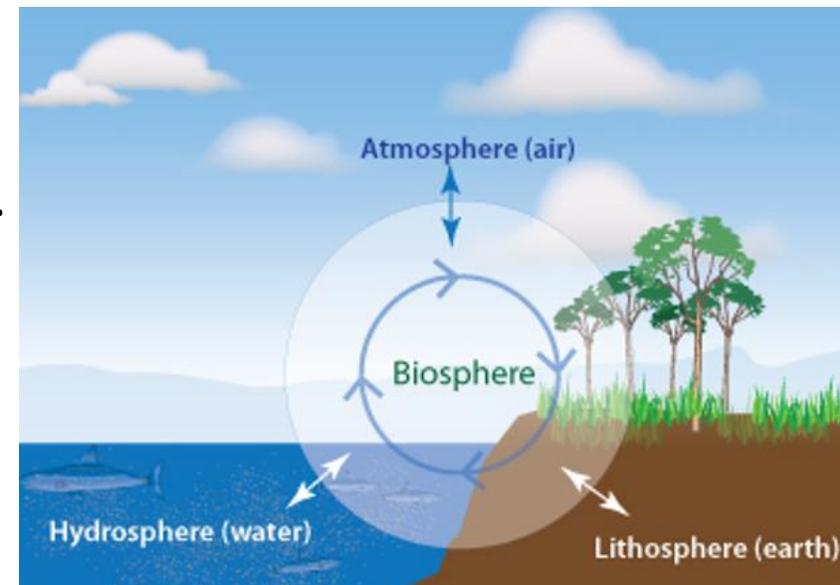


# MICROBIOLOGIA DEGLI AMBIENTI ACQUATICI

## IDROSFERA

- Comprende tutte le acque presenti sulla terra.
- E' interconnessa con la litosfera e l'atmosfera.

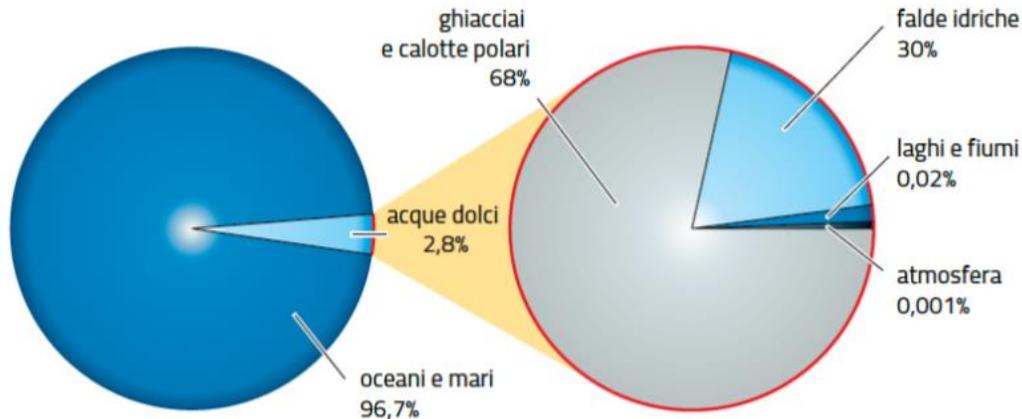


**Acque superficiali**  
oceani, mari, laghi, fiumi, estuari, ...

**Acque sotterranee**

**Acque marine**  
~ 97%

**Acque dolci**  
~ 3%



L'acqua rinvenibile sulla terra è presente in **diversi stati fisici**:

- **liquido** → mari, fiumi, laghi, falde sotterranee
- **solido** → ghiacciai
- **aeriforme (vapore acqueo)** → aria, terreno

L'acqua dolce rappresenta la fonte di approvvigionamento di **acqua potabile** per gli organismi della terra

**Acque dolci**

**Acque lentiche**  
(stagnanti, non correnti)  
laghi, stagni, paludi

**Acque lotiche**  
(correnti)  
fiumi, torrenti, ruscelli

# ACQUE DOLCI

~3% dell'idrosfera

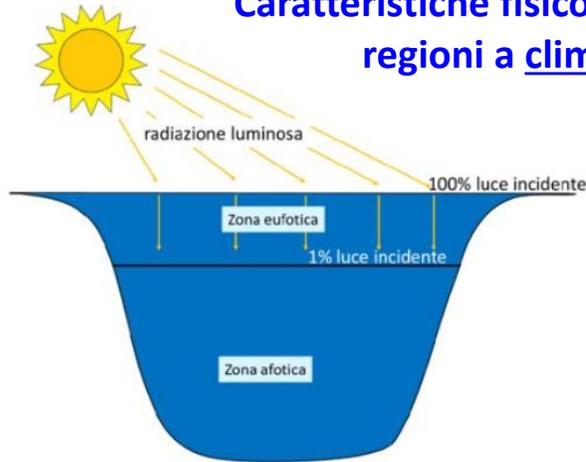
Acque lentiche  
laghi, stagni, paludi

Zona litorale  
Zona pelagica (laghi profondi): non risente delle influenze dirette del litorale e del fondo e presenta una zona afotica.

Ambienti influenzati da

- Apporti di nutrienti dalla litosfera
- Condizioni climatiche

## Caratteristiche fisico-chimiche di laghi di regioni a clima temperato



### LUCE

La luce condiziona la composizione delle comunità microbiche.

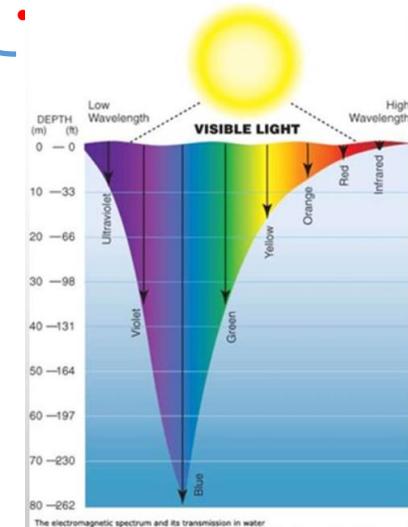
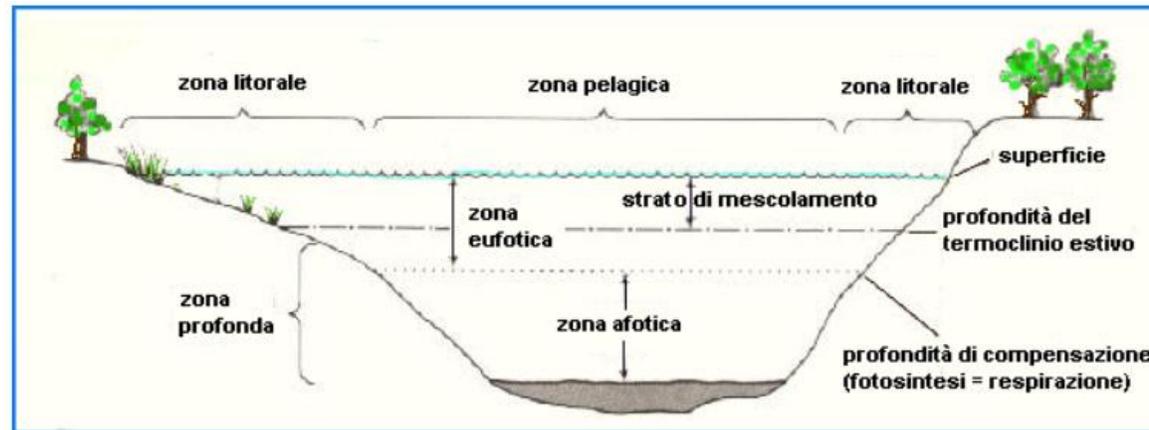
La presenza di luce consente la colonizzazione da parte di **microrganismi fototrofi**, sia in condizioni di aerobiosi che di anaerobiosi.

Le acque lentiche, dal punto di vista microbiologico, pur essendo delimitate costituiscono ambienti molto complessi

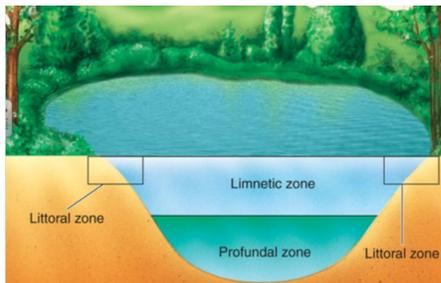
- Luce
- Temperatura
- Ossigeno
- pH
- Salinità
- Nutrienti

Nei laghi, in base alla penetrazione della luce possono essere definite diverse zone:

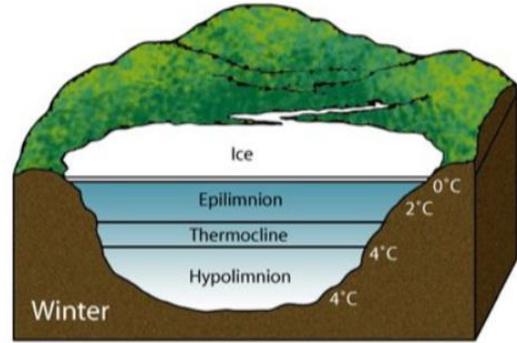
- Zona litorale } eufotiche
- Zona limnetica } eufotiche
- Zona profonda } afotica



Nella **zona litorale** la luce raggiunge il fondo, mentre nella **zona limnetica** essa giunge fino alla **profondità di compensazione**, dove l'attività fotosintetica è pari a quella respiratoria. Entrando nella **zona profonda (zona afotica)** la luce diminuisce (insufficiente a sostenere i processi fotosintetici), fino a scomparire del tutto.



