciclo e il loro effetto sulla produttività lacustre. Classificarono i laghi in funzione del loro stato trofico, introducendo il concetto di oligotrofia ed eutrofia.



G. Evelyn Hutchinson (1903–1991), fu professore a Yale e pubblicò in 4 volumi (l'ultimo postumo) un *Treatise of Limnology* (1957–1993); introdusse molti concetti ecologici e limnologici innovativi, studiando oltre agli schemi generali di funzionamento degli ecosistemi anche i meccanismi di controllo.



Ramon Margalef (1919–2004), uno dei padri fondatori dell'ecologia moderna, ha fornito considerevoli contributi a molti settori dell'ecologia teoretica e in particolare alla limnologia, introducendo l'uso della teoria dell'informazione nello studio della diversità ecologica.



Robert G. Wetzel (1936–2005) è stato segretario e tesoriere della SIL per oltre 3 decenni garantendo il funzionamento di questa complessa associazione professionale. Il suo testo di limnologia *Limnology – Lake and River Ecosystems*, è uno dei pilastri per i cultori della disciplina.



Robert Henry Peters (1946–1996) contribuì significativamente alla conoscenza del ciclo del fosforo negli ambienti acquatici. Sviluppò l'ecologia predittiva e affrontò in modo innovativo e critico lo studio della limnologia.



In Italia:

Rina Monti Stella (1871–1937), professore di Anatomia Comparata all'Università di Milano, studiò la limnologia dei laghi alpini e la limnologia comparata dei laghi insubrici. Documentò la distruzione del plancton nel Lago d'Orta causata da inquinamento industriale.



1927: l'Italia ospita a Roma il 4° congresso della International Society of Limnology, fondata da appena 5 anni. A sinistra, la medaglia coniata per celebrare l'evento.



1938: nascita dell'Istituto Italiano di Idrobiologia voluto da Rosa Curioni per onorare la memoria del marito, il limnologo Marco De Marchi al quale viene dedicato l'Istituto.



Edgardo Baldi (1899–1951) primo direttore dell'Istituto Italiano di Idrobiologia, svolse una intensa attività di ricerca sulla biologia dei copepodi dei laghi alpini; guidò l'avvio dell'Istituto di Pallanza facendolo diventare un importante centro di ricerca a livello mondiale.



1942: pubblicazione del primo volume delle “Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia”.

Vittorio Tonolli (1913–1967) fu direttore dell'Istituto Italiano di Idrobiologia dal 1951 al 1967. Livia Tonolli Pirocchi (1909–1985) gli succedette nella direzione dal 1967 al 1979. La loro attività fu indirizzata allo studio dei laghi alpini, approfondendo gli aspetti dell'ecologia del plancton. Studiarono anche la limnologia dei laghi profondi subalpini e in particolare del Lago Maggiore. Mantenero alto il livello della ricerca limnologica dell'Istituto che iniziò a rivestire un ruolo chiave nel panorama della ricerca limnologica mondiale.



1972: fondazione dell'Associazione Italiana di Oceanografia e Limnologia.

1999: nascita del *Journal of Limnology*, nuova veste editoriale delle *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*.

2002: l'Istituto Italiano di Idrobiologia con la riforma del CNR, diviene Sezione di Idrobiologia ed Ecologia delle Acque Interne dell'Istituto per lo Studio degli Ecosistemi (ISE).

2005: il CNR elimina le qualifiche tematiche dai nomi delle sezioni degli istituti. L'Istituto Italiano di Idrobiologia è identificato soltanto come Sede di Verbania dell'ISE. Il Presidente della Repubblica Carlo Azelio Ciampi visita l'Istituto.

2016: l'Italia ospita a Torino il 33° congresso della International Society of Limnology (oltre 800 partecipanti da 56 Paesi). A sinistra la targa offerta dal Presidente della Repubblica Sergio Mattarella



Nel 2015 ho realizzato un piccolo museo degli antichi strumenti della limnologia denominato “Crypta Baldi” e dedicato al primo direttore dell’istituto Edgardo Baldi. Se volete vedere un po’ di storia della limnologia visitate la versione virtuale del museo all’indirizzo: www.ise.cnr.it/crypta. C’è anche una cineteca online con alcuni filmati storici di interesse limnologico (www.ise.cnr.it/crypta/film/default.html) e una sezione con testi divulgativi e di approfondimento (www.ise.cnr.it/crypta/libreria.html).

Dalla sua nascita l’Istituto è stato un centro di riferimento per i limnologi di tutto il mondo e un centro di formazione per i limnologi italiani. Per questo la storia della limnologia italiana si confonde un poco con la storia dell’Istituto. Ma questo è un capitolo che, spero, scriverà qualcun altro tra qualche anno.

Ritornando alla Limnologia, il suo obiettivo è, quindi, lo studio dei grandi laghi profondi, dei piccoli laghi, degli stagni, delle pozze e anche delle raccolte d'acqua dolce costruite artificialmente dall'uomo. La Limnologia si occupa del lago come di un organismo unitario e lo deve quindi studiare utilizzando le competenze e i metodi di molte scienze diverse quali la geografia, la geologia, l'idrologia, la meteorologia, la fisica, la chimica, la zoologia, la botanica, la microbiologia, la matematica e l'informatica. La Limnologia è, in altre parole, una scienza interdisciplinare perché per studiare come funziona e dove sta andando un lago deve ricorrere alle diverse discipline scientifiche che si occupano delle diverse parti che costituiscono l'organismo lago: la parte di crosta terrestre che lo ospita, le piogge che lo alimentano, le sostanze chimiche introdotte dai fiumi, gli animali e i vegetali che ci vivono, ecc.

I laghi sono importanti perché costituiscono la maggior riserva facilmente accessibile d'acqua dolce del nostro pianeta. Infatti, anche se l'acqua sulla Terra è abbondante (da 1,4 a 1,7 miliardi di km³), essa è per la maggior parte acqua marina, salata e quindi non utilizzabile da animali e vegetali terrestri (Tab. 1).

Tab. 1. Distribuzione percentuale delle acque sulla Terra.

Oceani	97,3 %
Ghiaccio	2,19 %
Acque sotterranee	0,5 %
Umidità del suolo	0,005 %
Vapore acqueo in atmosfera	0,001 %
Laghi	0,009 %
Laghi salmastri	0,008 %
Fiumi	0,0001 %

Questa suddivisione delle acque è la fotografia istantanea delle masse d'acqua mantenute in movimento da un meccanismo complesso, il ciclo idrogeologico dell'acqua, che unisce tutti i sistemi acquatici del pianeta.

3. Tipi di lago: origine e morfologia dei laghi

I laghi sono cavità del suolo all'interno delle quali si accumula l'acqua raccolta, e ad essi convogliata, dal bacino imbrifero. Tali cavità si possono essere prodotte nella crosta terrestre a seguito di eventi catastrofici occorsi in epoche geologiche lontane (laghi tettonici e vulcanici) o in tempi relativamente recenti (laghi di frana). Ancora, le cavità possono essersi originate, in epoche geologiche più recenti, per una lenta modificazione della crosta terrestre (laghi glaciali, di pianura, costieri, carsici). I laghi sono così classificati secondo la loro origine come segue.

Laghi tettonici: sono quelli formati in seguito a movimenti degli strati più profondi della crosta terrestre che fratturandosi e spostandosi, hanno determinato l'aprirsi di bacini ove si sono raccolte le acque (Fig. 1). Di questa origine sono i grandi laghi africani (Tanganika, Niassa, Rodolfo) e asiatici (Baikal), tra i più estesi, profondi e antichi (decine di milioni di anni) della Terra.



Fig 1. Il Lago Baikal, Siberia.

Laghi vulcanici: sono quelli ospitati nei crateri (Fig. 2), singoli o diversi compenetrati, di vulcani spenti (laghi craterici: es. laghi di Monterosi, Albano, Nemi, Vico, Bracciano) o nelle depressioni formatesi per lo sprofondamento delle camere magmatiche di vulcani divenuti inattivi (laghi di caldera: es. Lago di Bolsena). Di origine vulcanica sono anche i laghi di sbarramento di vallate formatisi per il consolidamento di colate laviche trasversali alla valle.

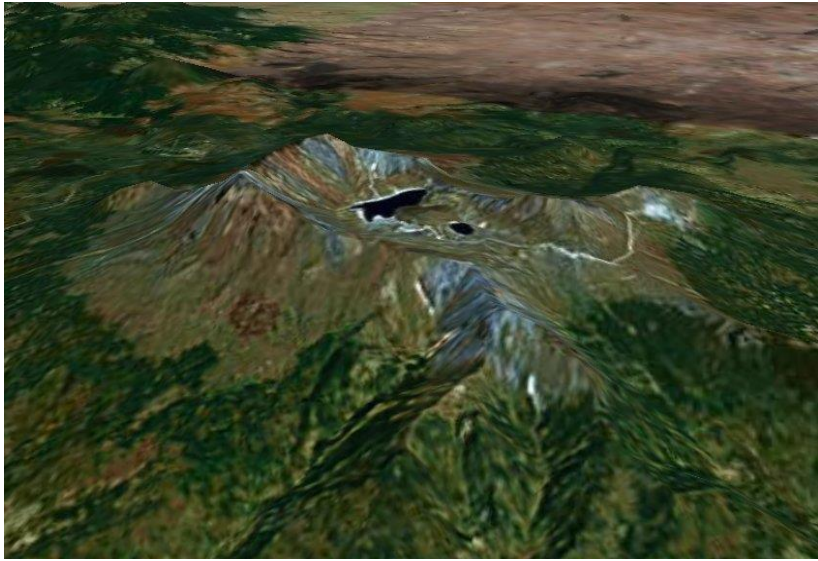


Fig. 2. I laghi craterici El Sol (a sinistra) e La Luna (a destra) in Messico.

Laghi di frana: si formano in seguito ad eventi catastrofici per la deposizione sul fondo di una vallata dei detriti franati da una parete della valle stessa (es. Lago di Antrona, Val d'Ossola) (Fig. 3).

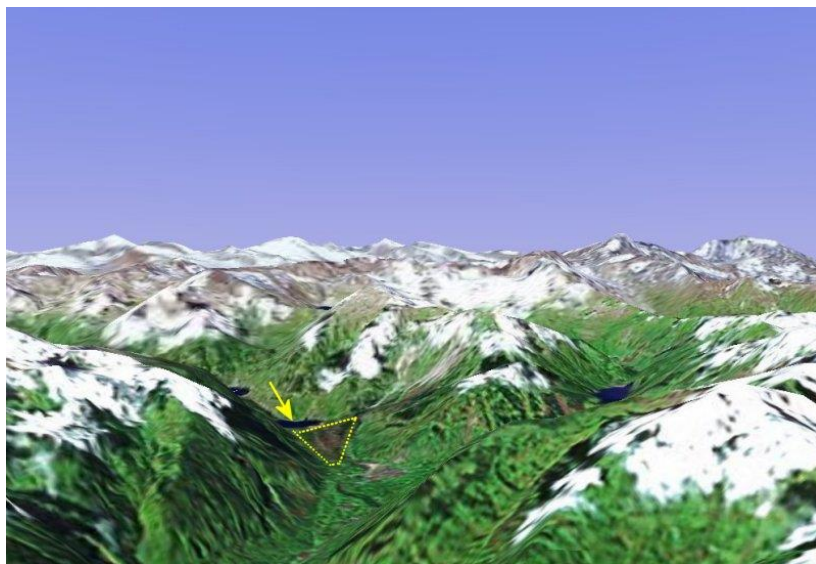


Fig. 3. Il Lago di Antrona, indicato dalla freccia. Il fronte della frana che ha formato il lago è indicato dal triangolo.

Laghi glaciali: i ghiacciai possono aver dato origine a conche lacustri in vari modi: scavando conche direttamente nella roccia; sbarrando valli con materiale morenico (laghi morenici) o con la loro stessa massa; dallo scioglimento di blocchi di ghiaccio rimasti immersi nel materiale morenico (cattle lakes nord americani). Le glaciazioni, che nel quaternario olocene (a partire da circa 10.000 anni fa) hanno ripetutamente interessato il nostro pianeta, hanno così dato origine a moltissimi laghi, direttamente e rimodellando valli preesistenti. Alle quote più elevate l'erosione glaciale incanalata si evidenzia con la formazione di circhi glaciali alla base dei quali spesso è contenuto un lago di circo (Fig. 4). I grandi laghi sudalpini sarebbero invece il risultato del rimodellamento glaciale di valli fluviali formatesi nel corso della crisi idrologica del Messiniano, quando il bacino del Mediterraneo era ridotto a poche raccolte di acque rimaste nelle parti più profonde del bacino (Fig. 5).



Fig. 4. Laghi alpini di circo ad alta quota: 1 e 2. Lago digato: 3.



Fig. 5. Il solco vallivo che ospita il Lago Maggiore visto da Nord.

Laghi di pianura: in una pianura molto livellata percorsa da molti fiumi bastano cause modeste per provocare tra due bacini

idrografici zone di spartiacque incerto, che facilmente si impaludano. Le cause più frequenti sono: il costipamento dei sedimenti, lo sbarramento a opera di alluvioni, le irregolarità nella deposizione originaria del materiale alluvionale che ha costituito la pianura e, infine, l'opera dell'uomo di estrazione dal sottosuolo. Ancora: se un meandro del fiume viene segregato dal corso principale, per esempio per la deposizione di materiali alluvionali, vi si può trattenere una raccolta d'acqua denominata lanca (Fig. 6).



Fig. 6. Una lanca separatasi dal corso principale del fiume. Le frecce indicano i punti di separazione.

Laghi costieri: si formano per deposizione, parallelamente alla linea di costa, del materiale sospeso nelle acque marine. Il protrarsi di tale deposizione può far sì che l'accumulo arrivi a sporgere sopra il livello medio del mare formando una lingua sabbiosa allungata: il cordone litoraneo. Se questo si origina all'imboccatura di un seno della costa, può giungere a saldarsi con la

terraferma a entrambe le estremità isolando dal mare aperto uno specchio d'acqua che diventa un lago costiero (Fig. 7).

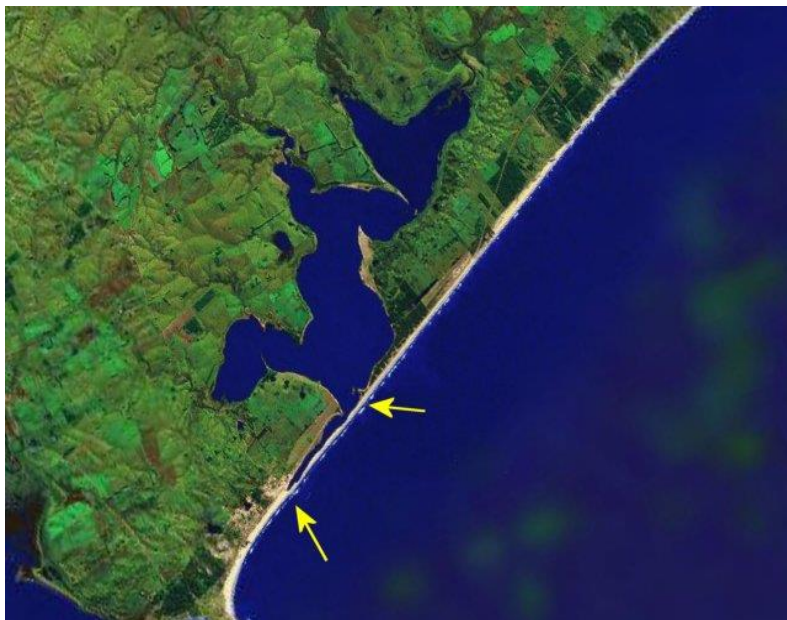


Fig. 7. Lago costiero (Lago Garzon) in Brasile. Le frecce indicano le estremità del cordone litoraneo

Laghi carsici: i fenomeni carsici, evidenti nelle regioni calcaree dove sono presenti rocce solubili, sono determinati dalla dissoluzione del carbonato costituente le rocce che, attaccato dalle acque a reazione acida perché ricche in CO_2 disciolta, si trasforma in bicarbonato solubile. Le fessure presenti nelle masse rocciose calcaree vengono così attaccate, allargate dalle acque carboniche che ne disciolgono le pareti. Si formano così delle caratteristiche cavità imbutiformi (doline) che vanno allargandosi progressivamente. Le acque solventi possono depositare dei sedimenti argillosi sul fondo, che diventa così impermeabile, permettendo alla dolina di raccogliere una certa massa d'acqua. Questi laghi di dolina si presentano tondeggianti e di piccole dimensioni; in Italia se ne incontrano esempi nel Carso e nell'appennino abruzzese.

Laghi artificiali: sono laghi creati dall'uomo sbarrando fiumi con dighe (laghi digati, Fig. 4) o riempiendo cavità scavate per qualche attività estrattiva (laghi di cava). Essendo ambienti non naturali vengono spesso gestiti considerandoli semplicemente dei serbatoi d'acqua. Questa semplificazione, che ignora la complessità i processi che hanno luogo in un lago, generalmente esita in un rapido degrado qualitativo del lago neofornato arrivando anche a comprometterne l'uso per il quale era stato creato.

Nell'Appendice 1 sono riportate le caratteristiche morfometriche dei principali laghi italiani ed alcuni dati sui laghi più grandi del nostro pianeta.

Il ciclo dell'acqua nella biosfera

Il rifornimento d'acqua per i laghi è garantito dall'esistenza del ciclo dell'acqua. L'acqua dolce è in continuo movimento perché superficie terrestre e atmosfera costituiscono una specie di grande dissalatore a energia solare. Questa provoca l'evaporazione dell'acqua marina. Circa l'85% di tutta l'acqua che evapora annualmente nell'atmosfera proviene dai mari (~ 500000 km³). Il restante 15% deriva dall'evaporazione delle acque superficiali continentali e, per la maggior parte, dalla traspirazione delle piante (evapotraspirazione). Dall'atmosfera l'acqua ricade poi, come pioggia o neve, sulla superficie terrestre. Il continuo trasferimento dell'acqua, sotto forma di vapore, all'atmosfera e il successivo ricondensarsi del vapore che ricade sulla Terra come precipitazioni costituisce il ciclo dell'acqua (Fig. 8). Il bacino imbrifero è la porzione di territorio che convoglia, attraverso i corsi d'acqua (torrenti e fiumi) costituenti il reticolo idrografico, le acque meteoriche a un determinato corpo d'acqua.

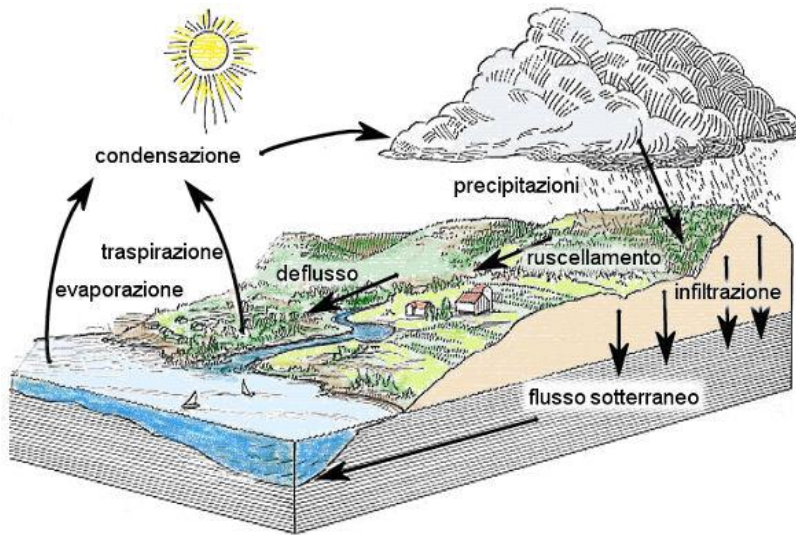


Fig. 8. Il ciclo dell'acqua.

È delimitato dalla linea spartiacque. Le acque drenate al di là di essa sono convogliate verso altri corpi idrici. Il bacino imbrifero influisce enormemente sugli ecosistemi acquatici: la sua superficie determina il volume delle acque raccolte, la sua composizione mineralogica influenza il chimismo di base dei laghi, la sua copertura vegetale influisce nella ripartizione delle acque di ruscellamento e di evapotraspirazione. Le acque drenate si caricano poi di sostanze organiche e inorganiche e di inquinanti in funzione dell'uso prevalente (agricolo, industriale, urbano) del territorio attraversato. Da quanto detto è chiaro che la fisiologia e l'evoluzione a breve e lungo termine degli ecosistemi acquatici dipende dalle caratteristiche del territorio che li circonda.

Morfologia e morfometria del lago

La forma della conca lacustre è importante per comprendere la genesi e l'evoluzione di un lago.

I parametri utili per caratterizzare morfologicamente un lago, generalmente rilevabili dalla cartografia disponibile, sono la lunghezza, cioè la distanza minima che separa nell'acqua i due punti più distanti sul perimetro del lago; e la larghezza, ossia la distanza

tracciata perpendicolarmente all'asse principale tra due punti delle coste opposte; la larghezza media di un lago è data dal rapporto tra la superficie e la lunghezza del bacino.

Il grado di articolazione della linea di costa, o **indice di sinuosità** della riva (D_L), è calcolato confrontando il perimetro del lago (L) con il perimetro di un cerchio che abbia la stessa superficie del lago; questa espressione dice quanto è più lungo il perimetro del lago reale rispetto al perimetro di un teorico lago circolare avente la stessa area:

$$D_L = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}}$$

Per determinare la forma della conca sommersa di un lago è necessario costruirne la batimetria. Questa operazione in passato veniva eseguita scandagliando il lago da un natante, ossia misurandone la profondità con un cavo metrato in punti distribuiti con una certa regolarità su tutta l'area del lago.

Attualmente si usa l'ecografo o ecoscandaglio, con il quale si determina la profondità misurando il tempo impiegato da un flusso di ultrasuoni generato in superficie per raggiungere il fondo del lago e, dopo esserne stato riflesso, raggiungere di nuovo la superficie. Esistono oggi strumenti come il sonar a scansione laterale (Side Scan Sonar), evoluzione dell'ecoscandaglio utilizzato per i sondaggi acustici batimetrici verticali, che effettua sondaggi acustici con scansioni areali (diagonali-suborizzontali) e permette così di ottenere una immagine tridimensionale della morfologia del fondo lacustre.

Riportati sulla planimetria i punti quotati del fondo, si congiungono quelli di eguale profondità, praticando le opportune interpolazioni; le linee così ottenute sono dette **isobate** e corrispondono alle isoipse del rilievo emerso.

Gli scandagli forniscono direttamente il valore della **profondità massima** (z_M), elemento molto importante per la caratterizzazione di un lago. Dalla carta batimetrica del bacino se ne può calcolare il **volume** (V) applicando formule che considerano il bacino lacustre costituito da tronchi di cono sovrapposti uno

all'altro, aventi per base la superficie delle isobate e per altezza la profondità che le separa. Dividendo il volume totale del lago per la sua superficie si ottiene la **profondità media (z_m)** del lago. È evidente che la conoscenza dei principali parametri morfometrici caratteristici di un lago è indispensabile per studiarne il funzionamento e l'evoluzione.

Quando il fondo di un lago si trova sotto al livello medio del mare, si dice che esso occupa una criptodepressione; questa avrà una profondità uguale alla differenza tra profondità massima del lago e livello medio del mare.

Una rappresentazione sintetica della forma di un bacino lacustre, utile per confrontare laghi diversi tra loro, è fornita dalla curva ipsografica delle superfici, ottenuta ponendo in diagramma sulle ascisse le aree delle singole isobate, calcolate come percentuale dell'area del lago alla superficie, e sulle ordinate le profondità delle isobate stesse (Fig. 9).

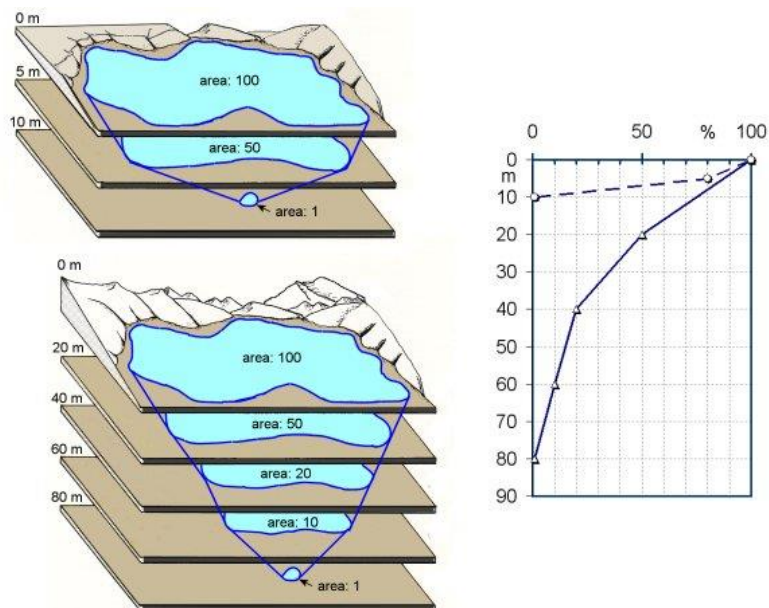


Fig. 9. A sinistra: area delle diverse isobate per un lago piatto (sopra) e per un lago profondo (sotto). A destra: grafico delle curve ipsografiche delle superfici di un lago piatto (linea tratteggiata) e di un lago profondo (linea continua).

È possibile anche disegnare la curva ipsografica dei volumi, mettendo in grafico i volumi tra due isobate contigue. Se l'area di isobate contigue è molto diversa la conca del lago ha una forma poco concava; se, invece, la variazione è modesta, le rive sommerse sono scoscese. Quindi, quanto maggiore è l'angolo tra curva ipsografica e asse delle ascisse, tanto più la conca del lago ha pareti ripide.

Se si ha una valutazione delle precipitazioni medie che cadono sull'intero bacino imbrifero (lago incluso) è possibile confrontare il volume annuo di precipitazioni (mm di pioggia per km² del bacino) e il volume del lago, e, tenuto conto del coefficiente di deflusso (perdite per evaporazione, ecc.), calcolare il tempo teorico di rinnovo dell'acqua del lago.

4. Dinamica delle acque nei laghi

Le acque si muovono all'interno delle cavità della crosta terrestre che le contengono trasportando soluti e sostanze in sospensione prese dagli ecosistemi confinanti, trasferendo da un punto all'altro del corpo idrico il calore in esse contenuto e scambiando gas con l'atmosfera. Per effetto della gravità nei fiumi l'acqua scorre lungo le linee di massima pendenza con una velocità di corrente che tende a diminuire dalla porzione montana a quella pedemontana, anche se deviazioni da questa regola sono possibili per il variare di altri parametri che pure influenzano la velocità di corrente (per es., aumento di portata per il contributo di affluenti). La velocità di corrente di un torrente di montagna è attorno a 3 m s^{-1} (circa 10 km h^{-1}), quella di un fiume di pianura è inferiore ad 1 m s^{-1} e in un lago la velocità di corrente scende a valori vicini ad 1 cm s^{-1} .

Raggiungendo il lago, l'alveo del fiume si amplia considerevolmente e la velocità di corrente rapidamente si abbassa a tal punto che i movimenti delle acque lacustri non sono più il risultato della gravità ma dipendono da altre sorgenti di energia: **l'energia termica fornita dalla radiazione solare** e **l'energia meccanica fornita dal vento**; queste determinano i movimenti delle masse d'acqua e, quindi, gli scambi tra di esse e con l'atmosfera. Poiché queste sorgenti di energia subiscono ovvie variazioni stagionali e sono influenzate dal clima della regione dove il lago è situato, il chimismo delle acque lacustri (in particolare in relazione alla disponibilità di ossigeno) e l'attività degli organismi che vivono nel lago è fortemente dipendente dalle vicende termiche stagionali del lago stesso.

Fiumi e laghi in considerazione della diversa velocità di corrente delle loro acque sono chiamati, rispettivamente, ecosistemi lotici (delle acque correnti) e lentic (delle acque ferme).

La dinamica delle acque di un lago è complessa perché sono complesse le interazioni tra l'acqua e le forze che ne determinano

i movimenti. Per comprenderla è necessario conoscere le **peculiarità proprietà fisiche e chimiche dell'acqua**, le modalità di **penetrazione nelle acque della radiazione solare** e in particolare della componente termica, i **movimenti delle masse d'acqua lacustri in relazione alle variazioni dell'energia termica** disponibile che è funzione delle stagioni e del clima e, infine, i **movimenti delle acque per effetto dei venti**, che concorrono a determinare le caratteristiche termiche delle acque lacustri.

5. Particolarità fisiche e chimiche dell'acqua

Prima di esaminare la dinamica dell'evoluzione termica di un lago nell'arco dell'anno è opportuno fare una piccola premessa per ricordare alcune particolarità dell'acqua che sono importanti nel determinare il funzionamento dei laghi.

L'acqua si forma quando due atomi di idrogeno instaurano un legame covalente con un atomo di ossigeno (Fig. 10). Nel legame covalente gli elettroni sono condivisi tra gli atomi. Questa condivisione nella molecola d'acqua non è paritetica: l'atomo di ossigeno attrae gli elettroni con forza maggiore degli atomi di idrogeno. La conseguenza è che nella molecola d'acqua le cariche sono distribuite in modo asimmetrico. Le molecole che hanno estremità parzialmente negative e positive si definiscono polari. Questa proprietà dell'acqua la rende un buon solvente per molte sostanze. La regione positiva di un molecola d'acqua attrae quella negativa di un'altra molecola, realizzando il così detto legame idrogeno (tratteggiato in Fig. 10). In questo tipo di legame un atomo di idrogeno è condiviso con altri due atomi di ossigeno: l'atomo donatore è quello al quale l'idrogeno è legato più strettamente e l'accettore (quello con parziale carica negativa) è quello che attrae l'atomo di idrogeno condiviso. Il legame idrogeno è notevolmente più debole del legame covalente. Però quando molti legami idrogeno agiscono insieme costituiscono una forza di coesione importante che fa sì che l'acqua posseda una forte tensione superficiale.

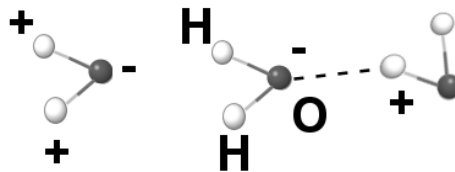


Fig. 10. Struttura della molecola d'acqua.

Quando la temperatura scende e si forma il ghiaccio i movimenti delle molecole si riducono moltissimo ed esse si legano rigidamente le une alle altre in una struttura cristallina (Fig. 11), la rigidità della quale fa sì che il numero di molecole d'acqua che può essere contenuto in un certo volume sia inferiore a quello che può essere contenuto nello stesso volume di acqua liquida.

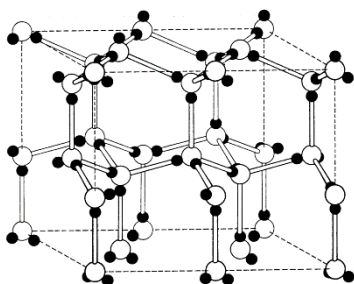


Fig. 11. Esempio di struttura cristallina delle molecole d'acqua nel ghiaccio. Si conoscono diverse modalità di cristallizzazione del ghiaccio.

È proprio la sua struttura molecolare che impartisce all'acqua le sue particolari caratteristiche fisiche peculiari. Infatti possiede:

a– il massimo di densità a $3,98^{\circ}\text{C}$, cioè a una temperatura più alta del punto di fusione (0°C).

b– il più elevato calore specifico fra tutti i solidi e liquidi noti, con l'eccezione dell'ammoniaca liquida.

c– il più alto calore (latente) di fusione, con la stessa eccezione.

d– il maggior calore (latente) di evaporazione che si conosca.

e– la tensione superficiale più elevata fra tutti i liquidi comuni.

f– la costante dielettrica più alta fra i liquidi; una dissociazione elettrolitica minima.

g– una elevatissima trasparenza ai raggi luminosi.

Le caratteristiche ricordate ai punti *a*– e *b*– sono quelle che più immediatamente influenzano i movimenti delle masse d'acqua lacustri. La densità dell'acqua è massima a $3,98^{\circ}\text{C}$: l'acqua a temperatura inferiore a questo valore è meno densa, cioè più leggera, fino al punto che un cubo di ghiaccio (0°C) di 1 cm di lato arriva a pesare 0,1 grammi in meno di un cubo d'acqua a $3,98^{\circ}\text{C}$ delle

stesse dimensioni. Sopra i $3,98^{\circ}\text{C}$ l'acqua diventa tanto meno densa (più leggera) quanto più aumenta la temperatura (Tab. 2).

Tab. 2. Cambiamento di densità dell'acqua in funzione della temperatura.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Densità (g per cm^3)
0 (solida)	0,9150
3,98	1,0000
20	0,9982
40	0,9922
60	0,9832
80	0,9718
100 (gas)	0,0006

Il fatto che l'acqua raggiunga la sua massima densità a $3,98^{\circ}\text{C}$, al di sopra del suo punto di congelamento, spiega perché le masse d'acqua comincino a gelare dalla superficie e perché il ghiaccio neofornato galleggi. La causa della minor densità del ghiaccio sta nella sua struttura cristallina più sopra illustrata. L'anomalia di comportamento dell'acqua si spiega ricordando che il ghiaccio ha una struttura tetraedrica ben ordinata (assicurata da legami covalenti e legami idrogeno) che consente ampi vuoti intermolecolari.

Il calore specifico dell'acqua, cioè la quantità di calore necessaria per innalzare di un grado la temperatura di un kg di questa sostanza, è il più elevato fra quelli di tutti i solidi e liquidi noti, con l'eccezione dell'ammoniaca liquida. Il calore specifico dell'acqua è =1, valore superato da poche sostanze (Tab. 3).

Tab. 3. Calore specifico di alcune sostanze: confronto con l'acqua.

Sostanza	cal/g (a 20°C)
Acqua	1,00
Ammoniaca liquida	1,098
Alcool etilico	0,58
Ghiaccio (-10°C)	0,49
Vetro	0,20
Granito	0,19
Mercurio	0,033

È necessaria una quantità di energia piuttosto alta per rompere i legami idrogeno dell'acqua liquida. Le proprietà dell'acqua che,

per aumentare di temperatura, necessita di molto calore che poi trattiene (l'acqua è un accumulatore di calore), fanno sì che l'ambiente acquatico sia termicamente più stabile di quello terrestre. Le fluttuazioni termiche nei laghi sono, quindi, gradualì e stagionali e i valori estremi sono, nell'arco della giornata, meno distanti che nell'ambiente aereo anche in laghi diversi per altitudine e latitudine (Fig. 12). La maggior uniformità del clima lacustre subacqueo è probabilmente una fra le cause più importanti del frequente cosmopolitismo di molti degli organismi che vivono nelle acque dolci.

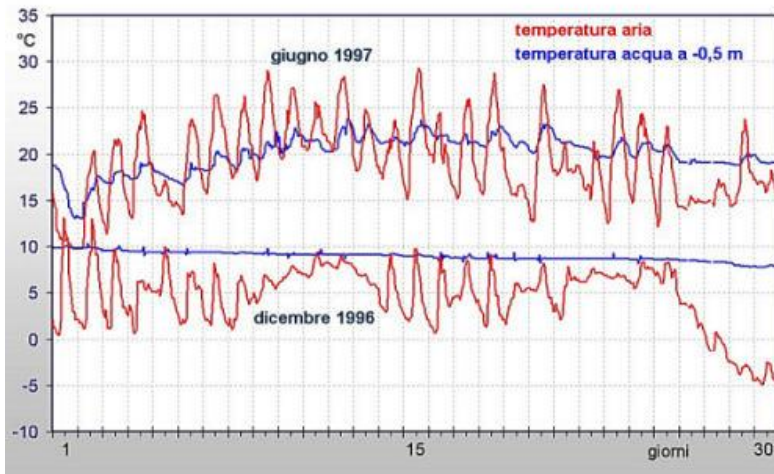


Fig. 12. Confronto fra l'escursione giornaliera della temperatura dell'aria (a Pallanza) e dell'acqua (Lago Maggiore, profondità 0,5 m) in un mese estivo e in uno invernale.

6. Radiazione solare ed energia termica

Nella figura 13 è schematizzato lo spettro della radiazione solare che raggiunge i laghi e l'effetto delle diverse lunghezze d'onda sulla materia. Senza entrare nel dettaglio di tali interazioni dal punto di vista fisico, qui basta ricordare che l'effetto della radiazione sulla materia è tale da modificarne, alle alte energie, la struttura atomica o molecolare. Con il diminuire del contenuto energetico, ossia nell'intervallo dove si trova la porzione visibile dello spettro, l'energia della radiazione interviene nelle reazioni biochimiche che portano alla sintesi della sostanza organica. La fotosintesi operata dagli organismi autotrofi, che mantiene la vita sul nostro pianeta, è appunto un complesso di reazioni biochimiche sostenute, dal punto di vista energetico, dalla radiazione luminosa che va da 400 a 700 nm e che è detta radiazione fotosinteticamente attiva o PAR (Photosynthetically Active Radiation). Come si vede, soltanto le radiazioni a onda lunga sono quelle che, interagendo con le molecole d'acqua, trasferiscono ad esse la loro energia determinandone il riscaldamento.

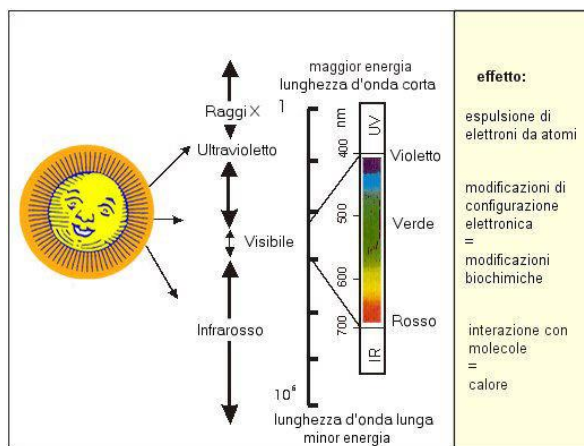


Fig. 13. Spettro e attività della radiazione solare che raggiunge la biosfera.

La quantità di radiazione solare che raggiunge la superficie dei laghi varia in funzione della trasparenza dell'atmosfera, della latitudine e quota del lago. Quando raggiunge la superficie lacustre, essa viene in parte riflessa (e ritorna all'atmosfera) e in parte rifratta, penetrando così entro l'acqua.

La percentuale di radiazione incidente che viene riflessa dipende dalla posizione del sole nelle diverse ore della giornata e nelle diverse stagioni, cioè dall'angolo di incidenza. La percentuale riflessa è minima quanto più la radiazione incide verticalmente sul lago (sole allo zenith) e massima quando la radiazione incide molto obliquamente (sole presso l'orizzonte). Alle nostre latitudini, come media annuale la radiazione riflessa è meno del 10% di quella incidente e, nell'arco dell'anno, oscilla dal 5% al 35% circa di quella incidente.

La radiazione incidente che penetra nell'acqua è rifratta, cioè cambia di direzione e diminuisce la propria velocità passando a un mezzo più denso, secondo le leggi della rifrazione (il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza ed il seno dell'angolo di rifrazione è una costante, detta "indice di rifrazione"). L'indice di rifrazione dell'acqua è di circa 1,33 ed è maggiore di 1 perché l'acqua è più rifrangente dell'aria. Per questo nell'acqua i raggi luminosi giungono, in un dato momento, sempre più verticali rispetto a quanto avviene fuori dell'acqua, fatto che rende più brevi, nel mondo subacqueo, le aurore e i crepuscoli.

Dopo essere penetrata nell'acqua, la radiazione si trasmette attraverso di essa fino a una certa profondità. Le cause che determinano il progressivo assorbimento della radiazione e ne limitano la penetrazione sono l'acqua stessa e le sostanze in essa disciolte (che ne determinano il colore) o sospese, viventi o no, che la riflettono all'interno dell'acqua (diffusione).

Il rapporto fra l'intensità della radiazione alla superficie (I_0) e alla profondità z (I_z) è dato dall'equazione:

$$I_z/I_0 = e^{-kz} \quad (1) \quad \text{o dall'equivalente} \quad \ln I_z - \ln I_0 = -kz \quad (2)$$

dove e è la base dei logaritmi naturali (\ln).

Il parametro k è il coefficiente di estinzione, che dice in che percentuale la luce incidente alla superficie è attenuata da uno strato d'acqua dello spessore di un metro. Quanto più è elevato il valore di k tanto più rapidamente diminuisce l'intensità della radiazione con la profondità.

Misura della radiazione

La misura si effettua usando opportuni sensori subacquei, calati da una imbarcazione, e registrando la radiazione misurata dalla superficie a profondità progressivamente crescenti, curando che l'imbarcazione non faccia ombra al sensore. La luce è energia e quindi la sua intensità può essere misurata in watt cm^{-2} o in erg cm^{-2} .

L'intensità di luce può anche essere misurata in fotoni. I biologi privilegiano questa unità di misura perché le reazioni fotochimiche biologiche (come visione e fotosintesi) dipendono dall'assorbimento di specifiche quantità di fotoni. La più diffusa unità di misura della radiazione luminosa basata sulla misura del numero di fotoni è il microeinstein m^{-2} . Un einstein è uguale a $6 \cdot 10^{23}$ fotoni (numero di fotoni pari al numero di Avogadro).

Per i sistemi biologici la radiazione luminosa si misura anche come moli di fotoni:

la radiazione è: moli \times unità di area ($\mu\text{mol m}^{-2}$);

il flusso di radiazione è: moli \times unità di area \times unità di tempo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

1 mole di fotoni = 1 einstein.

I misuratori di radiazione subacquea comunemente usati in ecologia acquatica sono progettati per misurare il PAR e, quindi, per rispondere allo stesso modo a tutte le radiazioni nell'intervallo di lunghezze d'onda del PAR.

Le misure di intensità di radiazione luminosa espresse in fotoni o in watt possono essere convertite le une nelle altre se è nota la lunghezza d'onda alla quale si sono effettuate le misure:

$$\text{einstein m}^{-2} = 12 \times 10^{14} \text{ erg } \lambda \text{cm}^{-2} \text{ sec}^{-1},$$

$$\text{einstein m}^{-2} \text{ sec}^{-1} = 12 \times 10^7 \text{ watt } \lambda \text{cm}^{-2},$$

dove λ è la lunghezza d'onda in nanometri (nm), valore del quale si deve tener conto perché i fotoni hanno più energia a corte che a lunghe lunghezze d'onda. Questo è importante quando si fanno misure a lunghezze d'onda specifiche o in intervalli spettrali molto ristretti. Per

esempio, il crescente interesse per la misura della radiazione UV subacquea, che oggi raggiunge la biosfera in quantità maggiore rispetto al passato recente per effetto dei cambiamenti globali in atto, fa sì che siano commercializzati apparecchi per la misura della radiazione UV subacquea. Questa viene espressa in $\mu\text{watt} \lambda \text{ cm}^{-2}$, dove λ è la lunghezza d'onda (in nm) alla quale viene fatta la misura.

Se misurando con uno strumento adeguato la radiazione in un lago si trova che è $1200 \mu\text{mol m}^{-2}$ alla superficie e $600 \mu\text{mol m}^{-2}$ a 5 m di profondità possiamo scrivere, usando l'equazione (2) e risolvendola per trovare il valore di k:

$$k = -(\ln I_z - \ln I_0)/z = -(\ln 600 - \ln 1200)/5 = 0,1386 \text{ m}^{-1}$$

In altre parole, fatta uguale a 100 la percentuale di radiazione alla superficie, quella che arriva a 5 m è, a partire dall'equazione (1):

$$I_z = I_0 e^{-kz} = 100 e^{-0,1386 * 5} = 50$$

ossia il 50% della radiazione superficiale arriva a 5 m.

Si ritiene che la massima profondità alla quale è possibile la vita dei vegetali acquatici (alghe e macrofite) sia quella dove arriva almeno l'1% della radiazione presente in superficie. Questa profondità è quindi assunta come limite inferiore della zona eufotica (o semplicemente fotica), cioè dello strato d'acqua dove è possibile la produzione da parte degli organismi autotrofi. La porzione di lago non raggiunta dalla luce è definita zona afotica. Conoscendo il coefficiente di estinzione delle acque di un lago si può facilmente calcolare l'estensione della sua zona eufotica a partire dall'equazione (2). Nel lago dall'esempio precedente, dove $k = 0,1386 \text{ m}^{-1}$, la profondità dove arriva l'1% della radiazione incidente sarà:

$$z = -(\ln I_z - \ln I_0) / 0,1386 \text{ m}^{-1}$$

ossia:

$$z = -(\ln 0,01 - \ln 1,00) / 0,1386 \text{ m}^{-1} = 33,2 \text{ m.}$$

Il lago dell'esempio è un lago molto trasparente, come è evidente esaminando la figura 14, dove sono messe a confronto le curve di attenuazione della radiazione luminosa di due laghi italiani a diversa trofia e di un lago ultraoligotrofo della Patagonia Argentina.

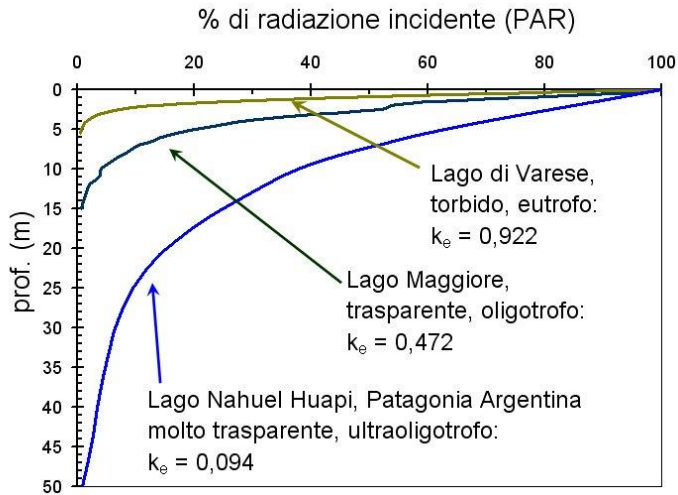


Fig. 14. Curve di attenuazione della radiazione luminosa in laghi di diversa trofia e quindi di diversa trasparenza.

Non tutte le lunghezze d'onda sono attenuate allo stesso modo. L'acqua assorbe alcune lunghezze d'onda più di altre, come si può vedere dalla tabella 4.

Tab. 4. Coefficienti di estinzione della luce in acqua distillata per la radiazione visibile e per le lunghezze d'onda adiacenti (Hutchinson, 1957).

Lunghezza d'onda (nm)		Coeff. di estinzione (m^{-1})
	Infrarosso	1,04
PAR	680	0,455
	620	0,273
	580	0,078
	520	0,016
	460	0,0054
	400	0,0134
	UV-A	0,0255
	380	

Nella regione del blu c'è una “finestra” di maggior trasparenza a queste lunghezze d'onda. Poiché la luce blu-verde è quella meno assorbita, questo è il colore prevalente della luce nelle profondità dei laghi. Però le sostanze sospese e quelle disciolte (plancton, detrito particellato, acidi umici, altri soluti) modificano lo spettro di assorbimento dell'acqua determinando il profilo luminoso, o il clima ottico subacqueo, caratteristico di ciascun lago.

Per questa ragione in un lago molto produttivo la luce non penetra molto in profondità e la radiazione luminosa dominante è allora quella rossa. Al contrario in un lago poco produttivo la radiazione rossa è estinta rapidamente e negli strati più profondi, dove ancora può arrivare la luce, le radiazioni a onda corta (blu e verde) sono quelle dominanti. La radiazione ultravioletta, in particolare, penetra assai poco nell'ambiente naturale perché anche nei laghi poco produttivi viene rapidamente assorbita dalle sostanze organiche disciolte (Fig. 15).

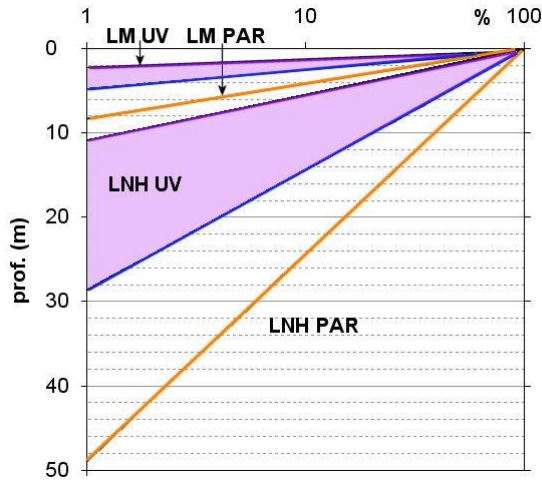


Fig. 15. Penetrazione della radiazione UV, espressa come percentuale della radiazione incidente alla superficie, in un lago meso-oligotrofo (Lago Maggiore: LM) e in uno ultraoligotrofo (Lago Nahuel Huapi, Patagonia Argentina: LNH). L'area in grigio è relativa alla radiazione UV nell'intervallo 305 – 380 nm.

La trasparenza delle acque lacustri

L'abbondanza di particelle e soluti in un lago ne determina la trasparenza. Questa viene valutata normalmente con uno strumento molto semplice, il disco di Secchi, usato per la prima volta nel 1865 dall'abate A. Secchi in Mediterraneo durante una crociera della pirocorvetta Immacolata Concezione dello Stato Pontificio. È costituito da un disco bianco, generalmente metallico, di 20-30 cm di diametro, fissato all'estremità di una fune metrata. Spesso se ne usa una variante dove i quadranti del disco sono dipinti in bianco e nero alternati. Il disco di Secchi viene immerso in acqua e, calandolo dalla parte in ombra di una imbarcazione, si misura la profondità alla quale esso diviene invisibile e quella alla quale ricompare (Fig. 16). La media tra le due misure è la trasparenza di un lago definita come la profondità di scomparsa del disco di Secchi. Questa stima della trasparenza è una funzione della riflessione della luce dalla superficie del disco, che è influenzata dall'assorbimento della radiazione da parte dell'acqua e delle sostanze in essa disciolte e sospese.

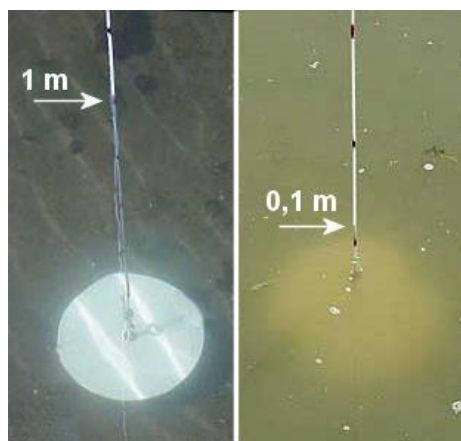


Fig. 16. Disco di Secchi immerso in un lago oligotrofo (a sinistra) e in uno eutrofo (a destra). Le frecce indicano il livello dell'acqua.

La trasparenza dei laghi molto produttivi può anche essere inferiore ad 1 metro mentre nei laghi poco produttivi può essere di alcune decine di metri. Per esempio, è di circa 40 m nel Lago Baikal. Alle nostre latitudini la trasparenza di un lago è massima nel periodo di minor produzione (inverno) e minima in estate–autunno (Fig. 17). Dalla trasparenza valutata come profondità di scomparsa del disco di Secchi si può ricavare una stima, molto approssimativa, dello spessore della zona eufotica che è circa 2–3 volte tale valore.

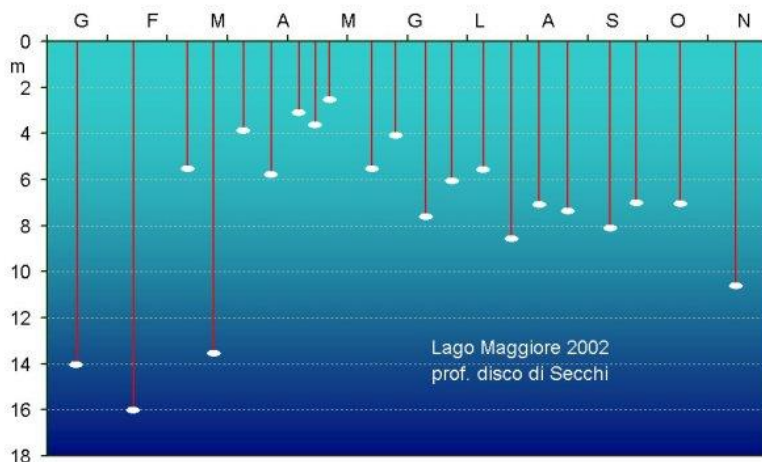


Fig. 17. Variabilità stagionale della profondità di scomparsa del disco di Secchi nel Lago Maggiore.

Il colore dei laghi

Il colore vero, o intrinseco, dell'acqua di un lago è quello a essa impartito dalle sostanze colloidali e dai soluti in essa presenti. La valutazione di questa colorazione si fa normalmente in laboratorio esaminando con uno spettrofotometro campioni d'acqua filtrati. Il colore apparente delle acque di un lago è quello percepito da un osservatore e dipende dalla presenza di particelle, viventi o non viventi, in sospensione, da condizioni esterne (colore del cielo, delle sponde), in acque poco profonde dal colore dei sedimenti di fondo, dalla presenza di sostanze colloidali e di soluti. Ad esempio, i composti del ferro, come solfato ferroso e come ossido ferrico, possono impartire a un lago un colore rossastro o giallastro. I laghi alimentati da acque che drenano territori molto forestati o torbosi sono ricchi di sostanze umiche, che possono determinare una colorazione bruna o addirittura nerastra alle acque. La colorazione di un lago può anche cambiare con il ciclo stagionale, in dipendenza da fenomeni biologici come la crescita di popolamenti algali diversi per tipo e densità. Gli organismi planctonici, infatti, concorrono a determinare la colorazione apparente della massa d'acqua in cui vivono, talvolta con effetti

straordinari come quando si verificano fioriture esplosive di organismi fitoplanctonici, come alcune specie di *Haematococcus*, *Euglena*, *Planktothrix*, che abbastanza frequentemente arrivano a dare l'aspetto di "laghi di sangue" ai laghi alpini. Intense colorazioni di diversa tonalità sono poi possibili in particolari ambienti, come in acque solforose o salmastre, dove sono spesso prodotte da batteri.

La determinazione del colore apparente si effettuava con il disco di Secchi, calandolo a metà della profondità di trasparenza e confrontando il colore apparente della colonna d'acqua sovrastante il disco con serie di campioni standard colorati, ottenuti con miscele di soluzioni di particolari sali, come ad esempio il cromato di potassio, e il solfato cobalto-ammonico (scala di Forel-Ule). Il metodo, estremamente soggettivo, è ormai in disuso così come la più oggettiva scala colorimetrica in "unità Platino", basata sul confronto spettrofotometrico tra acqua di lago filtrata e soluzioni di riferimento di sali di Pt e Co.

7. Le vicende termiche stagionali dei laghi

Il calore si trasferisce in tre modi:

- per radiazione, quando si ha il trasferimento di energia tramite onde elettromagnetiche, senza trasferimento di materia
- per conduzione, quando il calore è trasferito all'interno di un mezzo materiale attraverso il passaggio di energia termica da una molecola a quella vicina, senza spostamento di massa. Perché si abbia conduzione è necessario che esista un gradiente di temperatura
- per convezione, quando il trasferimento di calore si realizza attraverso il movimento di una massa di materia riscaldata da un punto a un altro. Questa è la modalità prevalente di trasferimento dell'energia termica nei fluidi.

La radiazione solare riscalda i primissimi strati d'acqua ma il trasporto del calore in profondità dipende dalla convezione e, per la maggior parte, dal **lavoro del vento**. Il trasferimento del calore nella massa d'acqua ne determina la temperatura che, in un determinato momento stagionale, è il risultato del **bilancio termico del lago**, cioè dalla differenza fra gli apporti e le perdite di calore. Se si misura la temperatura di un lago dalla superficie al fondo si ottengono, nel corso dell'anno, profili termici molto differenti. In particolare, vi sono periodi nei quali la colonna d'acqua ha la stessa temperatura dal fondo alla superficie e altri nei quali vi è un elevato gradiente termico.