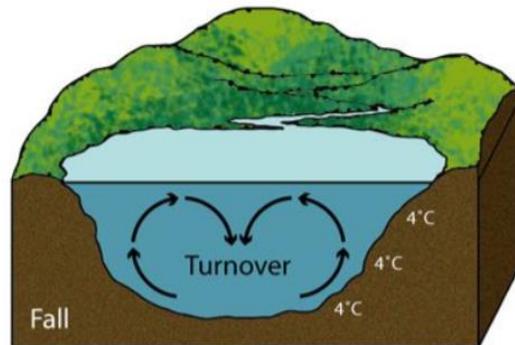
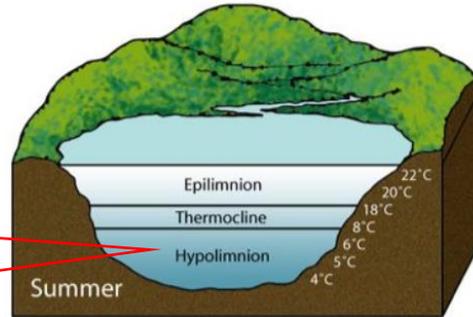
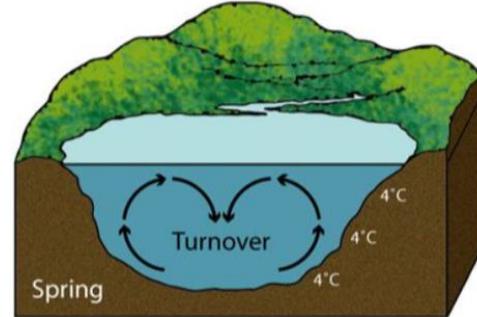
## L'acqua raggiunge la massima densità a 4°C



- Leggera stratificazione dell'acqua.
- Temperatura dell'acqua pressoché uniforme.
- Sottile strato di ghiaccio in superficie (0-2 °C).
- Strato profondo a 4 °C.

- Aumento della temperatura superficiale oltre 0 °C.
- Aumento della densità dell'acqua superficiale.
- Circolazione lungo la colonna d'acqua.
- Scomparsa della stratificazione.

Nell'ipolimnio, l'attività microbica, legata ai processi di decomposizione, consumando O<sub>2</sub> porta alla formazione di zone anossiche.



- L'epilimnio si raffredda.
- Rimescolamento del bacino.
- Ossigenazione dell'ipolimnio.
- L'Epilimnio si arricchisce di nutrienti provenienti dal fondo.

## TEMPERATURA

### STRATIFICAZIONI E RIMESCOLAMENTO IN UN LAGO zona temperata - emisfero settentrionale

A seconda delle stagioni, la **temperatura** determina **stratificazioni** e **rimescolamenti** dell'acqua del bacino.

### Alterazioni delle popolazioni microbiche

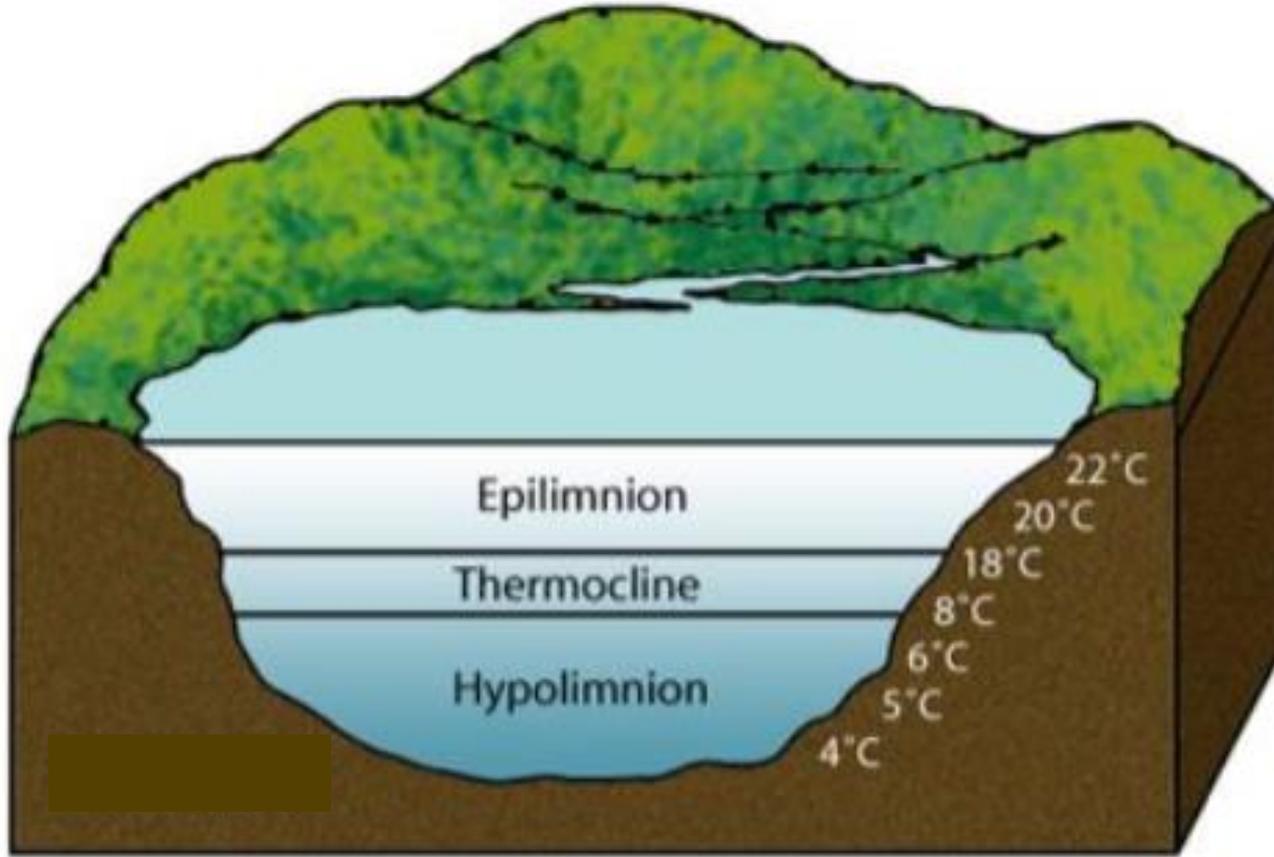
- Aumento della temperatura superficiale.
- Diminuzione densità dell'acqua superficiale.
- L'acqua più calda si stratifica in superficie (**epilimnio**), galleggiando sullo strato sottostante più freddo (**ipolimnio**).
- La zona di transizione tra epilimnio ed ipolimnio è definita **termocline** (o metalimnio).

I sedimenti, ad eccezione dei fondali bassi, sono anossici.

**Laghi oloimittici** → con almeno un rimescolamento all'anno.

**Laghi meromittici** → con stratificazione permanente, indipendentemente dalle stagioni (ipolimnio anossico).

**STRATIFICAZIONI E RIMESCOLAMENTO nei laghi delle regioni tropicali**

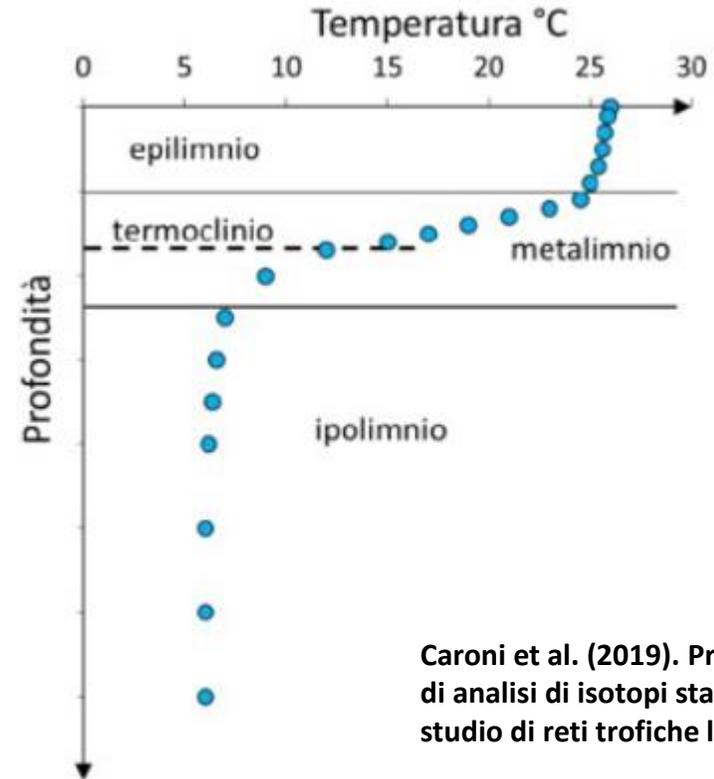


**Stratificazione permanente**  
(lago meromittico)



**Condizione frequente in laghi di regioni tropicali**  
a causa dell'assenza di variazioni stagionali.

**Profilo termico estivo** (lago di una zona temperata) o **permanente** (lago di una regione tropicale), con definizione dei differenti strati della colonna d'acqua.



Caroni et al. (2019). Problemi e prospettive dell'uso di analisi di isotopi stabili di carbonio e azoto per lo studio di reti trofiche lacustri. CNR Edizioni.

**Termocline**

Strato di acqua dove si assiste ad un cambiamento di temperatura secondo un gradiente rapido fra lo strato caldo superficiale (epilimnio) e lo strato freddo sottostante (ipolimnio.)

## NUTRIENTI

organici ed inorganici

Disponibilità di nutrienti

Apporti dalla litosfera  
Attività microbiche  
Rimescolamento delle acque

Laghi oligotrofici

(incontaminati)  
Poveri di nutrienti  
Scarsa produzione  
primaria

Laghi molto profondi

Laghi eutrofici

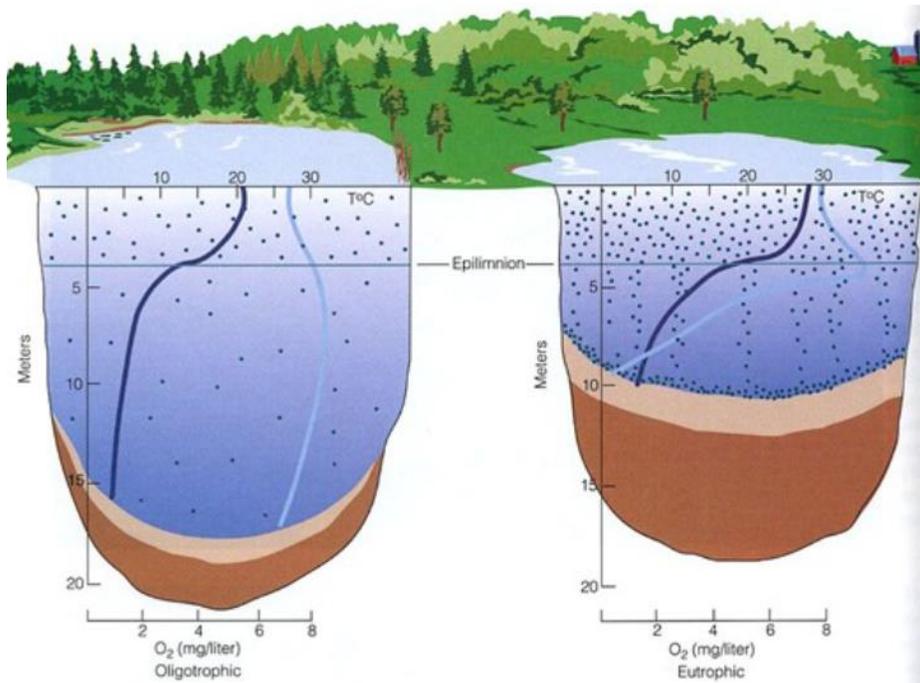
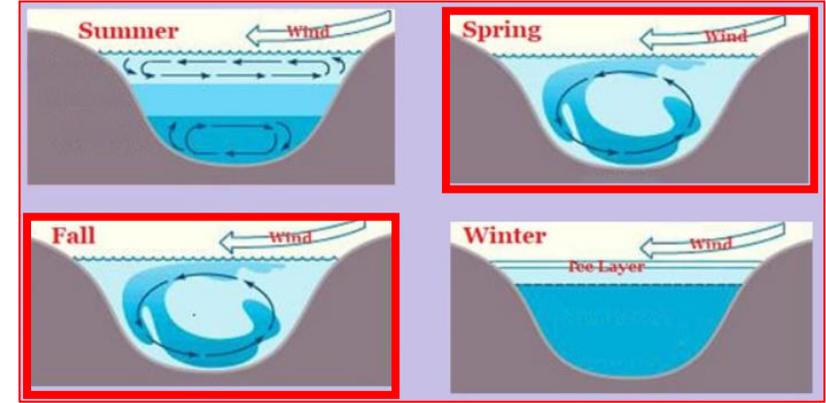
Ricchi di nutrienti  
Elevata produzione  
primaria  
(fotosintesi)

Laghi poco profondi

Le concentrazioni di  $O_2$  subiscono forti oscillazioni giornaliere.

**Giorno:** elevata produzione di  $O_2$  da parte dei **fototrofi ossigenici**.

**Notte:** consumo  $O_2$  da parte dei **chemiotrofi**.



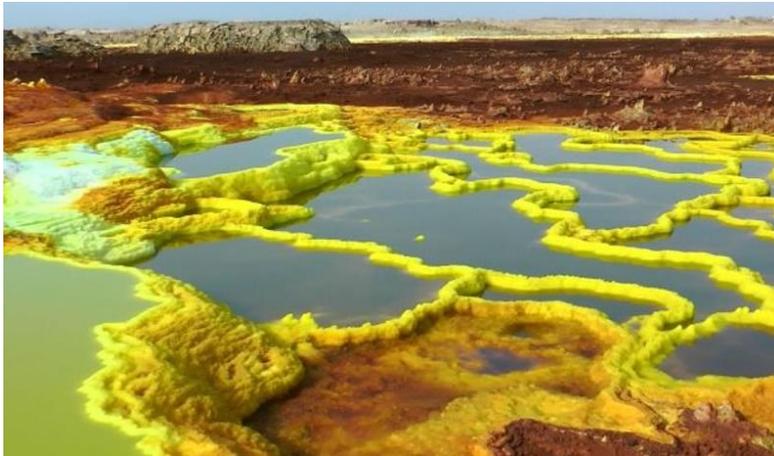
## pH

Fattore che condiziona la composizione delle comunità microbiche degli ambienti idrici.

Alcuni **laghi alcalini** (Africa centrale), per l'elevata concentrazione ioni carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), presentano un pH estremamente basico (9-10,5). L'elevata disponibilità di  $\text{CO}_2$  consente una elevata attività fotosintetica (produzione primaria).



**Lago Turkana** ha pH 9,5-9,7  
**Lago Malawi** pH 8,2-8,9  
**Lago Tanganika** pH 8-9



I **laghi acidi**, di solito, si trovano in prossimità di **vulcani**, dove acido solforico, idrogeno solforato, acido fluoridrico, acido cloridrico e anidride carbonica gorgogliano nell'acqua.

Nei laghi vulcanici, gli acidi possono entrare nell'acqua attraverso **fumarole attive** o **sfiati vulcanici**.

Nelle aree non vulcaniche, i laghi acidi possono formarsi dalla deposizione acida in seguito a piogge acide, inquinamento o deflussi acidi da operazioni minerarie.

I laghi acidi a Dallol (Etiopia) sono il risultato della **lisciviazione acida** dai **vulcani** vicini. Con un **pH <5,0**, pochi organismi (acidofili) possono vivere in laghi acidi.

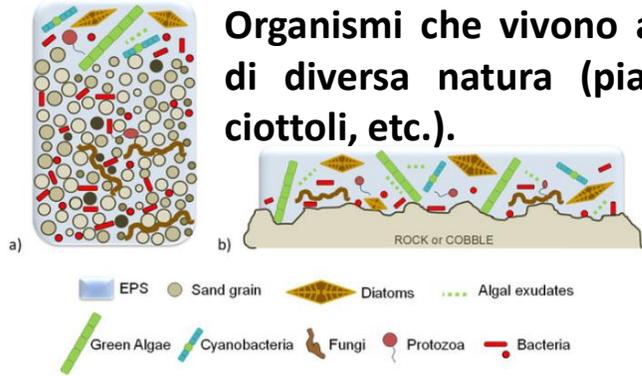
Indonesia → Kawah Ijen (il più grande lago acido del mondo: pH < 0,3). Presenza procarioti, prevalentemente *Archaea*.



# ORGANISMI PRESENTI IN UN BACINO DI ACQUA DOLCE

## Periphyton

Organismi che vivono adesi a superfici di diversa natura (piante acquatiche, ciottoli, etc.).



Mora et al. (2016). Limits of the Biofilm Concept and Types of Aquatic Biofilms - In Romaní, Guasch, Dolors Balaguer (eds): Aquatic Biofilms: Ecology, Water Quality and Wastewater Treatment. Caister Academic Press

## Neuston (microstrato di 1-10 $\mu\text{m}$ )

Organismi che vivono all'interfaccia idrosfera-atmosfera: **microalghe**, **batteri** (cianobatteri), **funghi** (filamentosi e lieviti), **protozoi**.

Notevoli escursioni termiche.

Elevato irraggiamento solare.

Disponibilità  $\text{CO}_2$ .

Presenza di sostanze (organiche) idrofobiche.

**fotoautotrofi**

## **Microrganismi eterotrofi**

## Plancton (**batterioplancton**, **fitoplancton**, **zooplancton**)

Organismi (0,2-200  $\mu\text{m}$ ) che vivono sospesi nell'acqua (batteri, alghe, protozoi, organismi pluricellulari)

## Necton

Organismi capaci di nuotare e spostarsi nella colonna d'acqua (pesci, molluschi, etc.)

## Benthos (**microbenthos**, **meiobenthos**, **macrobenthos**)

Organismi che colonizzano il fondo dei corpi idrici

**Batteri** (Gram +/-, mobili/immobili, pigmentati, ...)

*Pseudomonas*  
*Caulobacter*  
*Hyphomicrobium*  
*Achromobacter*  
*Flovobacterium*  
*Micrococcus*,  
*Leptothrix*,

...

**Funghi filamentosi**  
*Cladosporium*

...

**lieviti**

**Alghe**

*Chromulina*,  
*Chromophyton*,  
*Navicula*,  
*Nautococcus*

...

Meiobenthos  $\rightarrow >0,063 \text{ mm}$  e  $<1 \text{ mm}$

Gli organismi presenti in un corso d'acqua minore vengono generalmente distinti in differenti categorie ecologiche in riferimento allo spazio occupato

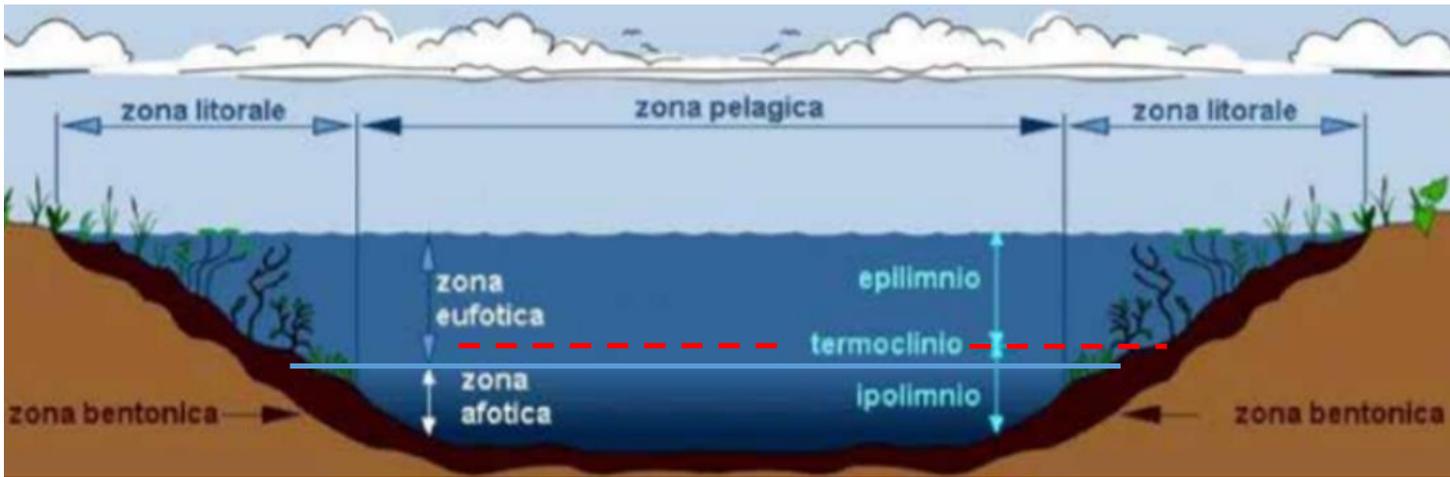
## Microrganismi nella colonna d'acqua

Luce – Temperatura - O<sub>2</sub>

Fattori particolarmente determinanti sulla distribuzione dei microrganismi lungo la colonna d'acqua



Lungo la colonna d'acqua, allontanandosi dal neuston, le concentrazioni microbiche diminuiscono.