Le acque di un ipotetico lago della regione temperata, con una profondità di 20 metri, alla fine della stagione invernale presentano, a tutte le profondità, una uguale temperatura di circa 4°C. Questa è, come abbiamo appena ricordato, la temperatura di massima densità dell'acqua. L'azione del vento può facilmente provocare un mescolamento delle acque più superficiali, a contatto con l'atmosfera e quindi contenenti ossigeno disciolto, con quelle sottostanti. La circolazione primaverile che così si instaura ricarica di ossigeno l'intera colonna d'acqua (Fig. 18 A)

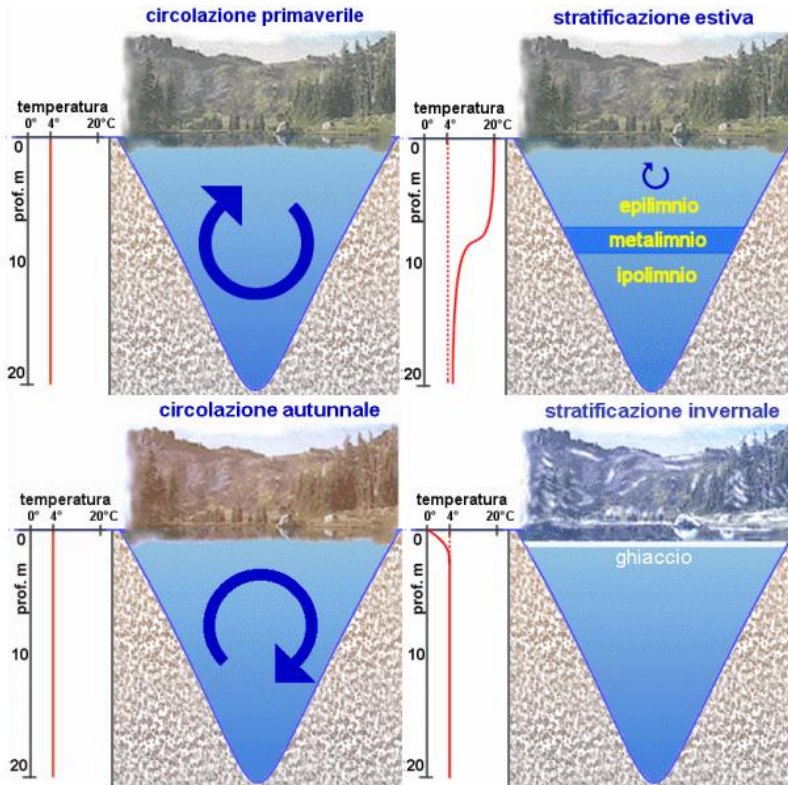


Fig. 18. Profilo della temperatura e sezione di un lago durante la circolazione primaverile, la stratificazione estiva, la circolazione autunnale e la stratificazione invernale.

Con l'avanzare della primavera (Fig. 18 B), l'apporto di calore attraverso la radiazione solare determina un innalzamento della temperatura delle acque superficiali. Il lavoro meccanico del vento potrà operare un certo mescolamento delle acque più superficiali (più calde e quindi meno dense) con quelle immediatamente sottostanti (più fredde e quindi più dense), contribuendo così alla distribuzione del calore dagli strati più superficiali a quelli via via più profondi. Tuttavia, con il progredire della stagione calda, tra acque superficiali e acque profonde andrà formandosi un gradiente termico, e quindi di densità, sempre più elevato e comunque tale da impedire il mescolamento ad opera del vento.

Nella stagione calda, quindi, si avrà nel lago uno strato superficiale caldo (**epilimnio**) separato dalle acque profonde uniformemente fredde (**ipolimnio**) da uno strato di passaggio (**metalimnio**), caratterizzato da un rapido abbassamento della temperatura con il crescere della profondità. Il livello dove si ha una differenza di temperatura maggiore di 1°C per metro si definisce **termoclinio** che è, in altre parole, il piano orizzontale che passa per il punto di flesso di un profilo termico verticale. In questa situazione di stratificazione estiva lo scambio di ossigeno tra le acque superficiali e quelle profonde è quasi nullo. Addirittura, se il lago è molto produttivo, l'ossidazione microbica della sostanza organica può consumare completamente l'ossigeno disciolto nelle acque ipolimnetiche arrivando a determinare una situazione di anossia, ovviamente incompatibile con la vita degli organismi acquatici.

In autunno (Fig. 18 C) l'acqua superficiale si raffredda, diventa più densa e scende verso il fondo. L'epilimnio aumenta di spessore raffreddandosi e si abbassa anche lo strato, sempre più sottile, nel quale avviene il salto di temperatura, il metalimnio. Si riduce così progressivamente la differenza di temperatura tra epilimnio e ipolimnio. Come già in primavera, per azione del vento il mescolamento delle acque si intensifica ed esita, infine, in una circolazione completa (circolazione autunnale). Il corpo d'acqua si trova ora a circa 4°C con l'ossigeno disciolto uniformemente distribuito.

In inverno (Fig. 18 D) la densità dell'acqua diminuisce per un ulteriore raffreddamento. L'anomalia della densità dell'acqua comporta una instabile stratificazione termica inversa, con uno strato superficiale più freddo sopra uno strato più profondo di acqua a 4°C . Il ghiaccio, quando arriva a formarsi, copre la superficie del lago poiché la sua densità a 0°C è solo i 9/10 di quella dell'acqua. Il ghiaccio può rendere stabile la stratificazione termica inversa e si produce così la stratificazione invernale.

Un lago che, come quello appena descritto, circola due volte l'anno si dice dimittico.

Il ciclo termico di un lago è influenzato da fattori climatici (temperatura dell'aria e ventosità) e morfologici (profondità e

forma del bacino lacustre) ma dipende principalmente dalla latitudine e dall'altitudine che influenzano direttamente la quantità e l'intensità della radiazione solare, cioè la sorgente di energia termica. A seconda del loro ciclo termico i laghi si possono classificare come:

1) di tipo polare, nei quali la superficie è costantemente gelata e la massa d'acqua sottostante ha sempre una temperatura inferiore ai 4°C. In essi non si verifica mai la piena circolazione; perciò questi laghi molto particolari sono detti **amittici**;

2) di tipo sub-polare, che presentano la superficie libera dai ghiacci solo per un breve periodo estivo, quando la loro temperatura superficiale supera i 4°C. Questi laghi hanno un solo periodo di isotermità e quindi un'unica piena circolazione (laghi **monomittici**). A questa categoria di ambienti appartengono la gran parte dei nostri laghi alpini d'alta quota;

3) di tipo temperato, con temperatura superficiale inferiore a 4°C in inverno, anche se possono non gelare, e superiore a 4°C in estate. Sono laghi che hanno un ciclo termico come quello illustrato sopra; poiché hanno due periodi di isotermità, e quindi due piene circolazioni l'anno, sono definiti **dimittici**;

4) di tipo sub-tropicale. Questa categoria include anche i laghi della regione mediterranea, nei quali la temperatura è sempre superiore, anche negli strati profondi, a 4°C. In essi si verifica annualmente un solo periodo di isotermità (fine inverno) e quindi una sola piena circolazione (laghi **monomittici**). Anche i grandi laghi profondi subalpini sono di tipo sub-tropicale. In essi però la piena circolazione non si verifica tutti gli anni e fanno, quindi, parte della categoria laghi **oligomittici** o, più precisamente, **oligomittici**;

5) di tipo tropicale. Sono i laghi delle regioni calde con temperatura sempre superiore a 4°C in tutta la massa d'acqua. In questi laghi le differenze di temperatura tra strati superficiali e profondi sono minime durante tutto l'anno (laghi **anisomittici**).

Oltre ai tipi di lago sopra illustrati, che si chiamano **olomittici** perché quando raggiungono l'omeotermità circolano completamente, ci sono anche i laghi **meromittici** (mero = parziale), nei

quali l'acqua di fondo non si mescola mai con l'acqua degli strati superficiali. Questo succede in laghi ove, per accumulo di soluti, l'acqua di fondo acquista una densità superiore a quella imputabile soltanto alla temperatura. Gli strati che si mescolano costituiscono il **mixolimnio** e gli strati profondi il **monimolimnio**. Lo strato intermedio, dove c'è il brusco cambiamento di densità al confine con lo strato più profondo ricco in sali o sostanze organiche disciolte, è detto **chemoclinio** (o picnoclinio). I laghi meromittici possono avere origine:

- **ectogenica** se si formano quando eventi esterni trasportano acqua salata in un lago d'acqua dolce o viceversa;
- **crenogenica** quando sorgenti saline situate al fondo della conca lacustre immettono nel lago acque ricche di sali;
- **biogenica**, quando l'accumulo di sali negli strati profondi è dovuto alla decomposizione della sostanza organica a livello dei sedimenti o alla precipitazione dei carbonati per le variazioni di pH legate alla fotosintesi. Nei primi due casi la meromissi è generalmente un fenomeno naturale. Nel terzo caso, invece, l'introduzione nel lago di sostanza organica in eccesso è di origine antropica diretta (immissioni di scarichi urbani in lago) o indiretta, come conseguenza dell'eutrofizzazione di un lago. Quale che sia la causa della meromissi, la segregazione degli strati profondi, che perdono la possibilità di entrare in contatto con l'atmosfera, fa sì che essi diventino rapidamente anossici perché la decomposizione (ossidazione) batterica della sostanza organica arriva a consumare l'ossigeno in essi contenuto. Nel monimolimnio, quindi, c'è soltanto l'attività della microflora batterica anaerobia. Nei laghi meromittici relativamente poco profondi, dove la radiazione solare arriva almeno al chemoclinio ma l'anossia impedisce la fotosintesi algale, si sviluppa spesso una microflora batterica anaerobia capace di fotosintesi e si può avere una importante produzione di sostanza organica. Un esempio è il Lago di Cadagno (Val Piora, Canton Ticino, Svizzera).

Bilancio termico dei laghi.

Per lo studio dell'evoluzione termica di un lago, che assume particolare rilievo nel quadro dell'evoluzione climatica globale

in atto, è importante calcolarne il bilancio termico annuale, che è la quantità di calore necessaria per alzare la temperatura dell'acqua dal valore minimo invernale a quello massimo estivo. Tale bilancio è, in altre parole, la quantità di calore contenuta annualmente nel lago standardizzata esprimendola in Joule (o calorie) per unità di superficie. Il bilancio termico birgeano, dal nome del limnologo americano Birge, stima il calore ricevuto da un lago, formato da n strati d'acqua sovrapposti di area A e profondità z , sommando il contenuto calorico di ciascuno degli n strati [dato da $A_{\text{strato}} \times Z_{\text{strato}} \times (\text{Temp max estiva} - \text{Temp min invernale})$] e dividendolo per l'intera area del lago. È ovvio che il bilancio termico annuale aumenta con la profondità media, l'area e il volume del lago e diminuisce, in termini relativi, per i laghi a quote e a latitudini elevate. Per dare un'idea delle quantità di calore in gioco si può citare il fatto che il bilancio termico annuo del Lago Maggiore (superficie 212 km², volume 37,7 km³) è attorno alle 30000 calorie cm⁻² anno⁻¹.

Si può anche calcolare un bilancio termico analitico basato sulla identificazione di tutte le entrate e le perdite di calore in o da un lago e allora l'equazione generale del bilancio può essere espressa come segue:

$$Q_s - Q_r - Q_b - Q_e - Q_h \pm Q_t = 0$$

dove:

Q_s = radiazione solare globale;

Q_r = radiazione solare riflessa;

Q_b = netto dello scambio energetico a onda lunga;

Q_e = calore utilizzato nei processi evaporativi;

Q_h = calore sensibile di conduzione;

Q_t = calore immagazzinato o perso dal lago (per trasferimento advettivo netto da immissari ed emissari).

Alcuni di questi termini possono essere misurati direttamente (trasferimento advettivo netto da immissari ed emissari, radiazione solare) o calcolati in modo soddisfacente (calore utilizzato nei processi evaporativi, netto dello scambio energetico a onda

lunga). Il bilancio termico analitico è importante per valutare i processi maggiormente influenti nell'aggiunta o nella sottrazione di calore a un lago.

La **stabilità termica complessiva** di un lago è misurata dalla quantità di **lavoro del vento** necessaria per vincere la stratificazione termica della colonna d'acqua e mescolarla completamente fino a omogeneizzarla, superando la resistenza opposta dalle differenze di densità. Secondo un altro approccio la stabilità è valutata in funzione del lavoro necessario per mantenere una condizione di omeotermia. Al di là di queste diverse sottolineature, che comunque implicano modalità di calcolo differenti, la stabilità è una espressione di quanto forte è la segregazione delle acque ipolimniche.

Spesso si preferisce valutare la **stabilità termica relativa** di un lago, che è data dal rapporto tra la differenza di densità di uno strato spesso 0,5 m e la differenza di densità tra l'acqua a 5 e a 4°C:

$$\text{stabilità termica relativa} = (d_2 - d_1) / 8,1 \times 10^{-6} \text{ g cm}^{-3}$$

dove d_2 e d_1 sono le densità superiore e inferiore dello strato considerato.

La stabilità dei termoclini primaverili, poco profondi e con forti riscaldamenti in superficie, è modesta e il termoclinio spesso si dissolve. I termoclini estivi, più profondi, hanno elevata stabilità e la stratificazione può persistere a lungo (Fig. 19).

La stabilità elevata dei termoclini fa sì che in un lago ne possa esistere più d'uno per il succedersi di periodi di riscaldamento seguiti da forte vento e da periodi di raffreddamento che possono provocare lo sprofondarsi di successivi strati d'acqua, ciascuno con le caratteristiche di un termoclinio. Il termoclinio più superficiale è generalmente il più pronunciato e, alle nostre latitudini e con il regime di venti della zona sudalpina, può formarsi tra i 5 e i 20 metri di profondità. In laghi soggetti a un regime di venti forti e persistenti, il termoclinio è, generalmente, singolo, poco pronunciato e profondo (Fig. 20).

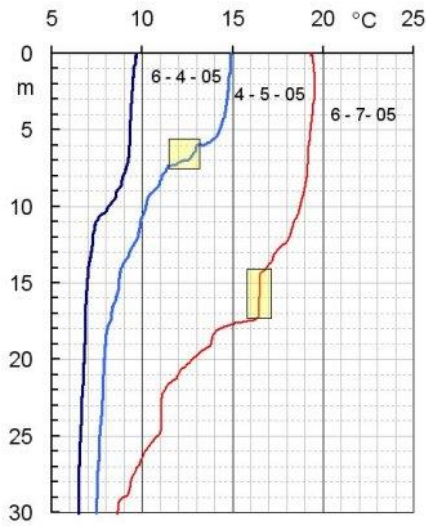


Fig. 19. Lago Maggiore: sprofondamento e aumento dell'ampiezza del termoclinio (riquadri in grigio) con il procedere della stagione.

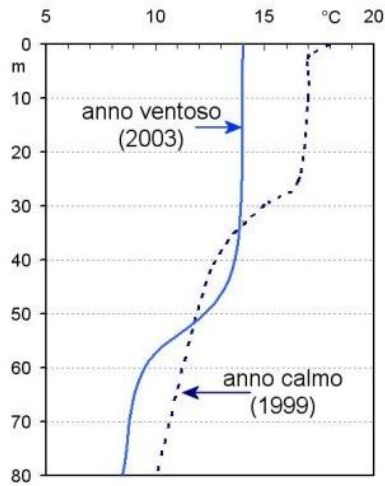


Fig. 20. Lago Nahuel Huapi, Patagonia Argentina (40° 47' S 71° 39, W; area: 557 km², z max 464 m). Influenza del regime del vento su posizione ed evidenza del termoclinio.

8. Movimenti delle acque

Si è calcolato che se il trasferimento del calore in una raccolta d'acqua avvenisse soltanto per conduzione termica, già alla profondità di 3 metri l'escursione termica annua sarebbe soltanto un decimo dell'escursione che si ha in superficie.

Nell'ambiente naturale, però, le masse d'acqua si muovono e il loro flusso può essere:

- **laminare** (velocità bassa e uniforme, moto unidirezionale)
 - **turbolento** (velocità elevata, moto multidirezionale e caotico).
- Il tipo di flusso dipende dalla viscosità e densità del fluido, dalla sua velocità e dalla sezione del condotto attraverso il quale il liquido fluisce; è espresso dal numero di Reynold (Re):

$$Re = (\text{densità} \times \text{velocità} \times \text{sezione}) / \text{viscosità}$$

se $Re < 1000$ si ha un flusso laminare, se $Re > 1000$ si ha un flusso turbolento. Nei laghi, considerando la profondità come sezione del condotto, già velocità dell'ordine di pochi mm al secondo inducono un regime di flusso turbolento.

Nel **regime turbolento** le particelle d'acqua si allontanano dalla sezione dove la corrente ha superato la velocità critica e penetrano nella massa d'acqua circostante, trasportandovi le proprietà chimiche e termiche che le caratterizzano. Si originano così dei moti convettivi turbolenti, che estendono il trasferimento delle proprietà termiche dell'acqua fino a strati situati a decine di metri di profondità. I moti circolari noti come vortici sono il risultato del flusso turbolento.

L'esistenza del regime turbolento nei laghi è garantita dal vento che, scorrendo sulla loro superficie, cede parte della sua energia alla massa d'acqua con la quale entra in contatto generandovi: il **moto ondoso**, le **sesse superficiali**, le **sesse interne** e le **correnti superficiali di deriva**.

Il moto ondoso

Il moto ondoso è una successione di oscillazioni più o meno ampie e regolari che convogliano nella stessa direzione del vento l'energia assorbita senza provocare sensibili spostamenti orizzontali del liquido coinvolto. La distanza percorsa dal vento sopra il corpo d'acqua prima di giungere alla terraferma è detta **fetch**. Più grande è il fetch maggiore è la possibilità di sviluppo di grandi onde. Il moto ondoso superficiale influenza la termica delle acque lacustri; l'azione del vento, accompagnata all'agitazione superficiale delle acque, le raffredda modificandone l'equilibrio termico con le acque sottostanti. L'onda si forma perché la frizione del vento sull'acqua la forza a incresparsi e la dimensione dell'increspatura dipende dalla forza del vento, dalla porzione di superficie lacustre interessata da esso (fetch) e dalla durata della folata. Le parti dell'onda sono: cresta (il punto più alto di un'onda), ventre (avvallamento tra due onde), lunghezza d'onda (distanza orizzontale tra due creste o ventri successivi), altezza d'onda (distanza verticale tra cresta e ventre), frequenza dell'onda (numero di onde che passano per un punto in un certo intervallo di tempo) (Fig. 21).

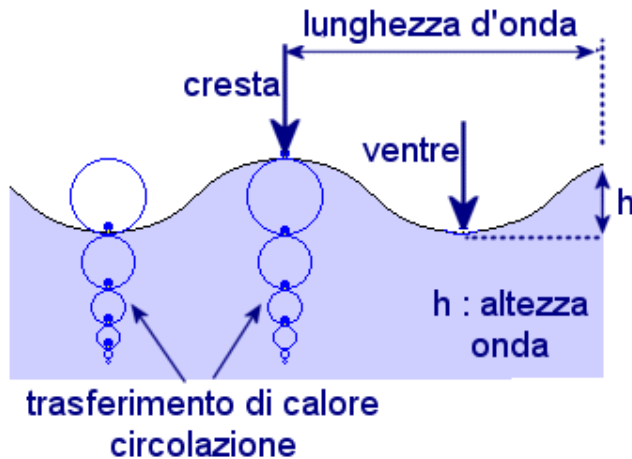


Fig. 21. Caratteristiche di un'onda.

L'onda sposta in avanti energia ma non acqua. In effetti l'acqua non avanza con l'onda: se seguissimo una goccia d'acqua durante il passaggio di un'onda la vedremmo seguire una traiettoria circolare che la riporta al punto di partenza alla fine dell'onda. Queste traiettorie sono più evidenti in prossimità della superficie. Esse decrescono con la profondità fino a sparire a mezza lunghezza d'onda sotto la superficie (Fig. 22).

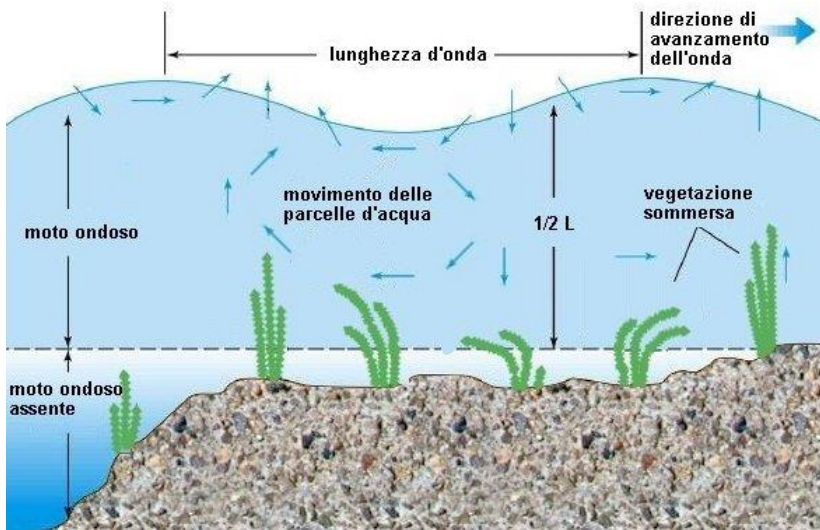


Fig. 22. Il moto ondoso in acque poco profonde.

Le sesse superficiali

Le sesse superficiali si generano quando il vento soffia costantemente in una direzione, spingendo l'acqua sottovento. L'acqua si accumula sulla costa sottovento ed è mantenuta lì dal vento stesso. Quando il vento cala, la massa d'acqua accumulata rifluisce indietro per gravità, innescando una oscillazione che progressivamente decresce per effetto della frizione e della gravità (Fig. 23 A). Le sesse superficiali si evidenziano quando il lago non è stratificato. L'ampiezza massima si ha in superficie ma le sesse

coinvolgono l'intera colonna d'acqua. Le sesse superficiali nei laghi si manifestano come piccole variazioni del livello, misurabili con un limnografo, che lasciano ritmicamente a secco tratti di spiaggia (da qui il termine in francese "seiche" che ha originato il vocabolo usato nella terminologia scientifica). I due punti estremi di massima oscillazione si dicono ventri (o antinodi) e il punto centrale, dove questi movimenti pendolari si annullano, nodo. Il periodo di una sessa superficiale è l'intervallo di tempo tra due alti o bassi livelli successivi e per ampiezza si intende il dislivello tra la massima e la minima altezza successiva raggiunta dalle acque.

Il periodo t (in sec) dell'oscillazione al nodo è, in base alla legge del moto pendolare:

$$t = 2L/\sqrt{gz}$$

dove L è la lunghezza del bacino in superficie (cm), g è l'accelerazione di gravità ($9,8 \text{ m s}^{-2}$), e z è la profondità media.

L'entità delle sesse dipende dalla morfologia e dalle dimensioni del lago; nei laghi Maggiore, di Como e di Garda le sesse uninodali, cioè con un singolo nodo, hanno un periodo di poco superiore ai 40 minuti e una ampiezza dell'ordine dei cm. Oltre al fenomeno comune delle sesse superficiali uninodali, si possono avere anche sesse multinodali, generate da periodici aumenti e diminuzioni della pressione atmosferica al centro di un bacino (Fig. 23 B). La loro ampiezza è di solito inferiore a quella delle sesse uninodali. Le sesse, provocando uno spostamento periodico delle acque, generano delle modeste correnti (dell'ordine del cm sec^{-1}) dirette alternativamente in senso opposto.

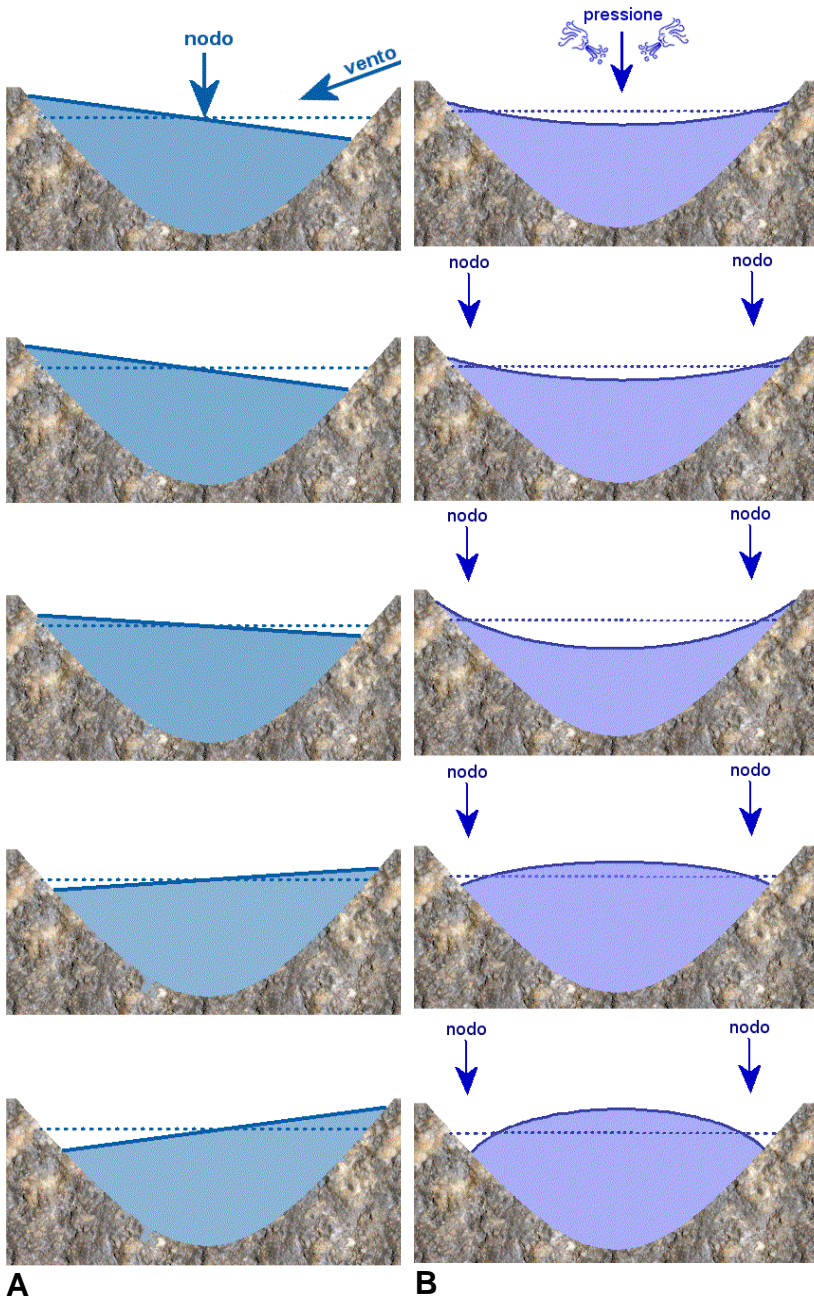


Fig. 23. Sesse superficiali uninodali (A) e binodali (B).

Le sesse interne

Le *sesse interne* (Fig. 24) sono causate da “accumuli” delle masse d’acqua prodotti da un vento che spirava nella stessa direzione per un periodo di tempo abbastanza lungo. Si verificano quando il lago è stratificato e non sono evidenti in superficie ma coinvolgono strati d’acqua di diversa densità che oscillano con onde stazionarie. Quando l’azione del vento cessa, le acque epilimniche tendono a riprendere la loro precedente distribuzione di equilibrio. La superficie che entra in oscillazione è, in questo caso, quella di separazione tra due strati d’acqua sovrapposti di diversa densità e generalmente il fenomeno si manifesta come variazioni di profondità del termoclino stesso, evidenziabile misurando in continuo con una catena di sensori il profilo verticale della temperatura del lago.

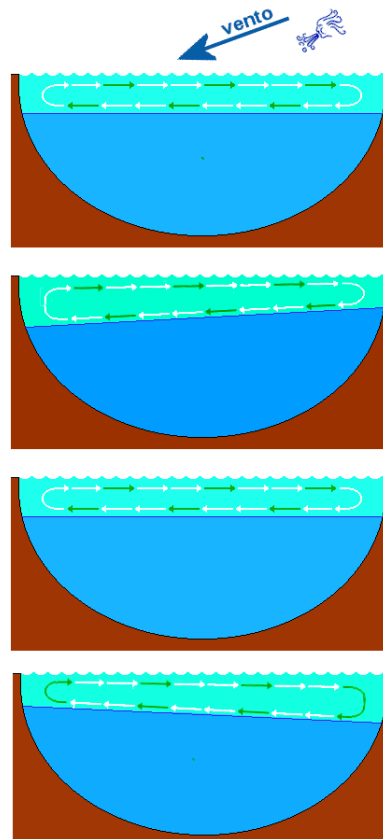


Fig. 24. Evoluzione delle sesse interne.

Sono di solito più ampie e con periodo maggiore delle sesse superficiali e possono essere alte alcuni metri. Le correnti che ne risultano fluiscono ritmicamente avanti e indietro in direzioni opposte e costituiscono una delle più importanti cause di movimento degli strati d’acqua profondi di un lago.

Si può calcolare il periodo delle sesse interne considerando il lago diviso in due strati omogenei a differente densità:

$$t = \frac{2L}{n \times \sqrt{\frac{g(d_b - d_a)}{\frac{1}{b} - \frac{1}{a}}}}$$

dove L è la lunghezza dell'asse del lago al termoclinio; a e b sono gli spessori dell'epi- e ipolimnio; d_a e d_b sono le densità dell'acqua alla temperatura media dei due strati, g è l'accelerazione di gravità; n è la nodalità della sessa. Da questa relazione è evidente che il periodo è direttamente proporzionale alla lunghezza del lago e che aumenta con il diminuire della differenza di densità dei due strati.

Le sesse interne sono importanti perché trasportano calore e sostanze disciolte a distanze rilevanti sia in orizzontale che in verticale. Possono alterare significativamente distribuzione e produzione di fito- e zooplancton, direttamente o indirettamente, modificando la stratificazione termica e chimica.

In laghi di grandi dimensioni (10^2 km^2) il movimento delle sesse interne non è semplicemente una oscillazione pendolare perché le masse d'acqua coinvolte sono soggette alla forza di Coriolis. Il risultato è un percorso circolare (il circolo inerziale) con il flusso indirizzato, nell'emisfero Nord, verso la costa.

Le correnti (o spirali) di Lagmuir

Sono un'altra forma di circolazione interna al corpo d'acqua caratterizzata dal fatto che, per azione del vento, l'acqua tende a muoversi in vortici a spirale, costituiti da celle rotanti elicoidalmente in senso orario e antiorario (Fig. 25). Essi producono zone di upwelling (sollevamento) e downwelling (abbassamento) alternate, con convezione di materiale particellato e accumulo di schiume che formano striature superficiali approssimativamente parallele alla direzione del vento. Le spirali hanno diametro circa uguale allo spessore dell'epilimnio. È uno dei principali modi di

trasporto verso il basso della turbolenza e di mescolamento degli strati superficiali.

Si verificano per l'interazione tra onde superficiali e correnti generate dal vento, con velocità del vento maggiori di 10 km h^{-1} ; quando però la velocità supera i 25 km h^{-1} le striature vengono disgregate dalla turbolenza superficiale.

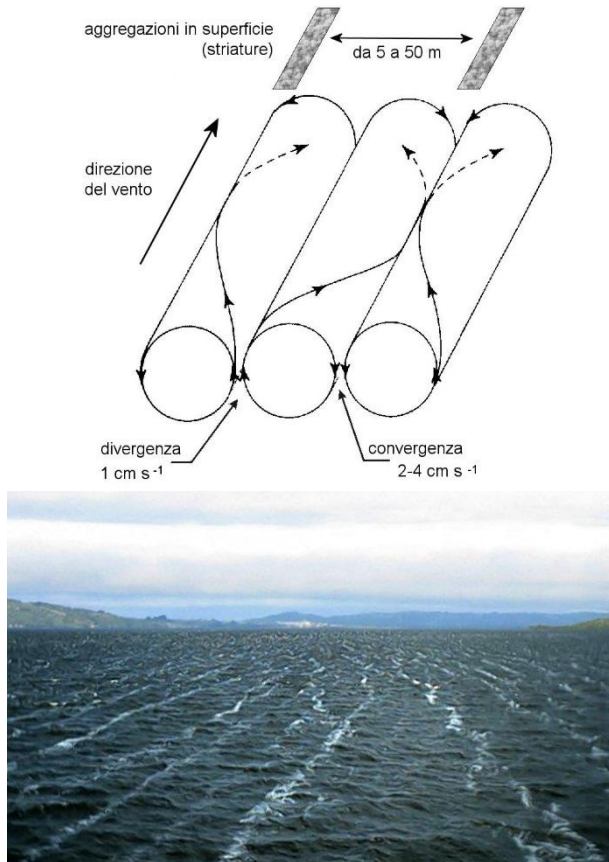


Fig. 25. Le spirali di Lagmuir: schema del processo di formazione (sopra) e loro manifestazione alla superficie del lago (sotto).

Le correnti superficiali di deriva

Sono movimenti non periodici delle acque determinati dal trascinarsi nella direzione del vento di lame d'acqua superficiali,

con movimento anche di masse liquide subsuperficiali, benché il moto diminuisca rapidamente con la profondità.

La velocità di corrente è, con larga approssimazione, circa il 2% di quella del vento ma è ampiamente variabile in funzione della morfologia del lago e del territorio dove esso è inserito. Per questo il regime delle correnti promosse dall'azione diretta del vento è diverso da lago a lago e non è generalizzabile. L'intensità delle correnti superficiali dipende, come è ovvio, dalla grandezza e dalla forma del bacino lacustre e dall'orientamento di questo rispetto ai venti dominanti. Per esempio, i grandi laghi pedemontani italiani, con asse maggiore orientato da Nord a Sud, sono soggetti a venti dominanti provenienti da tali direzioni che vengono incanalati nella valle lacustre.

L'acqua spostata dalle correnti è rimpiazzata da altra proveniente dalle porzioni di lago circostanti e, soprattutto, dagli strati più profondi e tranquilli, schermati dall'azione diretta del vento. Si generano così controcorrenti che hanno come effetto un rimescolamento delle acque degli strati superiori del lago fino alla profondità dove l'azione del vento si è fatta sentire. Tale rimescolamento perturba l'equilibrio degli strati d'acqua e può innescare una circolazione che permane anche quando l'azione diretta del vento è cessata.

Correnti indipendenti dai venti e reperibili anche in profondità nel lago sono le correnti di immissario, generate da acque fluviali, generalmente più fredde (particolarmente in estate) e più cariche di materiale sospeso, quindi più dense, delle acque superficiali lacustri. La corrente d'acqua fredda fluviale, giunta al lago, si immerge scivolando lungo il profilo della costa sommersa fino alla profondità alla quale le densità delle acque fluviali e lacustri si uguagliano e la corrente decorre orizzontalmente fino all'estinzione per la resistenza meccanica della massa d'acqua lacustre. Anche per la corrente di acque fluviali il termoclinio può rappresentare un piano di scorrimento che limita all'epilimnio il mescolamento di acque fluviali e lacustri.

Un importante effetto delle correnti superficiali e dell'azione del vento è la risospensione dei sedimenti. Questo fenomeno assume particolare importanza nei laghi poco profondi o con zone costiere molto estese perché la risospensione dei sedimenti, aumentando la torbidità dell'acqua, riduce la penetrazione della luce e, quindi, la zona dove è possibile la produzione da parte degli organismi vegetali. Inoltre, con la risospensione, i nutrienti, prima segregati ai sedimenti, vengono reintrodotti nelle acque lacustri divenendo di nuovo utilizzabili per la crescita algale. La risospensione può quindi contribuire al mantenimento, o allo sviluppo, di una condizione di eutrofia. La tabella 5 mostra come varia la profondità alla quale si ha risospensione dei sedimenti in funzione della velocità del vento e delle dimensioni del fetch, cioè della distanza percorsa dal vento sopra il corpo d'acqua prima di giungere alla terraferma.

Tab. 5. Profondità di risospensione dei sedimenti (in m) in funzione della velocità del vento (in km h⁻¹) e della lunghezza del fetch (in km).

		velocità vento (km h ⁻¹)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
estensione del fetch (km)	0,5	0,2	0,4	0,7	0,9	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,4
	1	0,3	0,6	0,9	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6	2,9	3,3
	2	0,4	0,9	1,5	2,0	2,6	3,1	3,7	4,2	4,8	5,3
	3	0,4	1,0	1,7	2,3	2,9	3,5	4,2	4,9	5,5	6,1
	4	0,5	1,1	1,8	2,5	3,3	4,0	4,7	5,4	6,1	6,8
	5	0,5	1,3	2,1	2,9	3,8	4,6	5,4	6,3	7,1	7,9
	6	0,5	1,3	2,3	3,1	4,0	4,9	5,8	6,7	7,5	8,4
	7	0,6	1,4	2,5	3,4	4,5	5,4	6,4	7,4	8,4	9,4
	8	0,6	1,5	2,6	3,6	4,6	5,6	6,7	7,8	8,7	9,8
	9	0,6	1,5	2,7	3,7	4,8	5,9	7,0	8,1	9,1	10,2
10	0,7	1,7	3,0	4,1	5,4	6,5	7,7	9,0	10,1	11,3	

Anche in profondità si può avere la risospensione dei sedimenti però legata non al moto ondoso ma a correnti interne al corpo d'acqua di diversa origine. Per esempio, i conoidi deltizi, cioè le aree di deposizione del materiale sedimentario alla foce degli immissari, possono cedere causando delle frane subacquee.

Queste danno origine alle correnti di torbida; una specie di nuvola di materiale sospeso che continua a propagarsi lungo il fondo lacustre, anche se l'inclinazione di questo è modesta.

9. Movimenti di materia nelle acque

Anche la materia penetra, come l'energia, nelle acque dei laghi ma secondo leggi diverse. Così, secondo la legge di Henry, a temperatura costante la quantità di gas che può essere assorbito in un certo volume di liquido è proporzionale alla pressione che quel gas esercita sul liquido:

$$C = kP$$

dove C è la concentrazione del gas disciolto, P la sua pressione parziale e k una costante tipica per ogni gas.

Le sostanze solubili in acqua si distribuiscono nel mezzo liquido per i movimenti passivi delle molecole (**diffusione**) attraverso un gradiente di concentrazione, in accordo con la prima legge di Fick:

$$Q = -K_s (dS - dx)$$

dove Q è il flusso di molecole che passano per una sezione in una unità di tempo; K_s è il coefficiente di diffusione; dS è la variazione di concentrazione del soluto e dx la variazione di distanza tra le differenze di concentrazione del soluto.

Le particelle, infine, in assenza di altre forze, in acqua sono soggette alla **sedimentazione**. La legge di Stokes dà la velocità di sedimentazione di una particella sferica di un certo diametro in un fluido per effetto della gravità. L'equazione è:

$$V = (2 g r^2) (d_1 - d_2) / 9 \mu$$

dove:

V = velocità di caduta (cm sec^{-1}),

g = accelerazione di gravità (cm sec^{-2}),

r = raggio "equivalente" della particella (cm),

d_1 = densità della particella (g cm^{-3}),

d_2 = densità del mezzo (g cm^{-3}),

μ = viscosità del mezzo (dyne sec cm^{-2}).

In ogni caso il percorso delle particelle dalla loro sorgente al sedimento o, in altre parole, il flusso e la velocità di sedimentazione, dipendono dall'abbondanza delle particelle, dalle loro caratteristiche fisiche e dalla turbolenza delle acque lacustri.

Nei laghi il flusso di sedimentazione è minimo quando la turbolenza è massima, cioè durante il periodo di piena circolazione. Quando il lago è stratificato, le particelle vengono mantenute in sospensione dalla turbolenza soltanto nell'epilimnio, detto anche mixing layer. Negli strati profondi, isolati dall'azione del vento dalla barriera di densità del termoclinio, la turbolenza è minima e il flusso di sedimentazione del particolato può essere elevato. Il flusso di sedimentazione si misura con le trappole di sedimentazione (cap. 20), che nella forma più semplice sono cilindri di dimensioni opportune aperti all'estremità superiore. Questi, tramite un adeguato ancoraggio, vengono lasciati sospesi nel lago a una profondità definita per essere poi recuperati dopo un tempo di esposizione variabile da giorni a mesi (Fig. 26). Dopo rimozione dell'acqua sovrastante il fondo della trappola, si raccoglie il materiale particolato accumulatosi sul suo fondo, lo si essicca per determinarne il peso secco e infine si calcola il flusso di sedimentazione per quel lago e quella profondità dalla formula:

$$\text{flusso di particolato (mg m}^{-2} \text{ g}^{-1}) = P / A T$$

dove: P = peso del particolato sedimentato, A = area della bocca della trappola (in m²) e T = tempo di esposizione della trappola (in giorni).

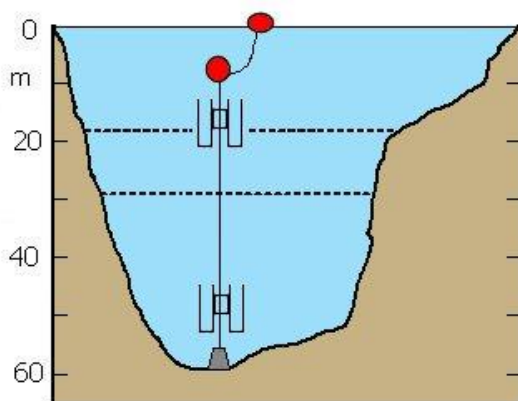


Fig. 26. Ancoraggio di coppie di trappole da sedimentazione in un lago.

Ovviamente usando metodi analitici adeguati si può valutare la sedimentazione anche della sola componente organica. Bisogna però considerare che quest'ultima durante la permanenza nella trappola viene alterata in varia misura dall'attività batterica e/o di altri organismi che possono penetrare nella trappola da sedimentazione. Le stime di flusso di sedimentazione fatte con questo metodo sono realistiche se le particelle raccolte provengono soltanto dagli strati superficiali e si muovono solamente lungo la verticale. In realtà queste condizioni non sono sempre soddisfatte perché si possono verificare fenomeni di risospensione del sedimento di fondo e di trasporto orizzontale del particolato.

10. Chimica delle acque lacustri

Gli organismi acquatici, come quelli terrestri, utilizzano i gas presenti nell'atmosfera per il loro metabolismo. I gas atmosferici, che hanno una solubilità in acqua modesta (Tab. 6), sono per questo meno disponibili per gli organismi acquatici che per quelli terrestri.

Tab. 6. Pressione parziale dei principali gas costituenti l'atmosfera e quantità solubile in acqua, a diverse temperature, a pressione atmosferica.

	Pressione parziale	Concentrazione (mg L ⁻¹)			
		0°C	10°C	20°C	30°C
O ₂	20,99%	14,5	11,1	8,9	7,2
N ₂	78,0%	22,4	17,5	14,2	11,9
CO ₂	0,03%	1,005	0,7	0,51	0,38

L'ossigeno

L'ossigeno è presente nelle acque in concentrazioni generalmente basse che, in alcuni casi, possono anche azzerarsi rapidamente. Questo fatto crea condizioni incompatibili con la vita per tutti gli organismi con l'eccezione di alcuni batteri. La solubilità dell'ossigeno in acqua, che diffonde in accordo con la prima legge di Fick, è definita dalla legge di Henry ed è in relazione alla temperatura (Tab. 6).

La quantità di ossigeno che, dall'atmosfera, può dissolversi nelle acque dei laghi fino alla saturazione dipende anche dalla loro quota, perché la diminuzione della pressione barometrica con l'aumentare dell'altitudine riduce la pressione parziale dell'ossigeno nell'atmosfera (Fig. 27).

Inoltre la solubilità dell'ossigeno dipende anche dall'umidità dell'aria. Infatti il vapore acqueo presente alla superficie del lago, che si forma perché l'acqua ha una sua tensione di vapore dipendente dalla temperatura, diluisce la concentrazione degli altri gas atmosferici e ne riduce la pressione parziale.

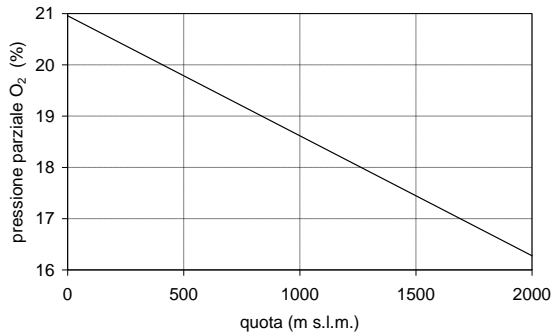


Fig. 27. Diminuzione della pressione parziale dell'ossigeno in acqua in funzione dell'altitudine del corpo d'acqua.

Anche le attività biologiche di fotosintesi, espletata dai vegetali che vivono nell'acqua, e di mineralizzazione (ossidazione) della sostanza organica, espletata dai batteri eterotrofi, producendo e consumando, rispettivamente, ossigeno, influiscono sulla concentrazione di questo gas nell'acqua. La saturazione relativa in ossigeno dell'acqua si può così alterare per eccesso o per difetto rispetto al massimo teorico a determinate condizioni di temperatura e pressione. La distribuzione verticale dell'ossigeno è comunque legata ai movimenti di turbolenza dell'acqua lacustre e alle vicende termiche del lago. Considerando tutti questi fattori che concorrono a determinare la concentrazione di ossigeno in un lago, è possibile schematizzare le diverse possibilità di presenza di questo gas in acqua tracciandone le curve di concentrazione rispetto alla profondità al cambiare della stagione e della produttività del lago (Fig. 28). Lo schema è relativo a un lago dimittico ma può facilmente essere adeguato alle altre possibili modalità di circolazione dei laghi.

Poiché le attività biologiche influenzano la distribuzione dell'ossigeno nelle acque, è necessario anticipare qui alcune considerazioni in proposito. La "quantità" di attività biologiche di produzione e di consumo di sostanza organica in un lago dipende dal suo stato trofico, cioè dalla maggior o minor disponibilità di quei nutrienti che sostengono la produzione vegetale prima e, poi, il suo consumo da parte dei batteri. Un lago povero di nutrienti (e quindi poco produttivo) si dice **oligotrofo**, uno

ricco di nutrienti (e perciò molto produttivo) si dice **eutrofo** e il lago in una condizione intermedia è detto **mesotrofo**. Nel lago poi, le attività biologiche non sono ripartite in modo omogeneo lungo la colonna d'acqua, ma esistono una zona trofogenica e una trofolitica. La prima, che corrisponde approssimativamente all'epilimnio, è interessata dal vento e si estende fin dove arriva la luce. Vi predomina l'attività di produzione di sostanza organica. La seconda zona inizia sotto il limite di penetrazione della luce e, a lago stratificato, corrisponde approssimativamente all'ipolimnio; è detta trofolitica perché vi predominano le attività di respirazione e di decomposizione della sostanza organica.

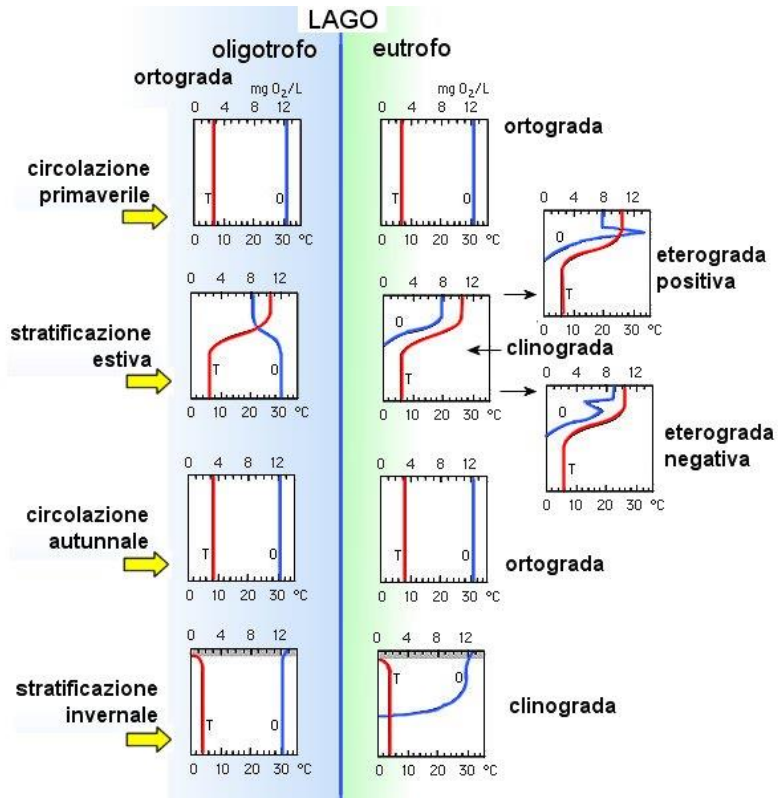


Fig. 28. Distribuzione verticale delle concentrazioni di ossigeno (O) e della temperatura (T) in due ideali laghi dimittici, uno oligotrofo e uno eutrofo.

Esaminando la colonna dei grafici relativi al lago oligotrofo si vede che in esso la concentrazione di ossigeno è prevalentemente influenzata dalla temperatura. In inverno la concentrazione di questo gas è massima perché a bassa temperatura è massima la sua solubilità e tutti gli strati d'acqua possono, alla piena circolazione, venire a contatto con l'atmosfera e ricaricarsi di ossigeno. Anche durante la stratificazione estiva il lago è sempre in condizioni vicine alla saturazione, cioè la quantità di ossigeno presente è quella di equilibrio tra acqua e atmosfera per una data temperatura e pressione: la diminuzione all'epilimnio in estate dipende dalla diminuzione della solubilità per l'aumento della temperatura. Il profilo della concentrazione rispetto alla profondità descrive una curva ortograde in ogni stagione, cioè la saturazione in O_2 è sempre la massima possibile.

Più articolata è la situazione nel lago eutrofo. Anche qui al momento della piena circolazione la concentrazione di questo gas è massima su tutta la colonna per i motivi detti per il lago oligotrofo e la curva dell'ossigeno è ortograde. Però con l'instaurarsi della stratificazione estiva nella zona trofolitica i processi di ossidazione biologica della sostanza organica prodotta in eccesso consumano l'ossigeno ipolimnico. Questa zona, impossibilitata a entrare in contatto con l'atmosfera a causa della barriera di densità costituita dal termoclinio, può così diventare anossica. La curva di concentrazione dell'ossigeno che presenta un forte gradiente in diminuzione fino ad arrivare a zero prima del fondo si definisce clinograde. Ma anche nella zona trofogenica le intense attività biologiche, mantenute dalla condizione di eutrofia del lago, producono effetti evidenti sulla distribuzione verticale dell'ossigeno. In particolare quando prevale la fotosintesi che, come si vedrà più oltre, libera ossigeno, al metalimnio si trova una concentrazione di ossigeno superiore a quella prevista per quelle condizioni di temperatura e pressione dalla legge di Fick. Si ha, in altre parole una sovrassaturazione di ossigeno e la curva che la descrive è detta eterograde positiva. Se invece al metalimnio si verifica un accumulo di sostanza organica di origine algale, la sua ossidazione da parte della flora batterica può portare a un consumo di

ossigeno tale da abbassarne la concentrazione sotto il livello di saturazione prevedibile dalla legge di Fick (sottosaturazione). La curva che descrive questa situazione è detta eterograda negativa. Nei laghi eutrofi poi, anche se la circolazione autunnale può ricaricare di ossigeno le acque lacustri, si può determinare una situazione di anossia ipolimnica invernale perché, pur in assenza di nuova produzione, continuano respirazione e consumo di ossigeno per ossidare la produzione estiva precedente. La distribuzione verticale dell'ossigeno è descritta anche in questo caso da una curva clinograda.

C'è da sottolineare che, poiché la maggior parte dei pesci non possono vivere a concentrazioni di ossigeno inferiori a 2 mg L^{-1} , quando c'è anossia si possono avere morie estive o invernali di pesci. La morfologia della cuvetta lacustre influenza il fenomeno dell'anossia ipolimnica perché, a parità di altre condizioni, l'ipolimnio di un lago poco profondo ha meno acqua di uno profondo e, di conseguenza, meno ossigeno; può dunque diventare anossico più facilmente e più rapidamente. Per differenziare i laghi in base alle loro caratteristiche morfometriche si può usare un indice, noto come rapporto di Thienemann, dato da:

contenuto di O_2 nell'ipolimnio / contenuto di O_2 nell'epilimnio.

Questo rapporto, in generale, è inferiore all'unità nei laghi che hanno una curva di ossigeno clinograda, maggiore dell'unità nei laghi con curva di tipo ortogrado.

La concentrazione dell'ossigeno disciolto nelle acque lacustri si può misurare *in situ* con un apposito elettrodo polarografico. Questo è costruito in modo da far passare tra catodo e anodo una corrente elettrica che è proporzionale alla concentrazione di ossigeno disciolto. È pure possibile determinare la concentrazione di ossigeno in campioni prelevati a una profondità definita con bottiglie da campionamento (cap. 20). È necessario usare particolari cautele nel prelevare e nel trasferire ai recipienti di analisi il campione evitando di farvi gorgogliare aria perché anche una piccola bolla di gas può inficiare i risultati. Per la determinazione chimica dell'ossigeno si usa il metodo di Winkler, basato sull'ossidazione

di idrossido di manganese (II) a ossido di manganese (IV) idrato da parte dell'ossigeno disciolto in acqua e immediata precipitazione del composto aggiungendo ioduro di potassio in soluzione alcalina. Per successiva acidificazione, il manganese (IV) si riduce a manganese (II), liberando iodio in quantità equivalente all'ossigeno inizialmente presente nel campione. Lo iodio così liberato viene titolato con una soluzione a concentrazione nota di tiosolfato sodico in presenza di salda d'amido come indicatore, che impartisce in presenza di iodio un colore azzurro alla soluzione. Il punto di fine della titolazione è raggiunto al viraggio della soluzione che diventa incolore. Il risultato viene espresso come mg L^{-1} di O_2 . Per conoscere la saturazione in ossigeno dell'acqua, si può usare il nomogramma di figura 29. Tracciando la retta che unisce i valori della temperatura dell'acqua e della concentrazione di ossigeno si trova, all'intersezione con la scala relativa, la percentuale di saturazione.

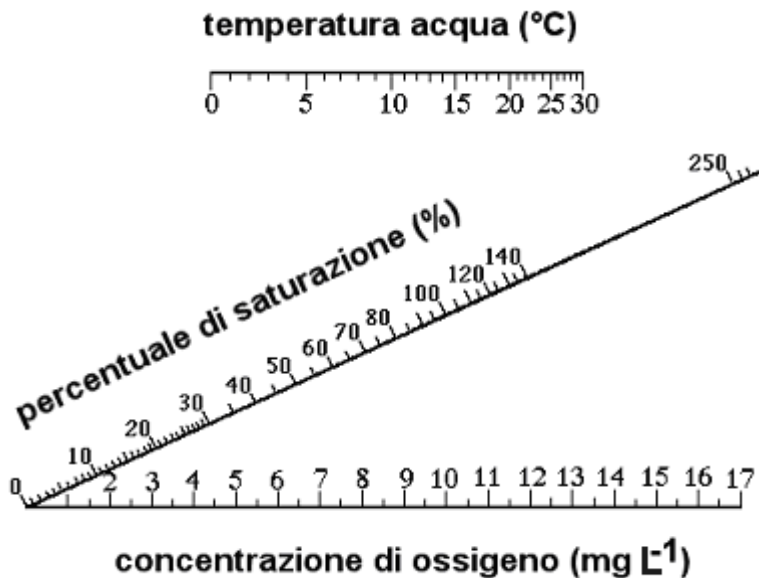


Fig. 29. Nomogramma per il calcolo della percentuale di saturazione in ossigeno di un lago.

Questo nomogramma fornisce la percentuale di saturazione d'ossigeno relativa di un'acqua lacustre. In realtà le acque più profonde di un lago sono anche sottoposte a una notevole pressione idrostatica; per la legge di Henry, in tali condizioni si possono disciogliere quantità di gas maggiori. Per esempio a 100 m di profondità (pressione di 11 atm) a parità di temperatura si potrebbe sciogliere circa 10 volte la quantità di gas che si scioglie in superficie. Di questo si dovrebbe tener conto se fosse necessario calcolare le curve di saturazione percentuale assolute.

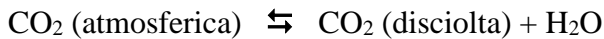
L'azoto

L'azoto è il gas più abbondante in atmosfera (quasi il 79%) e nelle acque. Per il mantenimento della vita sono necessarie grandi quantità di questo elemento, che è un componente essenziale delle proteine, degli acidi nucleici e di altri costituenti cellulari. Però l'azoto non è utilizzabile direttamente per la maggior parte degli organismi perché l'azoto gassoso, costituito da molecole fatte da due atomi di N uniti da un triplo legame, risulta piuttosto inerte. Per questo, per essere usato nel metabolismo di animali e vegetali, l'azoto deve essere "fissato", cioè combinato con altri elementi per formare composti più reattivi come gli ioni ammonio (NH_4^+) o nitrato (NO_3^-). La maggior parte dell'azoto arriva ai laghi in queste forme, come risultato delle attività biologiche naturali (fissazione batterica dell'azoto e degradazione batterica della sostanza organica) o delle attività umane che si realizzano nell'ecosistema terrestre. Nell'ambiente acquatico gli unici organismi capaci di fissare l'azoto atmosferico sono dei batteri fotosintetici anaerobi e i cianobatteri. Questi, essendo aerobi, utilizzano particolari strutture per proteggere dall'ossigeno la nitrogenasi, l'enzima che permette la fissazione dell'azoto e che è attivo soltanto in assenza di ossigeno. Degli organismi fissatori di azoto si parlerà comunque più oltre.

L'anidride carbonica

L'anidride carbonica, a differenza degli altri gas, non soltanto si discioglie nell'acqua ma anche reagisce con il solvente. Pur se

la concentrazione di CO₂ in atmosfera è bassa (0,033%), la CO₂ nelle acque è relativamente abbondante. Oltre che dall'atmosfera, la CO₂ arriva ai corpi idrici con l'acqua di pioggia, che si carica di questo gas durante la sua caduta, e dallo scorrimento attraverso i suoli, dove la CO₂ è generata durante la decomposizione delle sostanze organiche. Anche le acque sotterranee possono trasportare CO₂ derivante dalla dissoluzione di suoli o rocce carbonatiche. Infine, anche la respirazione degli organismi acquatici introduce in acqua CO₂. L'assorbimento atmosferico di CO₂ inizialmente procede in accordo con la legge di Henry ma, una volta discioltosi, questo gas prende parte a numerose reazioni chimiche. Il risultato finale è che nelle acque il contenuto in CO₂ supera di molto i valori di saturazione perché la CO₂ totale è, in definitiva, la somma della concentrazione di diverse molecole, ionizzate e non ionizzate. Di seguito saranno illustrate in dettaglio le reazioni che regolano la presenza in acqua delle diverse forme di carbonio inorganico e, quindi, la concentrazione totale di carbonio inorganico (DIC = Dissolved Inorganic Carbon) in un lago:



Una piccola frazione di CO₂ disciolta (meno del 1%) si idrata formando acido carbonico:



Quest'ultimo poi si dissocia, perdendo un protone e dando origine allo ione bicarbonato:



che a sua volta si dissocia liberando un protone e dando origine allo ione carbonato:



Gli ioni H^+ liberi determineranno il valore di pH. Dall'esame delle reazioni sopra illustrate emerge che l'equilibrio del carbonio inorganico è strettamente legato al pH. Ciascuna reazione ha una sua costante di equilibrio che, con la concentrazione totale della CO_2 , determina il valore del pH a una data temperatura e la concentrazione relativa di ciascuna delle specie chimiche coinvolte. Ad esempio alla neutralità, cioè a pH 7, il 21% del DIC totale è presente come CO_2 libera o come H_2CO_3 , il 79% come ione bicarbonato e soltanto lo 0,0026% come ione carbonato. A pH 9,5 la CO_2 libera è quasi assente mentre sono abbondanti lo ione bicarbonato (75%) e, in misura minore, lo ione carbonato (25%). A pH acido (pH=5), è presente prevalentemente CO_2 libera (circa il 96%) mentre il carbonato è praticamente assente (Fig. 30).

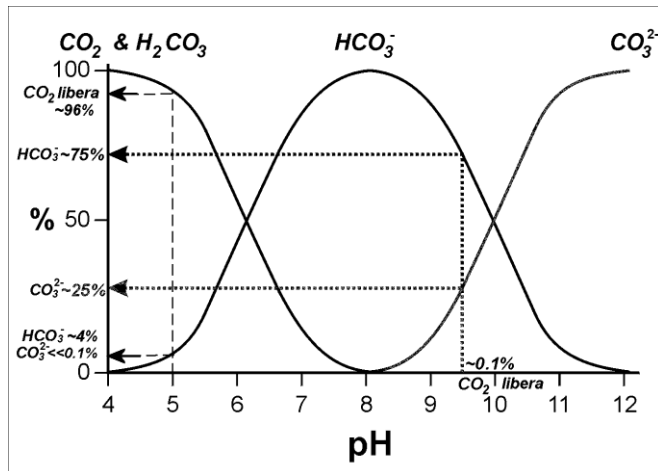


Fig. 30. Equilibrio delle varie forme di carbonio inorganico in acqua in funzione del pH.

Le attività biologiche che producono o consumano CO_2 alterano l'equilibrio sopra descritto e modificano, quindi, il pH delle acque. Per esempio, la sottrazione di CO_2 per la fotosintesi rimuove H^+ e alza il valore del pH. Viceversa le attività di demolizione della sostanza organica producono CO_2 determinando un abbassamento del pH.

Lo spettro ionico delle acque lacustri

Il fatto che la CO_2 disciolta si idrati formando un acido è molto importante perché causa la solubilizzazione dei suoli e delle rocce del bacino imbrifero. Gli ioni trasportati dalle acque di scorrimento determinano lo spettro ionico delle acque lacustri che è quindi strettamente dipendente dalla geologia del bacino. L'abbondanza relativa delle diverse specie ioniche valida per una gran parte dei laghi della regione temperata si può schematizzare così:

Anioni: $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$

Cationi: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} \geq \text{Na}^+ > \text{K}^+$

Gli apporti di acque meteoriche alterate dalle attività antropiche e di acque di scarico possono modificare notevolmente questo spettro, per esempio aumentando l'abbondanza relativa di nitrati e fosfati, responsabili del fenomeno dell'eutrofizzazione.

Anioni

Carbonati

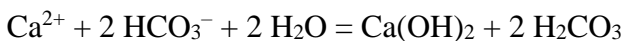
Un costituente molto comune delle rocce è il carbonato di calcio (CaCO_3). Questo è poco solubile in acqua ma si solubilizza quando è presente CO_2 per l'attività degli ioni bicarbonato che formano bicarbonato di calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) solubile. A questo consegue un notevole aumento della quantità di DIC totale presente, soprattutto come bicarbonato, rispetto a quella che si sarebbe potuta avere in acqua distillata a quella temperatura e pressione parziale del gas nell'atmosfera. Il processo di dissoluzione del carbonato procede fino al raggiungimento di un punto di equilibrio che è funzione della quantità di CaCO_3 disponibile, della pressione parziale della CO_2 atmosferica e della temperatura. Se, raggiunto l'equilibrio, si analizza la composizione chimica dell'acqua si trovano, oltre ai componenti del DIC già ricordati, anche i cationi Ca^{2+} e quantità variabili di Li^+ , Na^+ , Mg^{2+} , tracce di metalli pesanti e anioni SO_4^{2-} e Cl^- . Se la CO_2 non combinata presente, definita di equilibrio e difficilmente determinabile analiticamente, viene allontanata dal sistema (per esempio facendovi gorgogliare azoto) si avrà precipitazione del carbonato di calcio

fino al raggiungimento di un nuovo equilibrio. Se invece un'acqua contiene una quantità di CO₂ libera superiore a quella di equilibrio, come succede quando le quantità di calcare presenti sono molto basse o se si fa gorgogliare CO₂ nell'acqua, questa CO₂ libera è definita aggressiva perché può sciogliere altro calcare.

Se si fa bollire acqua contenente Ca(HCO₃)₂, una metà della CO₂ totale si diffonde nell'atmosfera e l'altra metà precipita come carbonato di calcio. La prima è detta CO₂ semi-combinata perché, pur essendo presente come bicarbonato, può essere ancora resa disponibile con il riscaldamento (o con l'aggiunta di una base), mentre la seconda, definita CO₂ legata, rimane stabilmente parte della molecola di carbonato di calcio, a indicare il fatto opposto.

Generalmente la CO₂ totale, ossia l'insieme delle diverse molecole coinvolte nell'equilibrio della CO₂ in acqua, o carbonio inorganico totale (DIC), è indicata come **alcalinità totale**. Questo perché i carbonati totali presenti, che impartiscono all'acqua un pH basico, vengono in pratica determinati titolandoli volumetricamente con acidi forti fino al punto di viraggio di un indicatore (per esempio, arancio di metile pH 4-5) o con metodi conduttometrici. L'alcalinità di un'acqua, quindi, determina la sua capacità di resistere ai cambiamenti di pH prodotti con aggiunta di acidi. Questa resistenza, che dipende dalla quantità di carbonati presente, è definita come **potere tampone** di un'acqua e sarà illustrata in dettaglio in seguito.

In effetti l'acqua distillata contenente piccole quantità di CO₂ ha pH leggermente acido per la formazione degli ioni bicarbonato e di H⁺ secondo la reazione già scritta sopra. Però se un'acqua contiene anche bicarbonato di calcio, il suo pH va a valori alcalini (tra 7 e 9) perché il bicarbonato si idrolizza formando idrossido di calcio e acido carbonico:



L'idrossido di calcio Ca(OH)₂ e l'acido carbonico H₂CO₃ si dissociano anch'essi ma, poiché la costante di ionizzazione del

primo è di poco superiore a quella del secondo, in soluzione ci saranno più OH^- che H^+ e l'acqua risulterà alcalina.

Il contenuto in carbonati di un'acqua è, in ambito applicativo, spesso definito come durezza da carbonati, espressa in gradi francesi (10 mg di CaCO_3 per litro e per grado) o in gradi tedeschi (10 mg di CaO per litro e per grado), diversi per la specie chimica considerata. La durezza totale di un'acqua è data invece dalla somma delle concentrazioni di tutti i cationi presenti, indipendentemente dall'anione al quale essi sono legati. Con il termine durezza permanente (detta così perché resta in soluzione anche dopo ebollizione, che rimuove tutta la CO_2 sia semi-combinata che legata) si intende la quantità di metalli alcalino-terrosi presenti come i cloruri e i solfati.

Il contenuto in bicarbonati di un'acqua naturale dipende dal contenuto in carbonati (di calcio, magnesio, ecc.) dei suoli e dalla quantità di CO_2 presente nell'acqua che li attraversa. Se per qualche motivo (per esempio per una diminuzione di pressione o un aumento di temperatura) in un'acqua con bicarbonati in soluzione al punto di equilibrio c'è perdita di CO_2 , si verificherà una precipitazione di carbonato di calcio fino al ristabilimento dell'equilibrio. Il fenomeno determina allora una precipitazione di carbonato di calcio, che può ricoprire di uno straterello calcareo la vegetazione acquatica.

La conducibilità

Il numero di ioni o di particelle cariche presenti in un'acqua ne determina la capacità di condurre una corrente elettrica, cioè la conducibilità. La misura della conducibilità di un'acqua lacustre fornisce, quindi, una stima della quantità di sostanze ionizzate presenti in acqua. Valori bassi di conducibilità sono caratteristici di laghi poveri di soluti e valori elevati si hanno nei laghi salini e in ambienti che, per ragioni naturali o per cause antropiche, sono ricchi in soluti. Benché la misura della conducibilità non dia informazioni sulle specie ioniche che la determinano, viene effettuata perché è di facile esecuzione e permette un confronto rapido e sicuro tra laghi diversi. Anche la conducibilità può variare in

funzione delle attività biologiche che influenzano la concentrazione delle diverse specie ioniche nelle acque.

La conducibilità, o conduttanza specifica, di un campione d'acqua si misura con il conduttimetro. Con questo strumento si fa passare una corrente alternata, di intensità e frequenza note, attraverso un campione d'acqua, posto in una cella con elettrodi di dimensioni definite. Si misura poi la resistenza opposta dall'acqua al passaggio della corrente. La conducibilità o conduttanza è il reciproco della resistenza e si esprime in microSiemens per centimetro ($\mu\text{S cm}^{-1}$). Dipendendo dalla temperatura, va riferita a un valore standard; la conducibilità aumenta di circa l'1,9% per grado °C. L'acqua distillata ha una conducibilità tra 0,2 e 5 $\mu\text{S cm}^{-1}$ e la conducibilità di un lago oligotrofo posto in un bacino non calcareo com'è il Lago Maggiore è attorno ai 140 $\mu\text{S cm}^{-1}$ alla temperatura di 20°C.

Il pH

La **concentrazione idrogenionica o pH** dell'acqua di un lago è un fattore molto importante nel determinare il "clima" chimico subacqueo e influisce perciò moltissimo anche sui popolamenti animali e vegetali insediati in un lago che, d'altro lato, possono modificare il pH con il loro metabolismo.

Il pH, acronimo di *pondus hydrogenii*, esprime la concentrazione di ioni H^+ in una soluzione (in grammi atomo per litro), linearizzata formulandola come inverso del logaritmo della concentrazione di H^+ :

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

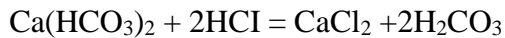
Il pH di un lago può variare naturalmente nell'ambito delle variazioni dell'equilibrio dei carbonati per effetto delle attività biologiche o di modificazioni chimico-fisiche. Esistono rari casi di laghi che hanno naturalmente valori di pH estremi perché situati in suoli ricchi di sali che, sciogliendosi, generano acidi o basi. Più frequenti sono i laghi con valori bassi di pH per la presenza di acidi organici (acidi fulvici e umici); normalmente sono laghi alimentati da acque che drenano territori densamente forestati e che, quindi, si caricano dei prodotti di decomposizione dei detriti vegetali. Spesso, poi, vi

sono casi di alterazioni del pH di origine antropica, dovuti ad attività di scavo che espongono alle acque rocce solubili, all'immissione nelle acque superficiali di reflui industriali e alle piogge acide, cioè alle acque meteoriche a basso pH perché arricchitesi in atmosfera di ossidi di zolfo e d'azoto, derivanti per la maggior parte dall'uso dei combustibili fossili.

Come già accennato, le acque lacustri posseggono un **potere tampone**, cioè una capacità di resistere alle variazioni di pH, dipendente dell'abbondanza in esse di carbonati e bicarbonati, così che il pH dei laghi tende a restare a valori fisiologici, cioè intorno alla neutralità.

Il pH dell'acqua distillata satura di anidride carbonica è fra 4 e 5 mentre quello di un'acqua naturale contenente bicarbonati, fra 7 e 9.

L'aggiunta di un acido forte (per es. acido cloridrico) a una soluzione acquosa di bicarbonati provoca un abbassamento del pH modesto perché, come si vede analizzando la reazione seguente:



l'acido forte si dissocia producendo un sale e l'acido carbonico, che però è un acido debole, cioè poco dissociato. La concentrazione di H^+ sarà quindi bassa e il pH subirà solo piccole variazioni. Soltanto quando la quantità dell'acido aggiunto è uguale a tutto il bicarbonato presente possono restare disponibili nell'acqua gli ioni H^+ derivanti dall'acido forte e si avrà, allora, un brusco abbassamento del pH. L'effetto tampone si ha anche all'aggiunta di una base forte (per es. soda):



In questo caso l'ossidrilione OH^- aggiunto è neutralizzato da un protone dello ione bicarbonato, con formazione di acqua.

Per gli organismi è molto importante vivere in un sistema dotato di elevato potere tampone perché essi possono tollerare nei

liquidi interni variazioni di qualche decimo di unità pH solamente. Nei laghi il pH tende ad avere una distribuzione verticale uniforme lungo la colonna d'acqua, con un incremento estivo nell'epilimnio quando c'è consumo di CO_2 per l'attività fotosintetica e una diminuzione ipolimnica generalmente modesta durante la stratificazione estiva. La diminuzione può diventare più importante in caso di anossia, accompagnata da formazione di H_2S .

La misura del pH delle acque lacustri si effettua con i piaccametri, strumenti elettronici dotati di appositi elettrodi che misurano la variazione di differenza di potenziale fra gli elettrodi stessi in funzione del variare della concentrazione di ioni H^+ e della temperatura. L'uso dei metodi colorimetrici basati sull'impiego di composti (indicatori) che virano al cambiare del pH è ormai molto limitato.

I solfati

I solfati sono tra gli anioni più importanti presenti nei laghi dove si trovano a concentrazioni che si aggirano sui $3\text{--}4 \text{ mg L}^{-1}$. I solfati non presentano una stratificazione verticale molto evidente. Però in un lago meromittico, alimentato da acqua proveniente da una sorgente minerale ricca di solfati, nel monimolimnio si trovano sempre grandi quantità di idrogeno solforato, originato dalla riduzione dei solfati a opera di batteri.

I cloruri

Il cloruro è un altro anione presente nei laghi anche se con una importanza minore dei solfati; può però essere abbondante nei laghi costieri. Nei laghi lontani dal mare il contenuto in cloruri è generalmente molto modesto (attorno a 1 mg L^{-1}).

Gli anioni di altri elementi (fosforo, azoto, silicio) che sono presenti nei laghi in concentrazioni molto basse, dell'ordine del $\mu\text{g L}^{-1}$, sono però di enorme importanza biologica. Di tali elementi si parlerà in dettaglio in seguito.

Cationi

Calcio e magnesio

Sono i cationi più abbondanti nei laghi. Il calcio è elemento essenziale per le piante verdi e il magnesio entra nella composizione della clorofilla ed è, perciò, indispensabile per la fotosintesi. Questi cationi sono presenti prevalentemente come sali dell'acido carbonico e quindi quando si ha precipitazione dei carbonati si ha sottrazione di questi elementi e di CO_2 dalla fase liquida. Il rapporto tra questi due elementi nei laghi dipende dalla loro abbondanza relativa nei bacini imbriferi e si ritiene che possa avere un effetto selettivo sulle specie costituenti i popolamenti lacustri; la questione è, tuttavia, ancora controversa.

Sodio e potassio

Possono essere presenti nei laghi anche con concentrazioni elevate (attorno a 10 mg L^{-1}) perché questi cationi sono dilavati dalle rocce dove sono presenti in abbondanza.

Prima di prendere in esame l'idrochimica di altri elementi che si possono trovare nei laghi in stati di ossidazione diversi, è indispensabile una digressione per illustrare come e in quali condizioni possa cambiare lo stato di ossidazione negli ambienti acquatici in funzione della disponibilità di elettroni liberi in acqua.

La capacità di un ambiente di fornire o di ricevere elettroni è misurata come **potenziale di ossidoriduzione** o **potenziale redox**. Questo parametro è importante perché quantifica la necessità o la disponibilità di energia potenziale nei processi biotici o abiotici che trasformano i composti chimici nell'ambiente o, in altre parole, le modalità di circolazione nell'ambiente dei nutrienti che regolano il funzionamento dell'ecosistema. Lo stato redox, o pE, di una soluzione è dato dal numero di elettroni liberi presenti in essa ed è espresso, in analogia col pH, come $\text{pE} = -\log [e^-]$.

Il potenziale redox nei corpi d'acqua è misurabile con un elettrodo che determina la disponibilità di elettroni trasferibili rispetto alla disponibilità di elettroni di un elettrodo a idrogeno. La misura è effettuata in milliVolts; valori bassi del potenziale redox (sotto 100 mV o negativi) denotano disponibilità di elettroni (condizioni riducenti) mentre valori elevati (sopra 500 mV) indicano scarsità di elettroni liberi (condizioni ossidanti). Il potenziale redox dipende dal pH e dalla concentrazione di O_2 e diminuisce di circa 58

mV per l'aumento del pH di una unità. La riduzione della saturazione in O₂ dal 100% al 10% abbassa il pE di 30 mV.

Anche se il potenziale redox è facilmente misurabile negli ambienti acquatici naturali, è difficile predire il potenziale redox per una singola specie chimica per la contemporanea presenza in soluzione di una miriade di composti caratterizzati da condizioni di equilibrio diverse.

Il ferro

Anche il ferro è un elemento molto diffuso nelle rocce e si ritrova, quindi, nelle acque lacustri. È un elemento indispensabile alla vita perché è presente in molte vie metaboliche, prima fra tutte la catena respiratoria. La sua solubilità in acqua dipende dal pH e dal suo stato di ossidazione, che è legato al potenziale redox dell'ambiente.

La concentrazione di Fe in un lago è un esempio di come la concentrazione di O₂ regola il potenziale redox controllando la concentrazione di una specie chimica nell'ambiente acquatico. Il ferro ferroso (Fe²⁺), cioè la forma ridotta, è solubile, mentre il ferro ferrico (Fe³⁺), la forma ossidata, forma idrato ferrico Fe(OH)₃ insolubile. Fe²⁺ si converte rapidamente in Fe³⁺ in presenza di O₂ e forma l'idrato ferrico insolubile che precipita e sedimenta. Quando il lago circola e tutti gli strati d'acqua entrano in contatto con l'atmosfera, la concentrazione di Fe è bassa in tutta la colonna d'acqua perché tutto il Fe è ossidato ed ha formato l'idrato insolubile. Quando, con la stratificazione estiva, l'O₂ nell'ipolimnio viene consumato e la sua concentrazione diminuisce, aumenta la concentrazione di Fe in soluzione perché il ferro ferroso, la forma ridotta solubile, diffonde dai sedimenti. In questo caso basso potenziale redox e elevata concentrazione di ferro disciolto sono correlate.

La riduzione e quindi la solubilizzazione del Fe all'interfaccia acqua-sedimento è accompagnata anche da rilascio di fosforo dal sedimento, con possibili effetti negativi per il trofismo del lago, perché l'accresciuta disponibilità di questo nutriente incrementa lo sviluppo dei popolamenti algali. Il rilascio di fosforo è possibile perché

quando il Fe ossidato precipita come $\text{Fe}(\text{OH})_3$ assorbe PO_4^{3-} . Diversi composti di Fe e P, come ad esempio FePO_4 , possono infatti co-precipitare con l'idrato ferrico. In effetti la presenza di Fe^{3+} diminuisce la disponibilità di PO_4^{3-} e, di conseguenza, uno strato di sedimento ossidato, che conterrà inevitabilmente Fe^{3+} , costituisce una barriera al riciclo del P segregato nei sedimenti. Al contrario, quando un lago diventa abbastanza eutrofo da sviluppare una curva di ossigeno clinograda, cioè condizioni di anossia all'interfaccia acqua-sedimento, esso diventa autofertilizzante perché il Fe passerà alla forma ridotta solubile liberando così il P prima legato nei sedimenti. Però nei laghi eutrofi dove si ha produzione di H_2S in corrispondenza del sedimento, il ferro può precipitare come solfuro anche se l'acqua sovrastante è fortemente riducente. Infine, le “sostanze umiche” presenti nell'acqua possono formare un complesso metallo organico che può esitare in una co-precipitazione del complesso metallo organico

Da ultimo bisogna ricordare che esistono microrganismi (i ferrobatteri) come *Leptothrix*, *Gallionella*, *Ferrobacillus ferrooxidans* che sono capaci di ottenere energia dall'ossidazione del Fe ridotto.

Il manganese

Anche il manganese è presente nelle acque lacustri con concentrazioni pari a quelle del Fe o molto inferiori (attorno a un decimo) in acque ben ossigenate. Il ciclo del manganese è parallelo a quello del ferro ma, poiché il manganese è più facilmente riducibile del ferro, il pronunciato aumento delle concentrazioni per il manganese inizia a profondità minori rispetto al ferro. Sono noti laghi con altissime concentrazioni metalimnetiche di manganese (fino a 15 mg L^{-1}), probabilmente imputabili a sorgenti subacquee con contenuto di manganese elevato.

Il fosforo

Il fosforo è un altro elemento fondamentale per gli organismi, al punto che esso è, in termini relativi, più abbondante nelle sostanze organiche della biosfera che nella componente inorganica

della crosta terrestre. È un elemento essenziale perché entra a far parte delle molecole deputate ai trasferimenti di energia nelle cellule. È anche definito come **nutriente algale** perché la sua disponibilità condiziona fortemente la crescita delle alghe. Il P può essere, quindi, un fattore limitante, perché la carenza di P può, anche se tutti gli altri elementi sono disponibili, impedire lo sviluppo degli organismi.

Il fosforo entra nei cicli biologici soltanto nella forma ossidata, cioè come ortofosfato (PO_4^{3-}), forma alla quale vengono alla fine lentamente idrolizzate le forme meta e piro fosfato. Nelle acque o nei sedimenti dei laghi il fosforo può essere presente in varie forme:

- come fosfato solubile, cioè ortofostato disciolto in acqua;
- come fosfato acido-solubile, prevalentemente fosfato ferrico o di calcio, in sospensione o adsorbito a particelle sospese;
- come fosfato solubile organico, costituito da composti organici diversi solubili in acqua e contenenti fosforo;
- come fosforo organico particellato, cioè presente in particelle organiche, viventi e non viventi, in sospensione nell'acqua.

Nei laghi il fosforo organico è, mediamente, circa 7 volte più abbondante dell'inorganico.

La concentrazione di fosfato nei laghi cambia nel tempo, cioè con le stagioni, e nello spazio, perché può presentare un gradiente verticale lungo la colonna d'acqua. Data l'estrema necessità di fosforo degli organismi tali variazioni sono fortemente influenzate dal biota lacustre e in particolare dai popolamenti vegetali. In generale i fosfati solubili scompaiono o sono presenti in concentrazioni molto basse nelle acque epilimniche in estate e al principio dell'autunno perché sono consumati dagli organismi durante il loro accrescimento estivo. Nell'ipolimnio, invece, durante la stratificazione estiva, la concentrazione di P ortofosfato può aumentare perché non c'è consumo di P da parte degli autotrofi e perché questo elemento è rimesso in circolo dalla decomposizione batterica del detrito organico nella colonna d'acqua o al fondo. Il ritorno del P alle acque ipolimniche dal sedimento superficiale è condizionato, come si è

detto sopra parlando del Fe, dalla solubilità del Fe nella massa d'acqua e quindi dalle condizioni ossido-riduttive dell'ipolimnio e dalla concentrazione d'ossigeno in questo strato.

Quindi, nei laghi con curve dell'ossigeno clinograde, la produttività, che è causa di notevoli deficit d'ossigeno ipolimnici, consente anche un continuo rifornimento di fosforo e ferro, perché in condizioni anossiche il Fe passerà alla forma ridotta solubile liberando così anche il P prima legato a livello dei sedimenti. Questi laghi sono definiti **sistemi a rigenerazione** di P dai sedimenti. Al contrario, nei laghi profondi, poco produttivi, con curve dell'ossigeno ortograde durante tutto l'anno, vi sarà una perdita continua di fosfati che, assimilati nell'epilimnio dagli organismi, alla loro morte saranno segregati al fondo per sedimentazione. Questi laghi sono **sistemi a riciclo** perché la disponibilità di P nel loro epilimnio è fortemente dipendente dal suo riciclo durante la mineralizzazione batterica della sostanza organica particellata o disciolta. L'apporto di nuovo fosforo a un lago di questo tipo è dipendente prevalentemente dalle rocce che costituiscono il suo bacino imbrifero. Poiché questa sorgente di P è comune a tutti i laghi, ci si può attendere che esistano differenze nel contenuto di fosforo dei laghi legate alla composizione chimica delle rocce costituenti il bacino imbrifero. Le successive trasformazioni dei composti del P ora descritte che hanno luogo nei laghi costituiscono il ciclo del P e sono schematizzate nella figura 32.

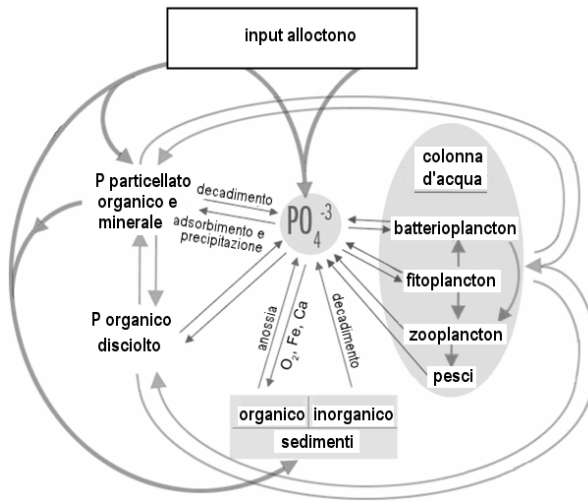


Fig. 32. Ciclo del fosforo.

Il silicio

Il silicio è un elemento necessario anche in notevoli quantità particolarmente per le Diatomee, perché queste alghe hanno cellule contenute in una teca silicea. La silice si può trovare nelle acque dei laghi in forma solubile, colloidale e insolubile o sospesa (frustoli di Diatomee e detrito minerale fine). Le Diatomee esercitano un controllo attivo della concentrazione di silice nei laghi. In effetti, normalmente, la concentrazione di silice è elevata in inverno e si riduce notevolmente in primavera, quando, cioè, si ha una grande fioritura di Diatomee. In estate la concentrazione di silice può riaumentare fino a che una nuova fioritura (autunnale) abbatta nuovamente la concentrazione di silicio. La distribuzione verticale dei silicati durante la stratificazione estiva è spesso non evidente nei grandi laghi, ma nei piccoli ambienti, con curve di ossigeno clinograde, la concentrazione di silice può aumentare considerevolmente nell'ipolimnio, con un massimo all'inizio della circolazione autunnale. Talvolta si evidenziano minimi di concentrazione di silice al metalimnio, in corrispondenza di densità rilevanti di Diatomee in quello strato. L'approvvigionamento di silice ai laghi è garantito dall'abbondanza di questo elemento nei suoli e nelle rocce della crosta terrestre.

L'azoto

L'azoto è probabilmente il solo altro elemento importante quanto il fosforo per la produzione autotrofa algale e, benché sia molto più diffuso del fosforo, può essere un fattore limitante la crescita algale. Per questo anche l'azoto è definito come **nutriente algale**. La ragione di questo sta nel fatto che la forma gassosa, nella quale questo elemento è più abbondante sulla Terra, può essere utilizzata direttamente come tale soltanto da particolari organismi, i Cianobatteri, come si è detto più sopra.

Quindi, oltre all'azoto presente nelle acque come gas libero disciolto che è di utilizzo limitato, bisogna considerare le altre forme di azoto più facilmente utilizzabili. In effetti ai laghi arrivano con l'acqua di pioggia quantità, a volte anche elevate, di

ione nitrato (NO_3^-) e ione ammonio (NH_4^+). Questi composti presenti in atmosfera possono formarsi dai gas elementari per sintesi per effetto di scariche elettriche. Anche i processi putrefattivi al suolo e i gas vulcanici possono immettere azoto combinato in atmosfera. Tuttavia, l'immissione in atmosfera di composti di azoto derivanti dalle attività umane è, attualmente, una sorgente di azoto estremamente rilevante, particolarmente (ma non esclusivamente) nelle zone ad alta densità abitativa ed industriale. Altre fonti di azoto per le acque di un lago sono le acque di drenaggio del bacino imbrifero che portano al lago i composti solubili organici ed inorganici naturalmente presenti nel suolo (anche per fissazione batterica) nonché l'azoto introdotto artificialmente dall'uomo (reflui e fertilizzanti).

I principali composti inorganici dell'azoto reperibili nelle acque, dove possono trovarsi in concentrazioni molto variabili, sono i nitrati ($1 - 600 \mu\text{g L}^{-1}$), i nitriti ($0,1 - 50 \mu\text{g L}^{-1}$) e l'ammonio ($5 - 50 \mu\text{g L}^{-1}$).

Le trasformazioni chimiche che determinano il passaggio da queste molecole inorganiche alle complesse molecole organiche azotate che, in seguito, vengono di nuovo demolite a composti inorganici semplici, costituiscono il **ciclo dell'azoto** (Fig. 33). Poiché questo elemento esiste in molti stati di ossidazione (Tab. 7), gli organismi si sono evoluti per sfruttarli allo scopo di soddisfare le esigenze energetiche del loro metabolismo e per la biosintesi.

Tab. 7. Stati di ossidazione dei principali composti inorganici dell'azoto.

Stato di ossidazione:	-3	0	+1	+2	+3	+5
Composto:	NH_4^+ ammonio	N_2 azoto gassoso	N_2O ossido nitroso	NO_2 biossido d'azoto	NO_2^- nitrito	NO_3^- nitrato

Il ciclo si attua attraverso cinque passaggi durante i quali hanno luogo i seguenti processi prevalentemente biologici: a) produzione di ammonio, b) produzione di nitrati (o nitrificazione), c) assimilazione dell'azoto, d) riduzione dei nitrati ed e) fissazione dell'azoto.

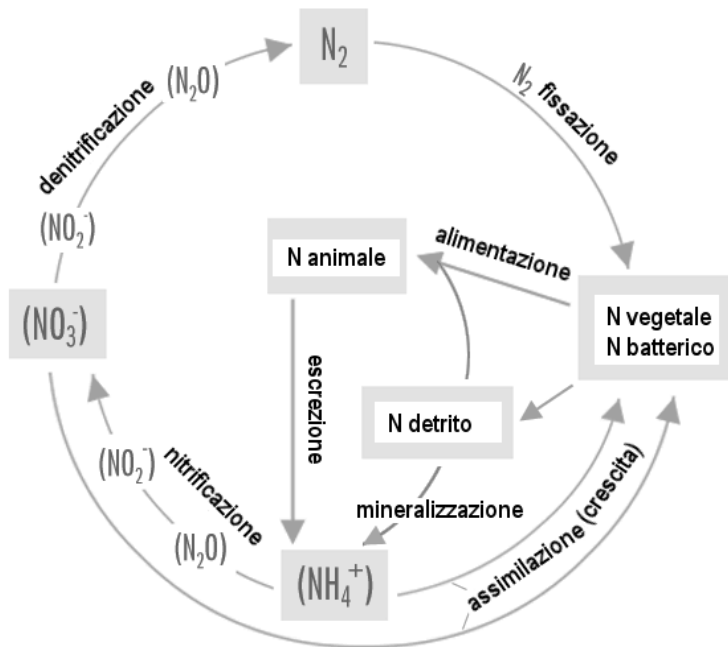


Fig. 33. Il ciclo dell'azoto.

Produzione di azoto ammoniacale. I composti inorganici dell'azoto sono gli elementi costitutivi delle complesse molecole proteiche dei vegetali e degli animali. Però i vegetali non possono usare l'azoto legato in molecole complesse come i prodotti di escrezione dei viventi o proteine e acidi nucleici che, alla morte degli organismi, vanno a costituire il detrito organico. Queste sostanze devono essere scisse in composti chimicamente molto più semplici perché i vegetali possano usarne l'azoto. Tale scissione, che avviene attraverso diversi passaggi ed è realizzata prevalentemente dai batteri proteolitici, passa attraverso la formazione di molti sotto prodotti diversi (per es. amminoacidi) e si conclude con la formazione di ammonio. L'azoto ammoniacale può essere usato direttamente dalle alghe unicellulari. Nelle acque lacustri esso è sempre presente in piccole quantità e la sua presenza è indicativa della localizzazione e dell'intensità della decomposizione organica.

Produzione di nitrati. Successivamente l'ammoniaca è ossidata a nitriti prima e poi a nitrati. Gli organismi capaci di trasformare l'ammoniaca in nitriti sono *Nitrosomonas* e *Nitrosococcus*. Sono batteri autotrofi che si riforniscono di carbonio assimilando anidride carbonica e usano il processo di ossidazione dell'ammoniaca a nitriti come fonte di energia. Questa ossidazione può avvenire in prossimità del fondo e nella zona pelagica ed è associata alla presenza di spoglie di organismi planctonici morti. Si può anche avere ossidazione fotochimica dell'ammoniaca a nitriti per azione della radiazione ultravioletta negli strati d'acqua più superficiali. L'ossidazione dei nitriti a nitrati è realizzata da batteri del gruppo *Nitrobacter* che pure usano la CO₂ come sorgente di carbonio e ricavano energia dall'ossidazione dei nitriti.

Assimilazione dell'azoto. I composti dell'azoto fin qui prodotti vengono assimilati principalmente dai vegetali (macrofite, fitoplancton, alghe bentoniche) e dai batteri. I vegetali per costruire le loro proteine (azoto aminico) possono usare: gli amminoacidi, l'ammoniaca, i nitrati e i nitriti. È possibile che le diverse specie di fitoplancton abbiano preferenze diverse rispetto ai composti dell'azoto disponibili, ma spesso le diverse forme di azoto sono vicarianti e possono essere utilizzate anche simultaneamente. Quando la produttività vegetale è modesta si può avere accumulo di azoto nitrico che, poi, può essere ampiamente consumato se si ha una fioritura algale. Alla conclusione del ciclo vitale dei vegetali per morte o per consumo da parte di animali fitofagi, c'è una rapida rimessa in circolo dell'azoto nel primo caso, alla decomposizione batterica della spoglia vegetale mentre, nel secondo caso, l'azoto organico vegetale diventa disponibile per gli organismi animali per ritornare in circolo più tardi, sempre per intervento dell'attività batterica.

Riduzione dei nitrati e denitrificazione. Nelle acque come nei suoli ci sono batteri denitrificanti e riduttori di nitrati, che operano in modo opposto ai batteri nitrificanti. I batteri denitrificanti convertono i nitrati a nitriti e poi i nitriti ad azoto gassoso. Questo passaggio costituisce per l'ambiente una perdita di azoto utilizzabile. Però questo processo non sembra essere molto importante

perché la distribuzione verticale dell'azoto gassoso disciolto è sempre molto uniforme anche in ambienti profondi. La denitrificazione sembra procedere attivamente negli ambienti e alle profondità dove l'ossigeno disciolto è scarso e dove, quindi, i nitrati sono utilizzati come sorgente di ossigeno.

Fissazione dell'azoto. Come detto sopra, anche negli ambienti acquatici ci sono organismi capaci di fissare direttamente l'azoto atmosferico. In particolare alcune Cianofitocce posseggono funzione azotofissatrice e in alcune specie esistono addirittura cellule specializzate per questa attività. Questo fatto potrebbe costituire per le Cianofitocce un vantaggio competitivo rispetto ad altre specie algali. Esistono anche batteri azotofissatori, frequenti soprattutto in acque costiere e molto spesso simbiotici di alghe. La fissazione dell'azoto è per essi un processo facoltativo, dipendente dalla quantità delle sostanze azotate disponibili.

Il profilo verticale della concentrazione dell'ammoniaca presenta una evoluzione stagionale, nei laghi di diversa trofia, assimilabile a quella del ferro ferroso e del fosforo.

Nei laghi stratificati, con curve clinograde marcate e bassi valori di potenziale redox, l'ammoniaca rilasciata dal sedimento si accumula nell'ipolimnio. L'assenza di ossigeno, inoltre, blocca la nitrificazione incrementando l'accumulo di ammoniaca. Poi, alla piena circolazione, anche l'ammoniaca circola e tende a distribuirsi uniformemente nel lago. Nell'ipolimnio nuovamente ossigenato si riattiva la nitrificazione che, a lago stratificato, aveva potuto aver luogo soltanto nell'epilimnio ossigenato. La riduzione dei nitrati può svolgersi durante tutto l'anno perché non è legata alle variazioni di concentrazione dell'ossigeno nell'acqua.

La sostanza organica

L'acqua dei laghi contiene, in sospensione e in soluzione vera o colloidale, quantità variabili di sostanze organiche generate dalle attività biologiche all'interno del lago (sostanze autoctone) o drenate dai tributari dal bacino imbrifero (sostanze alloctone).

Tra le prime ci sono escreti e secreti degli organismi, feci, sostanze endocellulari che si riversano in lago alla lisi *post mortem* delle cellule. Le sostanze alloctone possono derivare dal dilavamento dei suoli e dai reflui domestici o industriali. Le sostanze alloctone, com'è facile immaginare, oltre a sostanze organiche naturali, possono contenere sostanze organiche di sintesi. Con l'evoluzione della ricerca limnologica e delle tecniche analitiche la terminologia usata per qualificare le diverse componenti della sostanza organica lacustre è andata modificandosi così come sono cambiati i criteri per la loro individuazione. Per esempio, oggi è molto più comune parlare di carbonio organico invece che di sostanza organica. La ragione di questo sta nel fatto che attualmente la determinazione della sostanza organica nel suo complesso, prescindendo cioè dalle sue caratteristiche qualitative, si effettua ossidando ad alta temperatura (o con ossidanti forti e radiazione UV) la sostanza organica e misurando poi, dopo separazione dagli altri gas di combustione, la CO₂ così generata con opportuni rivelatori (per es. a conducibilità termica o non dispersivi nell'infrarosso).

Per quanto riguarda poi il limite tra particellato e disciolto, esso era in passato collocato a 0,45 µm perché questa era la porosità minima dei filtri organici in cellulosa in uso quando la separazione era finalizzata a studi morfologici, a determinazioni gravimetriche o ad analisi del filtrato. Il limite si è spostato verso 1 µm con la diffusione della strumentazione di analisi del particellato organico per ossidazione perché la procedura analitica impone che la sostanza organica venga ossidata insieme al filtro usato per separarla. Questo, quindi, deve essere inorganico per non aggiungere al campione carbonio estraneo; ma fino a pochi anni or sono i filtri inorganici avevano una capacità di ritenzione limitata ad 1 µm. Da circa un decennio vengono commercializzati filtri inorganici con pori di 0,2 µm, fatto che ha spostato il limite di demarcazione tra carbonio organico particellato e disciolto. Il limite superiore del particellato, invece, è arbitrariamente collocato attorno a 100 µm, valore oltre il quale può essere proponibile una misura del carbonio organico effettuata selettivamente per i

diversi taxa. Il confine operativo qui illustrato emerge dall'esame della tabella 8, che sintetizza anche gli acronimi in uso in ambito limnologico e fornisce indicazioni qualitative di massima sulla sostanza organica lacustre.

	densità		sigla	stato	tipo			
Sostanza organica	sedimentata per gravità	gravitoidale			organismi con mobilità > g	↑ ^		
			----- limite: ~ 100 μm					
			POM	vivente	organismi microscopici			
				morta	detrito			
	non sedimentata per gravità	colloidale	COM	----- limite: 1 – 0,45 – 0,2 μm			v ↓	
		disciolta		RDOM	acidi umici e fulvici,			
DOM			ADOM	enzimi, ormoni				
			LDOM	amino acidi, zuccheri				
		VOM	alcoli, aldeidi					

Tab. 8. La sostanza organica negli ambienti acquatici: suddivisioni dimensionali e qualitative.

Legenda degli acronimi:

OM: Organic Matter = Sostanza Organica

(se espressa come carbonio: **OC**: Organic Carbon = Carbonio Organico)

V: volatile; **D**: disciolto; **C**: colloidale; **P**: particellato

R: refrattaria = resistente alla decomposizione batterica

A: attiva = capace di promuovere reazioni biochimiche

L: labile = facilmente decomponibile dai batteri.

Una frazione di importanza e ruolo incerti è la sostanza organica volatile (VOM), ancora oggi poco studiata. La sostanza organica disciolta propriamente detta, cioè quella che ha dimensioni inferiori a 1–0,2 μm, è costituita da una frazione immediatamente utilizzabile da parte dei batteri, e quindi rapidamente degradabile, che è perciò definita labile. Si tratta di molecole semplici come zuccheri e amminoacidi che vengono rilasciate spontaneamente dai popolamenti algali durante la fotosintesi. Quando è questa la loro

origine tali molecole vengono chiamate anche EOC (Extracellular Organic Carbon). All'interno del DOM c'è poi una frazione definita attiva perché include molecole come gli enzimi, capaci di promuovere trasformazioni della sostanza organica anche fuori della cellula che li ha prodotti. Per esempio, l'enzima fosfatasi libero in acqua può scindere molecole organiche fosforilate complesse rendendo disponibile il fosforo per la crescita algale. Nelle acque sono stati reperiti anche ormoni e vitamine che possono interagire con lo sviluppo dei diversi popolamenti. Vi è poi una frazione costituita da prodotti di degradazione delle lignine o di altre molecole vegetali che nei suoli costituiscono l'humus. Si tratta di sostanze alloctone che possono essere estremamente abbondanti nei laghi siti in territori molto forestati. Sono acidi fulvici e acidi umici, di color giallo-bruno, fluorescenti, con elevato rapporto C:N. Alcune hanno peso molecolare molto alto e sono quindi colloidali (COM: Colloidal Organic Matter). Sono difficilmente o molto lentamente degradabili e perciò sono considerate refrattarie alla mineralizzazione batterica (RDOM: Refractory Dissolved Organic Matter). Poiché sono colorate e impartiscono ai laghi un colore che va da giallastro a bruno scuro sono anche dette "colored dissolved organic matter" (CDOM).

Infine, nella sostanza organica particellata (POM), c'è una frazione detritica, costituita da organismi morti e da frammenti di cellule o di organismi alla quale sono intimamente connessi organismi viventi, come batteri e piccoli protozoi, che le colonizzano. Pure le alghe possono far parte di questi aggregati. È ovviamente impossibile, per lo meno in una ricerca di routine, separare i componenti di tali aggregati. Perciò quando si parla di POM o di detrito organico bisogna ricordare che questa entità include anche una componente vivente. Il termine **seston** è talvolta usato per indicare il complesso del particellato organico e inorganico, vivente e non vivente, sospeso nelle acque aventi dimensioni dell'ordine del centinaio di micron. Il termine **tripton** identifica, invece, la sola componente inorganica del seston.

Anche organismi di grandi dimensioni come i pesci sono, in una certa accezione, sostanza organica particellata, ma in pratica

gli organismi individuabili e separabili anche se la loro biomassa viene misurata come carbonio vengono considerati per quello che sono e non come generica POM.

È il caso di ricordare che in realtà disciolto e particellato sono presenti nelle acque in un continuum dimensionale e che, quindi, l'individuazione di frazioni dimensionali nella sostanza organica dei laghi ha soltanto un valore operativo.

Poiché la sostanza organica autoctona è il risultato netto delle attività di produzione e di decomposizione di un lago, la sua abbondanza è in relazione allo stato trofico del lago. In un lago oligotrofo, quindi, sono normali concentrazioni di carbonio organico totale (Total Organic Carbon: TOC, dato dalle somma di DOC e POC) prossime ad 1 mg L^{-1} . Il valore si avvicina o supera i 10 mg L^{-1} nei laghi eutrofi.

Modi di esprimere la concentrazione

In limnologia la concentrazione dei diversi elementi si può trovare espressa in peso o in moli di elemento per unità di volume. Per convertire la concentrazione di un elemento espressa, per esempio, in micromoli per litro ($\mu\text{M L}^{-1}$) all'unità microgrammi per litro ($\mu\text{g L}^{-1}$), basta moltiplicare la concentrazione in micromoli per il peso atomico relativo dell'elemento.

Es.: il peso atomico del carbonio è 12. Una concentrazione 10 micromolare di questo elemento sarà:

$$10 \mu\text{M L}^{-1} = 10 \times 12 = 120 \mu\text{g C L}^{-1}$$

Per convertire la concentrazione di un elemento espressa in microgrammi per litro ($\mu\text{g L}^{-1}$) all'unità micromoli per litro ($\mu\text{g L}^{-1}$), basta dividere la concentrazione in microgrammi per il peso atomico relativo dell'elemento.

Es.: il peso atomico dell'azoto è 14. Una concentrazione $100 \mu\text{g L}^{-1}$ di questo elemento sarà:

$$100 \mu\text{g L}^{-1} = 100 \times 14 = 7,142 \mu\text{M N L}^{-1}.$$

11. Le zone di un lago

Alla luce di quanto detto fino ad ora, è possibile individuare in ogni lago delle zone che presentano caratteristiche diverse per modalità di penetrazione della luce e per condizioni termiche (Fig. 34). Vale la pena di riassumerne la definizione perché si tratta di una nomenclatura di uso frequente in ambito limnologico.

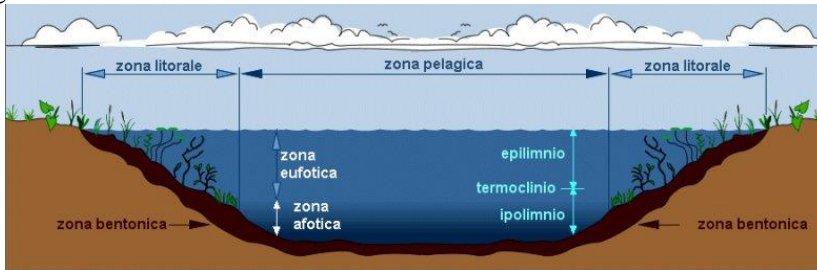


Fig. 34. Le zone di un lago.

- Zona litorale: è la porzione di lago che si estende dalla sponda fino a dove il fondo è raggiunto dall'1% della radiazione solare incidente.
- Zona pelagica: è la porzione di lago soprastante le profondità non raggiunte dalla radiazione solare.
- Zona eufotica: è lo strato d'acqua che va dalla superficie alla profondità dove arriva l'1% della radiazione solare.
- Zona afotica: è la parte della colonna d'acqua non raggiunta dalla radiazione solare.
- Epilimnio / Ipolimnio: strati d'acqua soprastanti / sottostanti il termoclinio.
- Termoclinio o metalimnio: è lo strato d'acqua dove la temperatura cambia di almeno 1°C per metro.
- Zona bentonica: è la porzione di lago situata all'interfaccia acqua-sedimento. È spesso indicata come zona bentonica profonda nella porzione afotica.

12. I popolamenti delle acque interne

Gli organismi che vivono nell'ambiente subacqueo si trovano in condizioni ambientali molto differenti rispetto a quelli che vivono nell'ambiente sub-aereo perché, come emerge dall'esame della tabella 9, acqua e aria hanno caratteristiche fisiche e chimiche tali da rendere i due ambienti molto diversi.

Tab. 9. Confronto tra le principali caratteristiche fisiche e chimiche di acqua ed aria.

	Acqua	Aria
densità (g L ⁻¹)	1000	1,19
viscosità (P)	0,009	0,0002
concentraz. O₂ (mg L ⁻¹)	8	250
concentraz. CO₂ (mg L ⁻¹)	0,3	250

Le conseguenze di tale diversità si possono così riassumere:

- la maggior densità dell'acqua dolce rispetto all'atmosfera evita agli organismi acquatici la necessità di realizzare un apparato di sostegno particolarmente importante. Inoltre l'elevata densità dell'acqua permette l'esistenza di un tipo di popolamento, il plancton, costituito da organismi dotati di scarse capacità di movimento che vivono sospesi a mezz'acqua perché la loro densità media è vicina a quella dell'acqua circostante;
- la viscosità dell'acqua, circa 50 volte maggiore rispetto a quella dell'aria, comporta per un organismo acquatico in movimento attivo un costo energetico superiore rispetto a quello richiesto, a parità di percorso, a un organismo terrestre;
- la concentrazione di ossigeno, assai minore in acqua che in aria, costringe l'animale acquatico a compiere più lavoro dell'animale terrestre per offrire la stessa quantità di ossigeno agli epiteli respiratori;
- la concentrazione di anidride carbonica libera è invece più elevata in acqua che in atmosfera. Gli organismi vegetali acquatici

hanno, quindi, rispetto ai terrestri maggior disponibilità di carbonio inorganico almeno negli strati superficiali;

– la presenza di soluti consente agli organismi autotrofi di accedere ai nutrienti senza sviluppare particolari meccanismi di trasporto. Questa situazione concorre con la precedente a privilegiare le piccole dimensioni degli organismi vegetali e, di conseguenza, degli animali che se ne cibano.

Da queste considerazioni emerge che, nell'ambiente acquatico, la vita animale deve affrontare difficoltà maggiori rispetto a quella vegetale che, inoltre, risulta agevolata dal fatto di non aver bisogno di strutture che comportano un notevole accrescimento dimensionale degli organismi.

Dopo questa premessa, importante per sapere come le particolari condizioni dell'ambiente subacqueo condizionano gli organismi che vi vivono, c'è da dire che nei laghi, come negli ecosistemi terrestri, il flusso di energia e di materia che mantiene la vita scorre attraverso una catena di organismi "trasformatori" di energia e di materia che è chiamata **catena alimentare** (Fig. 35). Nel fluire attraverso gli anelli della catena alimentare l'energia si degrada progressivamente in calore mentre la materia si ricicla, passando attraverso stadi di organizzazione a complessità variabile.

Si possono suddividere gli organismi acquatici a seconda del loro ruolo nella catena alimentare. In quest'ottica, essi possono essere:

1. **produttori primari.** Sono i vegetali, organismi definiti **autotrofi** perché capaci di sintetizzare la sostanza organica usando l'energia della radiazione solare e sostanze inorganiche. Sono produttori primari le alghe unicellulari, spesso coloniali, liberamente flottanti (che costituiscono il fitoplancton), o aderenti a un substrato (perifiton) e le piante acquatiche costiere (macrofite). Rientrano in questa categoria anche i batteri fotosintetici e chemosintetici che, comunque, sono quantitativamente importanti solamente in particolari ambienti;
2. **consumatori.** Questi possono essere *primari* (sono gli animali fitofagi e i parassiti dei vegetali), *secondari* (sono gli animali che si nutrono predando i consumatori primari o i parassiti di

- organismi animali), *terziari*, che si nutrono dei secondari, ecc. L'ultimo anello della catena dei consumatori è occupato da pesci carnivori, da uccelli o da mammiferi ittiofagi. Gli organismi consumatori e quelli dei successivi anelli sono detti **eterotrofi** perché usano la sostanza organica prodotta da altri essendo incapaci di sintetizzarla dai composti inorganici;
3. **detritivori**. Sono gli animali che si nutrono della sostanza organica presente nelle spoglie e nei resti di organismi morti e nei prodotti di rifiuto del metabolismo, degradandola a strutture chimiche progressivamente meno complesse;
 4. **decompositori**. Sono i batteri che mineralizzano la sostanza organica rimettendone in ciclo i costituenti inorganici che tornano così a disposizione degli organismi autotrofi. Anche i funghi hanno un ruolo importante nella decomposizione della sostanza organica.

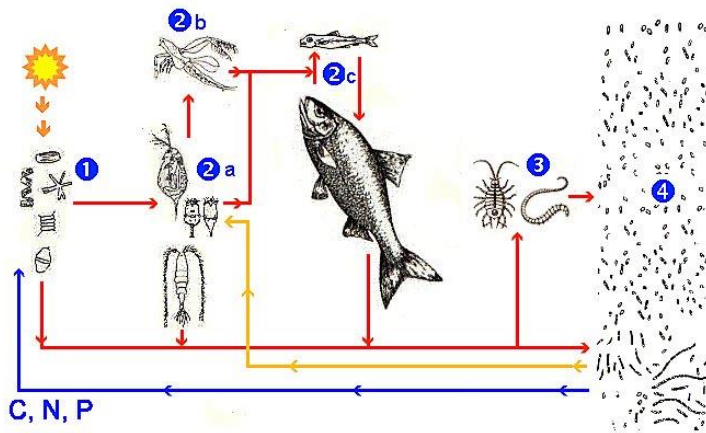


Fig. 35. Schema di catena alimentare. La linea continua rappresenta il trasferimento dell'energia chimica (cioè del cibo) dai produttori primari (1) che l'hanno sintetizzata ai consumatori primari (2 a), ai secondari (2 b), ai terziari (2 c) fino ai detritivori (3). Quello che resta dell'energia chimica dopo questi passaggi è utilizzato dai decompositori (4) che la riciclano essendo essi stessi cibo per il plancton più piccolo (linea punteggiata) e lo mineralizzano rendendo di nuovo disponibili i composti inorganici (linea tratteggiata).

La suddivisione per attività fisiologiche in *autotrofi* ed *eterotrofi* sopra introdotta va completata aggiungendo che nell'ambiente acquatico sono frequenti, e spesso importanti, i microrganismi unicellulari *mixotrofi*. Questi sono capaci, come il loro nome suggerisce, sia di fotosintetizzare la sostanza organica che di ricavare energia dal substrato organico già presente nelle acque. Quella dei mixotrofi è una categoria dotata di notevole adattabilità perché autotrofia ed eterotrofia possono essere, a seconda delle condizioni ambientali, alternative esclusive o contemporaneamente presenti. Una particolare forma di mixotrofia è realizzata da alcune specie di protozoi contenenti alghe simbiotiche nel loro protoplasma.

Un'altra possibile, e usata, suddivisione degli organismi acquatici tiene conto del loro habitat tipico. Le categorie principali sono:

1. il **plancton**, che è l'insieme di animali (**zooplancton**), vegetali (**fitoplancton**), batteri e archaea (**batterioplancton**) e virus (**viriooplancton**). Il plancton occupa la zona litorale e quella pelagica del lago, ma la presenza di fitoplancton e di batterioplancton autotrofo, l'attività dei quale è vincolata alla disponibilità di luce, è ovviamente limitata alla zona eufotica. È una comunità di organismi normalmente di dimensioni microscopiche e appartenenti a gruppi sistematici diversi che, nell'ambito dello zooplancton, vanno dai protozoi ai crostacei. Soltanto alcuni planctonti hanno dispositivi di locomozione che, tuttavia, non permettono loro di contrastare i moti delle correnti. Il plancton, che in greco significa "vagabondo", è trasportato dalla massa d'acqua che lo ospita della quale segue i movimenti nel lago.
2. Il **bentos**, è la comunità che vive nella zona bentonica (dal greco benthos = abisso), alla superficie o nello spessore del sedimento di fondo. È molto complessa dal punto di vista tassonomico e degli adattamenti funzionali. Ne fanno parte organismi sessili e mobili alla superficie e nello spessore del sedimento. Può variare molto anche nello stesso ambiente in funzione delle differenze fisiche (granulometria) del sedimento.

3. Il **necton** (dal greco néchein = nuotare) è la fauna ittica. È composto quindi da organismi più grandi del plancton capaci di trasferimenti che vincono i moti delle correnti. Vi sono specie litorali e specie pelagiche.
4. Il **neuston**, è costituito da organismi microscopici, protozoi e batteri, che vivono nella pellicola superficiale all'interfaccia tra acqua e aria. In questo gruppo vengono inclusi anche organismi più grandi, che grazie alla tensione superficiale, si muovono sul pelo dell'acqua (idrometre, girinidi, collemboli, ecc.).
5. Il **perifiton** (o "Aufwuchs"), è la pellicola di alghe che, nella zona litorale, ricopre i substrati sommersi organici (piante acquatiche) e inorganici (pietre). Ad esso sono normalmente associati protozoi, poriferi, briozoi e altri animali.
6. Lo **psammon**, è la comunità animale, comprendente protozoi, rotiferi, tardigradi, crostacei, vermi, larve di alcuni insetti, ecc., vivente nell'acqua interstiziale dei litorali sabbiosi.