### Zona eufotica

dominata dai produttori primari

**Epilimnio:** zona dominata da **fitoplancton**, **batteri** (cianobatteri), **microalghe** (clorofite)



- *Chlorella*,
- *Clamydomonas*,
- *Volvox*,
- *Pediastrum*,
- ...

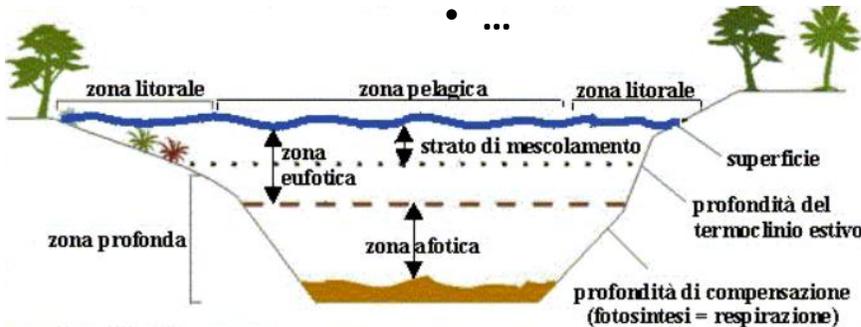
**Ipolimnio:** nella zona dell'ipolimnio ancora raggiunta dalla luce, fino alla **zona di compensazione**, sono presenti **batteri fotosintetici anossigenici** che utilizzano H<sub>2</sub>S come donatore di elettroni per generare potere riducente (NADPH).

- **Batteri verdi** (*Chlorabiaceae*)
- **Batteri purpurei** (*Chromatiaceae*)

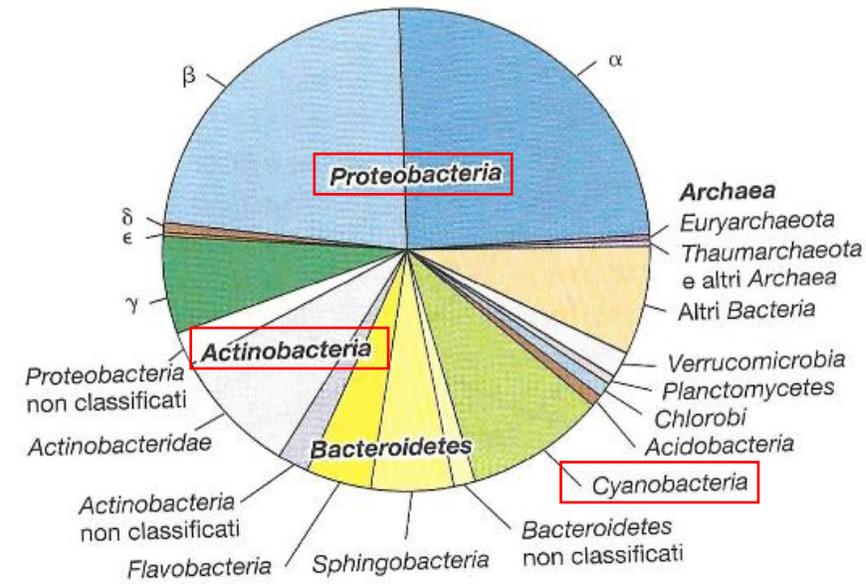
I **batteri rossi non sulfurei** sono i microrganismi metabolicamente più versatili.



Al di sotto della **zona di compensazione**, possono crescere **batteri rossi non sulfurei** fotosintetici (*Rhodospirillaceae*). Batteri in grado di comportarsi sia da fotoautotrofi (in ambiente eufotico privo di O<sub>2</sub>), che da chemiorganotrofi o chemiolitotrofi (al buio in presenza o in assenza di O<sub>2</sub> → aerobi/anaerobi).



## Microrganismi nella colonna d'acqua



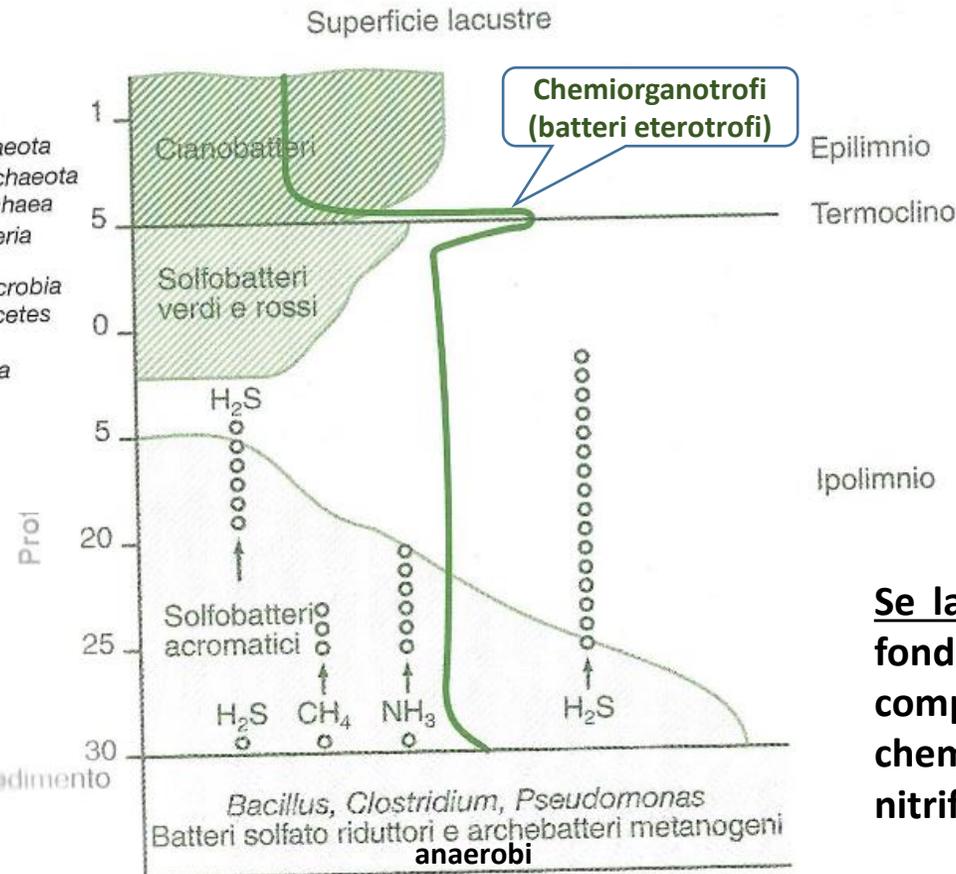
### Diversità microbica nei laghi di acqua dolce

#### Clima

La distribuzione dei microrganismi è legata anche al clima (andamento stagionale).

**Estate** → proliferazione delle alghe negli strati superficiali dell'epilimnio.

**Primavera/autunno** → aumento concentrazioni batteri.



**Chemiorganotrofi (eterotrofi)** sono più abbondanti dove vi è maggiore disponibilità di sostanza organica (termocline e fondo).

Se la colonna d'acqua è ossigenata fino al fondo, al di sotto della zona di compensazione possono svilupparsi, oltre ai chemiorganotrofi, batteri zolfo-ossidanti, nitrificanti, metanotrofi.

Non è possibile definire l'esatta composizione delle comunità microbiche dei laghi.

I laghi non sottoposti a pressione antropica sono, prevalentemente, poveri di nutrienti e, quindi, colonizzati da **microrganismi oligotrofi (autoctoni)**.

Nella catena alimentare dei laghi rientrano anche

- Funghi**
- Protozoi**
- Virus**

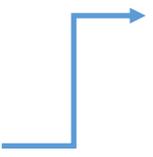
**Funghi**

I **funghi** rinvenibili nei laghi, di solito, vi giungono attraverso residui vegetali o altri materiali organici in decomposizione. Non vengono, pertanto, considerati autoctoni. Intervengono anche nel controllo delle microalghe. Vivono, prevalentemente, in forma adesa e non planctonica. Sono frequenti anche funghi lieviti (*Torulopsis*, *Candida*, *Rhodotorula*, *Cryptococcus*).

**Cianobatteri**

(*Microcystis*, *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Nodularia*, *Nostoc*)

In presenza di elevate concentrazioni di nutrienti inorganici (P, N) e durante i **periodi caldi** dell'anno, i cianobatteri possono dare origine ad intense **fioriture** sulla superficie dei laghi.

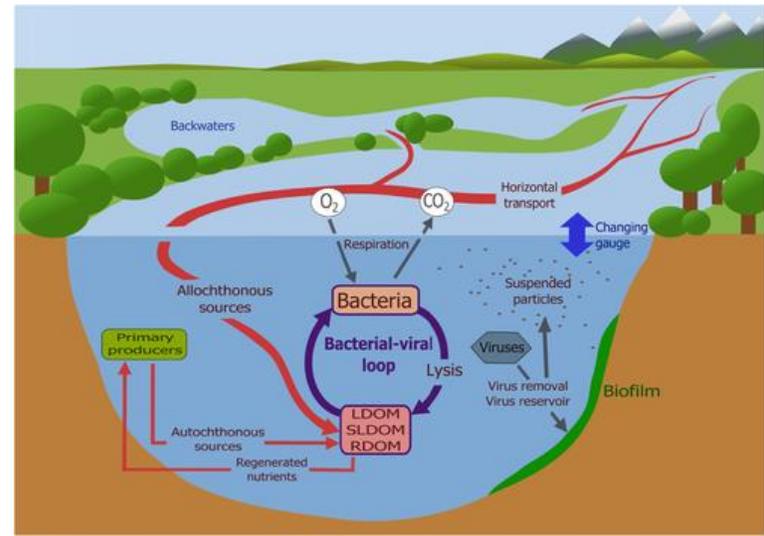


Alcuni cianobatteri producono sostanze tossiche (**cianotossine**) pericolose per l'uomo e gli animali:

- **Citossine** (dermatotossine)
- **Neurotossine**: anatoxina-a, anatoxina-a(s), saxitossina
- **Epatotossine**: microcistine, nodularine, cilindrospermopsine

**Virus**

Abbondanti nelle acque lacustri;  
Controllano le popolazioni batteriche (cianobatteri) e microalghe.