13. Il plancton

Il plancton, oltre a essere classificato con prefissi che ne indicano la collocazione ecofisiologica o tassonomica, è assai frequentemente qualificato anche in base alle sue dimensioni, in accordo con gli intervalli dimensionali proposti nel corso degli anni dai diversi autori. Bisogna ricordare comunque che non si tratta di confini rigidi ma, piuttosto, di limiti operativi spesso imposti dalle tecnologie di separazione disponibili. Sono quindi limiti indicativi, variabili e modificabili dal progredire delle conoscenze e delle tecnologie. È da sottolineare che frequentemente quando si identifica una classe dimensionale del plancton se ne precisa con un aggettivo anche la categoria funzionale, distinguendo, per esempio, tra picoplancton eterotrofo (esclusivamente batteri) e picoplancton autotrofo (prevalentemente cellule vegetali procariote ed eucariote).

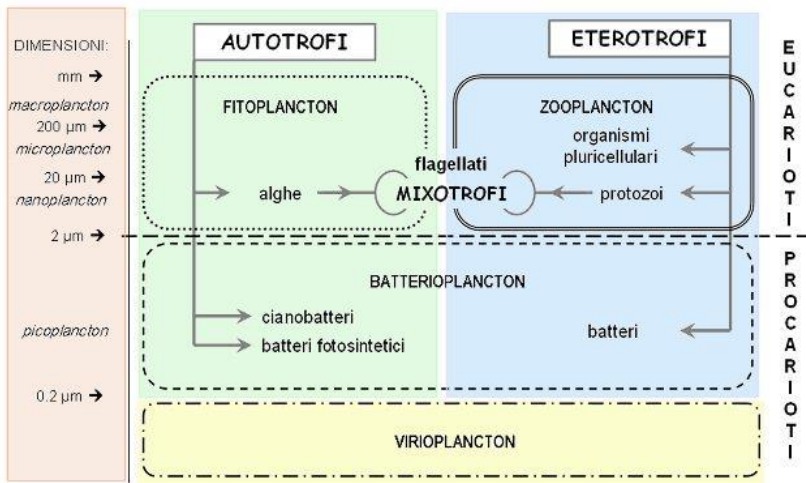
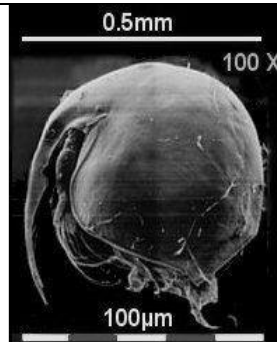
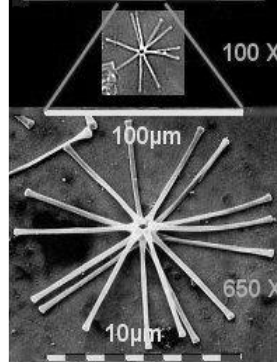


Fig. 36 A. Schema delle categorie dimensionali e dei gruppi fisiologici e tassonomici costituenti il plancton. Spiegazioni nel testo.

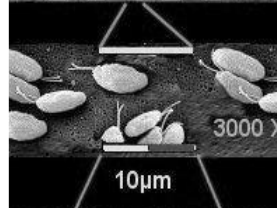
Macroplancton >200 μm
(crostaceo *Bosmina* sp.)



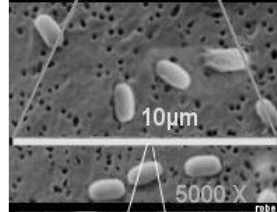
Microplancton 20–200 μm
(alga coloniale *Asterionella* sp.)



Nanoplancton 2–20 μm
(nanoflagellati eterotrofi)



Picoplancton 0,2–2 μm
(picocianobatteri *Synechococcus* sp.)



Femtoplankton < 0,02 μm
(fagi)



Fig. 36 B. Aspetto degli organismi planctonici al microscopio elettronico e confronto delle dimensioni.

Nella figura 36 A sono schematizzati, indicandone anche i limiti dimensionali e le caratteristiche funzionali generali, i diversi popolamenti che costituiscono il plancton e nella figura 36 B ne è mostrato l'aspetto al microscopio elettronico. Questi verranno di seguito esaminati più in dettaglio dal punto di vista tassonomico e funzionale.

Nelle tabella 10 sono riportate schematicamente le possibili modalità di assunzione dell'energia e della materia che si possono incontrare negli organismi planctonici.

Tab. 10. Sorgenti di carbonio, energia e H^+ / e^- per gli organismi planctonici.

<i>Organismi</i>	<i>Sorgenti di carbonio</i>
Autotrofi	CO_2 unica o principale sorgente di carbonio per la biosintesi
Eterotrofi	molecole organiche ridotte preformate da altri organismi trasportate attraverso la membrana cellulare (osmotrofia) o introdotte nella cellula come particelle/goccioline inglobandole nel protoplasma (fagocitosi/ pinocitosi)
Mixotrofi	l'insieme delle prime due, in proporzioni variabili a seconda del tipo di organismo e delle condizioni ambientali
<i>Sorgenti di energia</i>	
Fototrofi	luce; possono essere autotrofi, litotrofi o organotrofi
Chemotrofi	ossidazione di composti organici o inorganici
<i>Sorgenti di H^+/e^-</i>	
Litotrofi	molecole inorganiche ridotte
Organotrofi	molecole organiche

Il virioplancton

La presenza di virus negli ambienti acquatici era stata notata già negli anni 50 ma il loro ruolo ecologico è stato ritenuto trascurabile fino all'inizio degli anni 90, quando ci si è resi conto che i virus possono essere presenti nelle acque in concentrazioni molto elevate (da 10^4 a 10^8 virus ml^{-1}) e che possono infettare e lisare batteri e alghe. Questa scoperta ha portato a considerare importante il ruolo ecologico dei virus negli ambienti acquatici perché essi sono risultati capaci di interagire col microbial loop (vedi paragrafi sul batterioplancton), indirizzando il carbonio particellato batterico e algale verso la riserva di carbonio disciolto.

I virus, quindi, influenzano l'abbondanza, la composizione specifica e la diversità della comunità microbica e alterano il flusso di energia e di nutrienti nel microbial loop. Possono inoltre mediare lo scambio di materiale genetico entro e tra specie attraverso la trasduzione.

I virus sono i più piccoli organismi noti e presentano una struttura semplice, consistente in acido nucleico, RNA o DNA, con una copertura proteica, il capsido. Hanno dimensioni tra 20 e 200 nm e possono riprodursi soltanto all'interno di cellule viventi delle quali sono parassiti obbligati. Esistono in fase extracellulare e in fase intracellulare. Nella prima la particella virale (virione), stabile e resistente alla denaturazione, è liberamente flottante nelle acque. Quando un virione durante la sua diffusione passiva incontra un ospite si adsorbe ad esso protrudendo delle strutture proteiche recettori della superficie cellulare dell'ospite. Ha allora inizio la fase intracellulare perché il virus o il DNA virale penetra nella cellula ospite utilizzandone poi le strutture biochimiche per replicarsi. Alla fine, le particelle virali neoformate lisano la cellula ospite, ma non necessariamente distruggendola, e sono rilasciate nell'ambiente. Oltre a questo ciclo riproduttivo, detto ciclo litico, la replicazione virale può avvenire anche attraverso un ciclo lisogenico, nel quale il genoma virale diventa parte del genoma dell'ospite integrandosi in esso o mantenendosi come plasmide autonomo. Il genoma virale rimane così in uno stadio di quiescenza (profago) che termina quando le mutate condizioni

ambientali (radiazione UV, stress chimici, ecc.) inducono la fase litica.

L'esame al microscopio elettronico delle particelle virali reperte negli ambienti acquatici ha mostrato che i virus con capsidi tra 30 e 70 nm sono i più abbondanti mentre i virus grandi (> 80 nm) sono rari. Questo indica che la maggior parte dei virus degli ambienti acquatici sono batteriofagi. I virus delle alghe eucariote hanno capsidi più grandi, attorno a 150 nm.

L'abbondanza della comunità virioplanctonica dipende dall'abbondanza di ospiti. Negli ambienti più produttivi si sono in effetti evidenziate esplosioni virali più cospicue che in quelli poco produttivi.

L'abbondanza del popolamento virale può essere valutata osservando e contando al microscopio ad epifluorescenza le particelle virali (Virus Like Particles: VLP) concentrate per filtrazione differenziale su filtri da 0,02 μm dopo colorazione con coloranti del RNA e del DNA (ad esempio: SYBR-Green). Nei laghi sono state trovate da 1 a 9×10^7 VLP ml^{-1} . Anche la produzione virale può essere valutata con una tecnica basata sulla misura dell'incorporazione di traccianti radioattivi fluorescenti (fluorescently-labeled virus tracers: FLV) o con l'isolamento di fagi infettanti colture batteriche o cianobatteriche. Si sono misurate produzioni variabili da 0,1 a 7×10^6 virus $\text{ml}^{-1} \text{h}^{-1}$.

Il batterioplancton

È costituito da piccoli organismi, normalmente tra 0,2 e 2 μm e quindi rientranti nell'intervallo dimensionale del picoplancton. Gli organismi di questa classe dimensionale, prevalentemente procarioti, possono essere autotrofi ed eterotrofi. Alla prima categoria appartengono i cianobatteri, dei quali si parlerà illustrando il fitoplancton, e i batteri fotosintetici e chemiosintetici. La cattura della luce nella fotosintesi batterica non può avvenire in presenza di ossigeno; i batteri fotosintetici sono quindi anaerobi e il loro sviluppo è possibile soltanto in ambienti anossici. Essi possono essere molto abbondanti nei laghi meromittici dove è possibile

l'esistenza di strati d'acqua raggiunti dalla luce ma permanentemente segregati dall'atmosfera. I batteri chemiosintetici, normalmente poco abbondanti se non in ambienti chimicamente particolari, ricavano l'energia per la sintesi della sostanza organica dall'ossidazione di substrati minerali invece che dalla luce.

I batteri eterotrofi sono numericamente assai più abbondanti dei batteri autotrofi e costituiscono la maggior parte del batterioplancton. Anche gli archaea fanno parte del batterioplancton; però ancora poco si sa sulla loro effettiva abbondanza, che sembra tuttavia non trascurabile, e funzionalità nei laghi. Questi organismi, scoperti soltanto alla fine degli anni 70 analizzando le sequenze di DNA dei procarioti, si trovano prevalentemente in ambienti estremi (sorgenti calde, acque acide) e sono morfologicamente simili ai batteri. Dal punto di vista biochimico e genetico sono, invece, tanto diversi dai batteri quanto lo sono i mammiferi. Il ruolo dei batteri nella catena alimentare, schematizzato in figura 37, è duplice:

1. demolizione della sostanza organica, dapprima idrolizzata dagli esoenzimi prodotti dai batteri e infine mineralizzata, rendendone così di nuovo disponibili i costituenti minerali;
2. riciclo della sostanza organica disciolta usandola per costituire nuove cellule batteriche e rendendola così disponibile per gli organismi di maggiori dimensioni, incapaci di utilizzarla direttamente.

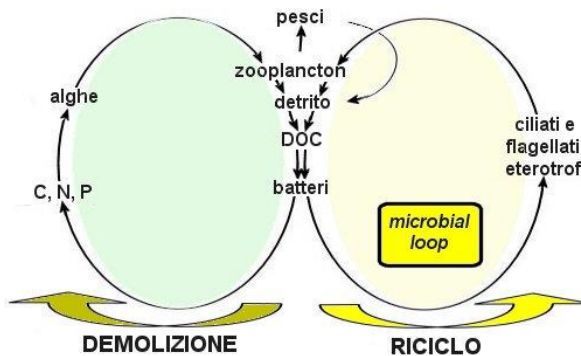


Fig. 37. Ruolo dei batteri nella catena alimentare: la demolizione e il riciclo della sostanza organica disciolta (DOC).

Questo secondo aspetto dell'attività batterica, evidenziato all'inizio degli anni 80 e definito come circuito microbico (microbial loop), riveste una particolare importanza ecologica perché la maggior parte del carbonio organico nei laghi è in fase disciolta e sarebbe sottratto all'ecosistema se non venisse trasformato dai batteri in biomassa cellulare, predata dal nanoplankton eterotrofo che poi è a sua volta preda dello zooplankton. Anche se la densità delle cellule batteriche è piuttosto grande persino nei laghi oligotrofi (tra 10^5 e 10^6 cell ml^{-1}), l'elevata diluizione rende difficile e incerta la misura del numero, della biomassa e, soprattutto, dell'attività batterica, che è ancora oggi metodologicamente problematica.

La determinazione del numero di batteri eterotrofi totali nelle acque è divenuta proponibile nella routine della ricerca limnologica alla metà degli anni 70, con l'introduzione dei coloranti vitali fluorescenti selettivi per gli acidi nucleici (Fig. 38) e della microscopia in epifluorescenza (Fig. 39).

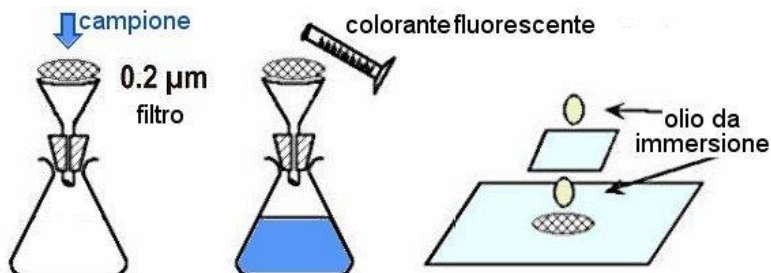


Fig. 38. Preparazione di un campione per l'esame con il microscopio a epifluorescenza:

1. si filtra un volume noto di campione (dell'ordine del millilitro) su un filtro a membrana non fluorescente con pori da $0,2 \mu\text{m}$ usando un apparato di filtrazione a superficie filtrante nota. Il corretto volume da filtrare va individuato sperimentalmente;
 2. i batteri trattenuti sul filtro vengono colorati ponendo il filtro a contatto con un colorante fluorescente (Arancio di Acridina, DAPI o SYBR green) che si legano selettivamente ad RNA e/o DNA;
- il filtro viene poi montato con olio da immersione per l'esame con obiettivo da 100X.

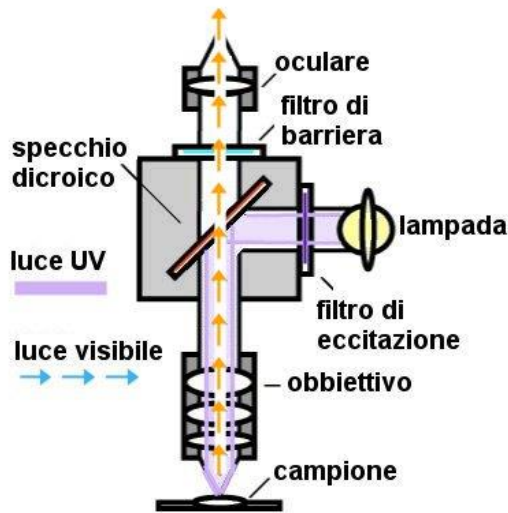


Fig. 39. Schema di funzionamento di un microscopio a epifluorescenza: una lampada a vapori di Hg genera la luce per l'illuminazione del campione e un filtro di eccitazione ne seleziona la lunghezza d'onda (nell'UV) adeguata a eccitare la fluorescenza del colorante utilizzato. Uno specchio dicroico riflette tale radiazione che, attraversato l'obiettivo, raggiunge il preparato. Il colorante fluorescente legato alle cellule batteriche emette quindi luce nel visibile. Questa attraversa lo specchio dicroico e il filtro di barriera che elimina la residua radiazione di eccitazione e, infine, attraverso l'oculare raggiunge l'osservatore.

Usando un oculare con reticolo che delimiti un campo microscopico di area nota all'ingrandimento utilizzato, si contano un numero di cellule per campo microscopico e un numero di campi adeguato a ridurre al minimo l'errore stocastico (attorno a 40 cellule per campo e almeno 10 campi). Il campo microscopico apparirà come in figura 40.

Il numero di cellule nel campione è dato dalla formula:

$$\text{cell. ml}^{-1} = (A_f/A_g) N / V_f$$

dove A_f è l'area di filtrazione, A_g è l'area del campo microscopico, N è il numero medio di cellule per campo e V_f è il volume di campione filtrato.

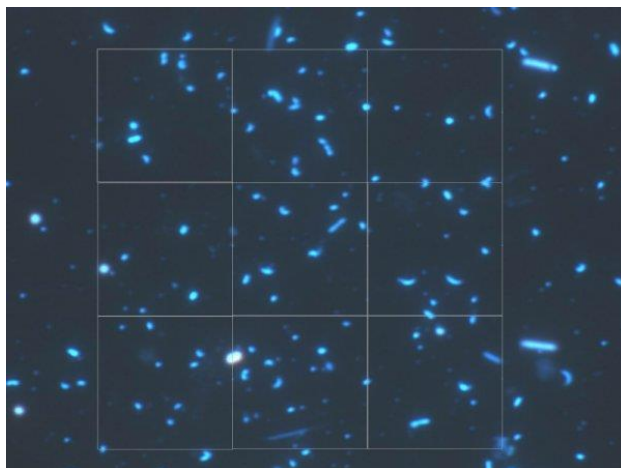


Fig. 40. Batteri osservati in epifluorescenza a 1250X. Il lato di ogni quadrato del reticolo è di 10 μm . Le cellule colorate con DAPI hanno fluorescenza azzurra e quelle colorate con Arancio di Acridina hanno fluorescenza giallo/arancio.

Immagini come quella della figura 40 possono essere acquisite, usando una adeguata telecamera, da un computer dotato di apposito software che analizza l'immagine, la digitalizza e misura l'area di proiezione di ciascuna cellula batterica. Assumendo che le cellule batteriche siano i solidi di rotazione di tali aree, si può calcolare il biovolume totale del popolamento batterico e, utilizzando opportuni fattori di conversione (per esempio: 1 cellula batterica = 20 fgC), si può esprimere come carbonio organico la biomassa batterica totale. Questa tecnica è ampiamente diffusa ma non è esente da incertezze e da problemi per possibili artefatti di colorazione e per la ridotta validità dei fattori di conversione, non generalizzabile a tutte le comunità batteriche. C'è però da aggiungere che la biologia molecolare ha messo a disposizione tecniche, come la Fluorescence *in situ* hybridization (FISH) e la catalyzed reporter deposition FISH (CARD-FISH), che permettono l'analisi qualitativa microscopica delle comunità batteriche. Con queste i taxa presenti in una comunità possono essere identificati al microscopio usando probes fluorescenti specifici, che si legano soltanto ai cromosomi delle cellule che hanno sequenze complementari.

La determinazione della densità dei popolamenti batterici può oggi essere fatta con rapidità e precisioni notevoli usando la tecnica nota come Citometria di Flusso. Si usa un apparecchio, il Flow Cytometer, in grado di far fluire il campione liquido in esame con il suo contenuto di cellule, generalmente colorate con opportuni coloranti fluorescenti, in una colonna di liquido di un centinaio di μm di diametro. Il percorso del fluido è attraversato da un raggio laser di lunghezza d'onda adeguata ad eccitare la fluorescenza del colorante utilizzato. Quando una cellula attraversa il raggio laser, lo riflette in parte ed emette una fluorescenza caratteristica. Dalla misura della luce laser riflessa e della fluorescenza emessa è possibile valutare il numero, le dimensioni e le caratteristiche di fluorescenza delle cellule che hanno attraversato il raggio laser. Utilizzando coloranti fluorescenti idonei, è possibile valutare il numero di cellule batteriche in un campione e differenziare quelle integre rispetto a quelle danneggiate, quelle con contenuto di Acidi Nucleici scarso rispetto a quelle che ne hanno in abbondanza. Con il Flow Cytometer è, in altre parole, possibile valutare in pochi minuti la densità e lo stato fisiologico di un popolamento batterico in un mezzo acquoso.

Anche la misura dell'attività batterica non è priva di difficoltà metodologiche e teoretiche. Infatti, pur essendo grande la massa di carbonio organico metabolizzata dai batteri nell'intero ecosistema, in un campione d'acqua di lago le variazioni di concentrazione dei reagenti o dei prodotti dell'attività batterica sono assai modeste, particolarmente nei laghi oligotrofi e mesotrofi. Risulta quindi problematico da un lato misurare il consumo batterico di DOC dalla diminuzione di concentrazione del substrato oppure la respirazione batterica (BR: Bacterial Respiration) come consumo di O_2 o produzione di CO_2 . Anche la produzione di biomassa batterica (BP: Bacterial Production) non è di facile misura perché le metodiche attualmente disponibili implicano generalizzazioni e assunzioni che aggiungono incertezza ai risultati.

Certamente la misura simultanea di BR e BP è di fondamentale importanza per sapere se in un lago l'attività batterica è indirizzata più alla mineralizzazione o più al riciclo e, quindi per conoscere la grandezza e la direzione reali del flusso di carbonio attraverso il batterioplancton. BR e BP, infatti, permettono di determinare l'efficienza della crescita batterica (BGE: Bacterial Growth Efficiency) quantità che valuta se in un ecosistema prevale la mineralizzazione o il riciclo, come si vede nello schema di figura 41.

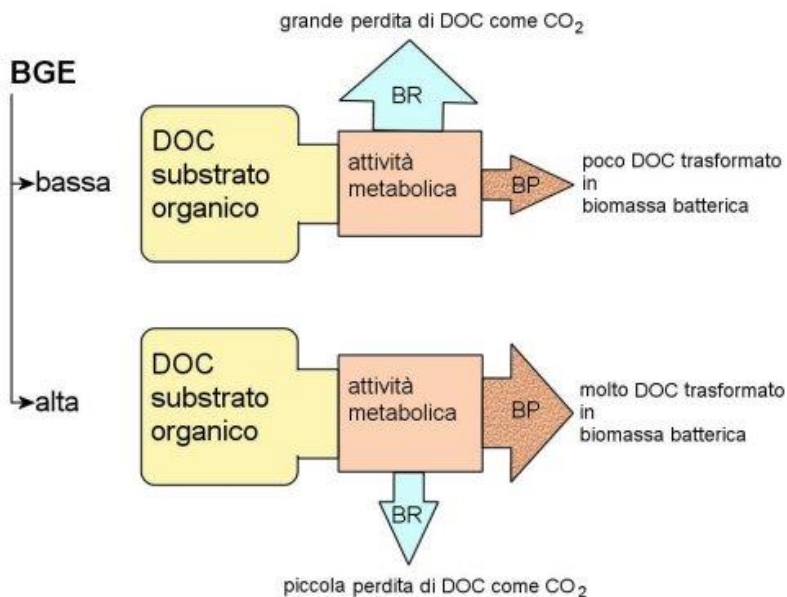


Fig. 41. Differenze di efficienza di crescita batterica (BGE: Bacterial Growth Efficiency) in funzione delle variazioni dell'attività metabolica.

In altre parole, la BGE, rappresenta il bilancio tra consumo batterico di sostanza organica e produzione di biomassa batterica ed è data dal rapporto:

$$BGE = BP/BR+BP$$

dove BP è la produzione di biomassa batterica, BR è la respirazione batterica. Il consumo totale di DOC è dato dalla somma BP+BR.

La stima a breve termine della BGE si realizza attraverso questi passaggi chiave:

- 1) isolamento dei batteri;
- 2) misura della respirazione batterica come consumo di O₂ o produzione di CO₂ e conversione del tasso di respirazione in C;
- 3) misura della produzione batterica;
- 4) integrazione di BP e BR per intervalli di tempo equivalenti.

Il passaggio 1), cioè la separazione dei batteri dalle altre componenti planctoniche che contribuiscono al consumo di O₂ / produzione di CO₂, si realizza filtrando il campione attraverso filtri con porosità idonea (2 o 3 µm) a trattenere il picoplancton autotrofo e i nanoflagellati eterotrofi. Però i filtri trattengono anche una quantità non trascurabile e variabile del popolamento batterico, fatto che porta a una sottostima del metabolismo batterico totale. Questo vuol dire che il metabolismo misurato nel filtrato può essere una sottostima del metabolismo batterico totale.

Per quanto riguarda il passaggio 2), la precisione delle misure di O₂ e CO₂ può costituire un problema di natura analitica (è necessaria una sensibilità assai elevata). Inoltre, assai frequentemente i tempi necessari per avere misurabili variazioni di concentrazione dei gas sono dell'ordine della decina di ore. Questo pone problemi interpretativi notevoli per le possibili variazioni dei popolamenti batterici e della loro attività nel corso dell'incubazione.

Più facilmente realizzabile e perciò più diffusa è la misura della produzione batterica (passaggio 3). Questa misura si basa sull'uso di sostanze marcate usate quasi esclusivamente dai batteri eterotrofi:

- la **timidina**, nucleoside della timina e precursore del DNA, che è specifico per i batteri eterotrofi. Però è difficile valutarne la diluizione intracellulare e il catabolismo;
- la **leucina**, amminoacido che viene incorporato nelle proteine e che, quindi, stima il tasso di produzione proteica. L'uso della leucina offre maggior sensibilità perché la quantità intracellulare di proteine è molto maggiore della quantità di DNA. Fornisce però

una misura meno specifica perché questo amminoacido può essere usato da alcuni cianobatteri; inoltre è difficile misurare la diluizione dell'isotopo perché le cellule possono contenere quantità assai variabili di leucina non marcata.

Le fasi essenziali della misura della produzione batterica sono:

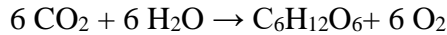
1. aggiunta di ^3H -timidina e/o ^3H oppure ^{14}C -leucina al campione (almeno 3 repliche) e al controllo (campione fissato immediatamente);
2. incubazione *in situ* o alla temperatura del lago e al buio (per escludere l'attività autotrofa) per un tempo dell'ordine dell'ora;
3. concentrazione su un filtro (con pori da $0,2\ \mu\text{m}$) del batterio-plancton presente nel campione;
4. estrazione di RNA, DNA e proteine dai filtri usando acido Tricloro acetico (TCA);
5. misura della radioattività incorporata dai batteri con un contatore a scintillazione liquida;
6. conversione della velocità di incorporazione del precursore marcato in acidi nucleici o proteine ($\text{nmol L}^{-1}\ \text{h}^{-1}$) in produzione di carbonio cellulare batterico ($\mu\text{gC L}^{-1}\ \text{h}^{-1}$). Quest'ultimo passaggio non è privo di problemi e può portare a valori irrealistici perché implica l'uso di fattori di conversione determinati empiricamente. Questi permettono di passare da quantità di isotopo incorporato a numero di cellule prodotte, assumendo un contenuto cellulare di timidina costante, e, infine, a contenuto di carbonio per cellula, assumendo un contenuto cellulare di carbonio costante. Anche usando la leucina è necessario utilizzare un fattore di conversione empirico per passare da leucina marcata incorporata a quantità di proteine prodotte per cellula e, infine, a carbonio cellulare prodotto. È evidente che la produzione batterica così valutata sarà tanto meno realistica quanto più diverso è il popolamento batterico in esame da quello usato per ricavare i fattori di conversione utilizzati.

Il fitoplancton

Questa componente del plancton è funzionalmente all'inizio della catena alimentare perché è quella in grado di sintetizzare la sostanza organica che serve a mantenere il funzionamento di tutta la catena alimentare. Questo processo, noto come fotosintesi, culmina nella produzione di composti organici a partire da sostanze inorganiche ed energia luminosa.

Il prodotto organico della fotosintesi è il glucosio (C₆H₁₂O₆), il glucide più diffuso sul nostro pianeta. Il carbonio e l'ossigeno da convertire in sostanza organica sono forniti dall'anidride carbonica (CO₂) atmosferica.

L'equazione chimica che riassume il processo è:



La fotosintesi si realizza in due fasi: la prima è detta luminosa ed è imperniata sulla clorofilla, la molecola che assorbe selettivamente la luce nelle regioni rossa e azzurro-violetta dello spettro visibile. L'energia che viene catturata dalla clorofilla permette la produzione di un composto riducente ad alta energia (il NADPH, nicotinammide adenina dinucleotide, fosfato ridotto) e di ATP (Adenosin Trifosfato, fosfato ossidato).

A questa segue la fase oscura, o ciclo di Calvin, durante la quale si realizza l'organizzazione della CO₂, ossia la sua incorporazione in composti organici e la riduzione del composto ottenuto grazie al NADPH. Nelle cellule procariote la sede della fotosintesi sono invaginazioni della membrana cellulare e in quelle eucariote appositi organuli, detti cloroplasti. La sintesi di sostanza organica porta ad un accrescimento dimensionale della cellula algale e poi ad una sua divisione in due cellule figlie. Queste possono separarsi completamente o mantenere in contatto le loro pareti cellulari formando così una colonia che può avere, in molte specie, una morfologia caratteristica.

Prima di prendere in considerazione i metodi di valutazione dell'abbondanza e dell'attività del fitoplancton nei laghi, vengono qui fornite schematicamente le informazioni tassonomiche essenziali sui principali gruppi algali che lo costituiscono, sottoli-

neando la necessità di ricorrere per l'identificazione degli organismi fitoplanctonici a testi di sistematica e alle numerose risorse presenti in internet sull'argomento. Nella figura 35 sono riportate delle microfotografie di alcuni organismi fitoplanctonici frequenti nelle acque lacustri.

Le comunità fitoplanctoniche d'acqua dolce sono costituite da **procarioti**, i cianobatteri, ed **eucarioti**, che includono diverse categorie tassonomiche: Diatomee, Crisoficee, Criptoficee, Dinoficce, Euglenoficee e Cloroficce. Procarioti ed eucarioti autotrofi si differenziano, tra l'altro, per la diversa struttura cellulare. I primi sono privi di membrana nucleare e la sede dell'attività fotosintetica sono membrane disperse nel protoplasma. Nei secondi i cromosomi sono contenuti nel nucleo e le membrane sede dell'attività fotosintetica (membrane tilacoidi) sono contenute in appositi organelli, i cloroplasti (Fig. 42). Le cellule eucariote si sarebbero evolute da protocellule contenenti organismi procarioti simbiotici. I cianobatteri sarebbero state le unità fotosintetiche che hanno originato i cloroplasti e i batteri le unità ossidanti evolute poi nei mitocondri.

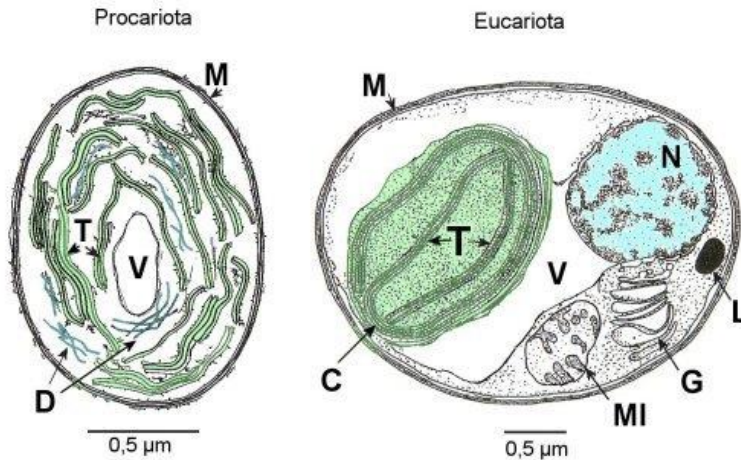


Fig. 42. Confronto tra cellule autotrofe procariote ed eucariote. M: membrana cellulare; T: membrane tilacoidi ove risiedono i pigmenti fotosintetici;

V: vacuolo; D: fibrille di DNA; N: nucleo; C: cloroplasto; MI: mitocondrio; G: apparato di Golgi; L: incluso lipidico.

I cianobatteri (o alghe azzurre) classificati con le alghe nella divisione Cyanophyta, sono in realtà dei batteri con la struttura cellulare tipicamente di procarioti. Si distinguono dai batteri per la presenza di clorofilla *a*, pigmento fotosintetico che hanno in comune con i cloroplasti delle alghe eucariote, che ha una struttura differente dalla batterioclorofilla. La denominazione di alghe azzurre deriva dalla colorazione loro impartita dai pigmenti accessori ficocianina e alloficocianina. Nei cianobatteri però possono essere presenti anche le ficoeritrine, che se abbondanti impartiscono un colore porpora. Questi pigmenti accessori sono definiti ficobiliproteine e il cromoforo di ciascun pigmento, responsabile della produzione del colore, è chiamato ficobilina.

Il processo fotosintetico attuato dai cianobatteri è molto importante perché sono stati i primi organismi a utilizzare l'acqua come donatore di elettroni e quindi a sviluppare ossigeno come prodotto di reazione. Questo processo, noto come fotosintesi ossigenica, è quello che ha progressivamente arricchito (nel corso di milioni di anni) di ossigeno l'atmosfera della Terra determinando l'evoluzione degli organismi verso le forme di vita oggi presenti nella biosfera. I cianobatteri però mantengono ancora una certa plasticità nell'apparato fotosintetico, fatto che li rende capaci di utilizzare, in ambienti particolari, anche l'acido solfidrico nella reazione di fotosintesi.

Nei laghi sono presenti dei cianobatteri non coloniali con dimensioni attorno a 1–2 μm (per esempio, *Synechococcus* sp.) che costituiscono la gran parte del picoplancton autotrofo. Questo può da solo realizzare fino all'80% della produzione primaria totale nei laghi oligotrofi. Negli ambienti eutrofi, invece, si possono avere crescite massive di cianobatteri coloniali (generi *Anabaena*, *Microcystis*, *Planktothrix*) che possono compromettere notevolmente la qualità delle acque lacustri. Infatti, l'eccesso di produzione di sostanza organica che essi realizzano può determinare un consumo di ossigeno talmente rilevante da rendere anossico il lago. Le fioriture di cianobatteri possono, poi, rendere inutilizza-

bili per la balneazione e per l'uso alimentare le acque perché questi organismi producono tossine (Tab. 11) che possono causare danni al bestiame e all'uomo per ingestione o, addirittura, per semplice contatto.

Tab. 11. Tossine Cianobatteriche.

EPATOTOS-SINE microcistine (–LR, –RR, YR e altre varianti, ~70) nodularine	NEUROTOS-SINE anatossina–a anatossina–a (s) omoanatossina–a saxitossina	CITOTOSSINE cilindrospermossina DERMATOTOS-SINE limbyatossina–a aplysiatossina
---	--	--

Le **Diatomee** sono uno dei più importanti gruppi di alghe; vengono classificate all'interno della divisione Chrysophyta come Bacillariophyceae. La loro caratteristica più importante è la presenza di una parete cellulare silicea che prende il nome di frustolo. Ciascuno di questi frustoli è costituito da due valve, l'epiteca (valva superiore) più grande e l'ipoteca (valva inferiore). Le diatomee presentano due morfologie distinte: le Centrales, forme a simmetria raggiata (*Cyclotella*, *Stephanodiscus*, *Coscinodiscus*, ecc.) e le Pennales, forme a simmetria bilaterale (*Asterionella*, *Fragilaria*, *Navicula*, ecc.). I pigmenti fotosintetici sono clorofilla *a*, *c1*, *c2* ed il principale carotenoide è la fucoxantina che dà alle cellule il loro caratteristico colore giallo–marrone dorato.

Le **Crisoficee** (Chrysophyceae) fanno parte anch'esse della divisione Chrysophyta. Sono tipiche di ambienti d'acqua dolce poveri di calcio. La maggior parte di queste alghe sono reperite come cellule singole: sono rare le forme coloniali e le filamentose. Caratteristica è la presenza di due flagelli; in alcuni generi (*Ochromonas*, *Dinobryon*, *Uroglena*, ecc.) i due flagelli sono inseriti nella cellula perpendicolarmente uno rispetto all'altro, al contrario in altri generi (*Synura*, *Mallomonas*, ecc.) i flagelli sono inseriti nella cellula parallelamente. Molte specie sono prive di una vera parete cellulare, però spesso sono provviste di uno strato

di scaglie, la lorica, nel quale alla cellulosa si accompagna una parte notevole di calcare, silice od ossidi di ferro. I pigmenti fotosintetici principali sono clorofilla *a*, *c1*, *c2*.

Le **Criptoficee** (Cryptophyceae) sono le uniche alghe che appartengono alla divisione Cryptophyta. Sono dotate di due flagelli che sono approssimativamente lunghi come la cellula; la porzione esterna della cellula o periplasto è composta da una membrana plasmatica e da una serie di placche poste direttamente sotto la membrana stessa. Il numero e la forma di queste placche sono importanti caratteri tassonomici. Contengono clorofilla *a*, *c2* e le ficobiline ficocianina e ficoeritrina.

Le **Dinoficee** (divisione: Dinophyta) sono importanti costituenti del fitoplancton sia marino che d'acqua dolce. Sono costituite da un epicono e da un ipocono divisi da una cintura o cingolo. Epicono e ipocono sono normalmente divisi in un numero di piastre diverso per ogni genere. Esistono anche Dinoflagellati non tecati o nudi. Presentano un solco longitudinale perpendicolare alla cintura; i flagelli, longitudinali e trasversali, fuoriescono tra le teche nell'area dove la cintura e il solco si incontrano ed emergono uno al di fuori della cellula e l'altro rimane attaccato alla cintura. I pigmenti fotosintetici principali sono la clorofilla *a*, *c2*. Diversamente dalle altre alghe, le Dinoficee presentano un'organizzazione nucleare intermedia tra quella dei procarioti e degli eucarioti. Le Dinoficee, che per questo sono definite mesocarioti o dinocarioti, presentano alcune caratteristiche singolari quali lo stato condensato dei cromosomi anche durante l'interfase, la diversa composizione chimica dei cromosomi stessi e il fatto che la membrana nucleare rimane intatta anche durante la divisione cellulare.

Anche le **Euglenoficee** (divisione: Euglenophyta) così come le Dinoficee presentano un nucleo mesocariota. Sono alghe flagellate presenti nella maggior parte dei piccoli ambienti d'acqua dolce eutrofi mentre è raro trovare Euglenoficee planctoniche in

laghi oligotrofi. Le cellule euglenoidi hanno due corpi basali e uno o due flagelli emergenti. La struttura dei flagelli è molto simile a quelle delle Dinofitce. Il cloroplasto contiene principalmente clorofilla *a* e *b*.

Le **Clorofitce** o alghe verdi (divisione: Chlorophyta) sono organismi presenti sia nelle acque dolci che nel mare. Hanno caratteristiche morfologiche e fisiologiche molto evolute, simili a quelle delle piante superiori; nelle loro cellule, per esempio, è presente clorofilla *a* e *b*. Un carattere che le differenzia dagli altri gruppi algali è la presenza di cellule flagellate con flagelli simili come struttura ma che possono differire in lunghezza; normalmente sono due per cellula, ma possono anche essere 4 o più. Il cloroplasto è verde poiché la clorofilla non è mascherata dai pigmenti accessori.

Nella figura 43 sono presentate le microfotografie di alcune specie algali comuni nei laghi italiani.

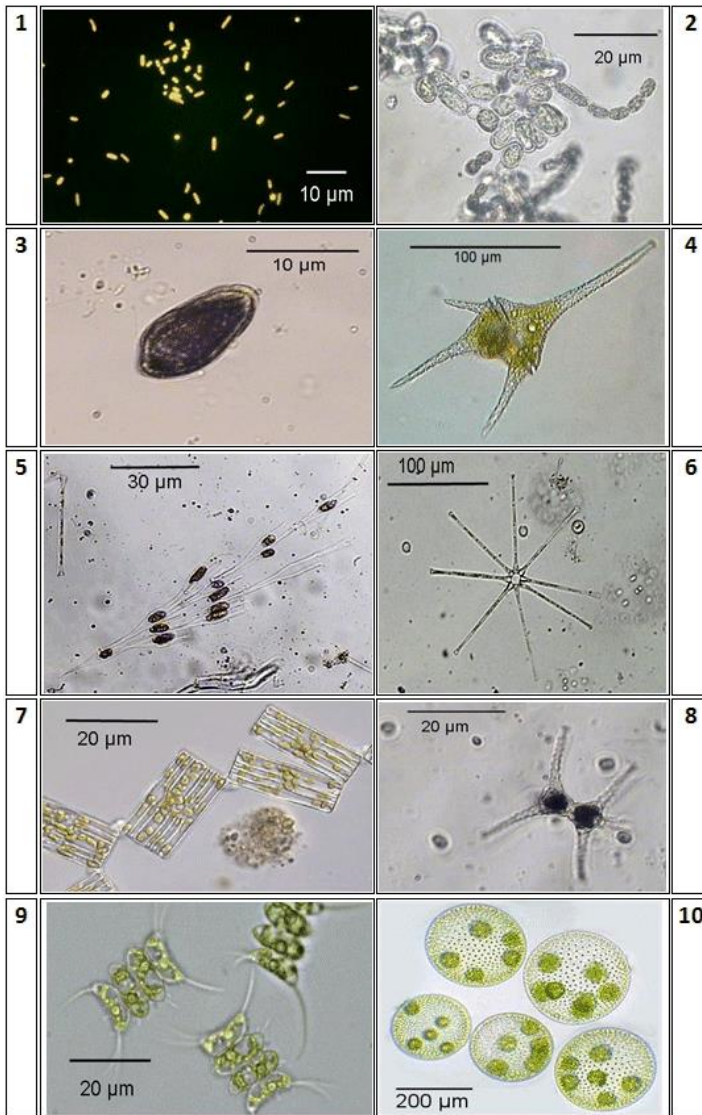


Fig. 43. Esempi delle diverse morfologie e dimensioni del fitoplancton lacustre. Cianobatteri: 1) *Synechococcus* sp., cellule singole; 2) *Anabaena* sp., coloniale. Criptofite: 3) *Cryptomonas* sp. Dinofitee: 4) *Ceratum* sp. Criosofitee: 5) *Dinobryon* sp. Diatomee: 6) *Asterionella* sp.; 7) *Tabellaria* sp. Clorofitee: 8) *Staurastrum* sp.; 9) *Scenedesmus* sp.; 10) *Volvox* sp.

Abbondanza e composizione del fitoplancton

L'abbondanza e il tipo di alghe presenti nel lago dipendono da moltissimi fattori come la situazione idrochimica (in particolare la concentrazione di nutrienti), le condizioni idrologiche, la temperatura e la turbolenza delle acque, il clima ottico subacqueo. Talvolta le condizioni ambientali diventano particolarmente favorevoli per una ben precisa specie algale. Questa può allora proliferare in modo massivo e si ha il fenomeno noto come fioritura (bloom) algale. Si tratta di un fenomeno frequente negli ambienti eutrofi ma non di essi esclusivo. In effetti pure in laghi oligo-mesotrofi si registrano occasionalmente fioriture algali sostenute anche da ceppi di cianobatteri potenzialmente tossici.

La determinazione dell'abbondanza e della composizione specifica del popolamento algale forniscono, quindi, indicazioni sullo stato trofico del lago stesso e sulla qualità delle sue acque.

La densità e la biomassa del picoplancton autotrofo si valuta con microscopio a epifluorescenza su campioni prelevati con bottiglie a chiusura (vedi cap. 20). La tecnica è simile a quella descritta per il batterioplancton. Non è però necessario usare coloranti fluorescenti perché i pigmenti fotosintetici presenti nelle cellule sono fluorescenti se eccitati con radiazione di opportuna lunghezza d'onda (attorno ai 400 nm); il picoplancton autotrofo è quindi autofluorescente.

Anche nano e microplancton vengono campionati con bottiglie a chiusura. Il macroplancton, invece, viene campionato utilizzando reti con maglie di adeguate dimensioni montate su apparecchi appositi (vedi cap. 20). Attraverso di esse vengono fatti passare volumi noti di acqua. Il campione quantitativo così ottenuto viene normalmente fissato con liquido di Lugol e così mantenuto fino al conteggio. Normalmente per contare il fitoplancton è necessario concentrarlo ponendo un subcampione di volume definito (indicativamente tra 5 e 20 ml) in apposite celle di sedimentazione dotate di fondo trasparente. Utilizzando un microscopio rovesciato, cioè con il tavolino portacampioni posto sopra l'obiettivo, è possibile esaminare le cellule algali sedimentate sul

fondo delle celle di sedimentazione (Metodo di Utermöhl, Fig.44) per identificarle usando una chiave tassonomica, contarle e misurarle usando un oculare micrometrico calibrato (Fig. 45)

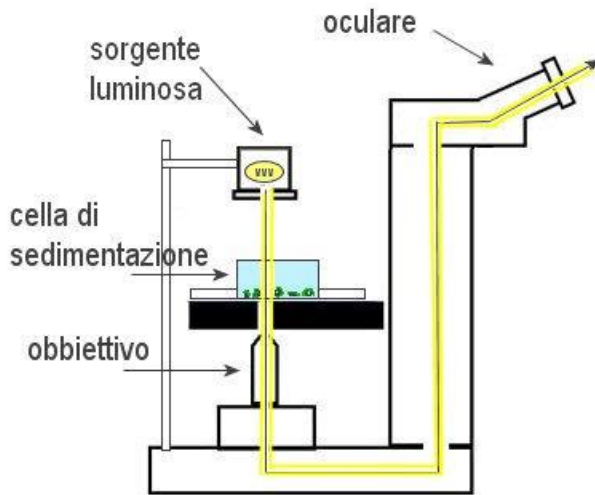


Fig. 44. Schema di microscopio rovesciato con cella di sedimentazione per il conteggio del plancton.

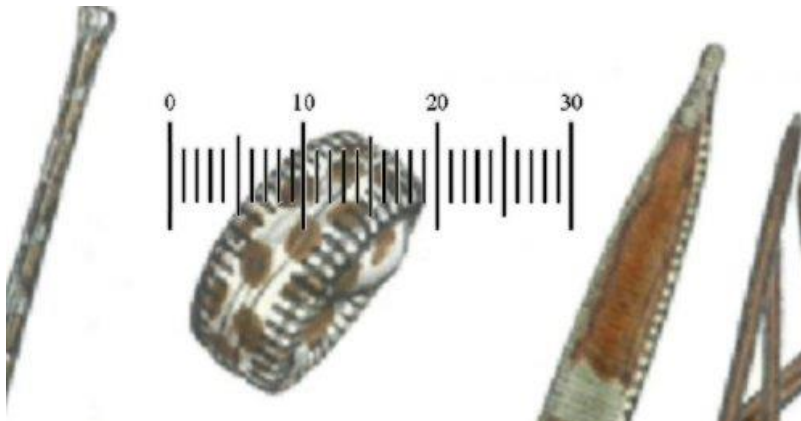


Fig. 45. Diatomee osservate attraverso un micrometro oculare.

Dal conteggio e dall'identificazione si ricavano i dati sull'abbondanza e sulla composizione del popolamento algale che vengono espressi come numero di cellule per litro o per m^3 di un determinato genere/specie. Il calcolo viene fatto tenendo conto del volume di campione messo a sedimentare e riferendolo all'unità di volume. Le informazioni così ottenute permettono di valutare la successione dei popolamenti algali nell'arco del ciclo stagionale e, in una serie pluriennale di dati, l'evoluzione di tale successione in conseguenza delle modificazioni trofiche di un lago (Fig. 46).

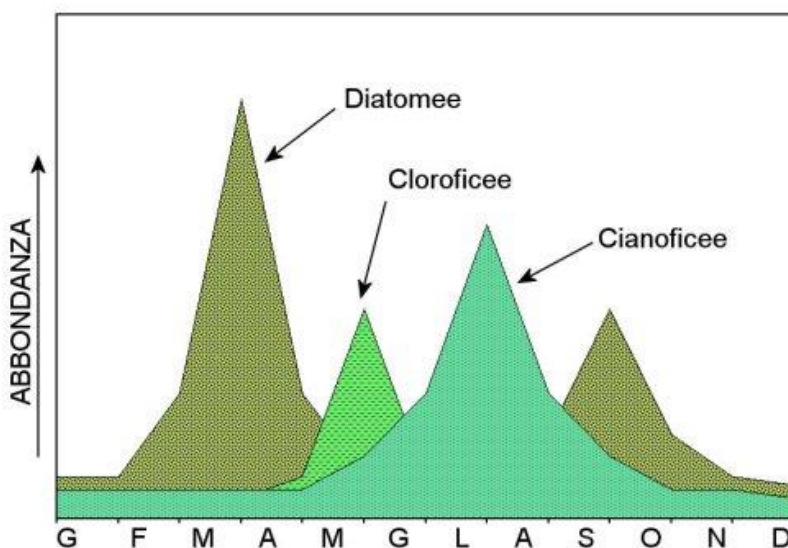


Fig. 46. Successione stagionale tipica delle principali classi algali in un lago temperato. Se il lago evolve verso l'eutrofizzazione, tende ad aumentare l'abbondanza delle Cianoficee.

È anche possibile determinare il biovolume di un popolamento algale a partire da misure effettuate con il micrometro oculare su un congruo numero di individui. A questi si attribuisce una morfologia semplificata così da calcolarne il volume cellulare con le formule usate per solidi di rotazione semplici, come quelli di figura 47.

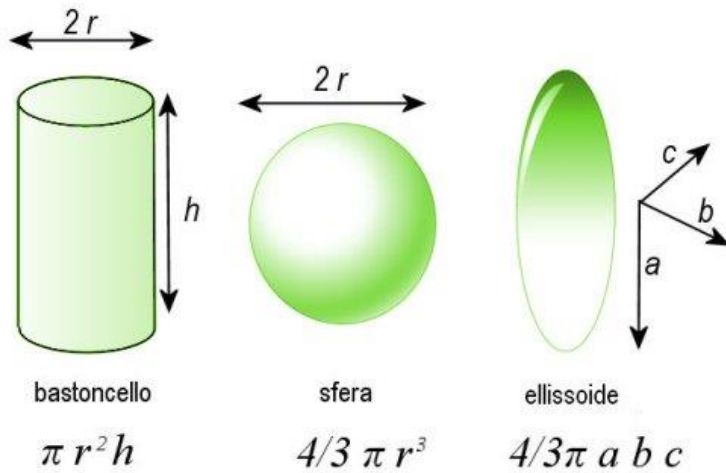


Fig. 47. Solidi di rotazione semplici ai quali può essere assimilata la forma di molte cellule algali comuni. Nella letteratura specifica si possono trovare molti esempi di morfologie complesse costituite per giustapposizione di solidi regolari semplici.

Assumendo che le cellule algali abbiano densità uguale a quella dell'acqua, la biomassa del popolamento algale risulta poi equivalente al suo biovolume.

Spesso l'abbondanza di un popolamento algale viene valutata misurandone il contenuto in clorofilla e, impropriamente, la concentrazione di clorofilla è talvolta usata come sinonimo di biomassa algale. Anche se c'è un'ovvia relazione tra le due grandezze, la variabilità delle concentrazioni di clorofilla tra specie diverse e, nella stessa specie, tra differenti momenti della crescita, non permette di individuare una relazione semplice e univoca tra concentrazione di clorofilla e biomassa cellulare nei popolamenti algali naturali. Di questo bisogna tener conto per non incorrere in grossolani errori di interpretazione dei dati. Premesso questo, c'è da sottolineare che la misura della concentrazione della clorofilla a rappresenta un dato importante per confrontare ambienti diversi e per valutare l'evoluzione temporale di uno stesso ambiente. Le fasi della misura della concentrazione di clorofilla di un popolamento algale sono:

- 1) concentrazione per filtrazione del fitoplancton presente in un campione d'acqua, usando filtri con pori opportuni così da trattenere la frazione dimensionale del fitoplancton che interessa;
- 2) estrazione della clorofilla con opportuni solventi. I più comunemente usati sono l'acetone, l'etanolo o il metanolo. Il primo ha un potere estraente inferiore agli altri e, quindi, obbliga a usare un omogeneizzatore per rompere meccanicamente le cellule algali;
- 3) determinazione con spettrofotometro o fluorimetro della concentrazione di clorofilla nell'estratto. Lo spettrofotometro ha una sensibilità di un ordine di grandezza inferiore al fluorimetro e obbliga quindi a filtrare volumi di campione maggiori. La determinazione spettrofotometrica e fluorimetrica della clorofilla non sono in realtà molto selettive perché altri pigmenti fotosintetici (clorofille diverse, ficobiliproteine, prodotti di degradazione della clorofilla come le feofitine) possono inficiare la lettura. La massima selettività nella determinazione dei pigmenti fotosintetici si può realizzare con tecniche cromatografiche. Ma queste normalmente comportano uno sforzo analitico non sempre sostenibile nella routine di una ricerca di campagna;
- 4) calcolo della concentrazione di clorofilla da opportune curve di taratura e da questo dato calcolo della concentrazione di clorofilla nel campione.

Esistono apparecchi che permettono, sfruttando l'emissione di fluorescenza della clorofilla quando questa molecola è eccitata da una radiazione di opportuna lunghezza d'onda, di misurare la concentrazione della clorofilla *in vivo* (cioè senza estrarre il pigmento dalle cellule) e *in situ*, immergendo nella colonna d'acqua un particolare sensore. Recentemente sono stati introdotti sul mercato fluorimetri subacquei in grado di misurare, oltre alla concentrazione di Clorofilla *a* alle diverse profondità, anche i profili relativi alle quattro principali classi algali. L'emissione di fluorescenza dovuta alle Cloroficee (alghe verdi), alle Cianoficee (alghe blu-verdi), alle Bacilliaroficee–Crisoficee–Dinoficee e, infine, alle Criptoficee è misurata selettivamente, sfruttando il fatto che ciascuna classe possiede uno spettro di pigmenti quantitativamente

e qualitativamente caratteristico e, quindi, un corrispondente spettro di emissione. I dati vengono memorizzati dalla sonda fluorimetrica stessa quando viene calata in acqua e sono poi letti successivamente scaricandoli su un computer quando le misure sono state completate.

Per valutare lo stato di un ecosistema è indispensabile conoscere anche la funzionalità del suo popolamento algale, oltre all'abbondanza e alla composizione. Questo scopo si raggiunge misurando la **produzione primaria** del fitoplancton, ossia la quantità di carbonio organico che le alghe producono per unità di superficie lacustre, o di volume d'acqua, nell'unità di tempo.

I metodi classici per determinare la produzione primaria si basano sulla misura della variazione di concentrazione di un prodotto o di un reagente previsto dall'equazione della fotosintesi. La misura è effettuata in campioni di acqua di lago incubati in bottiglie trasparenti (dove quindi avviene la fotosintesi) e in bottiglie non trasparenti (dove l'attività fotosintetica non è possibile). Per misurare la produzione primaria con questo metodo, detto anche delle bottiglie chiare e scure, si prelevano campioni d'acqua a diverse profondità della zona eufotica e poi li si pongono a incubare per alcune ore alle stesse profondità di prelievo, sospendendo le coppie di bottiglie chiare e scure a un galleggiante (Fig. 48).

I dati accessori da acquisire perché necessari per i successivi calcoli sono quelli relativi ai profili della concentrazione di carbonio inorganico, della radiazione luminosa e della temperatura.

Metodo dell'ossigeno: misurando la variazione di concentrazione di O_2 come prodotto della fotosintesi all'inizio e alla fine dell'incubazione nelle bottiglie chiare e scure si può calcolare la quantità di carbonio organico corrispondente a tali variazioni fissato a partire dalla CO_2 .

La fotosintesi (vedi l'equazione relativa) libera 6 molecole di O_2 ogni 6 molecole di CO_2 fissate. Il peso atomico di O è 16 e quello di C è 12. Quindi, per 12 atomi di ossigeno liberati, per un

peso atomico totale di ossigeno pari a 192, vengono fissati 6 atomi di C, per un peso atomico totale di carbonio pari a 72. Il rapporto tra C fissato e O_2 è quindi: $72 / 192 = 0,376$.

Ci si aspetta di trovare:

- nella bottiglia chiara: aumento complessivo della concentrazione di O_2 per la produzione primaria al netto della respirazione, o Produzione Primaria Netta (PPN)
- nella bottiglia scura: diminuzione della concentrazione di O_2 per la respirazione di autotrofi ed eterotrofi insieme (R).

Assumendo che sia R uguale alla luce e al buio, la Produzione Primaria Lorda sarà: $PPL = PPN + R$. Gli acronimi inglesi corrispondenti a PPL e PPN sono Gross Primary Production (GPP) e Net Primary Production (NPP).

Quanto detto risulterà più chiaro ricorrendo a un esempio numerico. Supponiamo di aver misurato la concentrazione iniziale e finale di O_2 in bottiglie chiare e scure mantenute in incubazione per 2 ore.

Le concentrazioni di O_2 misurate sono:

- concentrazione iniziale = $12 \text{ mg } O_2 \text{ L}^{-1}$
- concentrazione finale bottiglia chiara = $16 \text{ mg } O_2 \text{ L}^{-1}$
- concentrazione finale bottiglia scura = $5 \text{ mg } O_2 \text{ L}^{-1}$

Nella bottiglia chiara la concentrazione di O_2 è aumentata rispetto al valore iniziale per effetto della fotosintesi e nella bottiglia scura è diminuita a causa della respirazione. Con le misure fatte si può calcolare, esprimendola come carbonio, la Respirazione, la PPN e la PPL per il nostro sistema:

(conc. chiara – conc. iniziale):

$$0,376 (16 \text{ mg L}^{-1} - 12 \text{ mg L}^{-1}) / 2 \text{ ore} = 0,75 \text{ mgC L}^{-1} \text{ h}^{-1} : \text{PPN} = (\text{PPL} - \text{R})$$

(conc. iniziale – conc. scura):

$$0,376 (12 \text{ mg L}^{-1} - 5 \text{ mg L}^{-1}) / 2 \text{ ore} = 1,3 \text{ mgC L}^{-1} \text{ h}^{-1} : \text{Respirazione}$$

(conc. chiara – conc. scura):

$$0,376 (16 \text{ mg L}^{-1} - 5 \text{ mg L}^{-1}) / 2 \text{ ore} = 2,06 \text{ mgC L}^{-1} \text{ h}^{-1} : (\text{PPN} + \text{R}) = \text{PPL}$$

La tecnica della misura dell'ossigeno viene applicata effettuando una incubazione della durata di alcune ore durante il pe-

riodo centrale della giornata (attorno al mezzogiorno). Incubazioni troppo lunghe (oltre 6 ore) sono sconsigliabili perché accentuerebbero l'effetto bottiglia dovuto alla condizione innaturale di confinamento del campione in un recipiente e che può comportare: alterazioni dell'attività a contatto della parete per la presenza di una superficie solida, limitazioni di nutrienti e CO₂ per assenza di scambio, fotoinibizione per il permanere sempre alla stessa profondità e, infine, riduzione degli scambi nel volume considerato per assenza di turbolenza.

Il metodo dell'ossigeno non è applicabile ai laghi oligotrofi e mesotrofi perché possono essere così poco produttivi da non produrre variazioni di concentrazione di O₂ apprezzabili con i metodi analitici disponibili. La produzione primaria minima misurabile con questo metodo negli ambienti naturali è, infatti, dell'ordine di 10 mgC·m⁻²·h⁻¹. Spesso la produzione primaria è espressa per unità di superficie, in analogia con quanto si fa per gli ecosistemi terrestri, dividendo la produzione per unità di volume misurata alle diverse profondità per lo spessore della colonna d'acqua dell'intera zona eufotica.

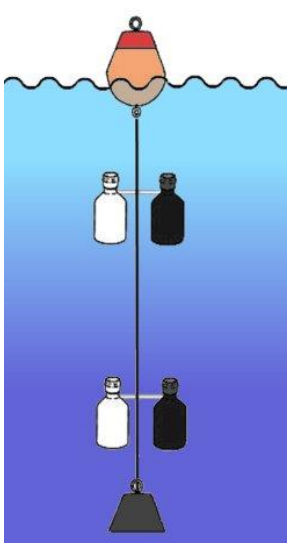
<p>Gli autotrofi nella bottiglia chiara producono carboidrati con la fotosintesi e li consumano con la respirazione: il bilancio è un aumento della concentrazione di O₂</p> <p>Gli autotrofi nella bottiglia scura non possono produrre carboidrati con la fotosintesi ma respirano consumando O₂: diminuisce la concentrazione di O₂</p> <p>In profondità con poca luce i carboidrati prodotti possono essere uguali a quelli consumati</p> <p>Al buio quasi totale c'è pochissima fotosintesi: il consumo di carboidrati è maggiore della produzione</p>	 <p>The diagram illustrates a vertical water column with a blue-to-purple gradient representing light intensity. At the surface, a red and white float is attached to a vertical line. Two bottles are suspended at different depths: one white (clear) and one black (dark). At the bottom, a black lamp is also attached to the vertical line, providing light for the upper bottles.</p>
--	--

Fig. 48. Esposizione dei campioni per la misura della produzione primaria con il metodo delle bottiglie chiare e scure.

Metodo del ^{14}C . Introdotto agli inizi degli anni 50 per superare i limiti di sensibilità imposti dal metodo dell'ossigeno, questo metodo prevede che si aggiunga al campione d'acqua di lago una quantità nota di carbonio inorganico come bicarbonato marcato con l'isotopo radioattivo ^{14}C . Le alghe utilizzeranno il ^{14}C insieme al ^{12}C originariamente presente in lago. Dopo una incubazione di alcune ore (solitamente 4), il ^{14}C incorporato dalle cellule algali può essere misurato con un contatore a scintillazione liquida e, conoscendo la quantità di carbonio inorganico originariamente presente in lago, si può calcolare il carbonio inorganico totale assimilato dalle alghe (ossia la PPN) dalla relazione:

$$^{12}\text{CO}_2 \text{ assimilato} = (^{14}\text{CO}_2 \text{ incorporato} / ^{14}\text{CO}_2 \text{ aggiunto}) \times \text{concentrazione } ^{12}\text{CO}_2 \text{ in lago}$$

Questo metodo radiochimico è molto sensibile e perciò ampiamente utilizzato in ambienti di diversa tipologia e stato trofico.

Si può determinare la produzione primaria come produzione di particellato, considerando soltanto il ^{14}C incorporato nelle cellule algali separate per filtrazione su un filtro di adeguata porosità; dal filtro va rimosso per acidificazione l'eventuale ^{14}C inorganico residuo prima di misurare la radioattività delle cellule algali da esso trattenute. Si può anche determinare la produzione totale, misurando la radioattività della frazione di ^{14}C incorporata nella sostanza organica fotosintetizzata ma rilasciata dalle alghe nell'ambiente extracellulare durante l'incubazione; anche in questo caso è necessario rimuovere per acidificazione il ^{14}C inorganico residuo rimasto nel campione. La produzione primaria con il metodo del ^{14}C può essere misurata con incubazioni *in situ* con bottiglie chiare e scure oppure in appositi incubatori che mimano il clima luminoso del lago alle diverse profondità. L'incorporazione di ^{14}C che si verifica nelle bottiglie scure per ragioni diverse dalla fotosintesi (adsorbimento, incor-

porazione per il metabolismo eterotrofo) viene sottratta all'incorporazione misurata nelle bottiglie esposte alla luce. In queste misure è importante iniziare l'incubazione immediatamente dopo il campionamento facendo attenzione a non esporre il campione ad alte intensità luminose (luce solare diretta) per evitare una importante fotoinibizione che può ridurre la fotosintesi fino al 70–80%.

Recentemente è stata introdotta una promettente tecnica di misura della produzione algale denominata PAM, acronimo di Pulse–Amplitude Modulated fluorometry. Questa tecnica si basa sull'uso di un fluorimetro che emette luce pulsata modulata di intensità variabile. Poiché un'alga assorbe soltanto la radiazione luminosa che può usare per la fotosintesi, la radiazione in eccesso perché troppo intensa o perché l'alga è in condizioni fisiologiche che ne impediscono l'uso viene dissipata come calore o come fluorescenza. Viene cioè riemessa come radiazione a una lunghezza d'onda leggermente più lunga che, misurata, permette di conoscere per differenza l'attività di fotosintesi che è in funzione della quantità di energia utilizzata, ossia assorbita da un'alga.

A esemplificare le concentrazioni di clorofilla e i tassi di produzione primaria medi estivi della zona eufotica che si trovano in differenti laghi, nella tabella 12 sono riportati i valori assunti da questi parametri in ambienti di diversa trofia.





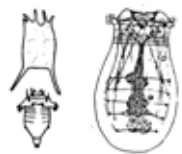


Tab. 12. Concentrazione massima estiva di clorofilla *a* ($\mu\text{g l}^{-1}$) e Produzione Primaria ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) in laghi di diverse condizioni trofiche.

Lago	Stato	Clorofilla <i>a</i> $\mu\text{g l}^{-1}$	Prod. Primaria $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Lugano	eutrofo	20	2
Maggiore	oligo–mesotrofo	3,5	0,5

Lo zooplancton

È opportuno premettere alle considerazioni ecofisiologiche sullo zooplancton qualche informazione tassonomica sui principali organismi che ne fanno parte (Tab. 13 e Fig. 49), sottolineando la necessità di ricorrere a testi specifici per una corretta identificazione degli organismi zooplanctonici.

Tab 13. Principali taxa rappresentati nello zooplancton lacustre.

		classe	ordine	
Protozoi		Rhizopoda (Amebe)		
		Zoomastigia (Flagellati)		
		Ciliata	Olotrici, Peritrici, Spirotrichi (<i>Stentor</i> , <i>Vorticella</i>)	
Cnidari		Hydrozoa	Limnohydrina (<i>Craspedacusta</i> sp.)	
Nematelminti		Rotatoria (Rotiferi)	Monogononta (generi <i>Brachionus</i> , <i>Keratella</i> , <i>Kellikottia</i> , <i>Asplanchna</i> , <i>Polyarthra</i> , <i>Synchaeta</i> , <i>Filinia</i> , Fam. <i>Conochilidae</i>)	
Artropodi	Crustacea	Sottoclasse Fillopodi	Cladocera, Famiglie <i>Sididae</i> , <i>Leptodoridae</i> , <i>Daphnidae</i> , <i>Bosminida</i> , <i>Polyphemidae</i>	
		Sottoclasse Copepoda	Calanoida (<i>Diaptomus</i>), Cyclopoida (<i>Cyclops</i>), Harpacticoida	

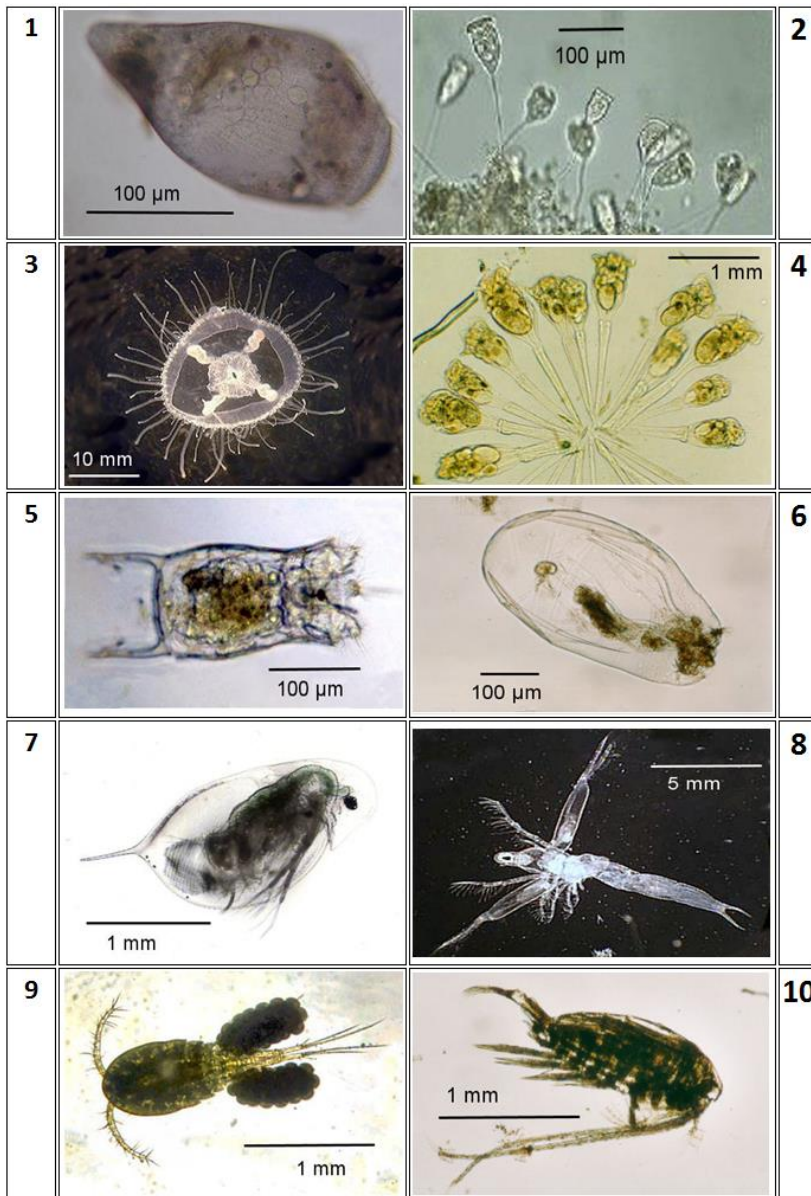


Fig. 49. Esempi di organismi dello zooplancton lacustre. 1) *Stentor* sp. 2) *Vorticella* sp., forma coloniale; 3) *Craspedacusta* sp. 4) *Conochilus* sp., forma coloniale; 5) *Keratella* sp. 5) *Asplanchna* sp. 6) *Daphnia* sp. 8) *Lepidodora* sp. 9) *Cyclops* sp. 10) *Diaptomus* sp.

I **Protozoi** sono organismi unicellulari con dimensioni variabili tra la decina e il centinaio di micron. Si nutrono di batteri o di particelle di detrito che vengono fagocitate, cioè inglobate in un vacuolo ove avviene la digestione. I protozoi planctonici per la maggior parte si muovono per mezzo di cilia. Ne esistono tantissime specie (per es. *Paramecium*, *Utrix*). Si nutrono prevalentemente di batteri e assumono così un ruolo molto importante nella catena alimentare. Sono, infatti, un anello nella trasformazione della sostanza organica disciolta, utilizzabile direttamente soltanto dai batteri, in un alimento di dimensioni maggiori e quindi adatto agli organismi zooplanctonici più grandi e più complessi.

Gli **Cnidari** sono in realtà una componente rara dello zooplancton d'acqua dolce. Rappresentano quindi più una curiosità che una presenza importante nell'economia dell'ecosistema; non è chiaro quali siano le condizioni che ne determinano la comparsa talvolta massiva anche in laghi di piccole dimensioni.

I **Rotiferi** sono animali affini ai vermi. Non sono segmentati e la loro lunghezza è compresa tra i 100 μm e 1 mm. Hanno una organizzazione complessa pur essendo molto piccoli: hanno un capo, un tronco e un piede (che può mancare in alcune specie). Alcuni rotiferi (per es. *Keratella*, *Kellicottia* e *Brachionus*) sono dotati di una spessa corazza che può essere munita di spine. La classe prende il nome dalla corona di cilia, sempre in movimento, che circonda la loro bocca e con la quale aspirano il cibo, costituito da alghe, protozoi, batteri e detrito. Alcuni generi (per es. *Asplanchna*) sono carnivori. La crescita dei rotiferi è continua e il loro tempo di generazione è, a temperature attorno ai 15°C, di 3–6 giorni. Generalmente si riproducono per partenogenesi, cioè senza che i maschi fecondino le uova; le femmine amittiche (cioè prive di fecondazione) producono uova diploidi generando giovani femmine identiche agli adulti. Si può avere anche la partenogenesi ciclica nella quale più generazioni partenogenetiche si alternano con una generazione anfiponica. In condizioni di stress ambientale compaiono femmine mitiche che producono uova aploidi che danno origine, se fecondate, a

femmine diploidi o, in caso contrario, a maschi aploidi e si ha allora una riproduzione sessuata. Questa esita nella produzione di particolari uova durature che si schiudono dopo una fase di vita latente. Queste uova, che possono resistere in un ambiente ostile (freddo, secco), si schiudono al ripristinarsi di condizioni favorevoli e permettono la ricolonizzazione dell'ambiente (Fig. 50).

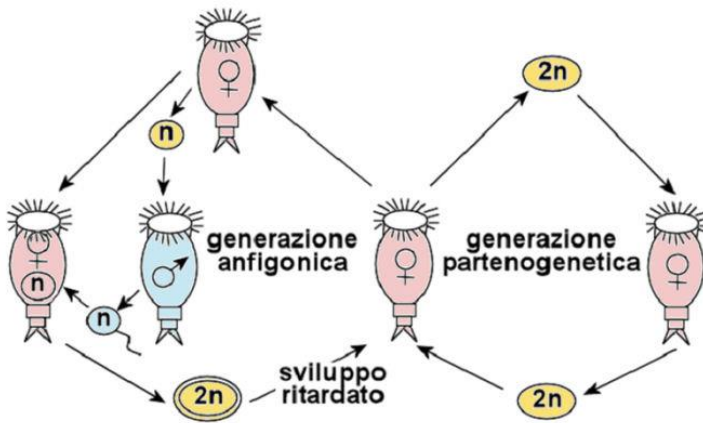


Fig. 50. Schema della partenogenesi ciclica nei rotiferi.

I **Crostacei** planctonici sono costituiti da due gruppi, i **Cladoceri** e i **Copepodi**, che sono i più importanti consumatori primari del lago.

Il più noto e comune dei Cladoceri è la *Dafnia*, comunemente detta "pulce d'acqua". Il suo corpo è costituito da due valve che racchiudono gli arti, e gli apparati circolatorio, riproduttore e digerente. Sporgono il capo e due paia di antenne, le più lunghe delle quali servono per la locomozione. Le due valve ventralmente formano un canale dove la *Dafnia* convoglia, muovendo i suoi arti, l'acqua dove sono in sospensione le particelle alimentari (alghe e detrito). Le setae delle quali sono dotati gli arti della *Dafnia* filtrano l'acqua e trattengono le particelle delle quali questi animali si nutrono. Anche nei Cladoceri la riproduzione è generalmente partenogenetica, cioè senza la fecondazione da parte dei

maschi che compaiono soltanto in condizioni ambientali particolari (Fig. 51). I Cladoceri tengono le loro uova in incubazione all'interno di una camera dorsale dove compiono l'intero sviluppo. I Cladoceri neonati, quindi, differiscono dagli adulti soltanto perché sono di dimensioni inferiori. Come in tutti i Crostacei, si accrescono poi per mute successive. Ogni femmina adulta, e l'età di riproduzione è raggiunta in 7–8 giorni, può produrre partenogeneticamente fino a 30–40 uova per volta; per questo motivo i Cladoceri possano rapidamente diventare molto numerosi. Le uova originate dalla riproduzione sessuata sono invece forme di resistenza, dette efippi, che possono permanere a lungo nel sedimento per schiudersi poi al sopraggiungere di condizioni favorevoli.

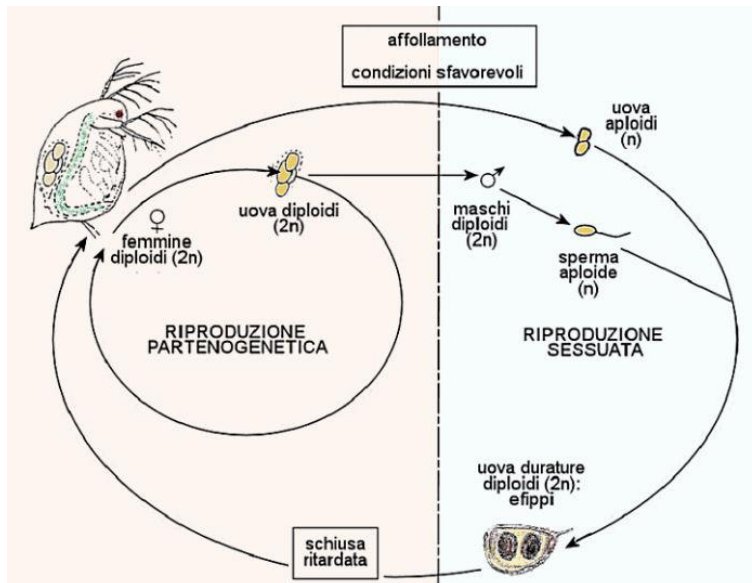


Fig. 51. La riproduzione dei Cladoceri con alternanza di cicli di riproduzione partenogenetica e di riproduzione sessuata.

Oltre ai Cladoceri fitofagi filtratori, grandi al massimo un paio di millimetri, ne esistono alcuni (per es. *Leptodora*) che sono invece predatori e possono raggiungere i 7–8 millimetri. I Cladoceri, che in generale si sviluppano nei periodi caldi, nei

nostri climi aumentano di numero durante la primavera per il concomitante sviluppo dei popolamenti algali dei quali si nutrono e le loro popolazioni durano fino verso il termine dell'autunno.

I **Copepodi** sono rappresentati dai Calanoidi (*Diaptomus* sp.) e dai Ciclopidi (*Cyclops* sp.). I primi sono generalmente fitofagi durante tutta la loro vita, mentre i secondi sono fitofagi negli stadi giovanili e predatori da adulti. La loro riproduzione avviene dopo la fecondazione delle uova da parte del maschio. Da adulti hanno un corpo generalmente piriforme, suddiviso in segmenti che portano arti e antenne; queste vengono mosse come remi per permettere all'animale di spostarsi. Le uova sono portate dalle femmine entro sacchi ovigeri, attaccati al corpo della madre, in numero di due nei Ciclopidi e di uno nei Diaptomidi. Da ogni uovo si sviluppa un organismo allo stadio larvale che, abbandonato il sacco ovigero, vive indipendente e diventa adulto, in un periodo di durata variabile (ordine dei mesi) e largamente dipendente dalla temperatura, dopo essere passata attraverso undici stadi di sviluppo (Fig. 52).

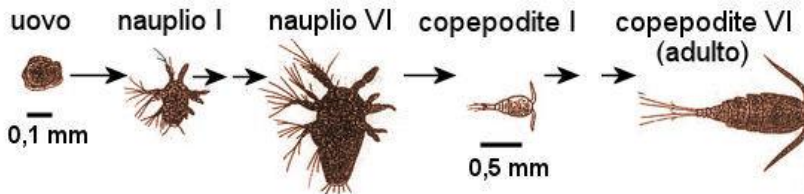


Fig. 52. Successione schematica degli stadi di sviluppo nei Diaptomidi.

Nei Copepodi ci sono specie che preferiscono le acque fredde, come il *Cyclops abyssorum*, un tipico abitatore invernale delle acque dei nostri laghi. L'optimum termico di queste specie è tale che con il procedere della stagione calda essa abbandona progressivamente gli strati d'acqua superficiali e va a vivere in quelli più profondi. Ci sono anche Copepodi che prediligono le temperature più elevate e che, quindi, trovano le condizioni ambientali più

adatte al loro sviluppo nel periodo primaverile ed estivo, come *Mesocyclops leuckarti*.

La formazione di sostanza organica da parte degli organismi autotrofi è definita come Produzione Primaria. La sua trasformazione da parte degli eterotrofi è, in analogia, definita come **Produzione Secondaria**. Questa trasformazione avviene con modalità di complessità crescente con l'aumentare della complessità degli organismi che la realizzano. Il consumo di cibo, ossia l'assunzione di sostanza organica, da parte dei protozoi e dei flagellati mixotrofi può essere valutato misurando la quantità di cellule picoplanctoniche da essi ingerite in un tempo definito. Per fare questo si ricorre all'uso di cellule picoplanctoniche opportunamente marcate con coloranti fluorescenti e se ne valuta la scomparsa dal mezzo e/o la presenza dentro le cellule degli organismi fagotrofi. Si può poi calcolare, da conteggi al microscopio fatti a tempi successivi, l'incremento numerico della popolazione di mixotrofi. Anche il consumo di alghe (grazing rate) da parte dello zooplancton di maggiori dimensioni può essere valutato dalla diminuzione della densità di cellule algali per unità di volume e unità di tempo. È però più comune valutare la produzione secondaria zooplanctonica studiandone la dinamica di popolazione con misure del tasso di crescita e di mortalità, nonché dell'effetto su di essa della predazione. La formazione di biomassa di zooplancton in un certo tempo è quindi il risultato del tasso di crescita specifico di una popolazione per la sua biomassa. La produzione secondaria annuale di una popolazione di zooplancton risulterà così dalla somma di tutta la biomassa prodotta dalla popolazione durante l'anno, incluse le perdite per mortalità, predazione, emigrazione.

Per studiare la dinamica di una popolazione se ne devono conoscere anche gli spostamenti nel corpo d'acqua e i cicli stagionali.

I movimenti del plancton

Le alghe hanno, come si è detto, una mobilità assai ridotta anche se i cianobatteri possono regolare il loro galleggiamento, e quindi la loro posizione lungo la colonna d'acqua, controllando la concentrazione endocellulare di gas o di sostanze organiche a

densità inferiore all'acqua. I flagellati mixotrofi e i protozoi planctonici hanno capacità di locomozione limitate ma comunque tali da permettere loro una incorporazione del cibo attiva. I Rotiferi e, specialmente, i Cladoceri e i Copepodi possono muoversi e spostarsi agevolmente almeno nelle acque calme per andare a cercare cibo e zone del lago più adatte al loro sviluppo.

Distribuzione spaziale del popolamento planctonico

Distribuzione verticale

La distribuzione del popolamento planctonico nel lago risente del gradiente superficie – fondo nonché della variazione stagionale e nictemerale (ciclo giorno–notte) delle condizioni chimiche e fisiche. La variabilità del clima subacqueo determina l'esistenza di un popolamento quantitativamente e qualitativamente diverso alle diverse profondità del lago e il verificarsi di migrazioni lungo la verticale degli organismi più intolleranti alla modificazione ambientale sfavorevole. Inoltre ci si può attendere una omogeneità verticale dei popolamenti planctonici più elevata nei laghi poco profondi che in quelli profondi, dove le diversità di caratteristiche fisiche e chimiche tra superficie e fondo sono spesso superiori che nei laghi piatti. L'omogeneità verticale dei popolamenti sarà massima durante i periodi di isotermità, cioè in condizioni di massima omogeneità del clima subacqueo, e minima nei periodi di stratificazione estiva.

Le migrazioni periodiche, nell'arco delle 24 ore e durante l'anno, dei popolamenti planctonici verso la profondità ottimale, sono influenzate da alcuni fattori qui di seguito illustrati.

Luce: è ovvio che gli organismi fitoplanctonici attivi sono confinati alla zona eufotica ma al suo interno i diversi gruppi tassonomici si collocano alle profondità ove possono reperire il clima ottico subacqueo ottimale per intensità e composizione spettrale della luce. Spesso poi, in prossimità della superficie la fotosintesi è inibita dall'eccesso di radiazione visibile e ultravioletta; questo mantiene bassa la densità degli organismi autotrofi in questi strati e fa sì che le concentrazioni massime di clorofilla si trovino a profondità elevate, vicine al limite inferiore della zona eufotica con

formazione del così detto Deep Chlorophyll Maximum (DCM). Al contrario quando, come accade nei laghi alpini, la copertura di ghiaccio e neve riduce fortemente la radiazione subacquea il fitoplancton all'inizio della primavera risulta concentrato subito al di sotto dello strato di ghiaccio.

In ambienti particolari la luce può influire in modo determinante anche sulla distribuzione verticale di parte dello zooplankton. Ad esempio, nei laghi andini nord patagonici, ultraoligotrofi e trasparenti, nei quali a 40 m c'è ancora l'1% della radiazione subacquea superficiale, due specie di protozoi ciliati con alghe endosimbionti coesistono occupando però strati d'acqua ben differenziati lungo la colonna d'acqua. La prima specie (*Stentor*), protetta da uno strato di granuli fortemente pigmentati, vive in prossimità della superficie perché il pigmento schermo le alghe endosimbionti dall'eccesso di luce. La seconda (*Ophridium*) è completamente trasparente e si colloca a profondità elevate, raggiunte quindi da radiazioni di modesta intensità e perciò tali da non fotoinibire le alghe endosimbionti.

Temperatura: questa può agire impedendo la vita alle specie non mobili quando le condizioni termiche dello strato dove esse vivono diventano fisiologicamente intollerabili e costringendo i planctonti mobili a spostarsi nello strato di acqua con condizioni termicamente ottimali. Ad esempio, il *Mixodiptomus laciniatus*, che popola i grandi laghi profondi subalpini, preferisce le acque fredde e le va a cercare, durante la stagione estiva, in profondità. Poiché però nell'ipolimnio c'è scarsità di cibo, questi organismi superano la carenza con una pausa estiva nello sviluppo, fatto che riduce le necessità alimentari, e compiendo migrazioni notturne fino in prossimità del termoclinio. C'è da sottolineare che la presenza di una barriera di densità come quella costituita dal termoclinio può influenzare gli spostamenti del plancton e quelli di particelle e organismi minuti che si muovono lungo la colonna per effetto della sedimentazione.

Vento: la sua importanza nel modificare la distribuzione verticale degli organismi planctonici è già stata illustrata parlando degli spostamenti delle masse d'acqua che esso promuove. Vale la

pena di sottolineare che la sua importanza può essere molto rilevante soprattutto nei laghi poco profondi perché più facilmente ne può alterare la stratificazione omogeneizzando le caratteristiche chimiche e fisiche dell'ambiente, oltre a ridistribuire nella massa d'acqua i popolamenti planctonici che prima della sua azione potevano rimanere collocati a profondità diverse. Il vento può anche produrre un accumulo sottovento, per deriva, delle acque epilimniche con i popolamenti planctonici in esse contenuti.

Ossigeno: il progressivo consumo di ossigeno durante la stratificazione estiva determina un gradiente di concentrazione decrescente dalla superficie al fondo, riducendo lo spessore di acqua utilizzabile dagli organismi aerobici. La situazione può essere drammatizzata dalla presenza di sostanze tossiche, come H_2S , concomitante all'anossia ipolimnica. Questi fenomeni, particolarmente evidenti nei laghi eutrofi, causano lo spostamento verso l'epilimnio dei popolamenti.

Cibo: gli organismi zooplanctonici, che hanno una distribuzione verticale più estesa rispetto ai fitoplanctonici, tendono comunque ad essere più abbondanti negli strati dove il fitoplancton del quale si nutrono è più denso o in quelli immediatamente sottostanti. Per i predatori, in questi strati è più abbondante la presenza di prede. Crostacei e rotiferi tendono anche ad addensarsi al termoclinio ove il salto di densità tende a concentrare, rallentandone la sedimentazione, il detrito particellato e la microflora ad esso associata.

Predazione: la migrazione verticale giornaliera (Diel Vertical Migration: DVM) è una strategia diffusamente adottata dallo zooplancton che riduce il rischio di essere predato migrando a profondità maggiori durante il periodo di luce. Questa strategia minimizza il rischio di cattura da parte di predatori come i pesci che cacciano a vista. La migrazione verticale è una risposta adattativa che può essere indotta chimicamente, per esempio in *Daphnia*, da mediatori chimici (kairomoni) associati ai predatori. La migrazione verticale nei laghi stratificati ha un costo energetico elevato per la bassa temperatura e la ridotta disponibilità di cibo nel rifugio costituito dall'ipolimnio.

Le migrazioni verticali giornaliere quale che ne sia la causa, ricerca di optimum fisico-chimico o rifugio dalla predazione, nei laghi possono realizzarsi con spostamenti anche cospicui, dell'ordine di diverse decine di metri (Fig. 53). Possono assumere aspetti assai differenti, variabili con le specie e gli stadi di età e con l'ambiente ove si verifica la migrazione. Si sono osservate migrazioni notturne dall'ipolimnio profondo alla superficie o al termoclinio e, più modeste, dal metalimnio alla superficie. Nonostante l'elevata variabilità di espressione del fenomeno esso comunque fa sì che gli strati superficiali siano più densamente popolati durante le ore notturne.

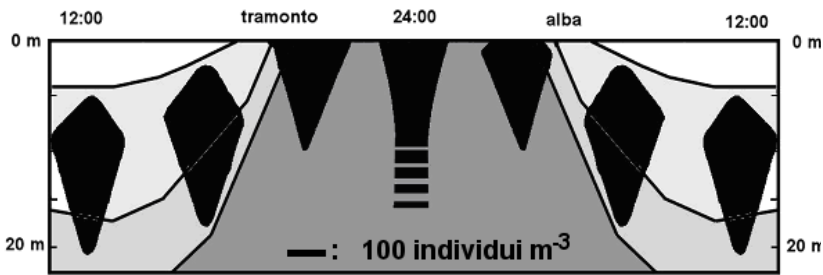


Fig. 53. Migrazioni verticali dello zooplancton nell'arco della giornata. La diversa intensità del grigio indica l'abbondanza relativa della radiazione subacquea nell'arco della giornata.

Benché la maggior parte degli studi sulle migrazioni del plancton lacustre sia stata condotta sui Crostacei, anche molti altri organismi acquatici effettuano migrazioni. Per esempio, la larva del dittero *Chaoborus* durante il periodo di luce rimane in prossimità dei sedimenti, sopportando anche basse concentrazioni di ossigeno, per risalire di notte agli strati superficiali dove trova abbondante preda. Oltre alle migrazioni giornaliere lo zooplancton può effettuare anche migrazioni stagionali, legate al ciclo riproduttivo, che possono risultare importanti per la pesca perché possono condizionare le migrazioni della fauna ittica.

Distribuzione orizzontale

Nella zona litorale, caratterizzata da un clima subacqueo diverso da quello del pelago, solitamente c'è un popolamento planctonico particolare, costituito da specie tipicamente litorali che convivono con le specie pelagiche, separate da un confine sfumato e situato a una distanza dalla linea di costa variabile in funzione delle condizioni climatiche (stratificazione, vento, ecc.) e della morfologia della riva (entità della pendenza, natura del substrato, abbondanza della vegetazione acquatica, ecc.). La zona litorale ha, rispetto al volume d'acqua che la costituisce, una superficie di contatto con i sedimenti più estesa rispetto alla zona pelagica; per questo può risultare più ricca in nutrienti che vengono rilasciati dai sedimenti e, di conseguenza, ospitare popolamenti vegetali, o in generale attività autotrofa, più abbondante rispetto al pelago. Infine, nella zona litorale l'acqua subisce una escursione termica giornaliera e stagionale più pronunciata rispetto al pelago e anche questo influenza i popolamenti che la abitano.

Inoltre, poiché le masse d'acqua più superficiali possono, per l'azione del vento, presentare un gradiente di velocità rispetto a quelle più profonde, si può avere una deriva di parcelle orizzontali delle biocenosi delle diverse profondità che determina una eterogeneità spaziale dei popolamenti planctonici differente a seconda della loro collocazione preferenziale lungo la colonna d'acqua. Pure per effetto del vento, le fioriture algali sostenute da specie che crescono negli strati più superficiali spesso si evidenziano per l'accumulo sottovento di masse di cellule algali talmente abbondanti da risultare visibili.

I cicli stagionali del plancton

I popolamenti planctonici si modificano nel corso dell'evoluzione stagionale in funzione del ciclo vitale delle differenti specie e del variare delle condizioni ambientali. La successione di specie fito e zooplanctoniche che si verifica nel corso delle stagioni dipende dal sinergismo di molti fattori, fatto che permette di proporre soltanto un modello molto schematico e incerto di come la

successione si realizza. Si possono approssimativamente individuare, in un lago stratificato temperato dimittico, le seguenti fasi, sottolineando ancora che morfologia del bacino, stato trofico e variabilità climatica possono alterare profondamente questo schema.

Fine inverno: la piena circolazione arricchisce di nutrienti e ossigeno tutta la colonna d'acqua. Inoltre aumenta la durata del periodo di luce e si verifica così uno sviluppo rapido di piccole alghe a crescita rapida (Criptoficee, piccole Diatomee). Questa produzione primaverile consente lo sviluppo dapprima di zooplanctonti di piccole dimensioni (Rotiferi e piccoli Cladoceri) progressivamente rimpiazzati da Cladoceri di maggiori dimensioni (*Daphnia*) e da Copepodi.

Fine primavera: lo sviluppo degli erbivori riduce drasticamente il popolamento fitoplanctonico aumentando la trasparenza delle acque a fine primavera (clear water phase).

Inizio estate: avendo esaurito le risorse alimentari e subendo la predazione da parte dei pesci, i grandi zooplanctonti decrescono notevolmente, rimpiazzati da zooplancton di piccole dimensioni (Rotiferi, Bosmine, piccoli Copepodi). Si ha di nuovo uno sviluppo notevole del fitoplancton, costituito da alghe verdi e, se c'è abbastanza silicio, da diatomee di grandi dimensioni.

Estate: i nutrienti presenti nell'epilimnio cominciano a scarseggiare e infine vengono esauriti ma la stratificazione termica ne impedisce la rigenerazione dai sedimenti. Possono allora comparire i cianobatteri coloniali o alghe grandi e a crescita lenta, poco appetite dagli erbivori per le loro dimensioni.

Autunno: alla piena circolazione autunnale l'epilimnio si ricarica di nutrienti e si può verificare un nuovo sviluppo delle Diatomee grazie alla accresciuta disponibilità di silice ma anche di specie di dimensioni tali da poter sostenere un certo sviluppo dello zooplancton.

Inizio inverno: con l'avanzare dell'autunno la diminuzione della radiazione solare e della temperatura riduce la fotosintesi e si ha il crollo della biomassa algale e dello zooplancton.

Oltre alla successione stagionale delle specie, anche nell'ambito della stessa specie si può verificare con l'avanzare della stagione la comparsa di individui con una morfologia differente. Il fenomeno, detto **cicломorfosi**, si manifesta come risposta alla predazione o al modificarsi delle condizioni ambientali in alcune alghe (Fig. 54), nei rotiferi (fig. 55) e nei microcrostacei (Fig. 56). Recentemente si è visto che anche i batteri possono subire modificazioni morfologiche in risposta alla pressione predatoria (Fig. 57).

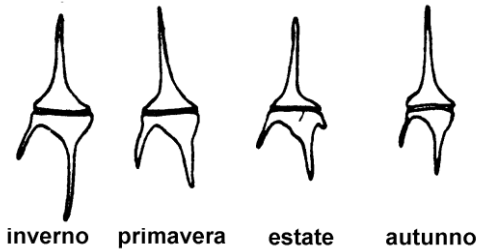


Fig. 54. Cicломorfismo stagionale nel Dinoflagellato *Ceratium* sp. che presenta forme invernali più allungate delle forme estive; d'estate compare anche una quarta spina.

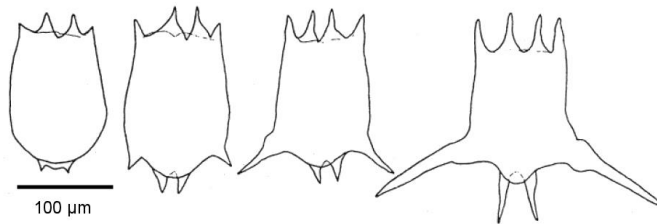


Fig. 55. Aumento della lunghezza delle spine in *Brachionus* sp. indotto aumentando la concentrazione nel mezzo di materiale proteico prodotto dal suo predatore *Asplanchna* sp.

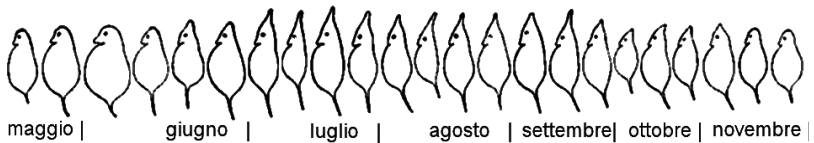


Fig. 56. Il cicломorfismo stagionale di *Daphnia cucullata*: le forme estive presentano un allungamento generale del corpo, un allungamento della spina e una protuberanza appuntita alla sommità del capo (elmetto).

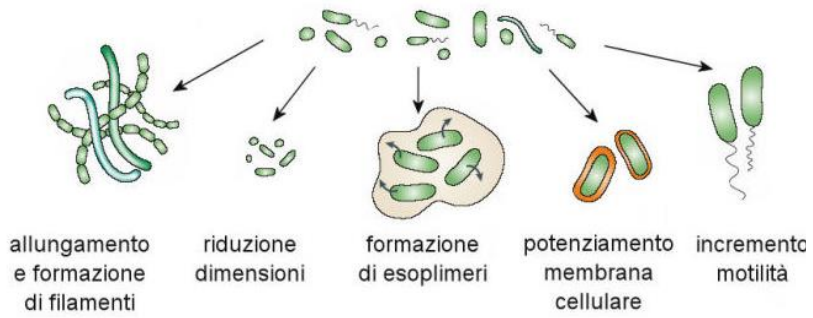


Fig. 57. La plasticità fenotipica dei batteri permette loro di esprimere modificazioni morfologiche in risposta alla pressione predatoria.

14. Il bentos

Gli organismi bentonici sono quelli che vivono a contatto con i sedimenti di fondo. Del bentos fanno parte, oltre a funghi e batteri, anche organismi vegetali e animali di dimensioni variabili, come ordine di grandezza, dal micron (alghe, protozoi, rotiferi, tardigradi) al centimetro (molluschi, vermi, artropodi).

Il fitobentos

Perifiton. Componente vegetale microscopica. Nella zona litorale dei laghi è abbondante il perifiton (o Aufwuchs), cioè la comunità di organismi autotrofi di dimensioni microscopiche che vive aderente alle superfici sommerse inorganiche (pietre e sedimento di fondo) e organiche, inclusi i vegetali viventi (steli di macrofite). Nel primo caso le alghe costituenti il perifiton sono dette epilittiche e nel secondo epifittiche. Impropriamente, talvolta anche i microrganismi eterotrofi vengono inclusi nel perifiton. La distribuzione verticale del perifiton è, nei laghi, limitata alle profondità raggiunte dalla radiazione luminosa.

Gli organismi dominanti del perifiton sono alghe filamentose, unicellulari o coloniali, appartenenti ai Cianobatteri, alle Diatomee ed alle Cloroficee.

Nei laghi poco profondi, dove quindi la zona litorale è prevalente su quella pelagica, il popolamento perifitico può avere un ruolo rilevante nella produzione primaria complessiva dell'ecosistema. L'esame qualitativo (diversità specifica) e quantitativo (abbondanza di organismi per unità di superficie o contenuto in pigmenti) del perifiton è condotto seguendo due possibili approcci: rimozione con varie tecniche della pellicola algale dai substrati naturali o posa *in situ* di substrati artificiali (vetrini, lastre ceramiche, ecc.) per un periodo di tempo adeguato a permettere l'insediamento su di essi del perifiton che sarà successivamente rimosso e sottoposto ad analisi.

Gli animali bentonici

Nei sedimenti di fondo o aderenti ai vari substrati che giacciono a contatto con essi sono presenti in abbondanza i microinvertebrati (protozoi, rotiferi, tardigradi). Anche nelle acque dolci si incontrano poi Spugne (circa 150 specie), Briozoi (circa 20 specie) e Cnidaria (Celenterati) sessili, ma pur se è importante il loro contributo alla biodiversità dell'ecosistema, il loro ruolo ecologico sembra modesto. Tuttavia nell'accezione più comune gli organismi bentonici sono i macroinvertebrati, appartenenti al gruppo degli insetti, dei crostacei, dei molluschi, degli oligocheti, degli irudinei e dei platelminti. Poiché le varie specie occupano nicchie assai differenziate per quanto riguarda le caratteristiche fisiche e chimiche ambientali, sono spesso visibili a occhio nudo e sono facilmente individuabili sulle rive dei corpi d'acqua, gli organismi bentonici sono utilizzati come bioindicatori della qualità dell'acqua nelle acque correnti. Nei laghi il valore dei macroinvertebrati bentonici come indicatori di qualità è, ovviamente, limitato alla zona litorale dove possono vivere popolamenti bentonici consistenti e diversificati. Una semplice chiave di classificazione dei macroinvertebrati bentonici è presentata nella figura 58 e alcune immagini di tali organismi sono proposte nella figura 59.

Il tipo di sedimento (limoso, sabbioso o pietroso) è importante nel determinare quali specie vi possano vivere e in che abbondanza. Ovviamente altri fattori, quali la disponibilità di cibo e le caratteristiche fisiche e chimiche dell'acqua, possono influenzare la densità dei popolamenti bentonici. I sedimenti limosi (a struttura fine) sono reperibili nei tratti di riva riparati e con debole ondatazione e nelle zone più profonde. Questi sedimenti, ricchi di detrito organico, ospitano gli Oligocheti (appartenenti al gruppo dei vermi) e le larve di alcuni insetti (per lo più Chironomidi).

Nei sedimenti sabbiosi, tipici dei tratti di riva con ondatazione sensibile e della zona sublitorale, si trovano varie specie di Molluschi Lamellibranchi (come *Pisidium*, *Unio*, *Anodonta*) e Gasteropodi, come *Viviparus*.

I fondali pietrosi sono abitati da una notevole varietà di organismi. Tra la ghiaia o sotto le pietre si trovano i Gammaridi, piccoli (10–20 mm) gamberetti onnivori, e gli Asellidi (10–15 mm), piccoli isopodi acquatici detritofagi. Le larve di insetti come *Chironomus* e *Chaoborus* sono comuni sulla superficie dei ciottoli.

Il bentos che si trova nella zona profonda dei laghi vive in un clima subacqueo caratterizzato da mancanza di luce, bassa temperatura e, soprattutto, scarsa disponibilità di ossigeno. Questa condizione, che nei laghi eutrofi può giungere alla completa anossia per tutta la tarda estate e il primo autunno, è comunque molto frequente all'interfaccia acqua–sedimento dove la sedimentazione convoglia abbondante detrito organico e dove, quindi, l'ossidazione batterica facilmente crea condizioni di anossia o ipoossia all'interfaccia e nei primi centimetri di sedimento.

All'animale bentonico, quindi, la zona profonda offre un ambiente a caratteristiche particolari: un sedimento privo di ossigeno, ricoperto da uno strato superficiale più o meno aerobico e, immediatamente al di sopra, un'acqua dotata di un notevole gradiente verticale delle condizioni chimiche, in particolare dell'ossigeno. Per questo la densità degli organismi bentonici nel sedimento diminuisce rapidamente con l'aumentare della profondità, perché essi per sopravvivere devono instaurare una connessione con le acque sovrastanti cosa che realizzano mediante comportamenti particolari. I popolamenti bentonici profondi sono consumatori del detrito apportato al fondo per sedimentazione. Anche gli animali bentonici carnivori predatori dipendono indirettamente dal detrito del quale si nutrono gli organismi limofagi loro prede. Nelle biocenosi profonde, situate in condizioni ambientali relativamente costanti, ci si può aspettare di incontrare un numero di specie inferiore rispetto alla zona litorale, caratterizzata da una elevata varietà di nicchie ecologiche. La zona profonda dei laghi oligotrofi avrà comunque un numero di specie più elevato di quella dei laghi eutrofi, dove le condizioni ambientali possono essere tali da scostarsi da un optimum vitale medio.










Macroinvertebrati:			taxa			
senza zampe	con conchiglia	singola		Molluschi gasteropodi		
		a 2 valve		Molluschi bivalvi		
	senza conchiglia	corpo non segmentato	piatto		Tricladi	
			cilindrico		Nematodi	
		corpo segmentato	senza appendici	senza ventose	Oligocheti	
				con ventose	Irudinei	
			con appendici		Insetti (larve)	
			6		Insetti	
zampe articolate	più di 6		Crostacei			

Fig. 58. Chiave per l'identificazione dei macroinvertebrati bentonici.

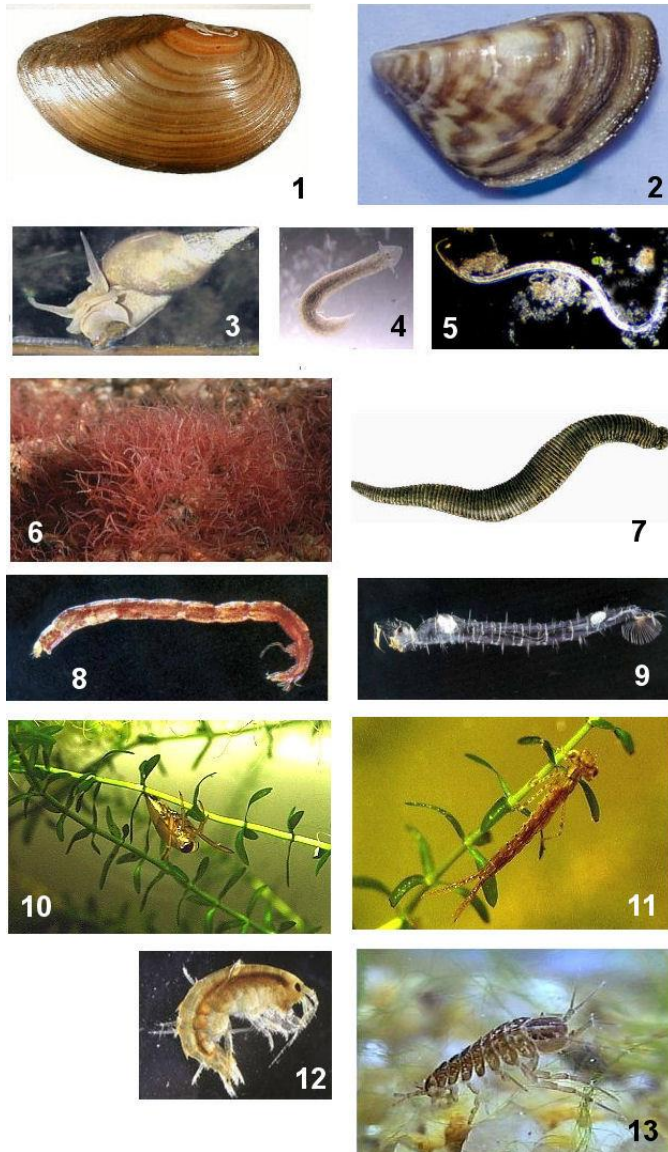


Fig. 59. Organismi macrobentonici. Molluschi bivalvi: *Unio* sp. (1), *Dreissena polymorpha* (2) e gasteropodi: *Limea* sp. (3). Tricladi: *Dugesia* sp. (4) Nematode (5). Oligocheti: *Tubifex* sp. (6). Irudinei: *Hirudo* sp. (7). Insetti larve: *Chironomus* sp. (8), *Chaoborus* sp (9). Insetti adulti: *Corixa* sp. (10), *Ischnura* sp. (11). Crostacei: *Gammarus* sp. (12), *Asellus* sp. (13).

Tra i principali rappresentanti della fauna profonda si trovano i Chironomidi. Questi Ditteri, che sono generalmente detritofagi, vivono in tubuli costruiti con sedimento cementato da secrezione salivare, che servono da rifugio e che permettono loro di innalzarsi, sia pur di poco, sopra l'interfaccia acqua-sedimento che è, come si è detto, la più povera di ossigeno.

Essi hanno comunque sviluppato un adattamento fisiologico che permette loro di vivere anche a basse concentrazioni di ossigeno. Alla fine dello sviluppo larvale raggiungono superficie del lago e sfarfallano come adulti. Anche *Chaoborus* occupa la zona profonda dei laghi anche se le larve di questo dittero, che si liberano alla schiusa delle uova deposte dagli adulti presso le rive, si mantengono per un certo tempo nelle acque superficiali ove si comportano come organismi zooplanctonici predatori. Soltanto verso la fine dello stadio larvale passano nei sedimenti. Tuttavia, durante le ore notturne, le larve bentoniche di *Chaoborus* compiono migrazioni verso le acque superficiali per tornare poi all'alba ai sedimenti del fondo. La migrazione è resa possibile da particolari vescicole idrostatiche (Fig. 60).

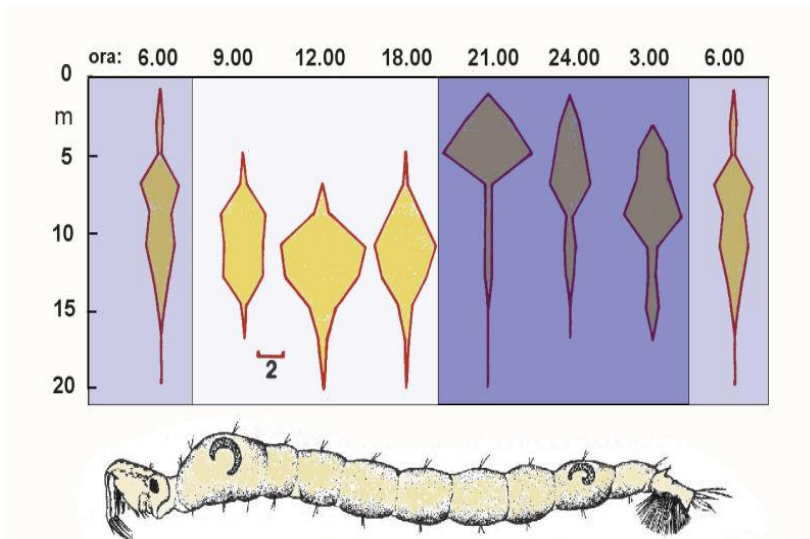


Fig. 60. Migrazioni giornaliere di larve di *Chaoborus* sp. La scala indica il numero di larve in 100 litri.

Nella fauna profonda dei laghi si trovano anche gli Oligocheti, rappresentati da Tubificidi (es. *Tubifex*). Oligocheti e Chironomidi svolgono una importante azione di bioturbazione dei sedimenti di fondo, nei quali scavano i loro tubuli promuovendo il rinnovo dell'acqua interstiziale e accelerando il riciclo dei nutrienti (Fig. 61). L'ingestione di particelle di sedimento e la loro successiva espulsione dal tubo digerente sotto forma di masse ricoperte da materiale mucoso facilita l'attività di mineralizzazione batterica analogamente a quanto succede nei suoli per l'attività dei lombrichi terrestri.

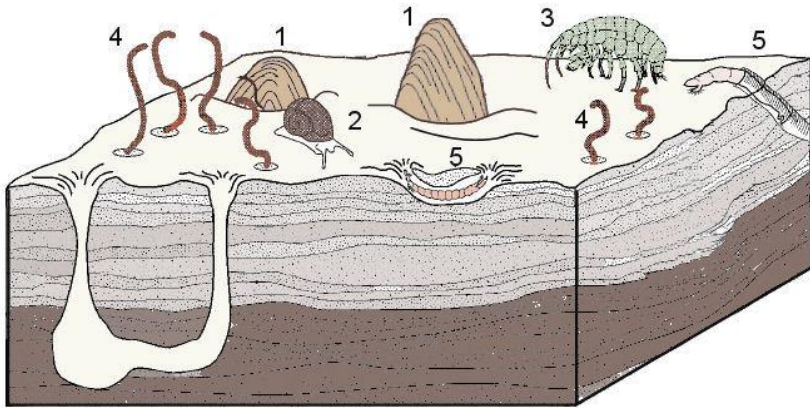


Fig. 61. I macroinvertebrati bentonici che scavano in profondità nei sedimenti stratificati: bivalvi (1), gasteropodi (2), anfipodi (3), vermi tubificidi (4) e larve di insetti acquatici (5).

Si è visto che i Tubificidi possono rimuovere fino a $6-12 \text{ kg m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$ di sedimento. L'ingestione di queste quantità notevoli dipende dal modesto contenuto energetico del sedimento (contenuto calorico del sedimento secco: 100 cal g^{-1}). Quando la concentrazione di ossigeno è molto bassa, i Tubificidi sporgono dai tubuli con l'estremità posteriore del loro corpo muovendola verso l'alto per aumentare lo scambio di ossigeno. I Chironomidi, invece, si alzano al di sopra dell'interfaccia acqua-sedimento costruendo tubuli più alti, dai quali però non escono.

Per completare l'elenco delle categorie di organismi acquatici individuate in funzione del loro habitat tipico, bisogna citare il neuston e lo psammon.

Il **neuston** (dal greco *neuo* = flottare) è costituito, come si è detto, da organismi microscopici e non che hanno come habitat la pellicola superficiale che fa da interfaccia tra acqua e aria. I primi sono protozoi e batteri mentre gli organismi di maggiori dimensioni sono prevalentemente insetti (idrometre, girinidi, collemboli, ecc.), che, grazie alla tensione superficiale, si muovono sul pelo dell'acqua (Fig. 62).



Fig. 62. *Hydrometra stagnorum*: un organismo del neuston assai comune.

Lo **psammon** (dal greco *psammos* = sabbia) è la comunità animale che vive nell'acqua interstiziale dei litorali sabbiosi. Vi fanno parte protozoi, rotiferi, tardigradi, crostacei, vermi, larve di alcuni insetti, ecc. (Fig. 63).



Fig. 63. Tardigrado: *Echiniscus* sp. (lunghezza 250 μm)

15. Le macrofite acquatiche

In stretto rapporto con il sedimento come il bentos ma in qualche modo allontanandosi da esso vivono le macrofite acquatiche, o idrofite, cioè quelle macrofite che crescono in ambienti acquatici o su substrati che almeno periodicamente vengono sommersi dall'acqua. Le macrofite acquatiche possono essere emergenti, galleggianti o sommerse. Le idrofite emergenti e sommerse sono sempre radicate nel substrato, le idrofite flottanti possono essere radicate nel substrato o liberamente galleggianti.

Le macrofite acquatiche sono distribuite nelle zone di transizione tra gli ecosistemi terrestri e acquatici. Tra di esse vi sono delle specie emergenti, che risiedono nelle acque poco profonde, e delle specie sommerse, che occupano la parte più profonda della zona litorale di un lago. In posizione intermedia si incontrano le idrofite radicate a foglie galleggianti, mentre la presenza di idrofite liberamente galleggianti è svincolata dalla profondità del substrato (Fig. 64).

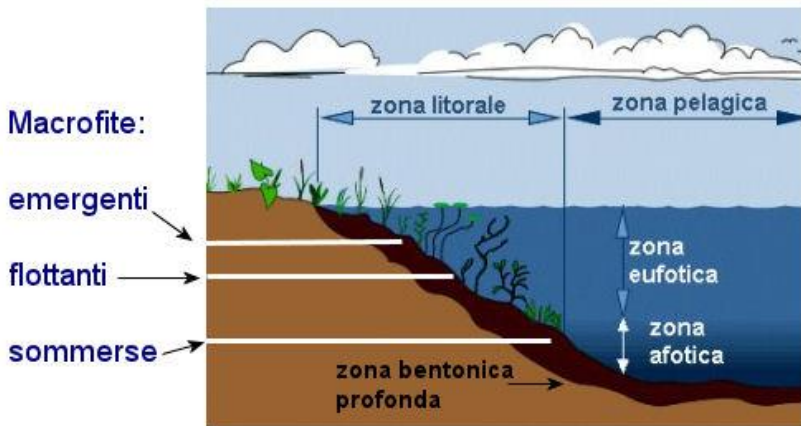


Fig. 64. Sezione della zona litorale della cuvetta lacustre e localizzazione degli insediamenti macrofitici.