**Protozoi**

I protozoi, pur se numericamente meno abbondanti rispetto agli altri microrganismi, controllano le popolazioni batteriche.

Precipitazione verso il fondo del **particolato organico** (residui animali e vegetali) presente nella colonna d'acqua.

Sedimenti ricchi di sostanza organica

**Microrganismi copiotrofi**

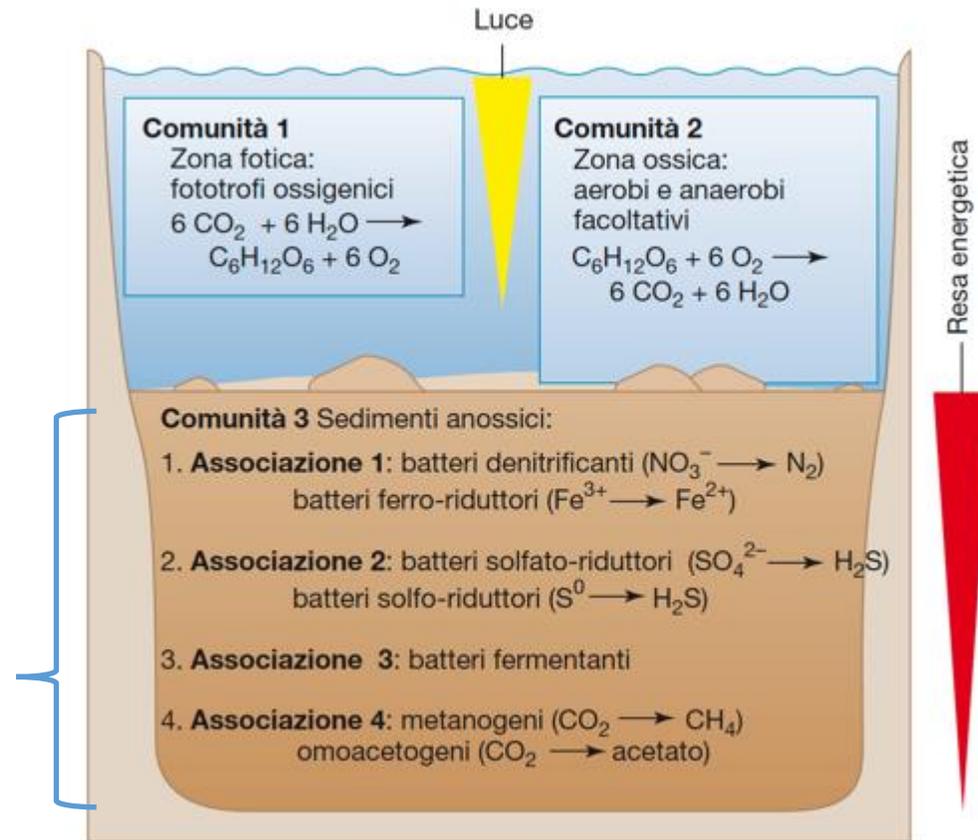
In assenza di luce si sviluppano solo batteri **chemiotrofi** (chemiorganotrofi e chemiolitotrofi).

**Ossigeno**

In presenza di  $O_2$  (periodi di rimescolamento) prevalgono microrganismi chemiorganotrofi aerobi (batteri, funghi).

In assenza di  $O_2$  sono favoriti i batteri fermentanti, aerobi-anaerobi facoltativi, anaerobi).

## SEDIMENTI (interfaccia idrosfera-litosfera)



## Luce

Se il bacino è poco profondo e la luce raggiunge il fondo, sulla superficie del sedimento (per qualche mm) possono svilupparsi sia batteri **fototrofi** che chemiotrofi.

**Denitrificanti**  
**Ferro-riduttori**  
**Solfato-riduttori**  
**Fermentanti**  
**Metanogeni**

...

## FIUMI (acque lotiche)



I fiumi sono dei **sistemi dinamici** che danno vita a numerosi habitat lungo il loro decorso.

Sono caratterizzati da acque in **flusso continuo**, con **andamento turbolento** alla sorgente ed in zone montane ed un decorso più calmo e lento in pianura. Il moto turbolento favorisce l'ossigenazione delle acque.



I fiumi presentano una vasta superficie di **interscambio con la litosfera** che, in seguito a fenomeni di erosione, arricchisce le acque di sostanze organiche ed inorganiche.



La fitta **vegetazione** lungo le sponde apporta sostanza organica alle acque e riduce, contemporaneamente, l'irraggiamento solare (riduzione della produttività primaria).

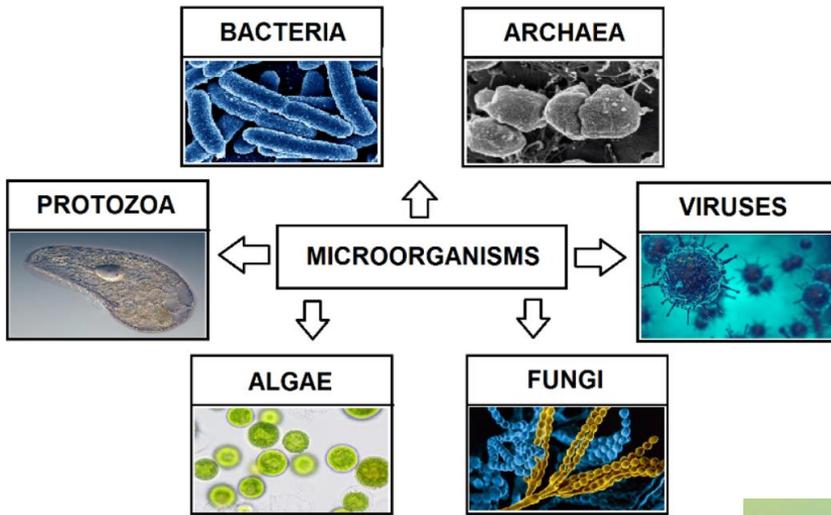


Per l'apporto di grandi quantità di nutrienti e sostanze tossiche, le **attività antropiche** condizionano fortemente gli ecosistemi fluviali:

- alterano la qualità delle acque;
- condizionano la vita degli organismi viventi.



## Comunità microbiche dei fiumi

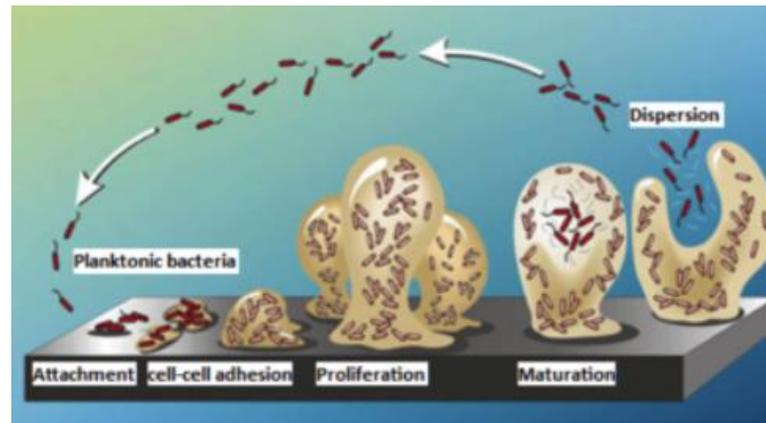


Le superfici sono spazi che possono essere colonizzati e che offrono una certa stabilità nella crescita ambientale.

Il biofilm fornisce di **nutrienti** i microrganismi ed offre **protezione** verso numerosi fattori ambientali (dilavamento, raggi UV, metalli tossici, disidratazione, salinità, fagocitosi, agenti antimicrobici, etc.).



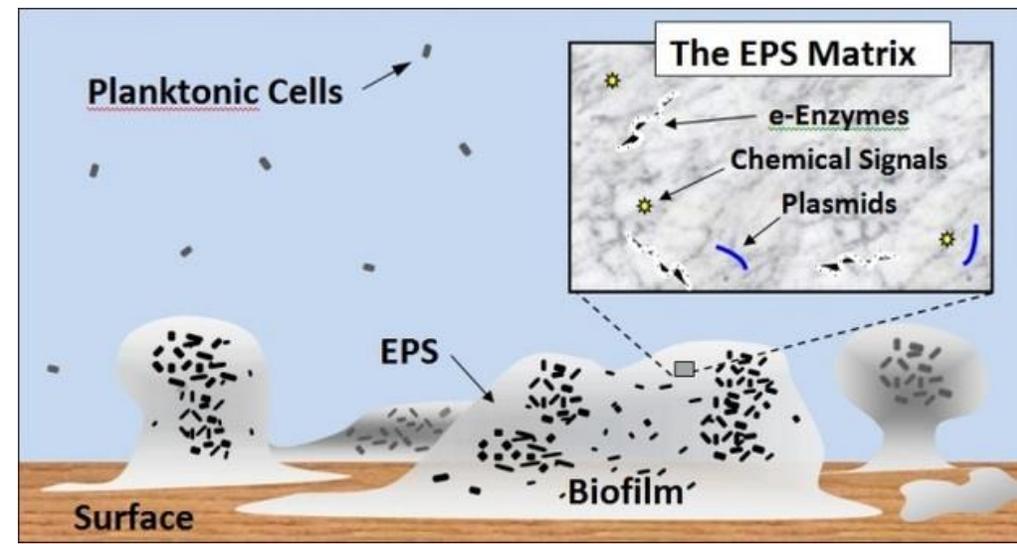
Per evitare il dilavamento, i microrganismi dei fiumi vivono, prevalentemente, adesi alle rocce ed ai ciottoli sotto forma di **biofilm**.



Il **biofilm microbico (periphyton)** è costituito da **microrganismi (batteri, funghi, virus, alghe, protozoi)** concentrati ad una interfaccia (solitamente solido-liquido), immersi in una **matrice polimerica extracellulare (EPS)** costituita da polisaccaridi, proteine, glicoproteine, glicolipidi, DNA, etc.