Alcune idrofite tipiche dei litorali dei laghi italiani sono presentate nella figura 65.

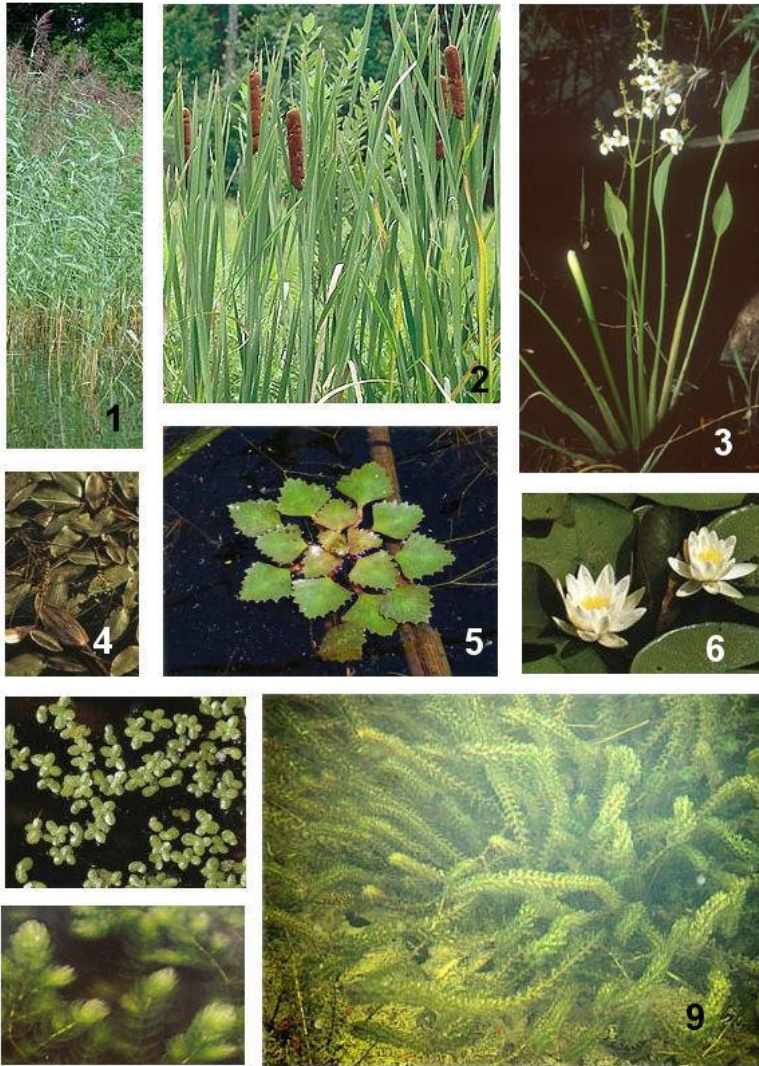


Fig. 65. Macrofite emergenti: 1) *Scirpus* sp., 2) *Thyfa* sp., 3) *Sagittaria* sp. Macrofite flottanti: 4) *Potamogeton* sp., 5) *Trapa natans*, 6) *Nymphaea alba*, 7) *Lemna minor*. Macrofite sommerse: 8) *Ceratophyllum demersum*, 9) *Elodea* sp..

Le macrofite emergenti sono piante radicate a un substrato che può essere saturo d'acqua o completamente sommerso. Sono generalmente perenni e dotate di un sistema di rizomi e di radici piuttosto esteso nel substrato. Sono piante originariamente terrestri che hanno sviluppato un adattamento ad ambienti acquatici o comunque su substrati saturi d'acqua. Come le piante terrestri sintetizzano sostanza organica dal carbonio atmosferico e dai nutrienti assunti attraverso l'apparato radicale. Questo è perenne e sopravvive durante la stagione invernale mentre la porzione aerea degenera. Le idrofite emergenti più comuni sono il *Phragmites australis* (canna palustre), lo *Scirpus*, la *Typha*, l'*Iris* sp. (giglio acquatico) e lo *Schoenoplectus lacustris* (giunco di palude), la *Carex*.

Le idrofite flottanti hanno un apparato radicale generalmente abbondante con il quale sono ancorate al substrato ed un apparato fogliare galleggiate; vivono in corpi idrici di profondità variabile tra qualche centimetro e 2–3 metri. Le idrofite flottanti più comuni sono la *Nymphaea* sp., la *Trapa natans* (castagna d'acqua), il *Potamogeton* sp. e l'*Hydrocotyle* sp. (soldinella acquatica). Anche le idrofite flottanti sintetizzano sostanza organica dal carbonio inorganico atmosferico e dai nutrienti che vengono assunti attraverso l'apparato radicale. Esistono poi idrofite liberamente galleggianti, cioè non ancorate al substrato, che utilizzano i nutrienti presenti nella colonna d'acqua. Un rappresentante di questo gruppo assai comune nelle acque stagnanti è la *Lemna minor*. Con una certa frequenza si incontrano anche idrofite liberamente galleggianti non autoctone come *Elicornia crassipes* introdotte a scopo di fitodepurazione.

Le idrofite galleggianti realizzano una copertura superficiale del bacino idrico che riduce la penetrazione della radiazione solare e la superficie di scambio con l'atmosfera. Perciò spesso la presenza di idrofite determina una forte riduzione del popolamento fitoplanctonico.

Le idrofite sommerse non posseggono parti emergenti e si trovano fino alla profondità di penetrazione della luce (circa 10–15 metri). Questi vegetali assumono il carbonio inorganico presente

nella colonna d'acqua mentre l'assunzione dei nutrienti può avvenire anche attraverso l'apparato radicale. Rappresentanti comuni di questo gruppo sono *Vallisneria* sp., *Elodea* sp.

Le macrofite sottraggono nutrienti e contaminanti dal mezzo liquido e dai sedimenti trasformandoli in biomassa vegetale che può poi essere, con relativa facilità, rimossa dal corpo d'acqua. Per questo possono svolgere una attività di fitodepurazione del corpo idrico a condizione che, prima della conclusione del loro ciclo vitale, la biomassa da esse prodotta sia esportata dall'ecosistema.

La porzione sommersa della vegetazione macrofita acquatica ha, com'è ovvio, un ruolo rilevante come rifugio e zona di riproduzione per invertebrati e vertebrati acquatici. La parte aerea, invece, assolve alle stesse funzioni per l'avifauna e i mammiferi che vivono in prossimità dei corpi d'acqua.

16. Il necton e il popolamento ittico

Il necton è costituito dagli animali acquatici capaci di spostarsi liberamente nelle acque senza subire passivamente gli spostamenti delle masse d'acqua lacustri. Negli oceani il Necton include pesci, molluschi, rettili e mammiferi marini. Nelle acque dolci si conoscono soltanto due specie di mammiferi esclusivamente acquatici: *Phoca sibirica* (Lago Baikal, Siberia) e *Phoca hispida saimensis* (distretti lacustri nel Nord della Finlandia). Esistono poi diversi mammiferi variamente adattati alla vita nell'ambiente delle acque continentali come il Castoro e la Lontra, ormai rari in Europa, e la Nutria, roditore del centro-sud america che sta invadendo laghi e fiumi italiani. Negli ambienti d'acqua dolce europei sono pure presenti rettili e anfibi.

Il popolamento ittico

Nonostante l'indubbio interesse naturalistico e zoologico di questi vertebrati, nei laghi il popolamento ittico costituisce la componente del necton di gran lunga più importante ed è normalmente considerato il vertice della catena alimentare lacustre. Ma molte specie di pesci che popolano i laghi in realtà non sono l'anello terminale della catena alimentare perché, accanto ai predatori che si nutrono di altri pesci, ci sono specie carnivore che si nutrono però di zooplancton o di bentos e anche specie erbivore e detritivore, che si nutrono di vegetali o di detrito organico. Inoltre, la dieta di molte specie varia con l'età o con la disponibilità di cibo.

La composizione specifica del popolamento ittico di un lago dipende dalla morfologia del lago stesso, che ne influenza il regime termico, dal suo chimismo (in particolare dalla disponibilità di ossigeno) e, infine, dalle sue caratteristiche biologiche che determinano qualità e quantità di alimento disponibile. Nella tabella 14 sono elencate le specie autoctone italiane e nella tabella 15 le specie autoctone endemiche.

Tab. 14. Elenco delle specie autoctone italiane secondo Bianco (1976) e indicazione della loro relativa abbondanza (Abb.), del regime alimentare (Alim.) e del valore (Val.) per l'alimentazione umana.

Abbondanza: A: abbondante, S: scarso, R: raro, E: in estinzione.

Alimentazione: B: bentofago, Z: zoofago, I: ittiofago, On: onnivoro, P: planctofago.

Valore alimentare: O: ottimo, D: discreto, S: scarso, N: nullo.

Specie	Abb.	Alim.	Val.
<i>Acipenser sturio</i> (storione comune)	E	B	O
<i>Acipenser naccari</i> (storione cobice)	R	B	D
<i>Huso huso</i> (storione ladano)	E	B	O
<i>Anguilla anguilla</i> (anguilla)	A	B	D
<i>Salvelinus alpinus</i> (salmerino alpino)	R	Z	O
<i>Thymallus thymallus</i> (temolo)	E	Z	O
<i>Esox lucius</i> (luccio)	S	I	D
<i>Rutilus rubilio</i> (triotto)	A	Z	S
<i>Rutilus pigus</i> (pigo)	S	Z	S
<i>Leuciscus cephalus cabeda</i> (cavedano)	molto A	On	S
<i>Leuciscus cephalus alba</i> (cavedano)	A	On	S
<i>Phoxinus phoxinus</i> (sanguinerola)	R	Z	N
<i>Tinca tinca</i> (tinca)	A	On	D
<i>Scardinius erythrophthalmus</i> (scardola)	A	Z	S
<i>Alburnus alburnus alborella</i> (alborella)	molto A	P	S
<i>Chondrostoma toxostoma</i> (lasca)	A	B	S
<i>Gobio gobio</i> (gobione)	E	B	N
<i>Barbus barbus plebejus</i> (barbo)	A	B	S
<i>Barbus meridionalis</i> (barbo canino)	A	B	S
<i>Noemacheilus barbatulus</i> (cobite barbatello)	S	B	N
<i>Lota lota</i> (bottatrice)	S	B	D
<i>Atherina boyeri</i> (latterino di lago)	A	P	S
<i>Aphanius fasciatus</i> (nono)	S	P	N
<i>Gasterosteus aculeatus</i> (spinarello)	A	P	N
<i>Cottus gobio</i> (scazzone)	R	B	N
<i>Perca fluviatilis</i> (persico reale)	S	I	O
<i>Blennius fluviatilis</i> (cagnetto)	A	B	N
<i>Knipowitschia panizzai</i> (ghiozzo)	A	B	N

Tab. 15. Elenco delle specie autoctone endemiche del territorio italiano (Bianco, 1976) e indicazione della loro relativa abbondanza (Abb.), del regime alimentare (Alim.) e del valore (Val.) per l'alimentazione umana.

Abbondanza: A: abbondante, S: scarso, R: raro, E: in estinzione.

Alimentazione: B: bentofago, Z: zoofago, I: ittiofago, On: onnivoro, P: planctofago.

Valore alimentare: O: ottimo, D: discreto, S: scarso, N: nullo.

Specie	Abb.	Alim.	Val.
<i>Alosa fallax lacustris</i> (agone)	S	P	D
<i>Salmo trutta fario</i> (trota di torrente)	A	Z	O
<i>Salmo trutta macrostigma</i> (trota sarda)	S	Z	O
<i>Salmo trutta lacustris</i> (trota di lago)	R	Z	O
<i>Salmo trutta marmoratus</i> (trota marmorata)	S	Z	O
<i>Salmo carpio</i> (carpione)	E	P	O
<i>Chondrostoma soetta</i> (savetta)	S	B	S
<i>Leuciscus souffia muticellus</i> (vairone)	A	Z	D
<i>Alburnus vulturius</i>	A	P	S
<i>Cobitis taenia bilineata</i> (cobite)	S	B	N
<i>Cobitis taenia zanandreae</i> (cobite)	A	B	N
<i>Sabanejewia larvata</i> (cobite)	S	B	N
<i>Sabanejewia cospersa</i> (cobite)	S	B	N
<i>Gobius nigricans</i> (ghiozzo di fiume)	E	B	N
<i>Padagogobius martesi</i> (ghiozzo di fiume)	E	B	N

Temperatura dell'acqua e specie ittiche

La temperatura dell'acqua condiziona molto la fauna ittica perché i pesci non dispongono di meccanismi fisiologici che permettano loro di regolare la temperatura corporea. Sono, quindi, stenotermi freddi o stenotermi caldi poiché non tollerano elevate escursioni termiche nell'ambito di un clima freddo o caldo, rispettivamente.

Nella zona temperata vivono specie ittiche stenoterme fredde appartenenti ai Salmonidi (trota, salmerino, coregone) e anche ai Gadidi (bottatrice) e specie stenoterme calde, che appartengono

principalmente ai Ciprinidi (scardola, triotto, carpa, tinca) ma anche ai Percidi (persico, persico trota) e ai Siluridi (pesce gatto), (Fig.66).

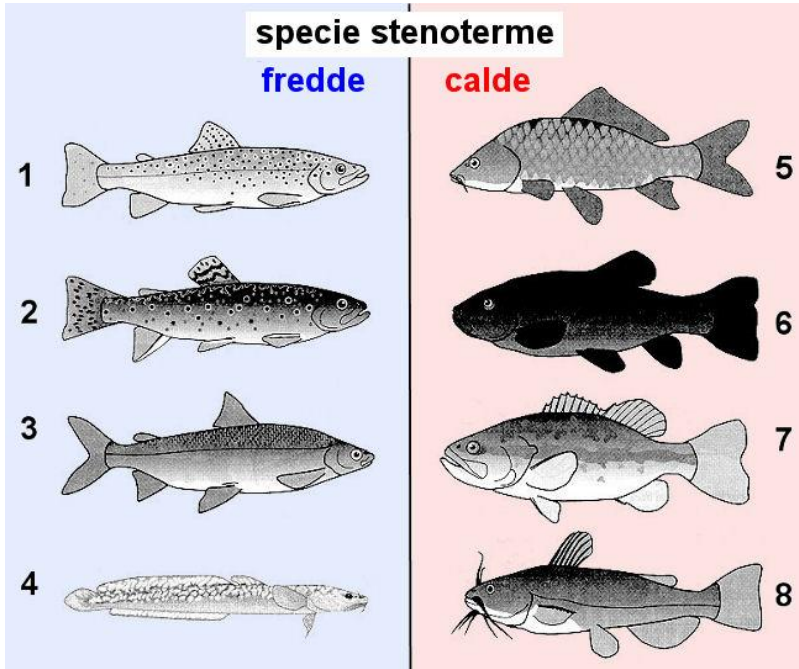


Fig. 66. Optimum termico di alcune specie ittiche comuni nei laghi italiani. 1: trota, 2: salmerino, 3: coregone, 4: bottatrice, 5: carpa, 6: tinca, 7: persico trota, 8: pesce gatto.

I grandi laghi profondi sudalpini presentano una evoluzione termica stagionale che permette a questi due gruppi di coesistere perché l'epilimnio, dove anche in inverno la temperatura non scende mai sotto i 6°C circa, può ospitare le specie stenoterme calde mentre nell'ipolimnio possono vivere le specie stenoterme fredde poiché anche in estate vi sono strati dove la temperatura non supera i 15°C circa. Nei laghi piccoli e poco profondi (profondità inferiore a 10-15 m) non vivono le specie stenoterme fredde perché nella stagione estiva vengono ampiamente superati i limiti di tollerabilità. Nei laghi piccoli di alta montagna (fino a

1800–2000 m s.l.m.) la fauna ittica presente è limitata a trota, salmerino e sanguinerola. Poiché temperatura ambientale condiziona il metabolismo dei pesci in tutte le sue espressioni (nutrizione, respirazione, accrescimento, riproduzione, migrazione), ciascuna specie ricerca la temperatura ottimale per le attività vitali prevalenti del momento.

Concentrazione di ossigeno disciolto e specie ittiche

Le specie ittiche d'acqua dolce sono adattate a tollerare un certo ambito di variazione della concentrazione di ossigeno necessaria per la normale respirazione e alcune possono sopravvivere anche a concentrazioni molto basse. Nelle tabella 16 sono schematizzate le esigenze di ossigeno di alcune specie di pesci comuni nei laghi dell'area mediterranea.

Tab. 16. Fabbisogno di ossigeno di alcune specie ittiche comuni nei laghi della zona temperata.

Specie	Concentrazione O ₂ (ml L ⁻¹)	
	ottimale	minima accettabile
trota, sanguinerola, cobite	7–11	6
temolo, pigo, barbo, bottatrice	5–7	5
triotto, scardola, cavedano	5–6	4
carpa, tinca, pesce gatto	5–6	1–2

Il consumo di ossigeno da parte dei pesci non è costante ma varia con l'età, lo stato di attività e le condizioni di vita del pesce (Tab. 17). Nelle specie adattate a vivere in situazioni di periodiche diminuzioni di concentrazione di ossigeno si ha una riduzione dell'attività per ridurre al minimo il consumo di ossigeno.

Tab. 17. Esempi di consumo di ossigeno da parte dei pesci.

	in attività	a riposo
Salmerino a 20°C	390 ml kg ⁻¹ ora ⁻¹	100 ml kg ⁻¹ ora ⁻¹
Carassio a 20°C	120 ml kg ⁻¹ ora ⁻¹	60 ml kg ⁻¹ ora ⁻¹
Carassio a 30°C	260 ml kg ⁻¹ ora ⁻¹	120 ml kg ⁻¹ ora ⁻¹

Alimentazione dei pesci

All'uscita dall'uovo le larve dei pesci presentano una struttura, il sacco vitellino (Fig. 67), contenente una riserva di sostanze nutritive che permette alla larva di sopravvivere per giorni o settimane, a seconda della specie, senza assumere alimento dall'ambiente. Esaurita tale scorta, i piccoli pesci si nutrono di organismi planctonici che possono cacciare a vista essendo dotati di occhi ben sviluppati.



Fig. 67. Avannotto di trota con il sacco vitellino.

Questa alimentazione è generalizzabile ai giovani di tutte le specie ittiche e si protrae almeno per tutta la prima stagione di accrescimento. Dopo il primo anno di vita, o dopo il secondo-terzo in alcuni casi, l'alimentazione può cambiare radicalmente e il pesce acquisisce le abitudini alimentari tipiche della sua specie. Una schematizzazione diffusa delle abitudini alimentari dei pesci, li vede suddivisi nel modo seguente:

- erbivori (o consumatori primari), sono i pesci che si cibano di piante acquatiche e alghe filamentose (es. la savetta, *Chondrostoma soetta*);
- carnivori (o consumatori secondari); sono i pesci che si cibano di zooplancton o di bentos (es. il coregone, *Coregonus* sp., il persico sole, *Lepomis gibbosus*);
- predatori (o consumatori terziari); sono i pesci che si cibano di altri pesci o di altri vertebrati, ad esempio il luccio (*Esox lucius*) e la sandra (*Stizostedion lucioperca*).

Questa schematizzazione ha un valore indicativo e limitato perché le abitudini alimentari dei pesci possono cambiare in funzione del tipo di cibo disponibile. Per esempio, un pesce predatore come la trota può nutrirsi esclusivamente di plancton e bentos in laghi di montagna dove manchino i pesci che costituiscono la sua preda. Molte specie soprattutto di Ciprinidi sono in realtà onnivore perché si adattano a diversi tipi di alimento essendo dotate di un notevole opportunismo alimentare. Esistono poi peculiari adattamenti anatomici che migliorano, in certe specie, l'efficienza di assunzione di un determinato alimento (Fig. 68). Così i predatori sono dotati di bocca grande e denti sulle mascelle o nel cavo orale mentre i detritivori e gli erbivori hanno bocca in posizione ventrale e barbigli con funzione sensoria.

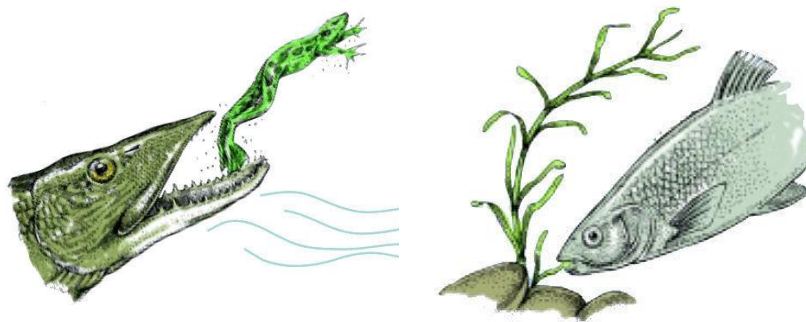


Fig. 67. Apparato boccale di un pesce carnivoro (luccio) e di un erbivoro (savelta).

Si avranno, ovviamente, adattamenti morfologici corrispondenti anche a livello di apparato digerente, dotato di uno stomaco differenziato nei carnivori che è invece assente negli erbivori e onnivori. L'intestino ha una lunghezza maggiore nei pesci prevalentemente erbivori: nella carpa erbivora è oltre 10 volte la lunghezza del pesce mentre nel luccio è di poco inferiore alla lunghezza dell'animale.

Quantità di alimento

La quantità di cibo assunta da un pesce è in primo luogo regolata dalla richiesta metabolica dell'animale; quindi il fabbisogno

alimentare di un pesce in fase di accrescimento è maggiore di quello di un pesce adulto, soggetto ad un accrescimento molto più limitato. Durante il periodo riproduttivo l'assunzione di cibo è minima o addirittura nulla, per riprendere intensamente a deposizione delle uova avvenuta.

Anche fattori esterni influenzano l'assunzione di cibo: la diminuzione di temperatura nella stagione fredda, per esempio, rallenta l'attività del pesce che ridurrà considerevolmente l'alimentazione e, allo stesso tempo, il dispendio energetico. Anche la luminosità ambientale influisce sull'assunzione di alimento; si è visto che il massimo di attività alimentare si ha con bassa luminosità come quella che si ha nei primi metri d'acqua all'alba e al tramonto.

La quantità di cibo assunto è inoltre legata alla disponibilità di preda o comunque di alimento, che dipenderà dalla produttività dell'ambiente. Il popolamento ittico può però ridurre di molto la sua base alimentare se la pressione predatoria che esso esercita sulla popolazione preda arriva a ridurla drasticamente. In un ambiente naturale equilibrato esistono meccanismi di regolazione del popolamento ittico, come la competizione alimentare, che gli permettono di convivere convenientemente con la sua base alimentare senza arrivare a distruggerla.

La competizione per il cibo può avvenire tra individui della stessa specie (competizione intraspecifica) e il suo effetto è di selezionare gli individui più abili nel procurarsi il cibo perché questi potranno avere un accrescimento migliore e più rapido e riprodursi con successo. La competizione alimentare può interessare anche specie diverse (competizione interspecifica) che però si nutrono dello stesso cibo. Questa competizione, che può portare alla scomparsa di una delle due specie, si verifica spesso in conseguenza dell'introduzione di specie esotiche.

Come si è illustrato sopra il clima termico e chimico di in lago influenza i pesci che vi abitano direttamente e indirettamente, determinando qualità e quantità di alimento. Tenendo conto di questo fatto, si possono individuare tre tipi di laghi con caratteristiche

simili e, quindi, con in grado di ospitare tre tipi di popolamento ittico diverso: i grandi laghi profondi, i piccoli laghi poco profondi e i laghi alpini d'alta quota.

Bisogna però ricordare che le specie costituenti il popolamento ittico di un certo lago possono variare qualitativamente e quantitativamente per cause naturali o a opera dell'uomo (attività di pesca, pratiche di ripopolamento, introduzione intenzionale o accidentale di nuove specie, fenomeni di inquinamento).

Fauna ittica e tipi di lago

La fauna ittica dei grandi laghi profondi può essere schematicamente suddivisa in due popolamenti principali: uno pelagico, costituito principalmente da Salmonidi, e uno litorale e sublitorale, costituito principalmente da Ciprinidi, Percidi e Centrarchidi.

Come si è detto, nei laghi profondi la presenza di un ipolimnio ben ossigenato e con una temperatura inferiore a 15–17 °C anche in estate permette l'insediamento nella zona pelagica di specie frigidostenoterme e ossifile (ad esempio, specie di Salmonidi).

Originariamente nel pelago dei grandi laghi sud alpini era prevalente la presenza della trota lacustre (*Salmo trutta lacustris*), del clupeide alosa (*Alosa fallax lacustris*) e del piccolo ciprinide alborella (*Alburnus alburnus alborella*). Nel Lago di Garda deve essere ricordata la presenza di un salmonide endemico: il carpione (*Salmo trutta carpio*). Dalla seconda metà del 1800 è stato introdotto nei laghi del nord e del centro Italia il coregone (*Coregonus* sp.), originario dei laghi a Nord delle Alpi. Questa specie è giunta a costituire un popolamento molto importante in molti laghi, oggetto anche di una pesca professionale rilevante.

Le specie ittiche pelagiche hanno abitudini alimentari esclusivamente zooplanctofagiche o, come nel caso delle trote di taglia superiore a 35–40 cm, ittiofagiche.

Il popolamento ittico litorale dei grandi laghi è costituito da Ciprinidi, principalmente con scardola (*Scardinius erythro-*

phthalmus), cavedano (*Leuciscus cephalus*) e triotto (*Rutilus rubilio*). L'alborella, considerata specie pelagica, compie tuttavia frequenti migrazioni stagionali nella zona litorale. Nelle acque poco profonde e con vegetazione acquatica abbondante, si trovano la carpa (*Cyprinus carpio*) e la tinca (*Tinca tinca*). Nella zona sublitorale o litorale rocciosa vivono anche i ciprinidi pigo (*Rutilus pigus*) e savetta (*Chondrostoma soetta*) e in prossimità dello sbocco a lago di immissari si può trovare il barbo (*Barbus barbus plebejus*). I Ciprinidi vengono generalmente considerati onnivori, con variabile propensione verso organismi planctonici o bentonici, verso altri pesci, come nel caso del cavedano, o verso vegetali.

Nella zona litorale si trovano predatori ittiofagi come il luccio (*Esox lucius*), il persico (*Perca fluviatilis*) e il persico trota (*Micropterus salmoides*), introdotto nelle acque italiane all'inizio del novecento dal Nord America.

Nella zona litorale e sublitorale dei grandi laghi si trova anche il gadide bottatrice (*Lota lota*), che abita le zone sublitorali rocciose, il persico sole (*Lepomis gibbosus*), un piccolo centrarchide introdotto dal Nord America, l'anadroma anguilla (*Anguilla anguilla*), il cottide scazzone (*Cottus gobio*).

Infine, i grandi laghi sud alpini, connessi al Mare Adriatico attraverso il reticolo idrografico del Po, erano raggiunti in passato (fino ai primi decenni del secolo scorso) dall'alosa (*Alosa fallax nilotica*), un clupeide anadromo che vi migrava per la riproduzione.

Il popolamento ittico dei piccoli laghi è simile a quello della zona litorale dei grandi laghi. In questi ambienti per l'assenza di una zona pelagica non sopravvivono i Salmonidi ai quali appartengono soltanto specie frigidostenoterme. Inoltre i piccoli laghi poco profondi sono spesso più produttivi e possono quindi presentare deficit di ossigeno negli strati profondi, fatto che permette la sopravvivenza soltanto a specie meno esigenti, come sono quelle appartenenti ai Ciprinidi.

La scardola, zooplanctofaga, costituisce la specie numericamente dominante e giunge a occupare la nicchia lasciata libera dall'alborella allontanata dal progredire dell'eutrofizzazione. Sono pure presenti carpa e tinca, che tollerano bene basse concentrazioni di ossigeno disciolto ed hanno una base alimentare ampia (macroinvertebrati, vegetali, detrito organico, ecc.). Le specie ittiofaghe sono anche qui il luccio, il persico e il persico trota. È ormai sempre presente anche il persico sole, che ha invaso le acque litorali di quasi tutti i laghi italiani.

Il popolamento ittico dei laghi alpini d'alta quota, quando è presente, cosa possibile comunque soltanto in laghi a quota inferiore a 1800 m s.l.m., è costituito dalla trota (*Salmo trutta fario*) e dal piccolo ciprinide sanguinerola (*Phoxinus phoxinus*), che garantisce un buon apporto alimentare per gli individui adulti di trota. In generale in questi ambienti i pesci sono naturalmente assenti, poiché non sono in grado di compiere il loro ciclo vitale a causa della scarsità di alimento. Infatti, i laghi alpini d'alta quota sono normalmente ambienti poco produttivi perché, a causa del clima, la loro superficie è sgombra dai ghiacci solamente per un breve periodo estivo (due-tre mesi).

La produzione ittica, cioè la quantità di pesce prodotta in un certo periodo di tempo per unità di superficie di un determinato ambiente, viene espressa in grammi per metro quadro per anno ($\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$) o in chilogrammi per ettaro per anno ($\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Negli ambienti artificiali (stagni adibiti ad allevamento) dove i pesci adulti vengono tutti pescati alla fine del periodo di allevamento, il peso del raccolto tende a coincidere con la produzione dell'ambiente. Negli ambienti naturali, invece, il raccolto coincide con il pescato, cioè è soltanto quella parte di produzione ittica che viene raccolta con la pesca. Per conoscere la reale capacità produttiva di una lago bisognerebbe misurare anche abbondanza, accrescimento e mortalità della parte di popolazione non pescata. Questi parametri non possono essere misurati direttamente ma devono

essere stimati, e questo rende assai incerte le stime di produzione ittica degli ambienti naturali.

La produzione ittica di un ambiente acquatico è, ovviamente, dipendente dalla produttività dei primi anelli della sua catena alimentare, cioè dal suo stato trofico, che influenza anche la qualità del pescato (Tab. 18).

Tab. 18. Produttività ittica e stato trofico dei laghi.

tipo di lago:	Oligotrofo →	Mesotrofo →	Eutrofo
produttività	scarsa	media	abbondante
popolamento ittico:	Salmonidi →	Percidi, Centrarchidi →	Ciprinidi
produz. ittica (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)	3–30	30–60	più di 100

La pesca deve essere adeguata alle caratteristiche ecologiche dell'ambiente per essere una attività compatibile con l'ecosistema naturale e per mantenere la possibilità di continuare anno dopo anno il prelievo di pesce. La pesca può, infatti, influenzare negativamente la produzione ittica:

- direttamente: con lo sfruttamento eccessivo dell'ambiente (per es., con l'uso di tecniche di pesca più efficaci che in passato), con lo sfruttamento troppo selettivo dell'ambiente, concentrando lo sforzo di pesca su poche specie di elevato valore commerciale (pesca professionale) o ricreativo (pesca sportiva);
- indirettamente: con l'uso di pratiche gestionali inadatte per compensare l'eccessivo prelievo ittico. È il caso dell'introduzione di specie alloctone o di specie incompatibili con le caratteristiche ambientali.

Pratiche di ripopolamento

Le pratiche di ripopolamento sono volte a contrastare l'evoluzione naturale della composizione numerica delle varie specie, la diminuzione legata all'attività di pesca o la mortalità da inquinamento. Queste pratiche, che sono tuttora un obbligo di legge per

i proprietari dei diritti di pesca a compensazione dello sfruttamento ambientale e per i responsabili di fenomeni di inquinamento a riparazione del danno ambientale, sono state massicciamente usate a cavallo tra il XIX e il XX secolo con l'idea di migliorare la produzione ittica di un ambiente.

In "Stabilimenti Ittiogenici" era effettuata la fecondazione artificiale delle specie più pregiate e più pescate e le uova fecondate erano poi assegnate alle "Società di Pesca" perché le immettessero a sostegno di un popolamento preesistente (assumendo che la natalità naturale fosse insufficiente) oppure realizzassero una introduzione di una specie nuova per l'ambiente per migliorare l'attività di pesca.

In realtà le successive ricerche mostrano che la quantità di uova prodotte da ogni specie ittica è tale da garantirne la presenza nell'ambiente naturale con una abbondanza adeguata alle condizioni ambientali e alla disponibilità di cibo offerte dell'ambiente. Per questo un crollo numerico di una popolazione ittica dovrebbe spingere a identificarne le cause piuttosto che a compensarne gli effetti con l'immissione di novellame. Sarebbe infatti insensato immettere nuovi avannotti se la popolazione avesse subito un danno per un eccesso di predazione, magari legata alla presenza di predatori recentemente introdotti, o per un episodio di inquinamento.

Introduzione intenzionale di nuove specie

Molte specie tra quelle attualmente presenti negli ambienti lacustri italiani sono il risultato di introduzioni intenzionali, realizzate per ragioni economiche, tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo. Le specie che hanno avuto maggior successo divenendo parte integrante della composizione specifica dei laghi italiani sono il coregone (*Coregonus* sp.) e il persico trota (*Micropterus salmoides*).

L'introduzione del coregone è stata effettuata per l'elevato valore commerciale di questa specie e per la sua adattabilità alle caratteristiche ambientali soprattutto dei nostri grandi laghi pede-

montani. Il coregone “Lavarello” proveniente dal Lago di Costanza fu introdotto nel Maggiore e nel Como a partire dal 1861 da F. De Filippi. Questo primo tentativo di introduzione ebbe risultati modesti ma, a partire dal 1885, a opera di Pietro Pavesi furono nuovamente immessi avannotti di (*Coregonus schinzii helveticus*) nel Lago di Como prima e nel Lago Maggiore poi. Successivamente l'introduzione fu effettuata in altri laghi del nord e centro Italia. Dal 1950 un altro coregone è stato introdotto nelle acque dei laghi italiani. In quell'anno, infatti, il Dipartimento di Caccia e Pesca del Canton Ticino decise di comune accordo con le Autorità Italiane, per ragioni di maggior commerciabilità, l'introduzione di un coregone di taglia inferiore a quella del “Lavarello”. Fu così eseguita nelle acque del Lago Maggiore e del Lago di Lugano l'introduzione del coregone “Bondella” (*Coregonus macrophthalmus*) del Lago di Neuchâtel. Tale introduzione, che non ebbe risultato positivo nel Lago di Lugano, riuscì felicemente nel Lago Maggiore. In questo lago, infatti, a partire dal 1957 cominciarono ad essere catturati alcuni esemplari e dal 1962 le catture assunsero quantità commerciali.

Questo secondo coregone (comunemente chiamato “bondella”), che tra le due forme presenti attualmente nel Lago Maggiore costituisce quella numericamente più importante, non ha tuttavia eliminato per competizione la prima, né con essa si è ibridata. Le due forme hanno però perso le caratteristiche sistematiche delle popolazioni di provenienza; per questa ragione vengono entrambe indicate come *Coregonus* sp., pur essendo due popolazioni distinte che vivono “simpatricamente” nel Lago Maggiore.

Introduzioni accidentali di nuove specie

Questo tipo di introduzione può comportare danni gravi alla struttura del popolamento ittico degli ambienti lacustri perché i competitori delle specie autoctone, introdotti in un ambiente dal quale sono assenti i loro naturali predatori, possono andare incontro a una esplosione demografica tale da compromettere l'esistenza del popolamento originario.

L'introduzione accidentale è relativamente frequente ed è legata a trasporto, commercializzazione e importazione di materiale ittico vivo anche per pratiche ittiogeniche spesso gestite privilegiando la produzione ittica anche a scapito dell'ecosistema nel suo complesso. All'introduzione accidentale si deve, ad esempio, la diffusione del pesce gatto (*Ictalurus melas*), introdotto dal Nord America nelle marcite da canapa e lino per ottimizzarne la produttività e poi diffusosi attraverso la rete idrografica e per trasporto accidentale con altro materiale ittico in numerosi laghi dell'Italia settentrionale. Anche il pesce siluro (*Silurus glanis*), specie originaria del Nord-Est Europa è stato introdotto negli anni '70 da pescatori dilettanti in piccoli ambienti lacustri adibiti a pesca sportiva. In seguito è stato introdotto nel Po e recentemente si sono catturati esemplari di questa specie nel Lago di Garda, nel Fiume Ticino, nel Lago Maggiore e nel Lago di Lugano. Il problema delle introduzioni accidentali non riguarda soltanto il nostro continente. Recentemente si sono rinvenuti in alcuni fiumi cileni dei salmoni (*Salmo salar*) probabilmente fuggiti da allevamenti in gabbie ancorate lungo le coste del Cile meridionale. Ci si aspetta che questa specie tra breve possa essere reperita anche a Est delle Ande data l'esistenza in quella regione di fiumi che attraversano lo spartiacque Argentino-Cileno dato che, pur nascendo nel lato Est della Catena Andina, poi la attraversano e vanno a gettarsi nell'Oceano Pacifico.

17. Trasferimenti di materia e di energia nei laghi

L'energia che entra nell'ecosistema lago come radiazione solare è trasformata in energia chimica, cioè in sostanza organica, dalle alghe con la fotosintesi. Nel trasferimento lungo la catena alimentare l'energia va rapidamente dissipandosi e la materia progressivamente disorganizzandosi poiché le efficienze ecologiche sono piuttosto basse. Il passaggio da un livello trofico al successivo è realizzato da meno del 10% dell'energia e della materia originariamente presenti al livello di partenza. La conseguenza di questo fatto è che le comunità risultano in generale strutturate in modo che se ciascun livello trofico viene rappresentato come un rettangolo di area proporzionale al contenuto di materia del livello, si ottiene una struttura piramidale con alla base i produttori primari e in cima i carnivori. I grafici che si ottengono sono le note piramidi di biomassa. Le piramidi delle energie hanno una struttura simile poiché l'accumulo di biomassa corrisponde, anche se non in modo lineare, a un accumulo di energia.

Quando si è parlato dei popolamenti delle acque interne (cap. 12) si sono illustrati, alla luce delle peculiarità dell'ambiente subacqueo, i motivi che rendono gli ecosistemi acquatici particolarmente idonei alla vita degli organismi autotrofi e, più in generale, degli organismi di piccole dimensioni. Se, tenendo conto di questo, si costruisce una piramide delle biomasse per l'ecosistema lago che includa anche il detrito organico e che ponga l'accento più sulle dimensioni che sulle funzioni dei costituenti i vari comparti, si ottiene una piramide delle biomasse simile a quella presentata nella figura 69, basata su dati relativi al Lago Maggiore. Come si vede, oltre il 90% della biomassa presente nel lago è confinata in organismi grandi al massimo qualche centinaio di micron. Questo risultato è simile a quanto si è trovato in molti altri ambienti lacustri.

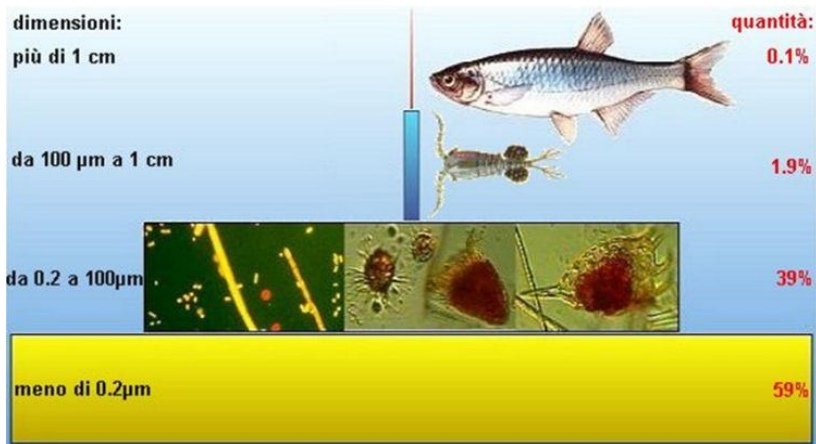


Fig. 69. Piramide delle biomasse presenti nelle diverse classi dimensionali nel Lago Maggiore. Il contenuto in sostanza organica della frazione disciolta e del plancton è stato valutato analiticamente e la piramide è basata su valori medi annuali. La sostanza organica del popolamento ittico è stata stimata dai dati relativi al pescato annuale.

Una ulteriore considerazione, che scaturisce dall'esame delle caratteristiche ecofisiologiche degli organismi costituenti i popolamenti dei laghi, è che la catena alimentare semplice descritta nel capitolo 12 rappresenta una semplificazione perché non tiene conto del fatto che alcune specie possono occupare livelli trofici diversi. Per illustrare le relazioni complesse che intercorrono tra gli organismi che vivono nel lago sarebbe meglio inserirli in una rete trofica. Ma anche questo schema è carente perché i meccanismi di competizione e di predazione possono coesistere (Fig. 70). Inoltre, stanno emergendo evidenze sempre maggiori del fatto che, soprattutto a livello microbico, l'attribuzione esclusiva di certe funzioni a certi organismi è irrealistica perché le funzioni possono variare al mutare delle condizioni ambientali. Così il batterioplancton può assumere il ruolo prevalente di dissipatore dell'eccesso di energia chimica prodotta o può attuare un metabolismo più rivolto alla conversione di tale energia in biomassa, cioè in cibo per gli organismi fagotrofi (cap. 13). I mixotrofi possono, in misura diversa a seconda delle condizioni ambientali e

delle specie, collocarsi nella parte vegetale o animale della catena alimentare. E anche al vertice della catena, nella fauna ittica, popolazioni con una rigidità alimentare molto spinta possono coabitare con popolazioni dotate di ampia plasticità per quanto riguarda la base alimentare.

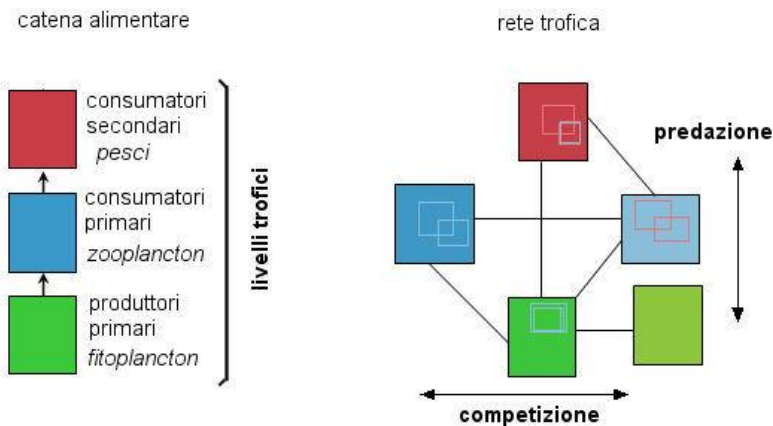


Fig. 70. La complessità dei rapporti tra gli organismi nell'ecosistema. Nel modello semplice, a catena alimentare, alcune specie possono occupare livelli trofici diversi. Nel modello, più complesso, a rete trofica, le interazioni di predazione e competizione possono coesistere.

Senza entrare nel dettaglio dei modelli che descrivono i rapporti tra organismi, tra l'altro ampiamente analizzati nei testi di ecologia, quello che è importante sottolineare è che nei laghi la plasticità funzionale soprattutto degli organismi di piccole dimensioni può modificare l'intensità e la direzione dei processi e, in definitiva, cambiare la struttura della piramide delle biomasse.

Modifica dei flussi di materia ed energia ed evoluzione trofica del lago

Le vicende che portano al cambiamento dei flussi di materia e di energia nel lago determinano l'evoluzione del suo stato trofico, cioè dell'abbondanza di sostanza organica e di organismi nelle

sue acque. La transizione dallo stato originario di oligotrofia, caratterizzato da scarsità di nutrienti e di popolamenti animali e vegetali, a quello di mesotrofia e infine di eutrofia, è determinata dal progressivo aumento di concentrazione dei nutrienti, in particolare azoto e fosforo, che sono i principali fattori limitanti della produzione algale. Se questi nutrienti sono largamente disponibili, la produzione fotosintetica cresce fino a raggiungere livelli tali che la sostanza organica prodotta non riesce più ad essere mineralizzata dai popolamenti batterici. La conseguenza è l'accumulo sul fondo del lago per sedimentazione di detrito organico che culminerà con l'interrimento del lago stesso. La sequenza di eventi che culmina in questo risultato è schematicamente illustrata nelle figura 71 a, b, c.

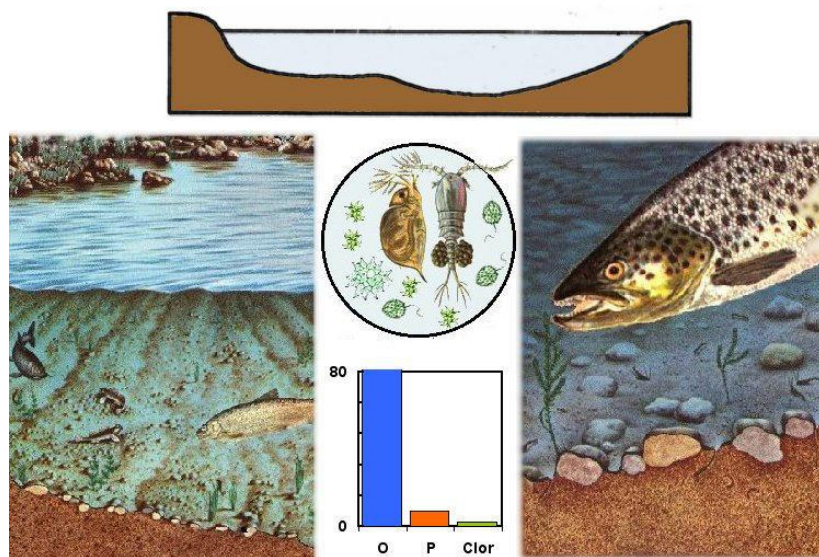


Fig. 71 a. In alto: sezione della cuvetta lacustre; il deposito sedimentario sul fondo è modesto. Al centro, nel tondo un campo microscopico con il plancton, costituito da zooplancton e poco fitoplancton. Il grafico sottostante mostra l'ossigeno al fondo (% di saturazione) e la concentrazione ($\mu\text{g L}^{-1}$) di fosforo (P) e clorofilla (Clor) nelle acque pelagiche. A sinistra è rappresen-

tata la zona litorale, con buon popolamento ittico e scarsa presenza di idrofite. A destra un'immagine del fondo in prossimità del quale possono vivere anche i salmonidi.

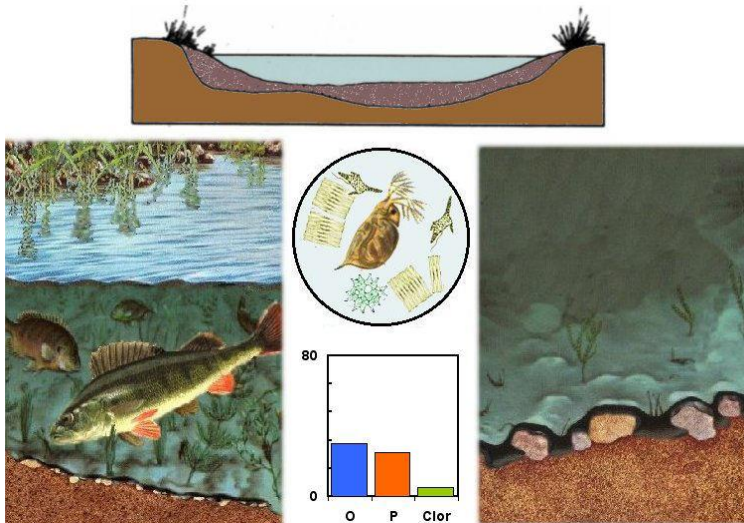


Fig. 71 b. In alto: sezione della cuvetta lacustre; il deposito sedimentario sul fondo è importante. Al centro, nel tondo un campo microscopico con il plancton, con prevalenza di fitoplancton. Il grafico mostra l'ossigeno al fondo (% di saturazione) che può ridursi a 0 in estate. La concentrazione ($\mu\text{g L}^{-1}$) di fosforo (P) e clorofilla (Clor) nelle acque pelagiche è aumentata. A sinistra è rappresentata la zona litorale, con un popolamento ittico a percidie e ciprinidi e abbondante presenza di idrofite. A destra un'immagine del fondo con una evidente copertura di sedimenti e assenza di pesci almeno durante l'anossia estiva.

Il progressivo ampliamento dei compartimenti che sono alla base della piramide delle biomasse esercita un controllo dal basso (bottom up) dei successivi anelli della catena alimentare. Un tale ampliamento procede accompagnato dalle degenerazioni qualitative della massa d'acqua lacustre già illustrate nei capitoli precedenti:

- la diminuzione della trasparenza per l'aumento del materiale particellato sospeso,
- la periodica produzione massiva di ingenti biomasse di determinate specie di alghe (fioriture algali), talvolta sostenuta da specie tossiche

- l'anossia dovuta al consumo ipolimnetico di ossigeno per ossidare l'eccesso di sostanza organica prodotta nella zona eufotica,
- la produzione ipolimnetica di cataboliti (acido solfidrico, ammonio, nitriti) tossici per invertebrati e vertebrati,
- l'alterazione qualitativa delle specie dei vari livelli trofici imposta dalle modificazioni chimiche e fisiche dell'ambiente subacqueo.

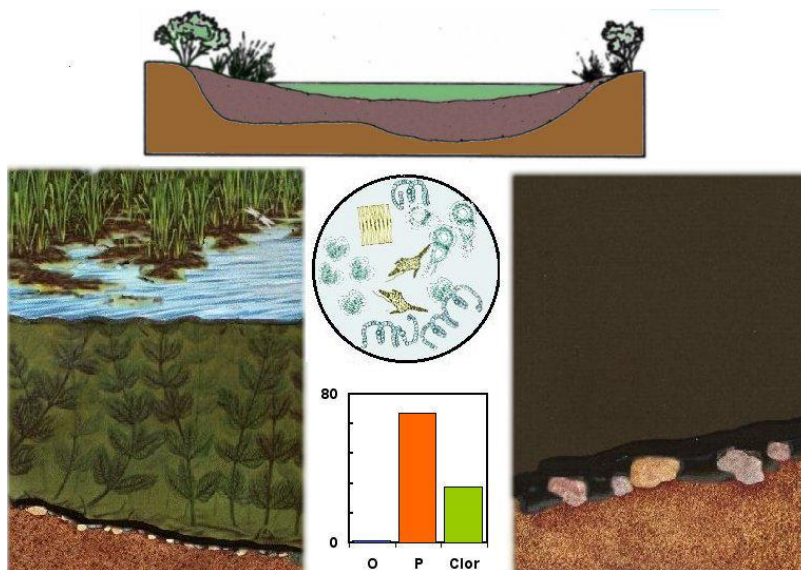


Fig. 71 c. In alto: sezione della cuvetta lacustre; il deposito sedimentario sul fondo ha quasi riempito il lago e la vegetazione terrestre occupa ormai l'area prima occupata dalle acque. Al centro, nel tondo un campo microscopico con il plancton, costituito in maggioranza da un fitoplancton dominato da alghe filamentose e cianobatteri. Il grafico mostra che l'ossigeno al fondo (% di saturazione) è assente e questa situazione è permanente. La concentrazione ($\mu\text{g L}^{-1}$) di fosforo (P) e clorofilla (Clor) nelle acque pelagiche è ormai molto elevata. A sinistra è rappresentata la zona litorale, con abundantissima presenza di idrofite. Il popolamento ittico è a ciprinidi, quando la concentrazione di O_2 lo consente. A destra un'immagine del fondo coperto da uno spesso strato di sedimenti.

L'evoluzione di un lago verso l'eutrofia, fenomeno noto col nome di eutrofizzazione, avviene naturalmente anche se l'impatto

antropico può fortemente accelerarla introducendo in un lago sostanza organica alloctona (scarichi domestici e/o industriali) o elementi fertilizzanti (N e P). I fattori più importanti nell'influenzare la velocità di modificazione di un lago verso l'eutrofia sono:

► il fattore idrologico. La portata degli immissari al lago deve essere considerata in rapporto al volume d'acqua contenuto nella cuvetta. Ci sono laghi che fruiscono di apporti tali che, almeno teoricamente, l'acqua lacustre si rinnova anche più volte all'anno e altri che hanno un tempo di rinnovo teorico superiore al secolo. Una permanenza lunga dell'acqua nell'ambiente lacustre determinerà il suo progressivo arricchimento in nutrienti e prodotti catabolici e metabolici legati alle attività del plancton. Si avrà, quindi, una progressione verso l'eutrofia più veloce che in un lago ove l'acqua è frequentemente rinnovata;

► il fattore edafico. Il chimismo dell'acqua degli immissari è fortemente influenzato dalla natura dei suoli dove si sviluppa il reticolo idrografico. Acque che attraversano suoli fertili o addirittura fertilizzati aumenteranno il contenuto di sostanze nutritive del lago e vi realizzeranno un accumulo dipendente dal loro tempo di permanenza nella cuvetta lacustre;

► il fattore evolutivo. Lo stato trofico del lago è legato alla sua età: quanto più il lago è vecchio, tanto maggiori sono le probabilità che si sia evoluto dall'oligotrofia iniziale alla meso- ed eutrofia. C'è da osservare che l'evoluzione verso l'eutrofia subisce una progressiva accelerazione con l'invecchiamento del lago perché i nutrienti accumulati nei suoi sedimenti vengono più facilmente mobilizzati e resi disponibili diminuendo, per la progressiva sedimentazione, la profondità del lago. In altre parole, si riduce sempre più la zona pelagica e progressivamente aumenta la zona litorale;

► il fattore climatico. Il clima incide molto sull'evoluzione del lago perché determina la temperatura atmosferica, dalla quale dipende l'evoluzione termica del lago, la radiazione solare dalla quale dipende la fotosintesi, il vento che influisce sulla circolazione epilimnica e totale e le precipitazioni, che possono essere

un fattore di diluizione o di arricchimento in nutrienti delle acque.

L'estremo massimo dell'eutrofia è l'ipertrofia, che è però, nella grande maggioranza dei casi, uno stato legato direttamente ad apporto antropico di fertilizzanti. Esistono poi laghi distrofi che hanno un trofismo profondamente alterato dall'apporto di acque con concentrazioni elevate di sostanze chimiche diverse (acidi o basi) per ragioni naturali o in seguito all'attività antropica.

La classificazione dello stato trofico dei laghi può essere effettuata applicando i criteri accettati dall'OECD (Organization for Economic Development and Cooperation; Vollenweider e Kerekes, 1982). Questi criteri mettono in relazione lo stato trofico del lago con i principali parametri che sono causa (concentrazione di fosforo) o effetto (concentrazione di clorofilla e trasparenza) dell'eutrofizzazione. La classificazione può essere basata su un sistema a valori fissi o su un sistema probabilistico.

Il primo (Tab. 19) definisce, per ogni condizione trofica, i limiti dei più importanti parametri in grado di caratterizzare lo stato trofico di un lago e il secondo (Fig. 72) utilizza delle curve di probabilità dalle quali si può ricavare la probabilità che un lago si collochi in un certa categoria trofica in funzione del valore assunto dal parametro considerato.

Tab. 19. Concentrazioni limite di fosforo totale (P) e di clorofilla *a* (Clor) e valori della trasparenza con disco di Secchi (D.S.) per l'individuazione dello stato trofico di un lago (OECD, 1982). I valori (max) e (min.) sono i massimi e i minimi annuali.

Categoria trofica (valori medi annui)	P	Clor	max Clor.	D.S.	min D.S.
	µg L ⁻¹			m	
Ultraoligotrofo	≤ 4,0	≤ 1,0	≤ 2,5	≥ 12,0	≥ 6,0
Oligotrofo	≤ 10,0	≤ 2,5	≤ 8,0	≥ 6,0	≥ 3,0
Mesotrofo	10 – 35	2,5 – 8	8 – 25	6 – 3	3 – 1,5
Eutrofo	35 – 100	8 – 25	25 – 75	3 – 1,5	1,5 – 0,7
Ipertrofo	≥ 100	≥ 25	≥ 75	≤ 1,5	≤ 0,7

Ne risulta una individuazione più sfumata, e quindi più realistica, della collocazione trofica di un lago. Per esempio, un lago dove la concentrazione media annua di fosforo totale sia di $10 \mu\text{g L}^{-1}$ ha una probabilità molto bassa (circa 1%) di essere eutrofo, un poco più alta di essere ultraoligotrofo (vicina al 10%), del 25% di collocarsi nella mesotrofia e piuttosto alta (63%) di essere oligotrofo.

Anche per gli altri parametri che variano per effetto dello stato trofico, come la clorofilla e la trasparenza, esistono modelli che mettono in relazione valore del parametro e stato trofico.