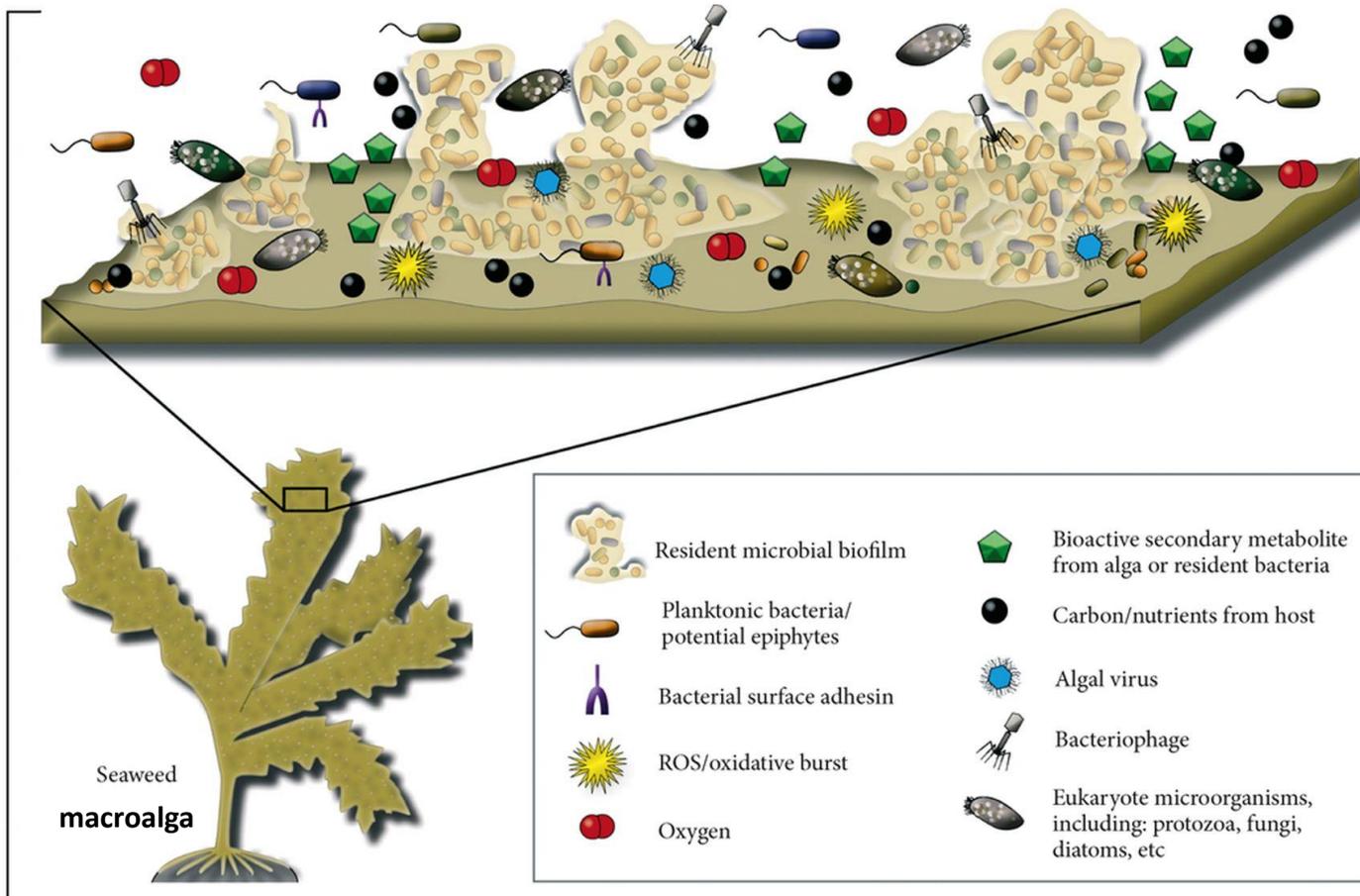
A differenza delle rocce e dei sedimenti, le **acque** dei fiumi, causa della elevata dinamicità, non sono caratterizzate da popolazioni microbiche stabili. Le concentrazioni dei microrganismi sospesi nell'acqua non sono molto alte.

Un biofilm è composto da **microrganismi immersi in una matrice esopolimerica (EPS)**, la quale circonda e protegge le cellule. La matrice EPS è composta, oltre che da **polisaccaridi, proteine, lipidi e frammenti di DNA**, anche da **enzimi extracellulari, plasmidi e molecole segnale**. I batteri rilasciano molecole segnale per un processo di comunicazione chimica chiamato «**quorum sensing**».



Il biofilm favorisce gli **scambi di materiale genetico (TGO)** tra i batteri:

- **Coniugazione** (stretto contatto tra le cellule batteriche);
- **Trasformazione** (presenza di frammenti di DNA);
- **Trasduzione** (presenza di virus).



Egan et al. (2013). The seaweed holobiont: understanding seaweed–bacteria interactions, *FEMS Microbiology Reviews*, 37(3):462–476,

## QUORUM SENSING (QS)

sistema di regolazione trascrizionale globale (regolazione espressione genica) basato sulle fluttuazioni della densità della popolazione microbica.

Il QS rappresenta una forma di comunicazione intercellulare basato sulla produzione di **autoinduttori**:

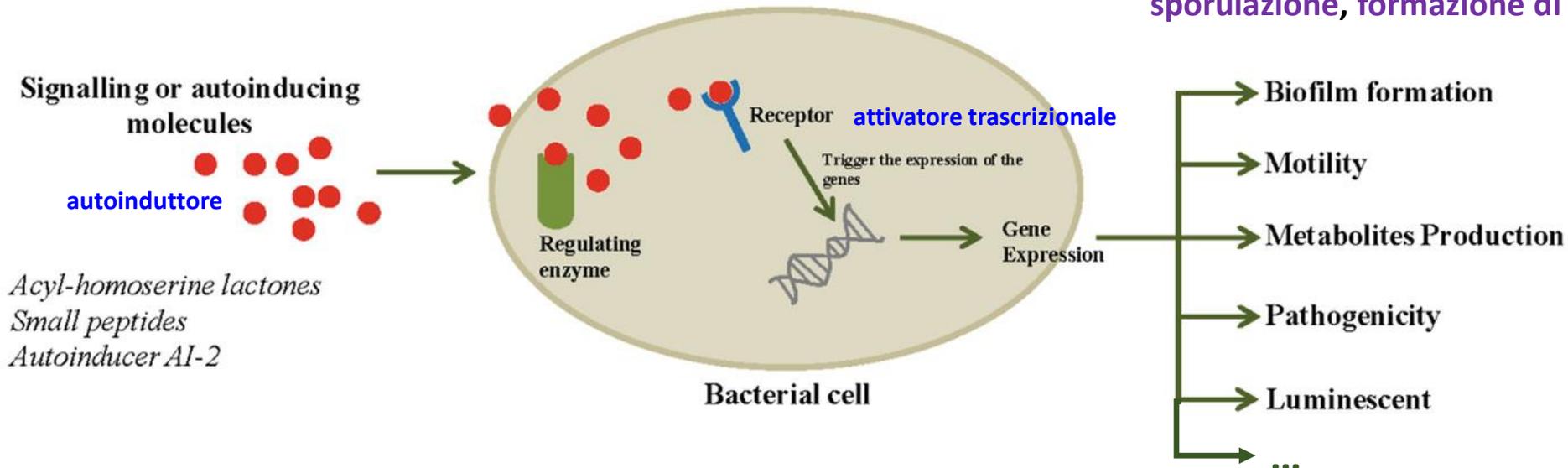
**Gram-negativi** → acil-omoserina lattone, autoinduttore 2 (AI-2)

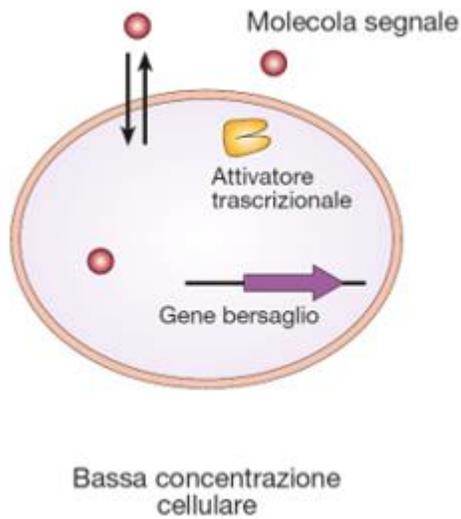
**Gram-positivi** → oligopeptidi,  $\gamma$ -butirrolattoni

I microrganismi (**batteri, alghe, funghi**) possono sintetizzare e rilasciare molecole segnale (**autoinduttori**) le cui concentrazioni aumentano all'aumentare della densità cellulare.

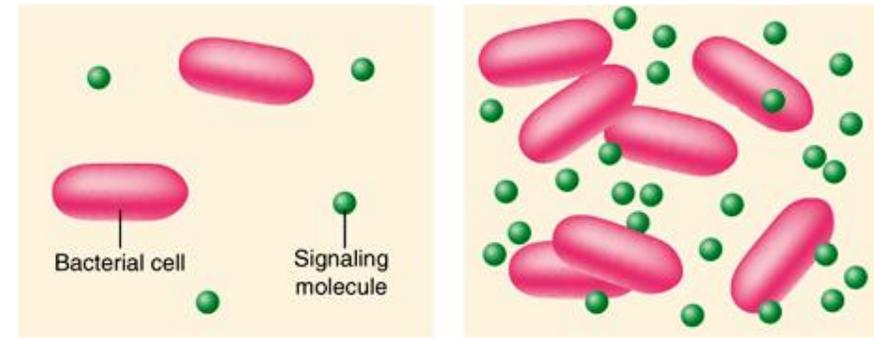
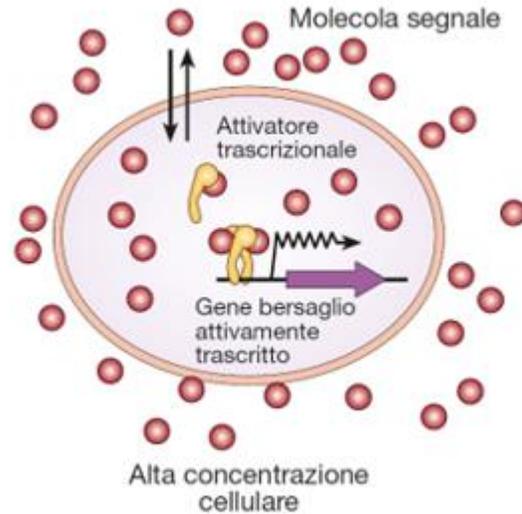
Il rilevamento di una concentrazione dell'autoinduttore, oltre una determinata soglia, porta alla modulazione dell'espressione genica.