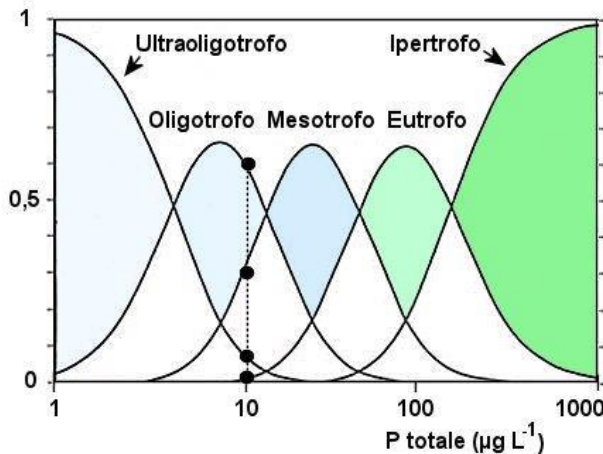


Fig. 72. Curve di probabilità della collocazione trofica di un lago basate sulla concentrazione di fosforo totale.

Il processo di eutrofizzazione può essere irreversibile se il contenuto di nutrienti nelle acque e nei sedimenti di un lago è tale che il carico interno può mantenere una ingente produzione algale anche in assenza di ulteriori apporti dall'esterno. Le possibilità di controllo dello stato trofico di laghi in queste condizioni sono la periodica asportazione di parte della biomassa prodotta (pratica che pone, però, ovvi problemi di smaltimento dei materiali ri-

mossi) e la biomanipolazione. Questa tecnica, applicabile in ambienti di piccole dimensioni, si basa sull'adozione di pratiche gestionali tese a controllare la catena alimentare di un lago, per esempio sostituendo le specie ittiche zooplanctofaghe con specie fitofaghe. Si realizza così un controllo dall'alto (top down) della catena alimentare che favorisce il consumo delle idrofite da parte dei pesci e delle microalghie da parte dello zooplancton, che può svilupparsi perché non più sottoposto alla pressione della predazione ittica.

Il processo di eutrofizzazione può anche subire una inversione di tendenza se vengono realizzati opportuni interventi di controllo dell'impatto antropico come, per esempio, il trattamento degli effluenti domestici. Laghi come il Lake Washington (Stati Uniti) o il Lago Maggiore (Fig. 73) sono ritornati, dopo l'adozione di queste misure, alla condizione di oligo-mesotrofia che li caratterizzava nella prima metà del secolo scorso.

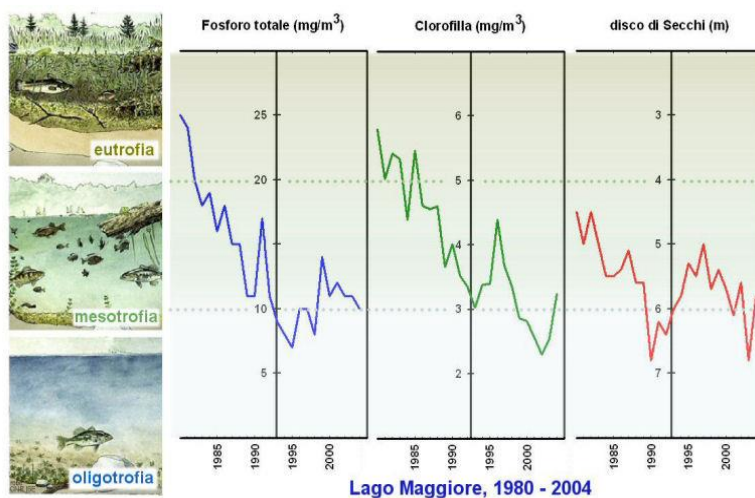


Fig. 73. Decorso del processo di oligotrofizzazione del Lago Maggiore negli ultimi 25 anni documentato dalla diminuzione della concentrazione di P totale e Clorofilla *a* e dall'aumento della trasparenza.

Variazioni naturali del popolamento ittico con lo stato trofico

I cambiamenti dei primi anelli della catena alimentare che determinano l'evoluzione trofica del lago hanno anche, com'è ovvio, un effetto sugli anelli terminali, cioè sul popolamento ittico.

La composizione specifica del popolamento ittico tende, quindi, a modificarsi in accordo con il cambiamento della produttività di un lago come schematizzato nella tabella 20.

Tab. 20. Modificazione specifica del popolamento ittico in funzione dello stato trofico.

tipo di lago:	Oligotrofo →	Mesotrofo →	Eutrofo
popolamento ittico:	Salmonidi →	Percidi, Centrarchidi →	Ciprinidi

Nel corso degli ultimi 50 anni molti ambienti lacustri sono stati sottoposti a una rapida accelerazione del processo evolutivo naturale a causa dell'eutrofizzazione antropica. Altrettanto rapidamente si è verificata negli ambienti soggetti ad eutrofizzazione il passaggio da popolamenti con dominanza di Salmonidi a popolamenti con dominanza di Ciprinidi.

Stato trofico: effetto dei mutamenti climatici in atto

Il nostro pianeta è attualmente interessato da un cambiamento climatico che si sta verificando con una dinamica ancora incerta che, però, sembra influenzata dalle attività antropiche. Quale che ne sia la causa, l'aumento globale della temperatura atmosferica è comunque un fatto certo e documentato. In seguito ad esso anche le grandi masse d'acqua lacustri hanno subito un progressivo riscaldamento; questo evento influenza l'idrodinamica interna dei laghi e potrebbe provocare alterazioni del loro stato trofico.

Sono arrivati a riscaldarsi anche gli strati d'acqua dell'ipolimnio dei laghi profondi ($z_{\max} > 100$ m), che pure non sono direttamente interessati dalle variazioni termiche giornaliere e stagionali (Fig. 74; Ambrosetti *et al.*, 2003). Per questa situazione la circolazione verticale completa avverrà con difficoltà sempre maggiore, con ripercussioni su tutta l'idrodinamica dei laghi profondi. La ragione di questo emerge dall'esame della figura 75, che illustra in dettaglio il rapporto tra temperatura e densità dell'acqua. Come si

vede dal grafico, la differenza di densità per grado di temperatura cresce all'aumentare della temperatura stessa. Così, se tra 4 e 5°C la differenza di densità è di 0,002, tra i 6 e i 7°C è di ben 5 volte superiore (0,010). Perciò c'è bisogno di un maggior lavoro del vento per avere il mescolamento di acque più calde. Per esempio, nel Lago Maggiore con temperatura superficiale di 6,6°C e di 5,8°C a 370 m (differenza 0,81°C) bastano $0,65 \text{ J m}^{-2}$ per indurre la piena circolazione. Questo valore sale a $4,0 \text{ J m}^{-2}$ con temperatura superficiale di 7,4°C e temperatura al fondo di 6,59°C, pur essendo sempre di 0,81°C la differenza di temperatura. Va precisato che le quantità di lavoro ora citate rappresentano un valore medio per l'intera colonna.

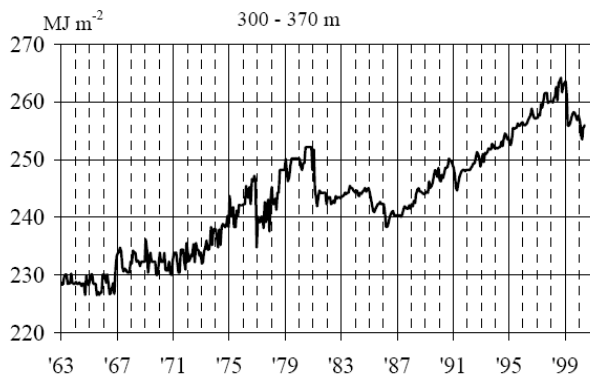


Fig. 74. Accumulo di calore nelle acque ipolimniche del Lago Maggiore.

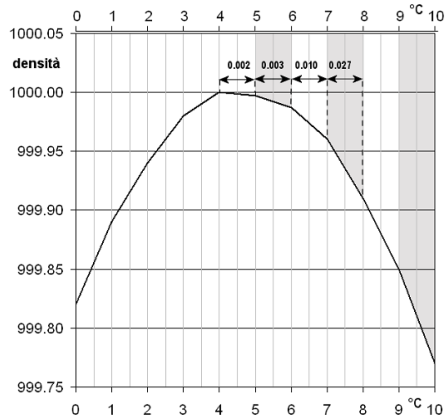


Fig. 75. Relazione non lineare tra incremento delle densità dell'acqua ed incremento della sua temperatura.

I mutamenti climatici in atto, soprattutto l'incremento delle temperature, possono quindi interagire con l'idrodinamica e con la componente biotica dell'ecosistema lacustre nei modi di seguito descritti. C'è da sottolineare che si tratta di interazioni delle quali si sta ancora valutando le reali entità in molti ambienti limnici.

In inverno il più elevato lavoro di mescolamento necessario per avviare una circolazione verticale completa riduce il volume della massa d'acqua che può rimescolarsi e, quindi, entrare in contatto con l'atmosfera da un lato e, dall'altro, trasportare verso gli strati più superficiali nutrienti e soluti contenuti nell'ipolimnio. Si avrebbe così, in assenza di altri apporti, una riduzione del contenuto di ossigeno negli strati profondi e una diminuita disponibilità di nutrienti algali nella zona trofogenica.

In estate l'incremento di spessore dello strato mescolato aumenta il volume d'acqua che può defluire dall'emissario accelerando così il rinnovo delle acque lacustri. Inoltre l'abbassamento della profondità del termoclinio comporta un ampliamento dello strato trofogenico e quindi del volume d'acqua a disposizione dei microrganismi autotrofi, prima confinati più in superficie dalla barriera del termoclinio. Questo fatto potrebbe incrementare la produttività complessiva del lago. A questa evoluzione potrebbe

concorrere l'aumento dei periodi siccitosi lunghi estivi con conseguente abbassamento del livello del lago rispetto al valore medio. Questo evento, lasciando scoperti larghi tratti della fascia litorale, causa il decadimento del perifiton e dello psammon che la abitava e può così determinare una immissione di sostanza organica e di nutrienti della quale è difficile valutare l'entità.

Va infine ricordato che, almeno in alcune regioni del globo, le alterazioni quali- quantitative della radiazione solare che accompagnano i mutamenti climatici in atto influenzano il biota acquatico e, promuovendo reazioni fitochimiche, modificano la biodisponibilità della sostanza organica disciolta.

18. La paleolimnologia

La paleolimnologia è lo studio della storia di un lago attraverso l'analisi fisica, chimica e biologica dei resti conservati nei suoi sedimenti. I materiali depositatisi sul fondo lacustre per sedimentazione raccolgono le evidenze dirette e indirette degli eventi accaduti negli ecosistemi terrestri circostanti il lago e nel lago stesso e analizzandoli si possono ricostruire le condizioni ambientali del passato con una risoluzione temporale variabile da anni a millenni.

Le tecniche paleolimnologiche sono perciò largamente utilizzate per valutare le perturbazioni antropogeniche e naturali significative sugli ecosistemi acquatici imputabili, per esempio, ai cambiamenti climatici, a fenomeni di eutrofizzazione, di acidificazione, di inquinamento, di rilascio di tossine, ecc.

In pratica il paleolimnologo estrae con opportuni apparecchi (vedi cap. 20) dei campioni, detti “carote”, dai sedimenti lacustri. In questa ricerca degli indicatori indiretti, chiamati “proxy records”, delle condizioni ecologiche esistenti nel passato. Le valutazioni derivate dai proxy records devono essere inserite in una scala temporale che può essere calibrata individuando negli strati di sedimento peculiarità fisiche e/o chimiche associabili a un evento storicamente noto o comunque a una datazione di taluni elementi presenti nei sedimenti.

I sedimenti lacustri sono formati da materiale particellato organico e inorganico che raggiunge il lago dal bacino imbrifero (alloctono) o che è prodotto nel lago stesso (autoctono). La prima componente dipenderà dalla morfologia e dall'idrologia del bacino imbrifero nonché dal clima e dalle attività antropiche che insistono su di esso e la seconda dalla produttività del lago.

Il materiale che ha raggiunto il fondo per sedimentazione recentemente (cap. 9) o che vi è sedimentato in un passato anche remoto viene estratto con dei carotatori (a gravità, a pistone, a

congelamento). Solitamente il sedimento presenta laminazioni caratteristiche di colore diverso, dovute alle variazioni qualitative e quantitative del materiale sedimentato nel corso del ciclo annuale. È chiamato varva lo strato costituito da un'alternanza di strati di sedimenti chiari e scuri depositi secondo il ciclo stagionale. Nel corso di questo si ha, infatti, una successione di sedimenti prevalentemente inorganico (lamina chiara) dopo il periodo delle precipitazioni e prevalentemente organico (lamina scura) dopo la stagione produttiva (Fig. 76).

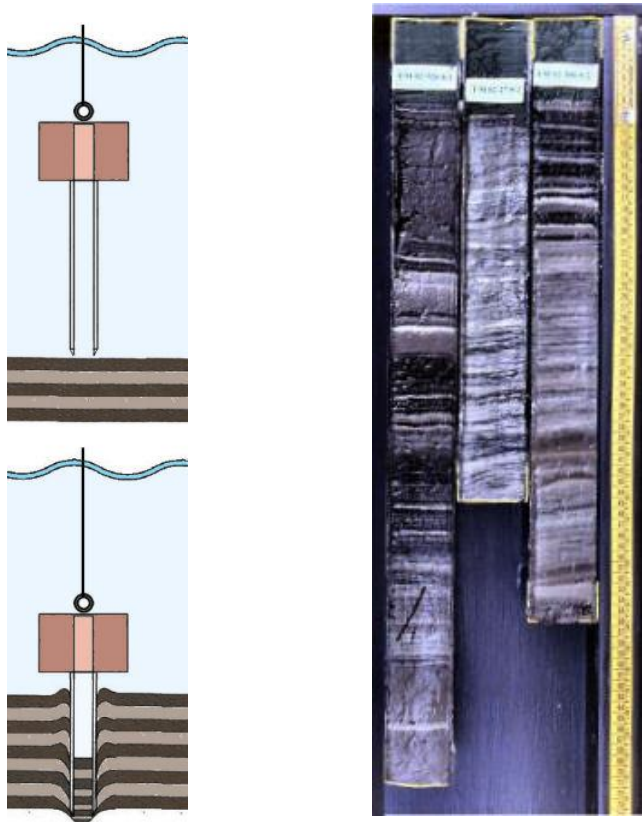


Fig. 76. Penetrazione nel sedimento di un carotatore a gravità (a sinistra) e sezione di una carota di sedimenti (a destra).

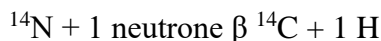
Datazione assoluta

Il conteggio delle varve permette di stabilire cronologie assolute recenti, anche se la variabilità interannuale dei fenomeni che determinano la sedimentazione e le trasformazioni del materiale sedimentato possono talvolta rendere incerta questa datazione.

Un'altra possibilità di datazione è offerta dalla tefrocronologia, basata sullo studio dei depositi piroclastici costituiti dalle ceneri vulcaniche (tefre). Quando le eruzioni vulcaniche sono storicamente documentate, cosa del resto frequente nel bacino del mediterraneo, la tefrocronologia permette datazioni molto precise in epoca storica. Inoltre, poiché gli strati di cenere vulcanica costituiscono un orizzonte isocrono che può essere individuato in un'area di estensione anche molto vasta, la datazione con il metodo del ^{14}C (vedi oltre) del materiale organico incluso nelle ceneri permette di datare l'epoca di deposizione dell'intero orizzonte.

Si può anche ricorrere alla datazione radiometrica, che si basa sulla misura della radioattività residua di un isotopo instabile del quale è noto il tempo di decadimento per calcolare da quanto tempo quell'isotopo è stato segregato nei sedimenti. Gli isotopi più comunemente usati sono ^{14}C , ^{210}Pb e ^{137}Cs .

Il ^{14}C può essere usato per questo scopo perché questo isotopo radioattivo si forma continuamente in alta atmosfera (a 15 km di quota) per azione della radiazione cosmica secondo questa reazione:



Il ^{14}C poi decade spontaneamente in ^{14}N con un periodo di dimezzamento di 5730 anni. In atmosfera, dove questo isotopo è presente in una percentuale molto bassa (0,0000001%) e dove il rapporto $^{12}\text{C}/^{14}\text{C}$ si mantiene piuttosto costante, viene rapidamente ossidato a $^{14}\text{CO}_2$. Questa CO_2 naturalmente marcata è incorporata nella biosfera attraverso la fotosintesi e, una volta che il detrito biogenico da essa derivante è seppellito nei sedimenti, non è possibile che alle sue molecole venga aggiunto nuovo ^{14}C . Così la quantità di ^{14}C originariamente presente inizia a decadere diventando ^{14}N . Conoscendo la differenza tra la proporzione di

^{14}C che una sostanza organica dovrebbe contenere se facesse parte di un organismo vivente e quello effettivamente presente è possibile datare l'epoca nella quale una sostanza organica ha cessato di essere parte di un organismo vivente. Poiché la progressiva diminuzione di ^{14}C giunge a renderne difficile la misura, con questo metodo non si possono avere datazioni attendibili oltre i 30000 anni circa. Il metodo, inoltre, non è utilizzabile per la cronologia recente (ultimi due secoli) per le interferenze introdotte dall'uso del carbon fossile e dagli esperimenti nucleari.

L'uso del ^{210}Pb si basa sul fatto che l'Uranio presente nella crosta terrestre rilascia il gas Radon che, decadendo in atmosfera, produce ^{210}Pb che è poi depositato sulla superficie terrestre, acque incluse, dalle precipitazioni. Nell'acqua questo isotopo si adsorbe sul particolato e con esso si deposita nel sedimento. Il ^{210}Pb ha un periodo di dimezzamento di 22 anni circa e la quantità di isotopo che rimane in un certo strato della carota di sedimento ne rivela l'età. Questo metodo di datazione può coprire un passato della durata di circa un secolo e può essere integrato con la datazione basata sull'uso di un isotopo del Cesio, il ^{137}Cs , liberato in grandi quantità nel corso degli esperimenti nucleari in atmosfera tra il 1954 e il 1963 e poi dall'incidente di Chernobyl del 1986.

Un altro metodo di datazione (U/Th) si basa sul decadimento di alcuni isotopi della famiglia del ^{238}U . La datazione di un sedimento può anche essere fatta utilizzando le variazioni nella mineralogia magnetica in una sequenza stratigrafica, dipendente dalle variazioni del campo magnetico terrestre.

Datazione relativa

Gli strati della carota di sedimento possono inoltre essere datati con metodi biologici (biostratigrafia), ricercando per esempio la presenza o l'assenza di pollini di una specie vegetale della quale sia nota la data di introduzione in una certa area oppure di scomparsa per effetto, ad esempio, di una patologia che ha determinato mortalità massive di determinate specie arboree.

Per valutare le condizioni ecologiche di un lago nel passato, alla datazione dei sedimenti si affianca lo studio dei “proxy records” che essi contengono. Questi sono prevalentemente strutture di origine biologica indicatrici di un peculiare clima terrestre o situazione trofica acquatica che, permanendo riconoscibili nel sedimento, consentono di dedurre le condizioni ambientali all’epoca nella quale sedimentò lo strato che le contiene. Quelli più frequentemente utilizzati sono:

► pigmenti algali (per es., pigmenti totali, β -carotene) o batterici fossili, che forniscono indicazioni sull’abbondanza e sulla composizione dei popolamenti di organismi fotosintetici. Si trovano anche pigmenti come la scytonemina che, essendo prodotti dai microrganismi come schermo alle radiazioni UV, sono rivelatori delle variazioni di abbondanza di queste lunghezze d’onda.

► Pollini. Pollini e spore sono parti critiche nel ciclo vitale delle piante vascolari, essendo dotate di pareti resistenti, sono tipicamente i reperti più abbondanti, meglio conservati e più facilmente identificabili tra i resti vegetali nei sedimenti. La loro presenza, qualità e abbondanza, quindi, è un eccellente indicatore della composizione del tipo di copertura vegetale esistente in prossimità di un ambiente lacustre in tempi recenti e in tempi geologici.

► Diatomee. Questo è il gruppo più largamente utilizzato perché queste alghe sono sensibili indicatori dell’evoluzione trofica dei laghi. Inoltre le teche silicee (valve) delle cellule di questa classe sono abbondanti e ben conservate nei sedimenti lacustri tanto da consentirne l’identificazione a livello di specie o sottospecie. Poiché ciascuna specie ha specifiche esigenze ambientali (per esempio, particolare valore di pH dell’acqua, alta o bassa concentrazione di nutrienti, crescita come epifita, ecc.), ricostruendo la struttura del popolamento a Diatomee del passato si possono inferire le condizioni trofiche del lago che ha ospitato il popolamento.

► Parti di invertebrati. Anche l’esoscheletro chitinoso degli invertebrati si conserva bene nei sedimenti permettendo l’identificazione degli organismi. E, se sono note le esigenze ecologiche

degli organismi che vengono reperiti, se ne può associare la presenza a determinate condizioni ecologiche. Per esempio, il reperimento di capsule cefaliche dei Chironomidi è una indicazione dei livelli di ossigeno nelle acque profonde. Nei sedimenti si possono rinvenire anche parti di Cladoceri e Ostracodi che pure forniscono indicazioni sulle condizioni dell'ambiente e sulle sue fluttuazioni di livello nel passato.

► Mineralogia del sedimento e presenza di particelle carboniose sono utili per individuare, per esempio, variazioni nell'idrologia del lago o episodi di inquinamento atmosferico.

19. Ecologia molecolare e limnologia

Nella seconda metà del secolo scorso si sono diffusi metodi e strumenti che hanno determinato un grande sviluppo della biologia molecolare, la branca della biologia che studia gli esseri viventi a livello dei meccanismi molecolari alla base della loro fisiologia. La biologia molecolare è indirizzata in particolare allo studio delle interazioni tra le macromolecole, cioè le proteine e gli acidi nucleici (DNA e RNA). L'uso delle tecniche proprie di questa disciplina per affrontare i problemi ecologici ha fatto nascere l'ecologia molecolare.

Il primo potente strumento della genetica molecolare è noto come Reazione di Polimerizzazione a Catena (Polimerase Chain Reaction: PCR) ed ha trovato largo impiego nello studio dell'ecologia degli ambienti acquatici, da sempre penalizzato dalle difficoltà analitiche connesse con l'elevata dispersione degli organismi acquatici e con la loro scarsa accessibilità. La PCR, infatti, "amplifica", cioè produce moltissime copie, di brevi frammenti specifici di DNA dei quali si può, quindi, analizzare la composizione in basi caratteristica. La sequenza amplificata è chiamata amplicone. Un ulteriore sviluppo è stato quello di tenere sotto controllo la curva di moltiplicazione delle basi nei diversi cicli, consentendo così di quantificare il numero di copie del frammento di DNA iniziale. Questa tecnica è definita PCR quantitativa (qPCR) o Real Time PCR perché analizza in tempo reale il prodotto di PCR. Una recente evoluzione della tecnica è costituita dalla Digital PCR, che si basa sulla quantificazione diretta delle molecole prodotte e si traduce in una sorta di qPCR di precisione elevatissima (teoricamente può venir riconosciuta anche una singola copia di frammento per campione).

Il passo successivo è il sequenziamento dei frammenti di DNA amplificati, cioè la determinazione dell'ordine dei diversi nucleotidi (Adenina, Citosina, Guanina e Timina) che costituiscono l'acido nucleico. All'interno di questa sequenza sono codificati i

geni di ogni organismo vivente e le istruzioni per esprimerli nel tempo e nello spazio attraverso la regolazione dell'espressione genica.

Al metodo di sequenziamento di prima generazione (Sanger sequencing) si sono aggiunti, nel decennio scorso, altri metodi di sequenziamento, detti High Throughput Sequencing (HTS), caratterizzati dalla capacità di sequenziare molti frammenti di DNA contemporaneamente. Fra i metodi disponibili i più diffusi sono l'ormai abbandonato 454 (pyrosequencing), il SOLID (sequencing by ligation) e i diversi sistemi Illumina (modified Sanger, reversible dye-terminators). Dato il velocissimo sviluppo di questo settore sono già disponibili dei metodi di Third Generation Sequencing, come SMRT (Single Molecule Real Time sequencing) o Nanopore sequencing (Oxford Nanopore). L'implementazione delle banche dati esistenti e l'aumento delle prestazioni delle tecnologie di sequenziamento hanno permesso l'amplificazione diretta del DNA senza necessità dell'amplificazione PCR e quindi senza le distorsioni che essa comporta.

Filogenesi molecolare

Con l'uso della PCR è stato possibile ottenere una grande quantità di copie dei frammenti selezionati di DNA che costituiscono l'impronta digitale molecolare (molecular fingerprinting) di un organismo. La molecular fingerprinting permette di distinguerlo da altri organismi che pure gli sono geneticamente molto vicini e dai quali è, assai spesso, morfologicamente indistinguibile. L'impronta digitale molecolare può essere costituita da piccole subunità di un gene, per esempio il 16s per i procarioti e il 18s per gli eucarioti, che codifica per il RNA ribosomiale (rRNA). Data la loro estrema conservazione evolutiva, queste specifiche subunità funzionano da marcatore filogenetico per confrontare degli organismi provenienti dall'ambiente naturale o da colture perché la sequenza di basi azotate nel 16s o nel 18s rRNA è caratteristica per ciascuna specie.

Confrontando le sequenze omologhe provenienti da geni di diversi gruppi di organismi si ottiene una indicazione di quanto

stretta sia la parentela tra gli organismi che fanno parte dei diversi gruppi tassonomici. Sulla scorta dei risultati scaturiti dalle analisi dei genomi dei diversi organismi è stato costruito il noto albero filogenetico della vita (Fig. 77). In analogia a quanto si fa disegnando gli alberi genealogici, per ottenerlo si è disegnata una struttura ad albero costruita in modo tale che la lunghezza di ciascun ramo corrisponda al numero di cambiamenti nella sequenza delle basi intervenuti da quando i due rami si sono divaricati dal vicino più prossimo.

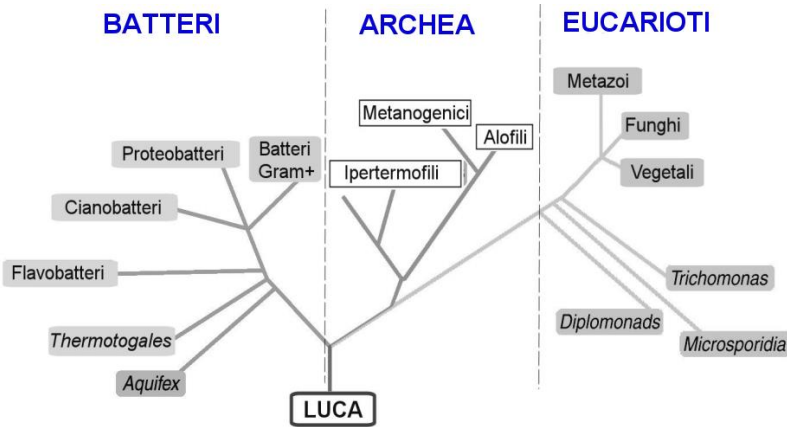


Fig. 77. L'albero filogenetico alla luce dei risultati scaturiti dalle analisi dei genomi dei diversi organismi. Alla base c'è il progenitore ancestrale comune (LUCA: Last Universal Common Ancestor).

Come si può vedere, le forme di vita più note, cioè Vegetali e Metazoi (animali), sono semplicemente due dei venti e più rami evolutivi principali. Ogni organismo attuale appartiene all'uno o all'altro di tre gruppi (detti domini): 1) Eucarioti, organismi dotati di cellule nelle quali i cromosomi sono contenuti all'interno di un nucleo; 2) Archea, microbi privi di nucleo comprendenti organismi spesso «estremofili», cioè che crescono in condizioni estreme, ma che nell'ultimo decennio sono stati più volte ritrovati in proporzioni significative anche in suoli, laghi e mari temperati

e 3) Batteri, il dominio che comprende i batteri (eubatteri) eterotrofi ed autotrofi, tra i quali i cianobatteri.

L'albero della vita, insomma, è costituito in grandissima parte da organismi microscopici. Dei più di venti rami, soltanto tre (vegetali, funghi e animali) contengono forme abbastanza grandi da essere visibili a occhio nudo e ciascuno di questi contiene anche forme microscopiche. Per questo motivo le tecniche proprie della biologia molecolare, che permettono di studiare gli organismi ed il loro ambiente a scala molecolare, sono uno strumento indispensabile per lo studio degli ecosistemi.

Tassonomia molecolare

Le pressioni ambientali, naturali ed antropiche, causano la perdita di biodiversità aumentando il rischio di estinzione per molte specie ed introducendo specie aliene negli ecosistemi. Il riconoscimento delle unità tassonomiche di base degli ecosistemi ha, quindi, un peso rilevante per contrastare gli effetti negativi degli stress ambientali. La tassonomia molecolare, basata sul riconoscimento del DNA, ha negli ultimi anni rivoluzionato i tradizionali schemi di classificazione, prevalentemente basati sulle caratteristiche fenotipiche degli organismi.

In particolare, è stato sviluppato uno strumento utilizzabile a scala globale per l'identificazione delle specie, noto come **DNA barcoding**, che si basa sull'analisi della variabilità di un marcatore molecolare, cioè di una sequenza caratteristica di coppie di basi. Nel mondo animale la regione scelta come DNA barcode standard è un frammento di 648 paia di basi del mitocondrio, codificante il gene per la citocromossidasi subunità 1 (anche noto come COX1). Per le piante superiori sono state proposte come marcatori standard due regioni del cloroplasto, note come *matK* e *rbcL*. Nei funghi il marcatore DNA barcode approvato è l'ITS.

Dopo aver estratto del DNA dall'organismo da identificare, con la PCR si amplifica la sequenza relativa al marcatore prescelto. La sequenza amplificata, l'amplicone, è sottoposta a sequenziamento ed i risultati del sequenziamento sono poi utilizzati per la ricerca nei database di DNA (banca dati Barcode of Life

DataBank). Una stretta corrispondenza tra la sequenza di basi del campione e una sequenza presente nel database identifica rapidamente una specie già catalogata. Potrebbe accadere che alcuni codici a barre siano del tutto nuovi e l'identificazione può portare all'immissione delle specie sconosciute in un albero filogenetico. I nuovi codici a barre saranno depositati nella banca dati Barcode of Life DataBank per la validazione.

Quando più specie vengono identificate a partire da un campione multiplo, cioè costituito da un insieme di organismi diversi provenienti da un campionamento massivo, si parla di **DNA metabarcoding**. Questo è un metodo rapido di valutazione della biodiversità che combina due potenti tecnologie: l'identificazione basata sul DNA e il sequenziamento ad alto rendimento (high-throughput sequencing) del DNA. Il metabarcoding del DNA utilizza primers PCR universali per amplificare molti barcodes del DNA proveniente da raccolte di massa di organismi o da un singolo campione ambientale contenente il DNA presente nelle acque, senza campionare organismi. In questo caso si realizza un **eDNA** (environmental DNA) **metabarcoding**. Il prodotto di PCR viene inviato a un Next generation sequencer che fornisce una moltitudine di sequenze di DNA. Queste vengono poi abbinate alle sequenze presenti in un database di riferimento permettendo di generare un elenco delle specie presenti nell'ambiente dal quale è stato prelevato il campione. L'eDNA metabarcoding è utile per individuare la presenza di specie anche aliene semplicemente a partire dal DNA disperso in un ambiente acquatico. Nella figura 78 sono messi a confronto schematicamente gli approcci al barcoding sopra illustrati.

È pure possibile, utilizzando dei primers PCR specifici, verificare la presenza di una certa specie nota, per esempio una specie aliena, in un ecosistema a partire da un campione di acqua. Questa tecnica è nota come **eDNA barcoding**.

Bisogna sottolineare che lo schema presentato sopra ha un valore soltanto indicativo per quanto riguarda le modalità di estrazione, amplificazione e sequenziamento. Le metodologie disponibili per queste operazioni sono, infatti, così varie e diverse da

non poter essere incluse in modo esaustivo e dettagliato nello schema. Il trattamento dei dati ottenuti dal sequenziamento è una attività complessa che deve essere affrontato utilizzando una disciplina specifica, la bioinformatica. Questa si avvale di strumenti informatici per filtrare le sequenze e selezionare quelle di interesse eliminando gli errori di sequenziamento (filtering) e per associare (clustering) le sequenze caratteristiche di un certo taxa. Le sequenze così individuate, definite OTUs (Operational Taxonomic Units), possono poi essere riferite alle diverse entità tassonomiche presenti nella banca dati Barcode of Life.



















DNA:	estrazione	amplificazione	sequenziamento	analisi dati	identificazione
DNA barcoding					
campione singolo 		con primers universali COI 	Sanger sequencing 	database di riferimento 	a livello di specie  <i>Perca fluviatilis</i>
DNA metabarcoding					
campioni multipli (bulk sample) 		con primers PCR universali 	High Throughput Sequencing 	database di riferimento 	a livello di genere, specie  <i>Carassius auratus</i> <i>Carassius gibelio</i> <i>Carassius moxi</i>
eDNA metabarcoding					
campione ambiente (acqua, sedimenti) 		con primers PCR universali 	High Throughput Sequencing 	database di riferimento 	a livello di ordine, famiglia, genere, specie  <i>Carassius auratus</i> <i>Carassius gibelio</i> <i>Carassius moxi</i>

Fig. 78. Schema dei diversi approcci allo studio della tassonomia molecolare.

Fisiologia molecolare

Fin qui si sono illustrati gli aspetti della biologia molecolare che si occupano dello studio del genoma degli organismi viventi, disciplina definita come **genomica**, e delle sue potenzialità nella ricerca ecologica. La genomica, quindi, si occupa di struttura, contenuto, funzione ed evoluzione del genoma. I metodi della biologia molecolare possono però fornire informazioni anche sulle attività metaboliche degli organismi, ossia sulla loro fisiologia. Infatti questi metodi sono applicabili, con opportune modificazioni, allo studio del RNA, cioè della molecola che, mediante il processo di trascrizione, riceve le informazioni contenute nel

DNA. Nel caso in cui il DNA codifichi una proteina, la trascrizione è l'inizio del processo che porta, attraverso la produzione intermedia di un mRNA (RNA messaggero), alla sintesi di peptidi o proteine funzionali. La **trascrittomica** è, appunto, la disciplina che studia l'insieme degli RNA messaggeri di una cellula, cioè il trascrittoma, che riflette i geni attivamente espressi in un determinato momento. Dagli RNA messaggeri, attraverso il processo di trascrizione, derivano le proteine che costituiscono gli organismi viventi.

La **proteomica** è la disciplina che studia le proteine cellulari su larga scala, prendendo in esame quali, quante e in che tempi vengono espresse da una cellula o da un organismo in seguito ad un determinato stimolo. La proteomica è complementare alla genomica in quanto si focalizza sui prodotti dei geni.

Infine la **metabolomica** studia le “tracce chimiche” lasciate da specifici processi cellulari. Il metaboloma rappresenta l'insieme di tutti i metaboliti che gli organismi rilasciano nell'ambiente e che sono i prodotti finali della sua espressione genica. In altre parole, il profilo metabolico può fornire un'istantanea della fisiologia di un organismo o di una comunità. Una delle sfide della biologia sistemica è di integrare la proteomica, la trascrittomica e le informazioni metabolomiche per avere una visione d'insieme più completa degli organismi viventi e delle loro interazioni con l'ambiente. Uno schema dell'approccio omico allo studio delle comunità microbiche è illustrato nella figura 79.

Come già detto, il contributo delle tecniche della biologia molecolare è importante particolarmente per lo studio dell'ecologia dei microrganismi acquatici che, per essere spesso non coltivabili, per le loro piccole dimensioni e per l'elevata dispersione nell'ambiente, è difficilmente affrontabile soltanto su base morfologica o con le tecniche della microbiologia classica. Però le biomasse microbiche sono nel complesso così rilevanti che le loro attività condizionano e determinano l'evoluzione degli ecosistemi acquatici.

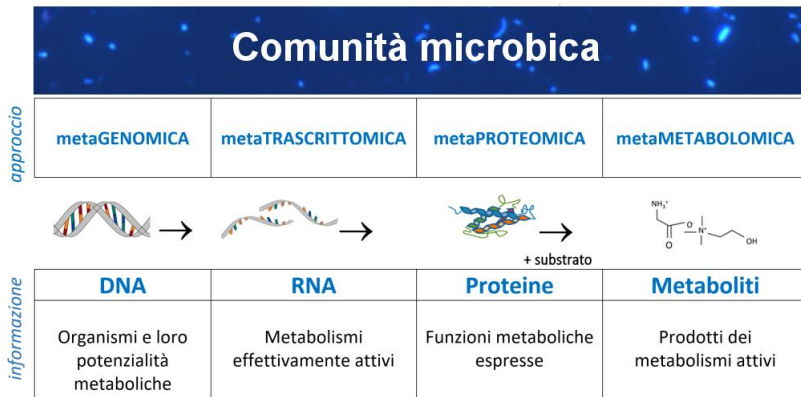


Fig. 79. Panoramica dell'approccio multi-omics allo studio del funzionamento della comunità microbica. Ogni livello di informazione (DNA, RNA, proteine e metaboliti) fornisce un diverso livello di caratterizzazione della comunità microbica.

L'ecologia molecolare ha già contribuito ampiamente allo sviluppo della ricerca limnologica, migliorando le conoscenze tassonomiche sugli organismi acquatici e fornendo informazioni dettagliate sulla composizione delle comunità microbiche in molti ambienti naturali caratterizzati da condizioni ambientali assai diverse. Cosa ancora più importante, ha permesso di associare alla biodiversità tassonomica una diversità fisiologica, evidenziando la presenza di geni regolatori di specifiche attività metaboliche, non rilevate con i metodi tradizionali, in nicchie ecologiche difficilmente accessibili quali l'ipolimnio dei laghi profondi o quello anossico dei laghi meromittici. L'applicazione dei metodi della biologia molecolare allo studio dell'ecologia degli ambienti acquatici è ancora al suo esordio ma è destinato ad incrementare considerevolmente le nostre conoscenze sull'ecofisiologia degli ecosistemi acquatici.

20. Il campionamento dei laghi

Il campionamento di un lago è l'operazione di prelievo di una porzione della sua massa d'acqua che possa essere considerata rappresentativa dell'intera massa d'acqua originaria. Così, misurando determinati parametri nel campione se ne può estrapolare il valore per l'intero corpo d'acqua, se si può ragionevolmente assumere che il lago sia omogeneo. Poiché l'assunzione di omogeneità è risultata, per molti corpi d'acqua, poco realistica, per ciascun ambiente si dovrebbe valutare empiricamente la rappresentatività accettabile di un campione.

Di quanto detto si dovrebbe tener conto anche nel campionamento finalizzato al monitoraggio di tipo legale, cioè fatto per verificare l'aderenza di un ambiente alla normativa, anche se in questo caso i vincoli di frequenza spaziale e temporale per il campionamento di fiumi e laghi sono posti dalla legislazione vigente.

Nel campionamento finalizzato a obiettivi di ricerca, che non ha altri vincoli che quelli imposti dall'eterogeneità spaziale e temporale della variabile che si vuole studiare, si deve individuare la rappresentatività accettabile di un campione quando si pianifica la ricerca. Questo può essere fatto, in via preliminare, prendendo in considerazione la velocità di evoluzione dei processi che si vogliono studiare (per es., tempo di sviluppo dei popolamenti fito o zooplanctonici, durata del ciclo vitale di un mollusco, ecc.) e delle variabili che sono influenzate da tali processi o che li influenzano (per es. concentrazione di O_2 , di sostanza organica, ecc.). In ogni caso bisogna tener presente che un lago presenta una eterogeneità spaziale e temporale non trascurabile, dipendente dal ciclo stagionale e dalle dimensioni dell'analita. Alla piena circolazione l'omogeneità tende, infatti, ad essere massima e in condizioni di stratificazione è maggiore il gradiente di concentrazione tra epilimnio e ipolimnio; inoltre l'eterogeneità di distribuzione di un analita, sia esso molecola,

particella oppure organismo, cresce con le sue dimensioni lineari.

Il campionamento può anche essere selettivo, cioè mirato a prelevare il materiale per l'esame di particolari componenti dell'ecosistema acquatico (organismi, materiale particellato, sedimento). Per i diversi tipi di campione esistono apparecchi specifici e qui di seguito saranno descritti i più importanti.

Campionamento dell'acqua

Da quando è nata la limnologia ci si è posti il problema di prelevare campioni lungo la colonna d'acqua a profondità definite. Sono stati perciò progettati, realizzati e commercializzati numerosi tipi di strumenti. Il più semplice, la bottiglia a strappo, è costituito da un recipiente di vetro adeguatamente zavorrato che viene calato fino alla profondità di prelievo chiuso da un tappo forzato alla bocca della bottiglia (Fig. 80). Al tappo è fissata una fune che è poi fissata al collo della bottiglia. Raggiunta la profondità di prelievo, è sufficiente dare uno strappo energico alla fune per provocare la liberazione del tappo e il riempimento della bottiglia. L'uso di questo apparecchio (e delle sue versioni più evolute) è limitato alla profondità di 20 m circa perché a profondità maggiori l'inerzia del sistema e l'elasticità della fune attenuano lo strappo impedendo la liberazione del tappo. C'è inoltre il rischio di implosione del recipiente.

Non c'è invece limite di profondità per le bottiglie che vengono calate aperte fino alla profondità voluta per poi comandarne la chiusura a distanza tramite un "messaggero" (Fig. 81) e recuperarle, infine, riempite con il campione d'acqua (Fig. 82). Il "messaggero" non è altro che un peso forato che viene lasciato scorrere lungo il cavo al quale è sospesa la bottiglia di campionamento e che alla fine della sua corsa va a colpire un meccanismo che sgancia gli elementi di chiusura della bottiglia. Nei laghi profondi gli strumenti di prelievo vengono calati alla profondità di campionamento fissati ad un cavo idrografico, filato e salpato con un verricello manuale o a motore. Il cavo non scende mai secondo una

linea perpendicolare alla superficie del lago ma forma con la perpendicolare un angolo tanto più ampio quanto maggiore è la velocità di deriva dell'imbarcazione dalla quale si esegue il campionamento. Misurando questo angolo e conoscendo la lunghezza del cavo filato si può calcolare (con una certa approssimazione perché in realtà il cavo descrive una catenaria) la reale profondità raggiunta dallo strumento di prelievo (Fig. 83). Per esempio, se l'angolo è di 20° e sono stati filati 300 m di cavo, la profondità vera di campionamento è di circa 280 m.

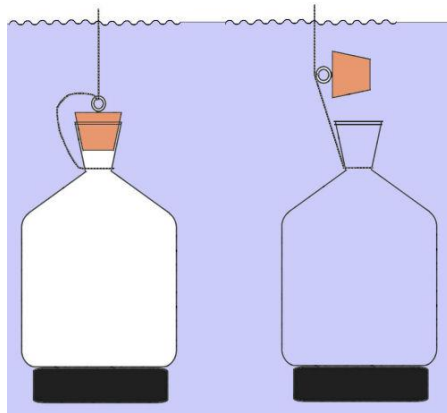


Fig. 80. Semplice bottiglia a strappo. 1: zavorra fissata al fondo della bottiglia in vetro 3; 2: tappo in gomma forzato nella bocca della bottiglia; 4: cavo al quale è sospesa la bottiglia.



Fig. 81. A sinistra: messaggero semplice costituito da un cilindro metallico forato al centro. A destra: messaggeri dotati di passaggio centrale per il cavo e di un meccanismo di chiusura attorno al cavo stesso.

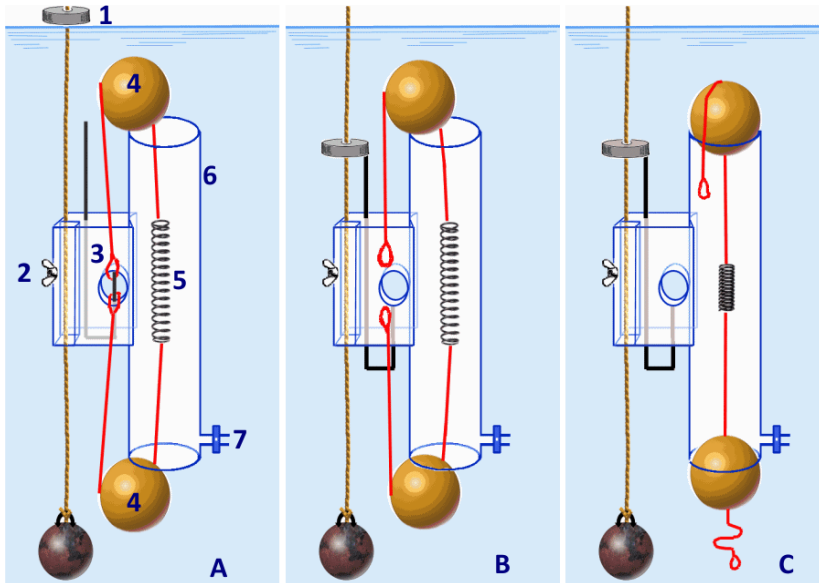


Fig. 82. Bottiglia a chiusura con messaggero. **A:** la bottiglia viene fissata ad un cavo con un peso all'estremità tramite il morsetto 2. È poi calata fino alla profondità di campionamento raggiunta la quale si lascia cadere il messaggero (1), un peso forato che scorre lungo il cavo. **B:** quando il messaggero colpisce il meccanismo di sgancio 3 vengono liberate le funi che trattengono le chiusure 4. **C:** queste, attratte dalla molla 5, vanno a chiudere il corpo della bottiglia 6. Dopo il recupero la bottiglia è svuotata attraverso la valvola 7.

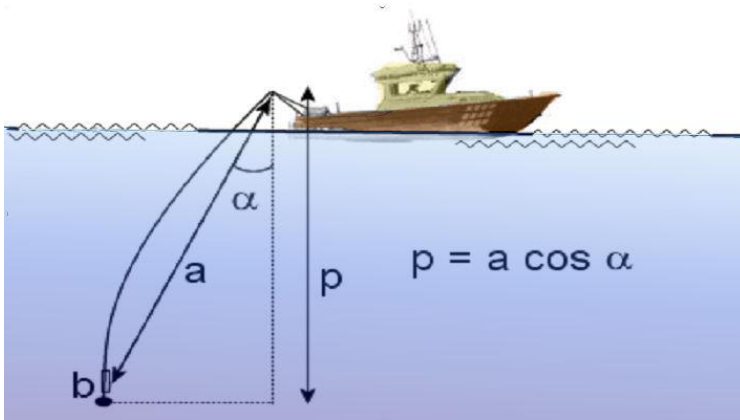


Fig. 83. Profondità p alla quale si trova il campionatore b quando è stata filata una lunghezza di cavo a che forma con la perpendicolare un angolo α .

Di questo tipo di bottiglia esistono numerosissime varianti diverse per sistema di chiusura, per materiali di costruzione e per volume di liquido campionato. Esistono poi dei campionatori integratori, in grado di accumulare progressivamente uguali quantità di campione man mano che attraversano gli strati d'acqua di un lago (Fig. 84). Il vantaggio di questi strumenti è che, fornendo un campione rappresentativo di uno strato d'acqua di 20–25 m di spessore, permettono di ridurre lo sforzo analitico.

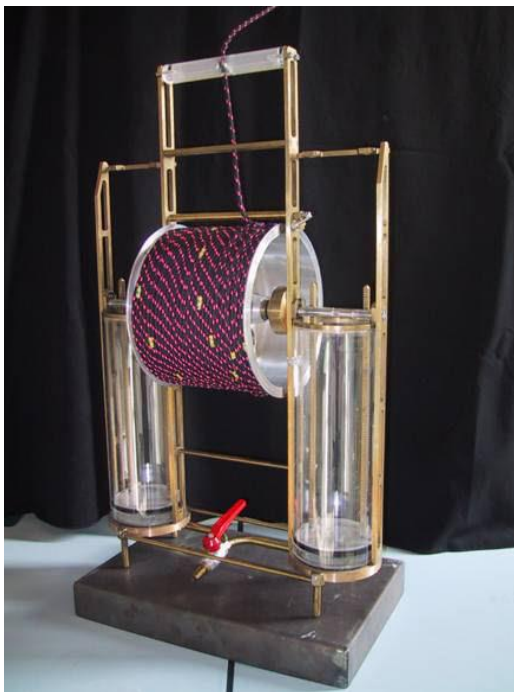


Fig. 84. Campionatore in grado di prelevare un campione del volume di 4 litri integrato dalla superficie a 20 m di profondità.

Campionamento del plancton

Il plancton viene campionato utilizzando retini conici armati con una rete con maglie di 50–100 μm di lato, a seconda del popolamento che si vuol campionare (Fig. 85, in alto). La bocca del retino, solitamente con diametro dell'ordine della decina di cm, ha dimensioni definite così che, calando il retino a una profondità

nota e recuperandolo (pescata verticale), si può facilmente calcolare il volume di acqua filtrato. L'estremità del retino opposta alla bocca è chiusa da un rubinetto che permette il recupero degli organismi raccolti al fondo della rete. Anche di questo strumento esistono numerose varianti. Può, infatti, essere dotato di una imboccatura rastremata per evitare la fuga degli animali (Fig. 85) oppure può essere adattato per il trascinamento in orizzontale e dotato di un misuratore del volume d'acqua filtrata così da consentire un campionamento quantitativo anche eseguendo una pescata orizzontale o sinusoidale.

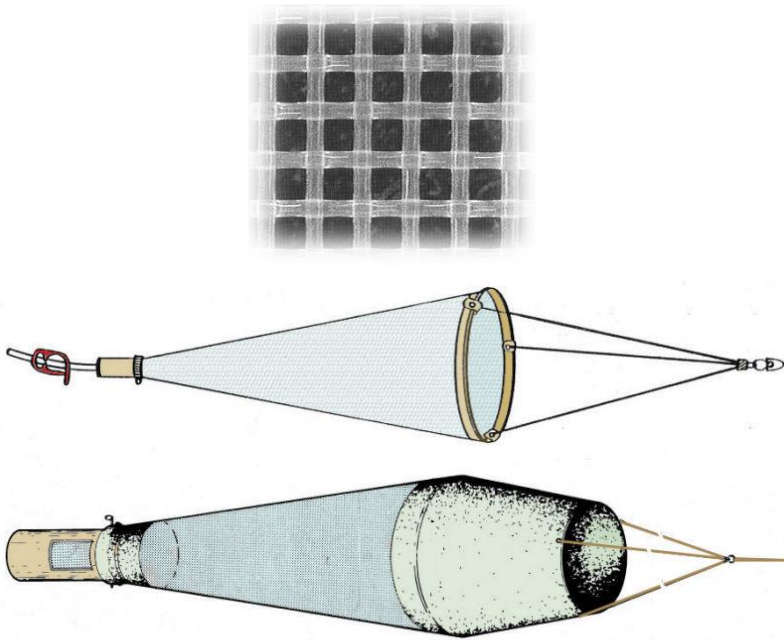


Fig. 85. Dall'alto: microfotografia di rete da plancton in monofilo di nylon con maglie di 126 μm di lato.

Rete da plancton semplice con uscita chiusa da un tratto di tubo in plastica e stringitubo.

Rete da plancton con bocca rastremata in tessuto non filtrante e bicchiere di raccolta del campione.

Esistono, infine, le cosiddette trappole da plancton, costituite da campionatori a chiusura di grande volume dotati di una rete da plancton in uscita così che quando vengono salpati dopo il campionamento l'acqua è persa e il plancton rimane intrappolato nella rete.

Campionamento del particellato in sedimentazione

Il materiale particellato in sedimentazione può essere campionato sospendendo nel lago delle trappole da sedimentazione, semplici cilindri in materiale plastico aperti alla sommità e chiusi alla base. La quantità di materiale raccolto cresce con il diametro della bocca della trappola. Però il rapporto tra altezza dei cilindri e diametro della loro bocca (aspect ratio) nei laghi con modesta velocità di corrente (pochi cm al secondo) deve essere almeno di 5:1 per evitare la risospensione del particellato raccolto nella trappola. Le trappole vanno mantenute esposte in acqua per il tempo necessario a raccogliere materiale sufficiente per le analisi che si vogliono effettuare, mantenendole in posto con un ancoraggio come quello proposto in figura 86.



Fig. 86. Trappole da sedimentazione in materiale acrilico.

Campionamento del bentos e dei sedimenti di fondo

Per prelevare campioni di bentos litorale si usano varianti differenti del retino illustrato in figura 87. È armato con rete a maglie di apertura congrua alle dimensioni degli organismi da catturare (mm) ed è dotato di un manico di varia lunghezza che consente di strisciarlo sul fondo per raccogliere gli organismi.

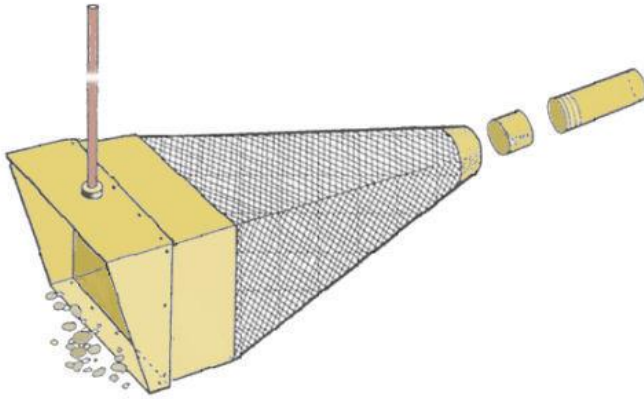


Fig. 87. Rete per la raccolta del bentos litorale.

In acque profonde, il sedimento superficiale con gli organismi che vi vivono è prelevato con apposite draghe (Fig. 88) che vengono calate aperte fino al fondo del lago fissate all'estremità di un cavo. Raggiunto il fondo, per il suo stesso peso la draga vi penetra per alcuni centimetri mentre la perdita di tensione del cavo libera i lati della bocca della draga che, quando questa viene estratta dal sedimento, si richiudono uno contro l'altro per gravità. Anche di questo strumento esistono numerose varianti. Per prelevare carote di sedimento di lunghezza attorno al metro o più, sono spesso usati i carotatori a gravità (Fig. 89) costituiti da un cilindro di acciaio all'interno del quale è inserito un tubo di plastica che conterrà alla fine il sedimento. Il cavo al quale il carotatore è sospeso viene filato liberamente così che il pesante strumento acquista progressivamente velocità e va a infingersi nei sedimenti

per una profondità variabile in funzione della natura del sedimento e della massa e velocità di caduta dell'apparecchio. Esistono numerosi tipi di carotatori di disegno e materiali adeguati alle più diverse condizioni di impiego.



Fig. 88. Draga per la raccolta di bentos profondo. A sinistra aperta, a destra in chiusura.

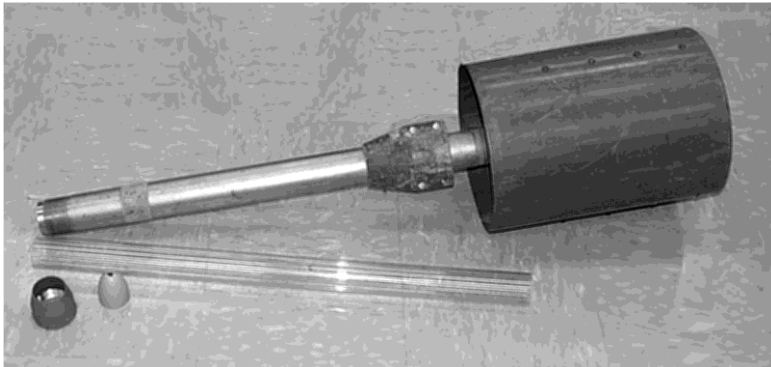


Fig. 89. Carotatore a gravità. Accanto è visibile il tubo in materiale plastico che viene inserito all'interno del tubo in acciaio.

Alcune caratteristiche fisiche e chimiche delle acque lacustri possono essere misurate direttamente *in situ*, senza trasportare a bordo o in laboratorio il campione. È il caso della temperatura, per la misura della quale si impiegano oggi termometri elettronici digitali (con precisione del centesimo di grado) con una sonda

collegata allo strumento di lettura per profondità dell'ordine della decina di metri o a un sistema di memorizzazione delle misura per profondità superiori. L'intensità della radiazione subacquea nell'intervallo del PAR si misura immergendo sonde radiometriche subacquee e lo stesso si può fare per pH, conducibilità, profondità, concentrazione di ossigeno, di ioni specifici e di clorofilla, con fluorimetri subacquei.

Vengono commercializzate sonde come quella di figura 90, dove tutti questi sensori sono conglobati in un unico strumento, dotato al suo interno di un sistema di registrazione dei dati (data logger) o di trasmissione in superficie tramite un apposito cavo che serve per calare la sonda e per trasmettere in tempo reale le misure che essa acquisisce.



Fig. 90. Sonda multiparametrica Ocean 316 (Idronaut, Brugherio). Il cilindro di fronte contiene l'elettronica di misura e, alla sua base, sono visibili i diversi sensori. Al bordo superiore del castello contenente la sonda è fissato un sensore sferico per la misura della radiazione subacquea (PAR).

21. Le acque correnti: torrenti e fiumi

Morfologia dei fiumi

L'acqua meteorica che scorre lungo i pendii finisce per unirsi in rivoli d'acqua che poi si incanalano in corsi d'acqua di dimensioni progressivamente crescenti fino a divenire un fiume. A causa dell'energia cinetica posseduta dall'acqua in movimento, i fiumi modificano la morfologia dei suoli che attraversano, scavando o modificando il loro alveo. Senza esaminare in dettaglio questo aspetto dell'attività fluviale, qui è sufficiente ricordare la terminologia di base utile per lo studio dell'ecologia del fiume.

Lo schema in figura 91 illustra un reticolo idrografico, nel quale si individua l'area che convoglia a un fiume l'acqua meteorica e che costituisce il suo bacino di drenaggio (bd). Un bacino idrografico che convoglia le acque al mare è detto esoreico mentre il bacino è definito endoreico quando lo sbocco in mare manca. Solitamente i bacini endoreici si trovano all'interno di vaste aree continentali dove depressioni topografiche locali costituiscono un punto di convergenza del reticolo idrico drenante superficiale, con la conseguente formazione di laghi, spesso salati poiché progressivamente vi si accumulano i sali trasportati dai fiumi. La salinità può essere molto più elevata di quella marina, dato il ridotto volume d'acqua nel quale i fiumi scaricano soluti e sedimenti. Il confine tra i bacini di drenaggio è detto linea spartiacque (s). Un sistema fluviale è composto da un corso d'acqua principale (f) al quale convergono molti affluenti (t). Si assume che la confluenza di due fiumi di pari categoria porti alla formazione di un corso d'acqua di categoria superiore. Quindi due corsi d'acqua senza tributari (ordine 1) nel punto di confluenza formano un corso d'acqua di ordine superiore (ordine 2). Un fiume che si origina dalla fusione di corsi d'acqua di ordine 1 e 2 è sempre di ordine 2. La confluenza di due fiumi di ordine 2 origina un fiume di ordine 3.

Un fiume modifica il territorio che attraversa principalmente mediante un processo di erosione e, successivamente, con il trasporto a valle del materiale eroso e il suo deposito per sedimentazione. Nella parte di un bacino di drenaggio situata a quota più alta, dove la velocità di corrente è maggiore, l'erosione è il processo dominante e il fiume scava solchi vallivi con versanti di pendenza elevata. I materiali erosi dai pendii e trascinati dalle acque sono il carico di sedimenti che viene depositato a valle giungendo a formare una pianura alluvionale. Gli alvei dei fiumi nelle pianure alluvionali possono intersecarsi, formare meandri o seguire un percorso rettilineo. La morfologia del fiume, ossia la forma del suo alveo è determinata dall'interazione di molti fattori quali velocità di corrente, quantità d'acqua trasportata dal fiume, pendenza, profondità e larghezza dell'alveo e caratteristiche geologiche del letto del fiume. Un corso d'acqua è definito, a seconda della sua larghezza media, ruscello, torrente o fiume. Si fa anche una distinzione tra la parte a quota più elevata (torrente), la parte centrale (fiume pedemontano) e la parte inferiore (fiume di pianura).

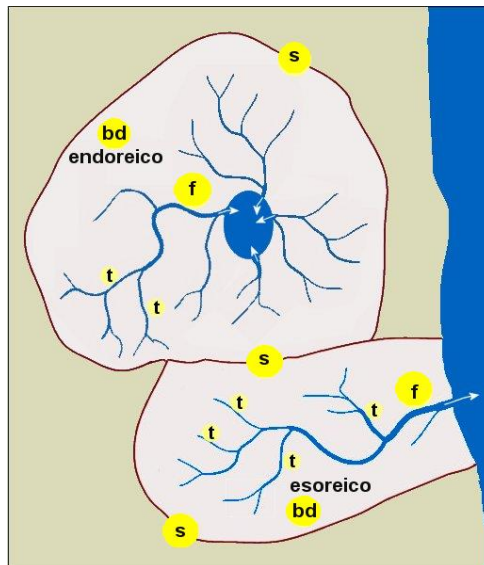


Fig. 91: La rete idrografica: bacino di drenaggio (bd), linea

spartiacque (s), fiume principale (f), tributari (t).

Ecologia dei fiumi

La velocità di corrente e la portata dei fiumi, la geologia e la granulometria dei loro alvei, l'estensione del territorio che possono inondare e la quantità di materiali alloctoni trasportati influenzano profondamente la natura e il funzionamento della componente biologica che li abita. La velocità di corrente è un fattore chiave per gli organismi che vivono nel fiume e concorre a controllare diversi parametri ambientali come la temperatura, la concentrazione di ossigeno, il tipo di substrato, l'abbondanza di risorse alimentari). La velocità di corrente generalmente diminuisce da monte a valle e questo gradiente influenza i fattori fisici e chimici che regolano la vita nei fiumi.

Temperatura e ossigeno

Vicino alla sorgente un corso d'acqua è definito torrente. Le sue acque sono caratterizzate da turbolenza elevata ed hanno una temperatura bassa e abbastanza costante. Scorrendo a valle, la temperatura dell'acqua è sempre più dipendente dalla temperatura dell'aria. L'escursione termica annuale, che non supera i 5°C nella zona alpina, può raggiungere i 15°C già dopo pochi chilometri. In pianura il comportamento termico di un fiume a bassa velocità di corrente è simile a quello di un ambiente lenticò, tanto che in estate il fiume può talvolta mostrare una stratificazione termica (vedi capitolo 7) ed un gradiente verticale della concentrazione di ossigeno (vedi capitolo 10). La turbolenza dei fiumi favorisce gli scambi tra acqua ed atmosfera, assicurando una concentrazione di ossigeno nelle acque correnti sempre prossime alla saturazione. Però nei fiumi a bassa velocità di corrente la ridotta turbolenza limita agli strati più superficiali il contatto tra acqua e atmosfera e, di conseguenza, l'ossigenazione dell'acque fluviali può dipendere più dal metabolismo degli organismi che dagli apporti atmosferici. Così l'attività fotosintetica può causare sovrassaturazione

di ossigeno durante le ore di luce mentre la respirazione può causare deficit notturni di ossigeno in particolare al fondo del fiume, dove la decomposizione batterica della materia organica può essere molto attiva.

Trasporto di materiali

Le acque correnti raccolgono dall'ambiente circostante e trasportano verso valle grandi quantità di particelle minerali di diverse dimensioni e materiale organico di origine vegetale e animale. Poiché nei fiumi la produzione vegetale autoctona è spesso prossima allo zero soprattutto nei tratti ove le acque scorrono veloci, il materiale vegetale alloctono può costituire oltre il 90% dell'energia in ingresso ed è, quindi, prevalente il metabolismo eterotrofo.

Durante il trasporto lungo il fiume la sostanza organica viene attaccata inizialmente da funghi, batteri e protozoi, che la rendono appetibile ad una grande schiera di invertebrati frammentatori, principalmente insetti e crostacei. La dimensione delle particelle organiche diminuisce progressivamente lungo il corso del fiume per l'attività di altri invertebrati (larve di chironomidi ed altri ditteri, oligocheti, molluschi). Nei tratti più a valle la velocità di corrente progressivamente diminuisce ed il fondo, che a monte costituito prevalentemente da materiale erosivo (massi, ciottoli e ghiaia), diviene sabbioso o fangoso. Qui l'apporto alloctono tende a diminuire e la presenza di macrofite, alghe bentoniche e fitoplancton riduce l'importanza relativa del metabolismo eterotrofo nella catena alimentare fluviale.

Nel tratto più a monte il letto del fiume è molto irregolare ed offre agli organismi numerosi rifugi, oltre a cibo abbondante e variato insieme ad una buona ossigenazione.

Andando verso valle, in pianura, il fondo fluviale progressivamente diventa limoso ed argilloso ed è generalmente abbastanza stabile perché incorpora piccole particelle organiche colloidali che agiscono da legante. La fauna qui comprende diversi organismi in grado di penetrare facilmente nei sedimenti fini. Questo

substrato è a volte poco ossigenato ma può ospitare una abbondante biomassa di invertebrati detritivori.

Zonazione ecologica dei corsi d'acqua

In base alle condizioni morfologiche e fisiche sopra illustrate, sono state proposte classificazioni delle acque correnti sviluppate tenendo conto delle modificazioni ecologiche che si verificano lungo l'asta fluviale.

La classificazione ecologica delle zone di un fiume basata sulla **successione di popolazioni ittiche** lungo il suo corso è nota da tempo e consente di individuare quattro zone, denominate secondo le specie ittiche prevalenti. La prima, più montana, è la zona dei salmonidi, abitata da trote (*Salmo trutta trutta*) e temoli (*Thymallus thymallus*). Segue a valle la zona dei ciprinidi, abitata dal barbo (*Barbus barbus*) e dal cavedano (*Squalius squalus*). Ancora più a valle, dove velocità di corrente e pendenza sono ridotte, la comunità ittica è costituita da scardole (*Scardinius erythrophthalmus*), carpe (*Cyprinus carpio*) e tinche (*Tinca tinca*).

La pendenza e la larghezza del fiume sono le variabili che regolano la successione delle specie, insieme ad altri fattori ecologicamente rilevanti come la temperatura. Il modello di successione delle comunità ittiche illustrata più sopra può essere alterato da particolari condizioni locali, come un restringimento importante del letto del fiume, una brusca variazione della pendenza o un'immissione di acqua più fredda. Ovviamente le particolari distribuzione areali delle diverse specie ittiche fa sì che le specie caratteristiche delle zone fluviali prima individuate possano cambiare nelle diverse regioni di un continente.

È stata anche proposta, ed è molto utilizzata, una **zonazione abiologica** dei fiumi basata sulle caratteristiche termiche delle acque fluviali. Secondo questo modello nei fiumi sono reperibili tre zone principali: il crenon, il rhitron e il potamon.

Il **crenon** è la zona di sorgente, caratterizzata da acque con pochi soluti e da temperatura e portata piuttosto costanti.

Il **rhitron** è il tratto torrentizio ed è caratterizzato da una temperatura media mensile che non supera mai i 20°C, da un'alta concentrazione di ossigeno e da forte turbolenza. Il letto del fiume è composto da massi, ciottoli e ghiaia con presenza di sabbia o fango soltanto in pozze laterali o in zone riparate. Gli organismi caratteristici del rhitron hanno specifici adattamenti morfologici alla vita in acque turbolente e preferiscono acque fredde e ben ossigenate. Il plancton è raro o più spesso assente.

Il **potamon** è il fiume vero e proprio. Le sue acque hanno una temperatura media mensile estiva superiore ai 20°C e possono occasionalmente presentare condizioni di anossia o ipossia, soprattutto in pozze laterali isolate dal flusso principale. La corrente è lenta e il flusso tende ad essere laminare. Il fondo è prevalentemente sabbioso o fangoso. Gli organismi che vivono nel potamon resistono a forti escursioni termiche, tollerano acque con temperature elevate e basse concentrazioni di ossigeno. Il plancton può essere abbastanza abbondante.

Il rhitron e il potamon corrispondono alle zone dei salmonidi o dei ciprinidi sopra descritte e i confini tra le zone ecologiche sono spesso punti di confluenza dei fiumi.

Alla fine del secolo scorso è stato sviluppato il River Continuum Concept (RCC), un modello ecologico di fiume basato sull'idea che i corsi d'acqua siano in una condizione di equilibrio dinamico e che le modificazioni da monte a valle dei parametri fisici (larghezza, profondità, velocità di corrente, trasporto di sedimenti e di sostanza organica) influenzino grandemente oltre alle comunità ittiche anche gli invertebrati, che assumono il ruolo di organismi indicatori. La figura 92 illustra graficamente il River Continuum Concept e l'associazione tra zonazione abiologica di un fiume e cambiamenti ecologici che si verificano lungo il corso d'acqua e che saranno illustrati di seguito.

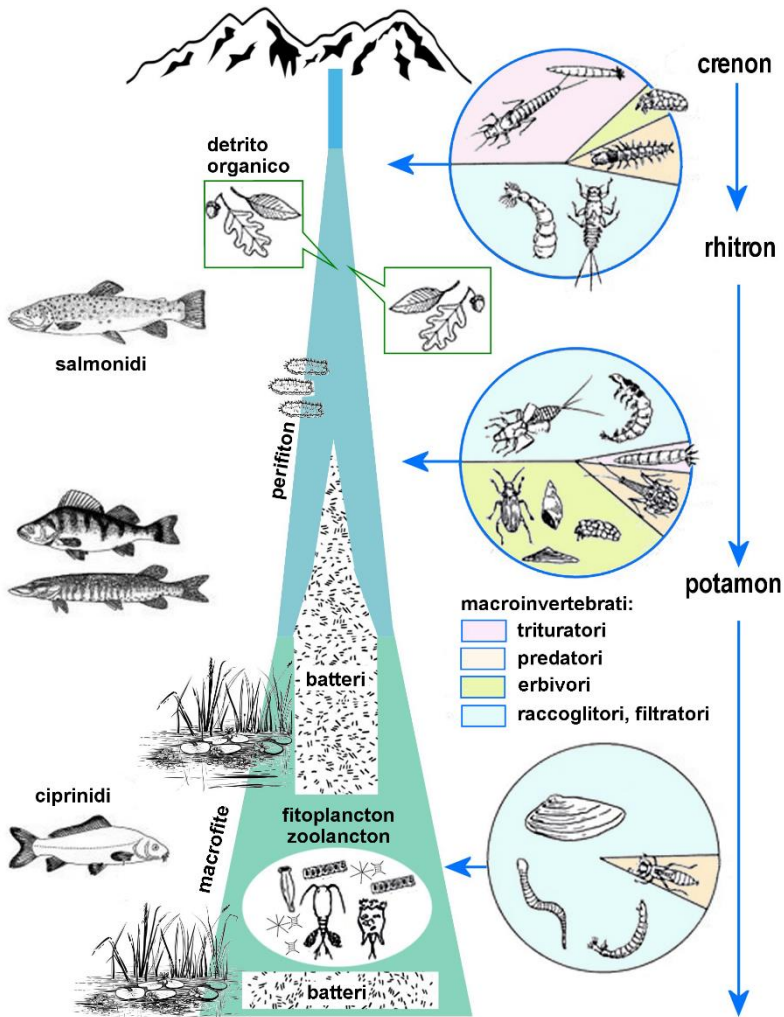


Fig. 92. Zone caratteristiche di un fiume e modificazioni ecologiche che si verificano lungo il suo corso.

Le sorgenti e il tratto iniziale del fiume

Le sorgenti sono i punti dove l'acqua sotterranea raggiunge la superficie emergendo dal terreno. Questo si verifica quando si ha un affioramento degli strati impermeabili del suolo che incanalano verso la superficie le acqua meteoriche assorbite dagli strati

permeabili sovrastanti. Le acque sorgive, che hanno soggiornato nelle profondità del suolo al riparo dalle variazioni termiche dell'atmosfera, hanno una temperatura abbastanza stabile, una bassa concentrazione di ossigeno e un basso contenuto di sostanza organica.

In queste condizioni ambientali relativamente stabili possono vivere anche organismi con esigenze ambientali piuttosto rigide. Inoltre le sorgenti, all'interfaccia tra acque sotterranee e acque superficiali, possono anche ospitare la fauna interstiziale, costituita da piccoli animali che vivono nelle acque sotterranee e nelle cavità sotterranee. Tra questi si trovano i copepodi arpacticoidi, i ciclopidi ciechi adattati all'oscurità e altri piccoli crostacei appartenenti a generi diversi.

Le sorgenti presentano caratteristiche diverse a seconda di come l'acqua affiora dal suolo e possono quindi essere suddivise in sorgenti **reocrene**, **elocrene** e **limnocrene**. Nelle sorgenti reocrene, che si formano su pendii ripidi, l'acqua sgorga generando subito un ruscello con una corrente veloce. La fauna è costituita da erbivori bentonici e da detritivori; le alghe sessili (perifiton) coprono il fondo ed una vegetazione caratteristica colonizza le sponde. Nelle sorgenti limnocrene, l'acqua emerge in una depressione e ristagna formando un piccolo lago o una pozza. Le comunità biologiche di questo tipo di sorgenti sono simili a quelle lacustri. Nelle sorgenti elocrene l'acqua emerge lentamente e in maniera diffusa per affioramento delle acque sotterranee, generando una zona paludosa. Gli anfibi e molte larve di insetti adattati alle correnti deboli sono tipici di questo habitat.

Il tratto iniziale montano del fiume, il torrente, ha una corrente veloce, un flusso turbolento, un'erosione intensa e temperature basse. L'elevata turbolenza limita lo sviluppo della vegetazione. Le piante più alte sono assenti, anche se alcune specie come il ranuncolo (*Ranunculus fluitans*) possono svilupparsi nelle zone più tranquille del fiume. Tuttavia alcuni muschi (*Fontinalis*, *Hypnum*) e alcune alghe possono formare densi tappeti sul fondo ed ospitano gli invertebrati erbivori. L'abbondante offerta di materia

organica alloctona fornisce energia per lo sviluppo degli organismi detritivori. La buona ossigenazione dell'acqua consente lo sviluppo di invertebrati predatori con elevate esigenze energetiche.

Il fondo grossolano del fiume protegge dall'esposizione diretta a forti correnti ed offre riparo a molti organismi. Abbondano gli insetti, in particolare plecoteri, efemerotteri, tricoteri e ditteri, oltre ad altri invertebrati, come crostacei, idracarini, molluschi e vermi. Gli invertebrati bentonici che colonizzano il tratto superiore del fiume possono raggiungere densità molto elevate, da centinaia a migliaia di individui per metro quadrato.

Come si è detto, il tratto superiore del fiume è dominato dai salmonidi, in particolare dalla trota (*Salmo trutta*), adattata alle acque fredde (5-10°C) e ben ossigenate. La trota ha una lunghezza di 15-30 cm, è carnivora, si nutre di invertebrati acquatici e di avannotti di altri pesci. In autunno risale il fiume per deporre le uova, arrivando quasi 2000 m s.l.m.

Lo scazzone (*Cottus gobio*) è lungo 10-20 cm e condivide ambiente e dieta con la trota. Diversamente da questa, è un cattivo nuotatore, ha abitudini notturne e caccia invertebrati sul fondo del torrente. Nella zona dei salmonidi è comune anche la sanguinerola (*Phoxinus phoxinus*), un piccolo ciprinide lungo circa dieci centimetri. Questi pesci richiedono concentrazioni di ossigeno di 8-12 mg L⁻¹.

Il temolo (*Thymallus thymallus*) sostituisce gradualmente la trota nelle parti del fiume dove l'acqua è meno turbolenta e diventa leggermente più calda in estate (10-15°C). Qui sono presenti altre specie di pesci, come il gobione (*Gobio gobio*) e le specie del genere *Chondrostoma* e *Squalius*, che tollerano concentrazioni di ossigeno più modeste (5-7 mg L⁻¹).

Il tratto medio ed inferiore del fiume

Raggiungendo il fondovalle la velocità di corrente si riduce e il letto del fiume è costituito da sabbia grossolana e ghiaia, alternate a un substrato più fine coperto di vegetazione. I muschi e le alghe filamentose sono accompagnate da piante più alte radicate

nel fondo del fiume, come il ranuncolo (*Ranunculus fluitans*), il millefoglie (*Myriophyllum* sp.), il *Potamogeton fluitans* e la *Elo-dea canadensis*. Nelle zone a bassa velocità di corrente è anche presente il *Callitrichum* sp.

La temperatura estiva raggiunge spesso i 20°C e i fondali fangosi sono colonizzati da fauna bentonica abbastanza omogenea, costituita da invertebrati fossori, filtratori o carnivori.

Nelle zone con abbondante perifiton dominano gli organismi erbivori, come le larve di efemerotteri e ditteri. I gammaridi sono abbondanti nei muschi e vicino alle rive del fiume si trovano frequentemente larve di Odonati (*Gomphus*, *Calopteryx*) e invertebrati buoni nuotatori.

I salmonidi qui sono scomparsi ad eccezione della trota iridea (*Oncorhynchus mykiss*), introdotta dagli Stati Uniti in tutta Europa. Questo tratto del fiume è l'habitat tipico del barbo (*Barbus plebejus*), un ciprinide onnivoro che si nutre di animali e vegetali bentonici. Qui vivono altri ciprinidi, come il cavedano e il triotto, e pesci carnivori, come il persico (*Perca fluviatilis*), il luccio (*Esox lucius*) e l'anguilla (*Anguilla anguilla*).

In estate le temperature delle acque a scorrimento lento possono superare i 20°C. Poiché il fiume trasporta un notevole carico di particelle sospese, la trasparenza dell'acqua è bassa e la penetrazione della luce è ridotta, fatto che limita la crescita di macrofite e perifiton. La produzione autotrofa è assicurata dal fitoplankton e, lungo le sponde, dalle macrofite. Particolarmente in estate, all'interfaccia acqua-sedimenti non sono infrequenti condizioni di anossia.

Qui la fauna bentonica è costituita da organismi che tollerano basse concentrazioni di ossigeno come gli oligocheti, in particolare i tubificidi. Nel tratto inferiore del fiume gli insetti più abbondanti sono i ditteri, in particolare le larve di chironomidi. Gli erbivori, abbondanti nella parte centrale del fiume, qui sono scarsi e dominano i detritivori e i filtratori.

Lungo le sponde del fiume la comunità di invertebrati è costituita da larve di Megalotteri (*Sialis* sp.), Odonati, Coleotteri e

Crostacei (*Asellus*), sanguisughe, lumache (*Limnea*, *Planorbis*), molluschi bivalvi (autoctoni, come gli Unionidi, o alloctoni come *Dreissena polymorpha*). La fauna zooplanctonica è dominata dai rotiferi mentre i crostacei (Copepodi e Cladoceri), che costituiscono la componente più importante nei laghi, nei fiumi sono per lo più rappresentati da specie bentoniche.

Il pesce caratteristico del tratto inferiore del fiume è la carpa (*Cyprinus carpio*), un ciprinide che si nutre principalmente di invertebrati bentonici e piante acquatiche. Questo tratto ospita pesci tolleranti come il triotto (*Rutilus erythrophthalmus*), la scardola (*Scardinius erythrophthalmus*), la tinca (*Tinca tinca*) e il pesce gatto (*Ameiurus melas*). Il luccio (*Exos lucius*) è presente, ma soltanto quando la concentrazione di ossigeno è abbastanza alta. La comunità ittica è paragonabile a quella dei laghi mesotrofi.

Alla foce del fiume il flusso delle maree governa il mescolamento dell'acqua con l'acqua marina e molti pesci marini occasionalmente si ritrovano in questa zona di acqua salmastra. Questa presenza è rilevante nel caso delle specie anadrome, che risalgono i fiumi per deporre le uova. Appartengono a questa categoria gli storioni (*Acipenser sturio*), l'alosa (*Alosa fallax*), la lampreda di mare (*Petromyzon marinus*) e la lampreda di fiume (*Lampetra fluviatilis*). Le popolazioni di queste specie sono diminuite drasticamente a causa della pesca eccessiva, delle dighe che ostacolano la risalita dei fiumi e della distruzione delle aree di riproduzione.

Lungo tutta l'asta del fiume è presente, con abbondanze variabili, una importante microflora, costituita da alghe, funghi, protozoi, batteri. La microflora batterica, in particolare, degradando e mineralizzando il detrito organico particellato e disciolto garantisce al fiume la sua capacità di autodepurazione. Ovviamente l'immissione nell'alveo di acque contaminate da microrganismi patogeni, provenienti per esempio da effluenti domestici ed agricoli non trattati, determina uno scadimento qualitativo delle acque e ne preclude l'uso perché possono costituire un pericolo sanitario.

Il rapporto che si instaura tra qualità delle acque di un fiume e la struttura delle comunità che lo abitano può essere alterato

dall'intervento dell'uomo sottraendo acqua che viene dirottata altrove per soddisfare altre esigenze o immettendo in un fiume scarichi inquinanti.

Il quantitativo minimo di acqua rilasciata da una qualsiasi opera di captazione sull'asta di un fiume che è in grado di garantirne la naturale integrità ecologica è definito Minimo Deflusso Vitale (MDV) ed è normata per legge. Il minimo deflusso vitale deve essere considerato come portata residua, in grado di permettere a breve e a lungo termine la salvaguardia della normale struttura naturale dell'alveo e, di conseguenza, la presenza di una biocenosi che corrisponda alle condizioni naturali.

Anche l'immissione in un fiume di scarichi urbani o industriali se viene effettuata senza rispettare i limiti di legge può arrecare al corso d'acqua gravi danni ecologici, alterandone la naturale biodiversità e, addirittura, eliminando alcune specie (Fig. 93).

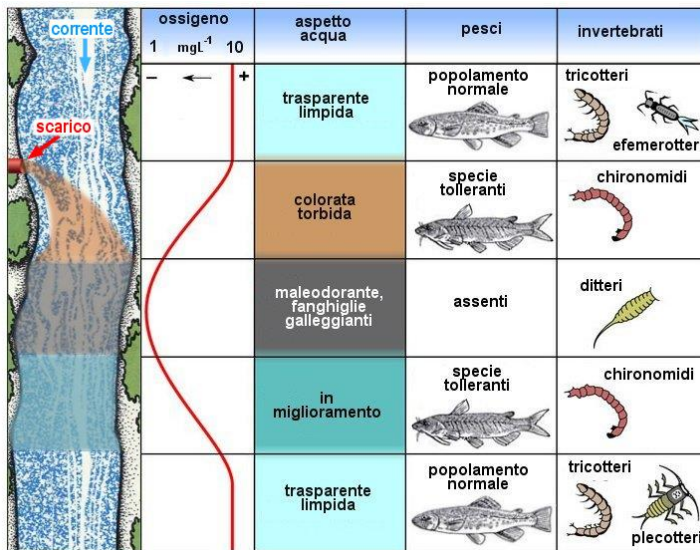


Fig. 93. Schema dello scadimento qualitativo e dei danni ecologici determinati da scarichi domestici non trattati.

Come già detto, le acque così deteriorate non sono più utilizzabili per gli usi umani né per l'agricoltura.

La stretta relazione tra qualità delle acque e organismi viventi nel fiume ha portato all'introduzione di indici per verificare la qualità degli ecosistemi fluviali in base ai cambiamenti che avvengono nelle comunità di tali organismi. Un esempio è l'Indice Biotico Esteso (IBE) che rileva lo stato di qualità di un tratto di corso d'acqua integrando lo studio delle comunità di macroinvertebrati con quello dei fattori di inquinamento o delle alterazioni fisiche dell'alveo. L'IBE può essere usato per individuare scarichi abusivi, per verificare le capacità auto-depurative del fiume e per valutare l'impatto di opere che modificano la morfologia dell'alveo.

Suggerimenti per l'approfondimento

Testi di limnologia

- Dodson S., 2005. *Introduction to Limnology*. New York, McGraw–Hill Higher Education, 400 pp.
- Fenoglio S. Bo T., 2009. *Lineamenti di ecologia fluviale*. Città Studi Edizioni. 252 pp.
- Goldman C.R., Horne A.J., 1994. *Limnology*. (2nd ed.) New York, McGraw Hill Book Company, 464 pp.
- Hutchinson G.E., 1957. *A treatise on limnology. Volume I: Geography, physics, and chemistry*. London: John Wiley & Sons, 1015 pp.
- Kalff J., 2002. *Limnology*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Lampert W., Sommer U., 1997. *Limnoecology: The ecology of lakes and streams*. English ed. New York: Oxford University Press.
- Margalef R., 1983. *Limnologia*. Ediciones Omega, Barcelona.
- O'Sullivan P.E., Reynolds C.S., 2005. *The Lakes Handbook. Volume I: Limnology and Limnetic Ecology*. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK, 699 pp.
- O'Sullivan P.E., Reynolds C.S., 2005. *The Lakes Handbook. Volume II: Lake Restoration and Rehabilitation*. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK, 560 pp.
- Provini A., Galassi S., Marchetti R., 1998. *Ecologia Applicata*. Città Studi Edizioni, 1216 pp.
- Tonolli V., 1964. *Introduzione allo studio della limnologia (ecologia e biologia delle acque dolci)*. Edizioni dell'Istituto Italiano di Idrobiologia, Verbania Pallanza, 385 pp. (digitalizzato nel 2001, scaricabile da <http://www.ise.cnr.it/crypta/ebooks/e-tonollino.pdf>)
- Wetzel R.G., 2001. *Limnology*. (3rd ed.) Academic Press (Un testo enciclopedico ma accessibile al quale ricorrere per approfondimenti).

Riviste di limnologia

1. *Advances in Limnology* (Germania):
<https://www.nhbs.com/series/advances-in-limnology-formerly-ergebnisse-der-limnologie>
2. *Advances in Oceanography and Limnology* (Italia), pubblicazione ufficiale della Associazione Italiana di Oceanografia e Limnologia (AIOL): <https://www.pagepressjournals.org/index.php/aiol/>
3. *Archiv für Limnologie* (Germania): now *Fundamental and Applied Limnology*:
<https://www.schweizerbart.de/journals/fal>
4. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, (Canada): <http://www.nrcresearchpress.com/journal/cjfas>
5. *Freshwater Biology*:
<https://onlinelibrary.wiley.com/journal/13652427>
6. *Hydrobiologia* (Germania, Belgio e Olanda):
<https://link.springer.com/journal/10750>
7. *Inland Waters* (Official journal of the International Society of Limnology):
<https://www.tandfonline.com/toc/tinw20/current>
8. *Journal of Limnology* (Italia), prosecuzione dello storico *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*: <http://www.jlimnol.it>
9. *Journal of Plankton Research* (Gran Bretagna):
<http://www.oxfordjournals.org/plankt/about.html>
10. *Limnology and Oceanography*, pubblicazione della American Society of Limnology & Oceanography, ASLO; Stati Uniti):
<http://aslo.org/lo/>
11. *Limnology and Oceanography Methods* (pubblicazione della American Society of Limnology & Oceanography, ASLO; Stati Uniti): <http://aslo.org/lomethods/>

Appendice: Glossario

A

acido	sostanza capace di cedere protoni (H^+)
aerobio	organismo che può vivere e crescere soltanto in presenza di ossigeno
afotica, zona –	porzione dei corpi idrici raggiunta da una quantità di luce troppo piccola per permettere ai vegetali di realizzare la fotosintesi
alcalinità	è una caratteristica dell'acqua che le viene impartita prevalentemente dal suo contenuto in carbonati, bicarbonati e idrossidi ed è la capacità di un'acqua di accettare protoni (H^+)
alga	un vegetale semplice, dotato di clorofilla, costituito da singola cellula (alga unicellulare) o più cellule ma senza fusto, foglie e radici
alghe verdi	organismi unicellulari, della divisione delle Clorofite, nei quali il colore verde impartito dalle clorofille <i>a</i> e <i>b</i> non è mascherato da pigmenti accessori
alimentare, catena	relazione di trasferimento del cibo che lega gli organismi di un ecosistema: da vegetali a erbivori, a carnivori, a decompositori
alimentare, ciclo	trasferimenti di energia connessi con produzione, consumo, decomposizione del cibo (sostanza organica) e successivo riutilizzo da parte dei produttori (vegetali) dei prodotti inorganici della decomposizione
alimentare, rete	è l'insieme di un gruppo di catene alimentari connesse tra di loro

alloctono	qualcosa che si è formato all'esterno dell'ambiente del quale si parla e che viene trasportato in esso per esempio dai fiumi, dalle acque meteoriche, dal vento
amissia	assenza di periodi di circolazione delle acque, tipica di laghi permanentemente coperti dai ghiacci (laghi amittici)
anabiosi	stato di vita sospesa che permette a taluni organismi, ad esempio rotiferi e tardigradi, di superare l'essiccamento e temperature estreme
anadromo	che migra dal mare ai fiumi per riprodursi, come nel caso dei salmoni
anaerobio	organismo che può vivere soltanto in assenza totale o quasi di ossigeno
anione	ione dotato di carica negativa
anossia	situazione di carenza di ossigeno
anossico	privo di ossigeno. Condizione degli strati d'acqua profondi di alcuni laghi. In tali strati, a contatto con sedimenti ad alto contenuto di sostanze organiche, l'intensa attività batterica ha causato il consumo dell'ossigeno disciolto nell'acqua. Questa diventa anossica fino a quando non si verifica il rifornimento di ossigeno libero dagli strati superficiali. In assenza di ossigeno si ha formazione di idrogeno solforato
antropogenico	originato dalle attività umane
artropode	animale con scheletro esterno segmentato e zampe ed appendici articolate, per esempio insetti e crostacei

autoctono	formato nell'ambiente o nel sito del quale si parla
autotrofia	modalità di nutrimento di organismi autotrofi
autotrofo	organismo capace di sintetizzare il suo alimento (sostanza organica) a partire da sostanze inorganiche

B

bacino imbrifero	porzione di territorio drenata da un fiume o un sistema di fiumi che convogliano le acque a un lago o ad un mare
base	composto capace di catturare protoni (H^+)
batimetria	determinazione della topografia del bacino contenente un corpo d'acqua attraverso misura di profondità
bentico	relativo alla zona di fondo del lago o organismi che vi abitano
bentos	gli organismi acquatici che vivono in prossimità o nel sedimento
biodegradabile	che può subire la biodegradazione
biodegradazione	demolizione di composti organici operata da processi biologici; generalmente è realizzata dai batteri
biodiversità	è la varietà delle diverse specie, la variabilità delle caratteristiche genetiche di ciascuna specie e, infine, la varietà di ecosistemi diversi che esse formano
bioluminescenza	produzione di luce senza apprezzabile produzione di calore da parte di organismi viventi a

	seguito di reazioni chimiche all'interno di particolari cellule o strutture
biomassa	quantità, espressa in peso, di materia vivente per unità di superficie o di volume d'acqua
biosfera	zona di transizione tra terra e atmosfera ove è localizzata la maggior parte degli organismi viventi terrestri; è la porzione più esterna della geosfera e la più interna dell'atmosfera
C	
C	simbolo chimico del carbonio
caldera	cavità costituita dal relitto di un cratere vulcanico; i laghi di caldera sono quelli che occupano tali cavità
carapace	porzione a forma di scudo dell'esoscheletro che copre parte della regione dorsale anteriore degli artropodi
carboidrati	composti organici di origine biologica costituiti da carbonio, ossigeno ed idrogeno
carico esterno	nutrienti o inquinanti che arrivano ad un lago dall'esterno, per esempio attraverso i fiumi tributari
carico interno	è costituito da nutrienti o inquinanti rilasciati nelle acque libere dai sedimenti
carnivoro	organismo che uccide animali e se ne ciba
carota (di sedimento)	un campione cilindrico, verticale, del sedimento di fondo di un lago dal quale si possono avere indicazioni sulla stratificazione dei sedimenti di fondo e sulle loro modificazioni

	nel tempo. Sul loro studio si basa la paleolimnologia, scienza che studia le condizioni dei laghi nel passato
catione	ione dotato di carica positiva
chemiosintesi	autotrofia sostenuta dall'energia ricavata da legami chimici inorganici e da sostanze inorganiche come datori di elettroni; è attuata dai microorganismi chemiolitotrofi
chemoclinio	gradiente di densità dovuto a un cambiamento della concentrazione di sali (sin.: picnoclinio)
chitina	polisaccaride azotato principale costituente dell'esoscheletro degli artropodi
cicломorfosi	è la periodica comparsa, nell'ambito della stessa specie, di individui con una morfologia differente; il fenomeno si manifesta nei microcrostacei e nei rotiferi
circo	depressione a forma di tazza scavata in una montagna da un ghiacciaio. Se si riempie di acqua forma un lago di circo
clinogrado	gradiente in diminuzione. Per esempio, si dice curva clinograda quella che descrive la progressiva diminuzione della concentrazione di ossigeno con la profondità
clorofilla	gruppo di pigmenti utilizzati dai vegetali per catturare l'energia luminosa durante la fotosintesi
coloniale, organismo –	è un organismo nel quale gli individui sono uniti insieme a formare una unità (la colonia) e non esistono come organismi separati

- commensalismo relazione di simbiosi tra due specie nella quale una specie trae vantaggi dall'altra senza però danneggiarla
- compensazione, profondità di – profondità alla quale c'è luce esattamente sufficiente per produrre, per attività fotosintetica, una quantità di ossigeno pari a quella che gli organismi hanno bisogno per la loro respirazione
- competizione interazione tra due popolazioni nella quale ciascuna inibisce l'altra
- comunità insieme di organismi, integrati e reciprocamente adattati, vegetali e animali che occupano una certa area. L'insieme, che può essere dotato o privo di autosufficienza, è considerato in uno stato di equilibrio dinamico
- condensazione processo fisico che porta un vapore allo stato di liquido o di solido; è l'opposto di evaporazione. La condensazione del vapore acqueo si attua con sviluppo di calore e produce, quindi, un innalzamento di temperatura
- conducibilità è una misura indiretta degli elettroliti; fisicamente è il reciproco della resistenza
- contaminante ogni sostanza chimica che ha un effetto negativo sulla salute, sulla riproduzione o sulla sopravvivenza degli organismi in un ambiente
- convezione spostamento di una parcella all'interno di un fluido che esita nel trasporto e nel mescolamento delle proprietà di quel fluido. La convezione è, insieme con la conduzione e la radiazione, una delle principali modalità di trasferimento dell'energia

D

decomposizione	processo biologico di degradazione delle strutture di un organismo sostenuto dalla demolizione delle molecole organiche da parte della microflora batterica
denitrificazione	processo biologico, attuato in natura dai batteri denitrificanti, che realizza la progressiva riduzione dei composti azotati organici fino ad azoto molecolare
detritivoro	animale che si nutre di sostanza organica morta (detrito organico) e della microflora batterica ad essa associata
detrito	sostanza organica morta. Nelle acque può essere disciolta o presente in forma di particelle sospese sulle quali possono essere insediate cellule batteriche
diatomee	è una classe (nome ufficiale: Bacillariofite) di microscopici vegetali planctonici dotati di una parete silicea costituita da due valve sovrapposte come “fondo” e “coperchio” di una scatola
digestione	frammentazione di molecole organiche complesse in molecole più piccole operata da enzimi o da sostanze chimiche
dimissia	modalità di attuazione della piena circolazione di un lago dimittico
dimittico	è un lago con due periodi di piena circolazione ogni anno, il primo, primaverile, allo scioglimento del ghiaccio e prima della stratificazione estiva e il secondo, autunnale, al cessare della stratificazione estiva e prima della formazione di ghiaccio

dinoflagellati	è una divisione (nome ufficiale: Dinofite) di organismi unicellulari dotati di flagelli. Nei dinoflagellati si trovano tutti i tipi di alimentazione: ci sono specie autotrofe, dotate di clorofilla, specie eterotrofe capaci di catturare (fagocitosi) altri organismi o particelle di detrito e specie mixotrofe, cioè capaci di fotosintetizzare ed anche di assumere sostanze organiche già formate
distrofia	condizione di un lago con un bilancio produzione – decomposizione di sostanza organica profondamente alterato; quest'ultimo processo è impedito e il riciclo di nutrienti è rallentato
DOC	acronimo di <i>Dissolved Organic Carbon</i> = carbonio organico disciolto, cioè contenuto in carbonio delle molecole organiche disciolte in acqua che attraversano i filtri con pori di 0,2 μm
DOM	acronimo di <i>Dissolved Organic Matter</i> = sostanza organica disciolta, cioè molecole organiche disciolte in acqua che attraversano i filtri con pori di 0,2 μm
durezza temporanea	è quella rimossa per la precipitazione dei carbonati di calcio e magnesio con l'ebollizione
durezza, dell'acqua	è la capacità di un'acqua di legarsi ad un sapone ed è dipendente dalla presenza di cationi (calcio e magnesio)
E	
ecosistema	il complesso delle componenti viventi e non viventi di una comunità

effetto serra	intrappolamento nell'atmosfera delle radiazioni ad onda lunga (calore) da parte di alcuni gas (per es. CO ₂). Si ritiene che l'eccessiva quantità di questo gas prodotta dall'uomo con la combustione possa produrre un riscaldamento artificiale dell'atmosfera con conseguenze ecologiche globali
endemica	si dice di una specie che si reperisce soltanto in una certa località e che si suppone si sia evoluta in quello specifico luogo
endoreico	significa "che fluisce all'interno" ed è usato per indicare i bacini imbriferi chiusi, che non riversano al loro esterno le acque che raccolgono. Nei climi secchi in tali bacini si originano i laghi salati per l'impossibilità del sistema idrico di portare via i sali disciolti nelle acque che, anzi, vengono progressivamente concentrati per evaporazione della fase liquida
EOC	acronimo di <i>Extracellular Organic Carbon</i> = carbonio organico disciolto rilasciato dalle cellule algali durante la fotosintesi o, più in generale, escreto o secreto dagli organismi
epifitico	che cresce sopra un vegetale
epilimnio	è lo strato d'acqua superiore di un lago termicamente stratificato; è situato sopra il termoclinio o metalimnio, che lo separa dagli strati profondi (ipolimnio)
epilitico	che cresce sopra un substrato roccioso
eterotrofo	organismo che assume energia degradando molecole organiche prodotte da organismi autotrofi

- eufotica, zona – con luce; porzione (strato eufotico) di un corpo d'acqua raggiunto da una quantità di radiazione solare sufficiente per la fotosintesi
- eutrofico altamente produttivo. Situazione di un corpo d'acqua ricco di nutrienti (azoto, fosforo) e quindi capace di sostenere una intensa crescita algale
- eutrofizzazione progressivo arricchimento, naturale o artificiale, di un lago in nutrienti che causa un aumento della produzione algale
- evaporazione processo fisico attraverso il quale un liquido o un solido si trasforma in gas; è l'opposto della condensazione
- F**
- fattori biotici fattori biologici come disponibilità di energia (cibo), competizione tra prede e predatori, competizione tra specie diverse, che influenzano la distribuzione e l'abbondanza delle specie vegetali e animali
- filtratori animali che si nutrono filtrando acqua e trattenendo le particelle in essa sospese
- fioritura algale elevatissima concentrazione (milioni di cellule per litro) di fitoplancton in una certa zona, causata da un improvviso e massivo sviluppo di organismi, spesso di una sola specie, e tale da produrre evidenti modificazioni dell'acqua (colorazione)
- fitoplancton è la componente vegetale del plancton. Nella zona pelagica sono gli unici organismi fotosintetici
- fotoautotrofi organismi fotosintetici, capaci di fotosintesi

fotosintesi processo biochimico che porta alla costruzione di molecole di carboidrati, cioè di alimento, a partire da biossido di carbonio (CO₂) e acqua in presenza di clorofilla, utilizzando energia luminosa e liberando ossigeno (O₂)

G

grazing termine inglese che indica l'attività di assunzione di cibo da parte dei consumatori primari; attività di pascolo

H

habitat termine inglese che indica un luogo caratterizzato da un particolare tipo di ambiente abitato da organismi

I

idrografia scienza che studia le caratteristiche fisiche di oceani, mari, laghi, fiumi e zone costiere, specie nell'ottica del loro uso per la navigazione

idrologia studio delle acque sulla terra e, in particolare, degli effetti di precipitazione ed evaporazione sulle acque fluviali, lacustri e sotterranee

idrologico, ciclo è il ciclo dei trasferimenti dell'acqua tra i suoi diversi siti di accumulo (acque interne e oceani) e i suoi diversi stati (liquido, solido e vapore)

idrosfera è il complesso di tutte le acque degli oceani, dei laghi, dei fiumi e sotterranee; può anche includere le acque presenti nell'atmosfera

igroscopico sensibile all'acqua o capace di trattenerla

inorganico	composto chimico che non contiene carbonio
ione	atomo o gruppo di atomi dotato di carica positiva o negativa
ipersalino	con un alto contenuto di sali
ipolimnio	la zona profonda di un lago termicamente stratificato; è separato dagli strati superficiali (epilimnio) dalla zona del metalimnio, caratterizzata dalla presenza di un termoclinio, cioè da un salto termico (di 1°C per metro)
isoterma	linea che congiunge i punti di uguale temperatura
isotermia	condizione di essere alla stessa temperatura
L	
larva	embrione capace di vita indipendente prima che esso assuma le caratteristiche dell'organismo adulto
lentico	concernente le acque ferme o a bassa velocità di corrente (laghi, stagni, zone umide)
<i>liming</i>	tecnica di ripristino del corretto pH delle acque di un lago neutralizzandone l'acidità eccessiva mediante l'immissione di carbonato di calcio
limnico (o limnetico)	relativo al lago
limnologia	la scienza che studia la fisica e la chimica dei corpi d'acqua situati sui continenti nonché la biologia e l'ecologia degli organismi
litorale, zona	regione marginale di un corpo d'acqua che si estende dalla riva verso il centro del lago fino

	alla profondità raggiunta dalla radiazione solare
litosfera	parte solida della crosta terra, anche sinonimo di crosta terrestre
livello trofico	livello nutrizionale; compartimento della catena alimentare ove, per esempio, il primo livello trofico è costituito dai produttori primari
lotico	concernente le acque correnti (fiumi e torrenti)
M	
m s.l.m.	abbreviazione di metri sul livello del mare
macrobentos	organismi con dimensioni superiori ad 1 mm che vivono in prossimità del fondo o nel sedimento
macrofite	vegetali acquatici visibili ad occhio nudo
meiofauna	organismi che vivono tra i granelli di sabbia o le particelle di materiali depositati sul fondo
meromissi	condizione di un lago permanentemente stratificato per la maggior salinità degli strati profondi. I laghi meromittici possono talvolta perdere la loro stratificazione a seguito di forti venti
meromissi biogenica	circolazione incompleta delle acque di un lago imputabile all'accumulo di sostanze di origine biologica negli strati profondi (nel monimolimnio)
meromissi cre-nogenica	circolazione incompleta, limitata agli strati superficiali (mixolimnio), delle acque di un lago causata dall'apporto di sali da sorgenti subacquee che determinano una maggior densità degli strati profondi (monimolimnio)

mesotrofia	è la condizione di un lago moderatamente ricco in nutrienti algali ed è intermedia tra l'oligotrofia (= scarsità di nutrienti) e l'eutrofia (= eccesso di nutrienti)
messaggero	cilindro metallico, del peso di poche centinaia di grammi, con un foro al suo asse che viene utilizzato per comandare a distanza gli strumenti di campionamento. Questi vengono calati alla profondità voluta sospesi ad un cavo lungo il quale viene lasciato cadere il messaggero quando si desidera azionare il campionatore
metabolismo	insieme di reazioni chimiche che hanno luogo in un organismo vivente e che portano alla costruzione (reazioni anaboliche) o alla demolizione (reazioni cataboliche) di molecole organiche
metalimnio	in un lago termicamente stratificato è la zona compresa tra gli strati superficiali (epilimnio) e quelli profondi (ipolimnio); nel metalimnio è localizzato il termoclinio
microgrammo	simbolo: μg ; è la milionesima parte di 1 grammo
micrometro	simbolo: μm ; è la milionesima parte di 1 metro e, quindi, è lungo un millesimo di millimetro
mixolimnio	zona di un lago permanentemente stratificato che è più prossima alla superficie e che subisce il rimescolamento per azione del vento
mixotrofia	capacità di nutrirsi utilizzando sia composti organici che inorganici del carbonio
monimolimnio	strato d'acqua profondo di un lago meromittico che, a causa della stratificazione chimica,

	non giunge mai in contatto con l'atmosfera ed è per questo anossico
monomissi	si dice del rimescolamento completo delle acque di un lago quando questo ha luogo una volta l'anno
monomittico	è un lago nel quale si ha la piena circolazione una volta l'anno, quando la perdita invernale di calore degli strati superficiali ne abbassa la temperatura fino ad eguagliare quella ($\sim 4^{\circ}\text{C}$) degli strati profondi più densi. I laghi monomittici caldi, tipici della regione temperata, non ghiacciano in inverno ed in essi, non protetti dall'azione del vento, non si può realizzare la stratificazione termica inversa
morfometrico	relativo alla misura della forma. I principali parametri morfometrici di un lago sono: profondità media e massima, sviluppo della linea di costa, superficie
N	
N	simbolo chimico dell'azoto
nanoplancton	vegetali e animali planctonici con dimensioni comprese tra i 2 e i 20 microns
necton	grandi invertebrati e pesci capaci di spostamenti indipendenti dalla turbolenza delle acque
neuston	è la comunità degli organismi che vivono a contatto della pellicola superficiale, prodotta appunto dalla tensione superficiale; comprende l'iponeuston e l'epineuston che vivono, rispettivamente, sotto e sopra la pellicola superficiale

- nicchia è il ruolo funzionale e la posizione di un organismo nell'ecosistema
- nutriente ogni elemento o sostanza essenziale per gli organismi viventi. Azoto e fosforo sono nutrienti essenziali per tutte le alghe e il silicio lo è per le Diatomee; anche le vitamine del gruppo B sono essenziali per molte alghe
- O**
- oligomissi completa circolazione che si verifica raramente e irregolarmente. Laghi oligomittici sono quelli tropicali o temperati profondi, nei quali una modesta differenza di temperatura tra acque superficiali e acque profonde è sufficiente a mantenere la stratificazione. Questo è, per esempio, il caso del Lago Maggiore
- oligotrofia è la condizione di un lago povero di nutrienti algali. Il lago oligotrofo è piuttosto profondo, ha acque trasparenti con un basso contenuto di sostanza organica ed una elevata concentrazione di ossigeno
- olomissi circolazione completa o completo rimescolamento delle acque che si ha nei laghi olomittici
- ortograda, curva diritta, senza pendenza. Per esempio, si dice curva ortograda quella che descrive una concentrazione di ossigeno o un valore di temperatura circa costante a ogni profondità
- ossidazione è una reazione chimica nella quale gli elettroni sono rimossi da un atomo o da una sostanza. Questo spesso, ma non necessariamente, si verifica per reazione con l'O₂

P

P	simbolo chimico del fosforo
paleolimnologia	branca della limnologia che studia origine ed evoluzione geomorfologica dei laghi nonché la loro risposta, nel passato recente e in quello remoto delle ere geologiche, a variazioni antropogeniche, climatiche, idrologiche e di contenuto in sostanze disciolte e sospese. Analogamente alla limnologia, l'oggetto di studio non è il lago soltanto ma l'intero bacino imbrifero
pelagica, zona	è quella delle acque aperte, non direttamente influenzate dal litorale e dal fondo
perifiton	popolamento algale che cresce attaccato alle superfici sommerse
pH	è una misura della concentrazione di ioni idrogeno in una soluzione; pH=7 significa che la concentrazione di ioni idrogeno in una soluzione è di $1 \times 10^{-7} \text{ mg L}^{-1}$. Un pH=7 è neutro; un pH minore di 7 è acido e un pH maggiore di 7 è basico
plancton	organismi alla deriva nelle acque dolci o marine o dotati di mobilità insufficiente a contrastare i movimenti delle masse d'acqua. Nei laghi questo gruppo include vegetali (fitoplancton) e animali (zooplancton) microscopici o lunghi pochi millimetri, uova e stadi larvali del necton e del bentos
plancton di rete	plancton trattenuto da reti con maglie attorno ai 100 μm di lato
planctonico	relativo al plancton
planctonte	individuo della comunità planctonica

POC	acronimo di <i>Particulate Organic Carbon</i> = carbonio organico particellato. È un modo di esprimere la quantità di POM misurando il contenuto in carbonio delle particelle, detrito organico e organismi viventi, sospese in acqua e trattenute da filtri con pori di 0,2 μm
polimissia	condizione di un lago che ha molte piene circolazioni per anno o è quasi sempre in circolazione
polimorfismo	presenza nella stessa specie di individui strutturalmente e funzionalmente diversi
POM	acronimo di <i>Particulate Organic Matter</i> = sostanza organica particellata, cioè particelle sospese in acqua e trattenute da filtri con pori di 0,2 μm . Include organismi viventi e particelle di detrito organico
predatore	animale carnivoro che cattura e uccide altri animali per cibarsene
predazione	interazione tra popolazioni animali basata sul fatto che una popolazione (predatori) sfrutta come cibo l'altra (preda)
produttività	massa di sostanza organica sintetizzata dagli organismi in una unità di volume e di tempo (per esempio, g per litro per ora)
produzione	massa di sostanza organica (biomassa) sintetizzata da una popolazione in una unità di tempo al netto delle perdite per il mantenimento del metabolismo (respirazione), per le escrezioni e secrezioni, per la mortalità e la predazione
produzione lorda	è la produzione totale di sostanza organica, inclusa la quota utilizzata per la respirazione e per altri processi metabolici

produzione primaria quantità di sostanza organica sintetizzata dai vegetali per unità di tempo in una unità di volume d'acqua o in una colonna d'acqua estesa dalla superficie al fondo e sottostante a una unità di area

protozoi regno degli animali microscopici unicellulari

Q

qualitativo, campionamento è quello che si propone di individuare quali organismi sono presenti in una certa area

quantitativo, campionamento è indirizzato alla stima dell'abbondanza di organismi in una certa area

R

radiazione emissione e propagazione di energia attraverso lo spazio o un mezzo fisico (aria, acqua)

radiazione ultravioletta radiazioni dello spettro elettromagnetico di lunghezza d'onda approssimativamente compresa tra 10 e 400 nanometri, intermedia tra il visibile e i raggi X

riduzione reazione chimica nella quale gli elettroni sono aggiunti a un atomo o ad una molecola con, spesso ma non necessariamente, contemporanea rimozione di un atomo di ossigeno

S

Secchi, disco di - disco bianco di circa 20 cm di diametro utilizzato per valutare la trasparenza di un corpo d'acqua in base alla sua visibilità in profondità

sedimentazione processo di trasferimento verso il fondo per gravità del detrito organico originatosi negli strati superficiali di un corpo d'acqua nonché

	del detrito organico ed inorganico proveniente dal bacino imbrifero
sedimento	particelle di detrito organico ed inorganico accumulate sul fondo di un lago
sesse	oscillazioni pendolari dell'intera massa d'acqua di un lago, generalmente innescate da fenomeni meteorologici, che si manifestano come oscillazioni della superficie lacustre (sesse superficiali) o di strati intermedi tra zone d'acqua a diversa densità, come per esempio il metalimnio (sesse interne o termiche)
seston	sostanza organica particellata, vivente e non vivente, sospesa in acqua
simbiosi	relazione tra due specie che è utile e non dannosa per entrambe
soluzione	stato di una sostanza (soluta) le cui molecole sono omogeneamente distribuite in un liquido (solvente)
specie	insieme di organismi con caratteristiche comuni, gli accoppiamenti dei quali sono fertili e consentono la riproduzione
stratificazione	situazione dei laghi nei quali le acque sono distribuite in strati diversificati da caratteristiche fisiche (temperatura) o chimiche (concentrazione di materia)
stratificazione termica	fenomeno che si manifesta nei laghi con lo sviluppo di due strati discreti di acqua a temperatura diversa e relativamente omogenea nello strato. Le acque più calde sopra (epilimnio) e più fredde sotto (ipolimnio) sono separate da una regione intermedia (metalimnio)

	dove la temperatura cambia bruscamente con la profondità
stratificazione, – diretta	riferita alla distribuzione verticale della temperatura (profilo termico), indica una situazione nella quale l'acqua più densa (più fredda) è situata sotto gli strati di acqua a minor densità (più calda); tipica struttura termica estiva
stratificazione, – inversa	situazione nella quale le acque più calde stanno sopra quelle più fredde; è tipicamente la stratificazione invernale al disotto della copertura di ghiaccio di un lago
sublitorale	zona del fondo di un corpo d'acqua situata tra la zona litorale e quella profonda

T

tassonomia	classificazione di vegetali e animali in gruppi sulla base delle loro peculiari caratteristiche
tempo di residenza (o di ritenzione)	è il rapporto, espresso in anni, tra il volume di un lago ed il volume annuo d'acqua da esso effluente
tensione superficiale	fenomeno tipico delle superfici liquide determinato da una forte attrazione verso l'interno del liquido delle sue molecole poste alla superficie così da ridurre l'area superficiale
termoclinio	brusco gradiente verticale negativo di temperatura nei corpi d'acqua, più grande dei gradienti termici sovrastanti o sottostanti
tettonico	relativo a qualunque tipo di attività nella crosta terrestre
torbidità	trasparenza di un'acqua in funzione della presenza in essa di particelle in sospensione

traspirazione	evaporazione di acqua dagli stomi dei vegetali
trofogenica, zona	regione di un lago dove sono prevalenti i processi di sintesi di nuova sostanza organica; tende a coincidere con la zona eufotica, dove è possibile la fotosintesi
trofolitica, zona	regione di un lago dove sono prevalenti i processi di decomposizione della sostanza organica
turbolenza	flusso erratico e molto irregolare di un fluido (flusso turbolento), caratterizzato da intensi moti vorticosi su piccola scala e da parcelle di fluido che si muovono in direzioni e con velocità diverse rispetto al flusso principale

U

ubiquitario	che si trova dappertutto
umici, composti	molecole organiche terminali nella demolizione del materiale vegetale

V

V	volume di un corpo d'acqua
viscosità	capacità di un fluido di resistere per un certo tempo ad una sollecitazione tangenziale e quindi alla deformazione

Z

Z	profondità di un corpo d'acqua
Z _{max}	profondità massima di un corpo d'acqua

zooplancton frazione della comunità planctonica costituita da animali (zooplanctonti). Include vari crostacei (Cladoceri, Copepodi), protozoi, larve di animali del bentos e del necton