Mediante questo sistema di comunicazione i microrganismi regolano numerose attività fisiologiche (**simbiosi, virulenza, autolisi, competenza (trasformazione), coniugazione, produzione di antibiotici, motilità, sporulazione, formazione di biofilm, ...**).





A bassa densità cellulare l'autoinduttore viene sintetizzato in modo costitutivo (costante, ma a bassi livelli). L'autoinduttore sintetizzato attraversa liberamente le membrane e diffonde nell'ambiente circostante.



All'aumentare della popolazione cellulare, segue contemporaneamente un aumento della concentrazione extracellulare dell'**autoinduttore**.

Quando l'autoinduttore, diffondendo nelle cellule in quantità sufficientemente alta, si lega all'**attivatore trascrizionale** specifico ne induce una variazione conformazionale.



Il **complesso attivatore trascrizionale-autoinduttore**, legandosi ad un promotore specifico sul DNA, attiva la trascrizione dei **geni quorum sensing-dipendenti**.

Gli autoinduttori sono, di solito, **specifici delle specie** che li ha prodotti (**autoinduttori specie-specifici**), tuttavia, alcuni possono essere riconosciuti anche da specie diverse (**autoinduttori ad ampio spettro d'azione**).

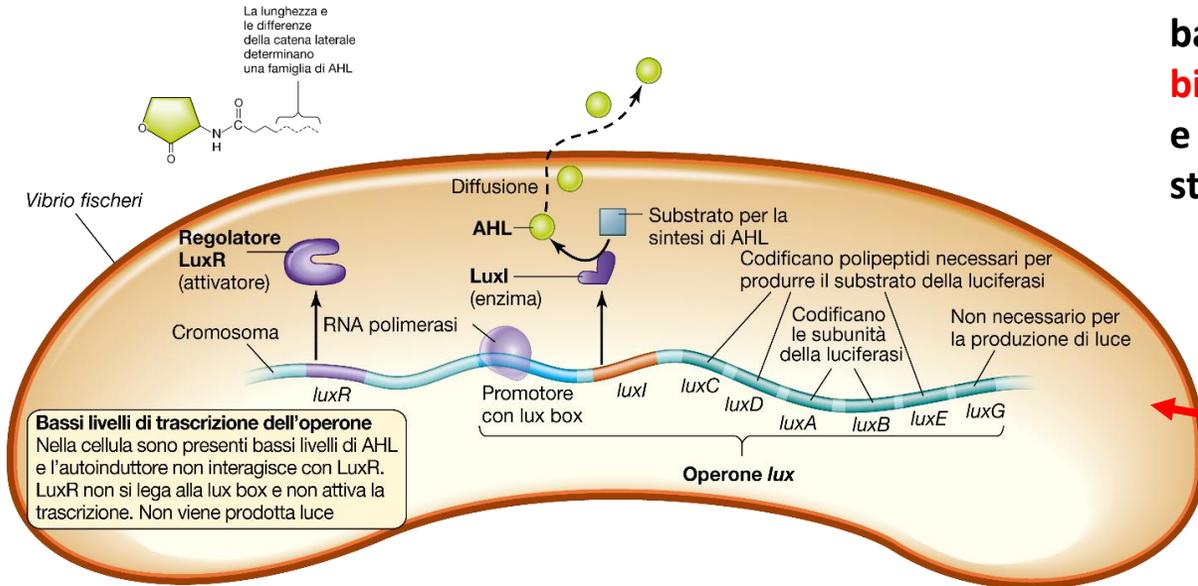
La capacità di comunicare tra loro consente ai microrganismi di **coordinare l'espressione genica** e, quindi, il comportamento dell'intera popolazione.



Presumibilmente, questo processo conferisce ai microrganismi alcune delle proprietà degli organismi superiori: l'evoluzione del QS potrebbe essere stata una delle prime fasi di sviluppo verso la pluricellularità.

Il QS è stato descritto per la prima volta negli anni '60/'70 nel batterio marino **bioluminescente** *Vibrio fischeri* (Gram -).

*V. fischeri*, attraverso l'attività di "autoinduzione" basata sulla densità cellulare, controlla la **bioluminescenza** nel pesce *Monocentris japonica* e nel calamaro *Euprymna scolopes*, con i quali stabilisce strette **associazioni simbiotiche**.

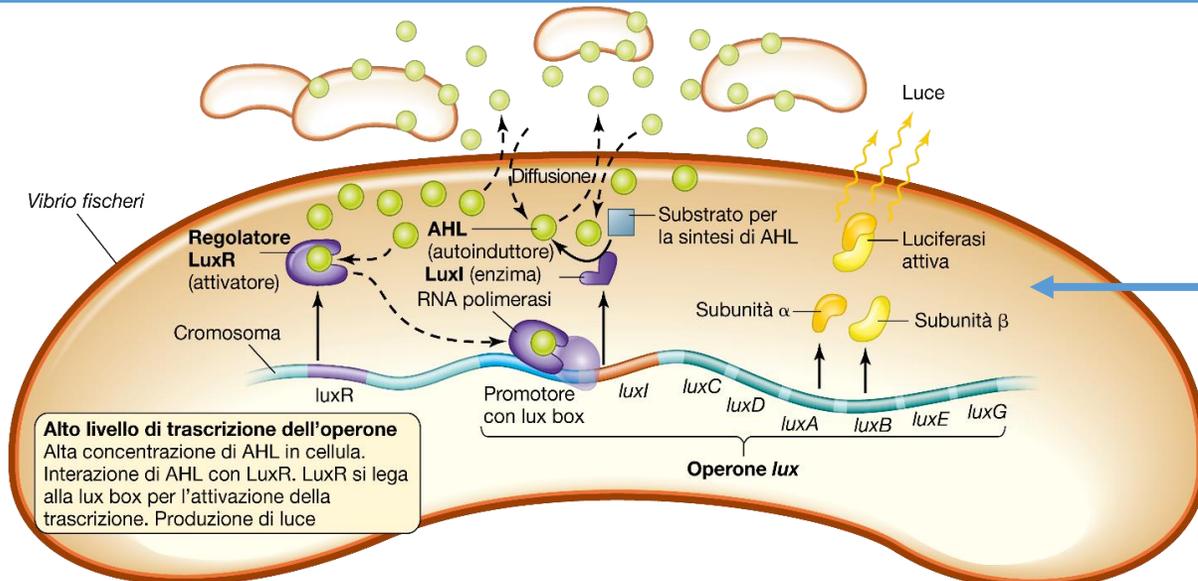


Quando i batteri sono in numero limitato la produzione di autoinduttore (AHL), da parte di *luxI*, è bassa.



non viene attivata la sintesi dei prodotti genici coinvolti nell'emissione di bioluminescenza.

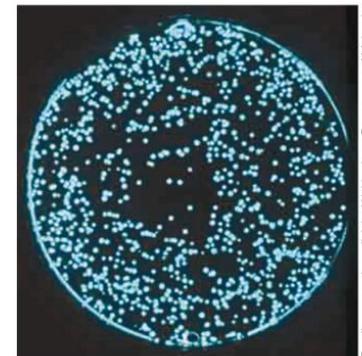
A. Bassa densità di popolazione; bassa concentrazione di AHL



Solo quando la densità batterica aumenta la concentrazione di **acil-omoserina lattone**, raggiunto un valore soglia, si lega ad una proteina regolatrice specifica (**LuxR**).



Il complesso proteina regolatrice-autoinduttore (**LuxR-AHL**), legandosi ad un promotore specifico sul DNA, attiva la **trascrizione dei geni** sotto il suo controllo.



A. Colonie luminose di *V. fischeri*

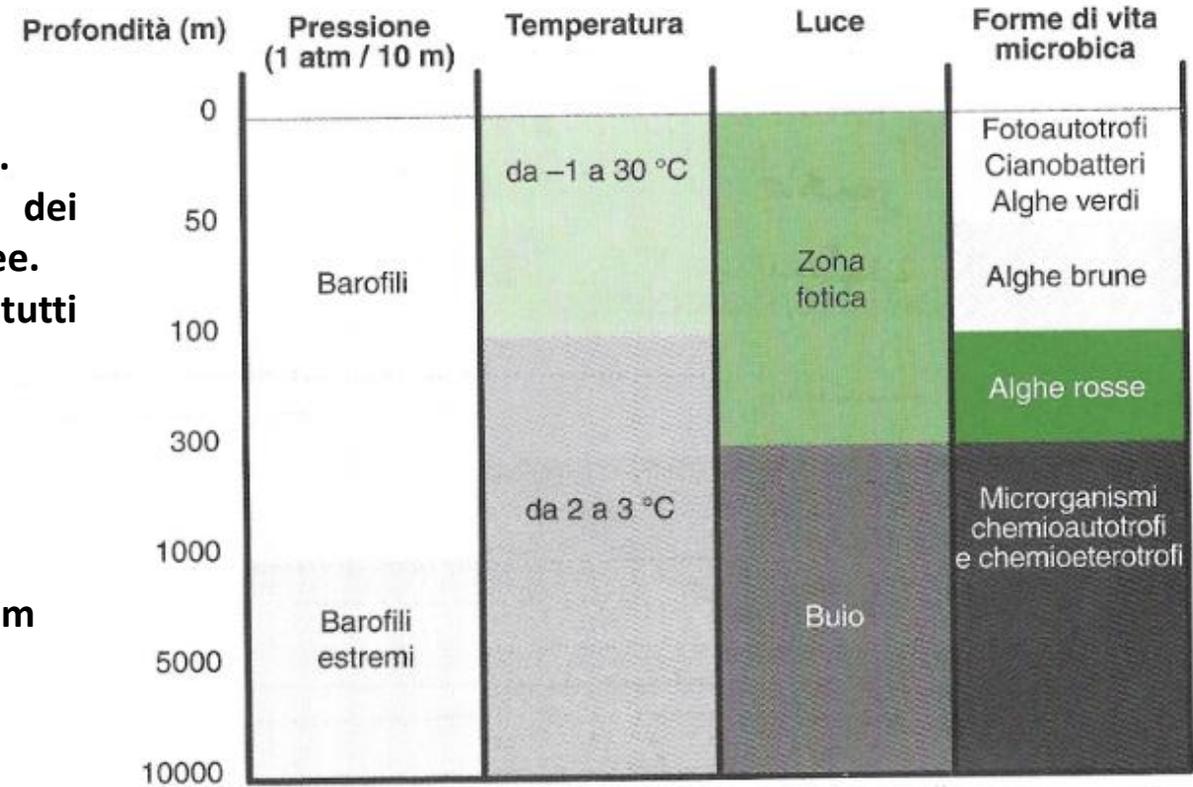
Gentile concessione di John W. Hastings, Department of Molecular and Cellular Biology, Harvard University

B. Elevata densità di popolazione; elevata concentrazione di AHL

## ACQUE MARINE (oceaniche)



- Coprono ~71% della superficie terrestre.
- Condizioni omogenee, a causa dei rimescolamenti dovuti a correnti e maree.
- Contengono, a basse concentrazioni, tutti gli elementi chimici esistenti.
- Salinità 34-35,8 parti per mille.
- pH 8,3-8,5.
- Temperature superficiali → -1/35 °C
- Temperature sotto i 100 m → 0-5 °C
- Pressione → aumento di 1 atm ogni 10 m
- Luce → fino a 200-300 m

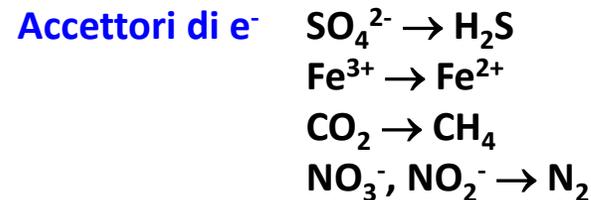


Barbieri, Bestetti, Galli, Zannoni – Microbiologia ambientale ed elementi di ecologia microbica – CEA, 2012



### Sedimenti

I primi millimetri di sedimenti marini sono ossigenati. Scendendo in profondità i sedimenti diventano anossici (riducenti).



**Concentrazioni microbiche** nelle acque marine costiere

- Batteri  $\sim 10^6$  cellule/ml
- Cellule eucariotiche  $\sim 10^4$  cellule/ml

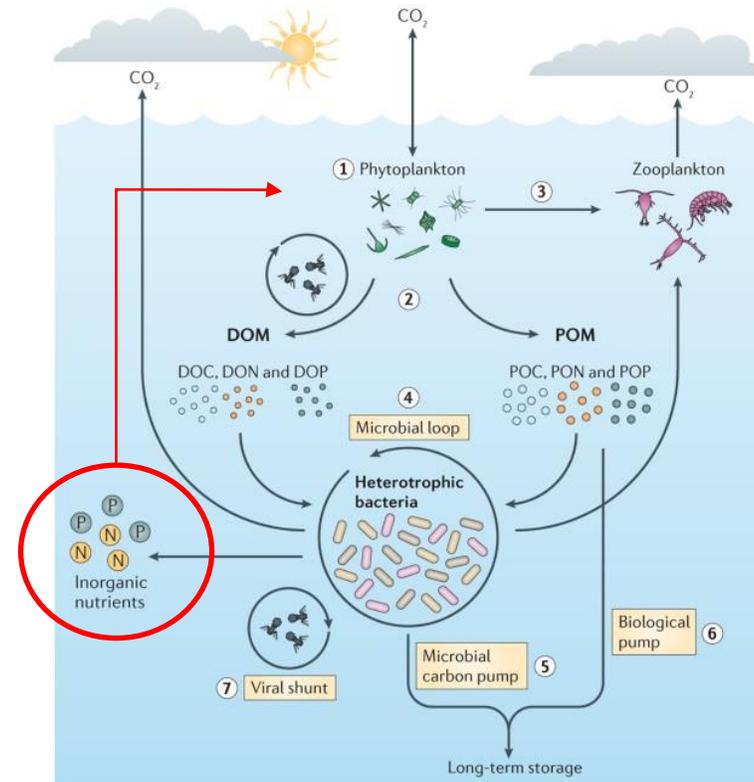
Allontanandosi dalla costa e con l'aumentare della profondità (zone fotiche  $\rightarrow$  zone afotiche) le concentrazioni microbiche diminuiscono.

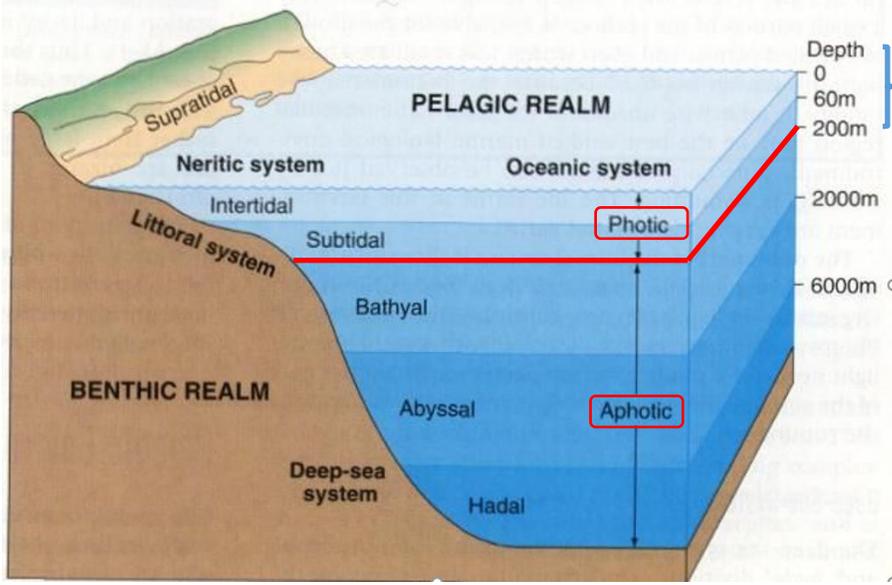
In **mare aperto** i **nutrienti inorganici (N, P, Fe)** sono presenti in bassissime concentrazioni (**ambiente oligotrofo**), al punto di essere limitanti per la crescita dei fototrofi.

Data la limitata disponibilità di nutrienti nell'acqua, la crescita dei fototrofi è strettamente legata al **riciclo dei nutrienti**.

Lo **strato più superficiale** ( $\sim 30 \mu\text{m}$ ), definito **pleuston**, è ricco di microrganismi, soprattutto batteri **eterotrofi**, per la presenza di molecole organiche ed inorganiche di diversa natura (lipidi, idrocarburi, proteine, carboidrati, etc.).

*Pseudomonas*, *Erytrobacter*, *Erytromicrobium*,  
*Roseobacter*, cianobatteri (*Trichodesmium*),  
diatomee, funghi, protozoi.



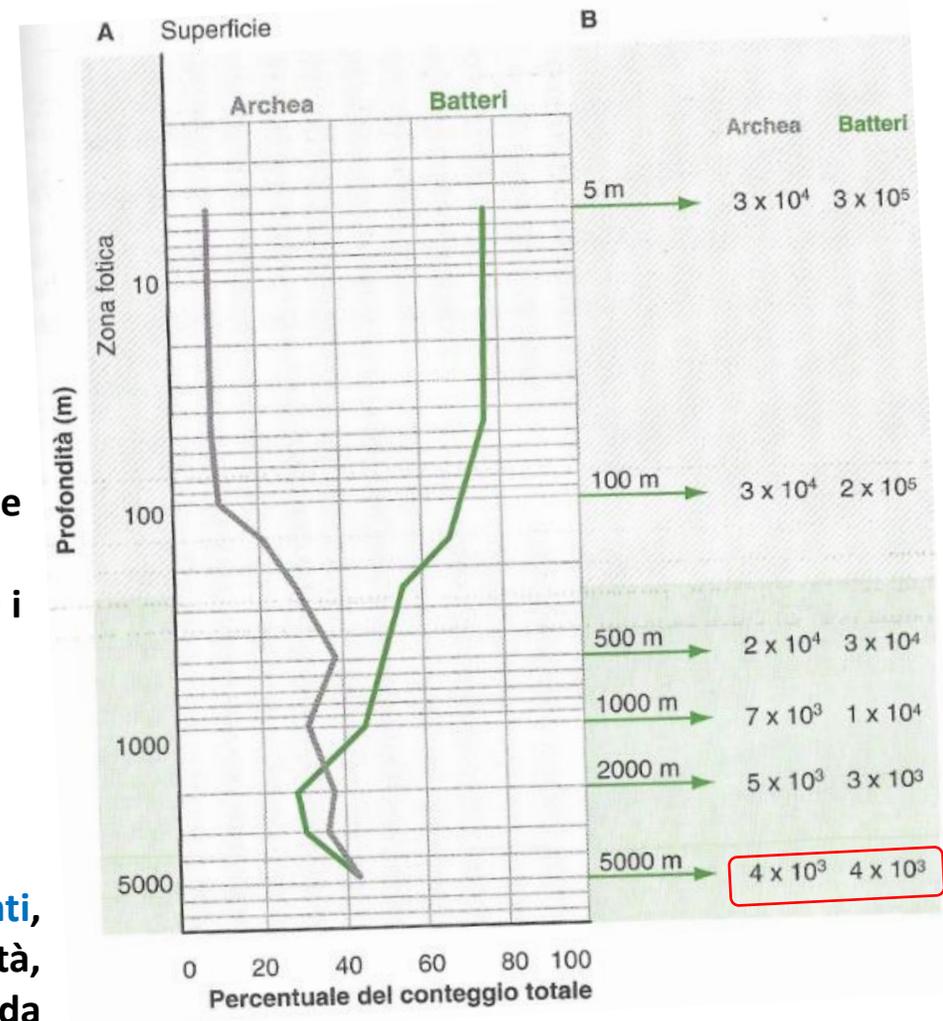


Fitoplancton (autotrofi)

Dal punto di vista microbiologico, lo strato superficiale (fotico) delle acque risulta il più popolato (fotoautotrofi); in particolare, nell'ambito dei procarioti, la concentrazione dei *Bacteria* è nettamente superiore a quella degli *Archaea*.

Con l'aumentare della profondità

- scompaiono i fotoautotrofi;
- prendono il sopravvento chemiorganotrofi e chemiolitotrofi;
- gli *Archaea* tendono ad aumentare, mentre i *Bacteria* tendono a diminuire.

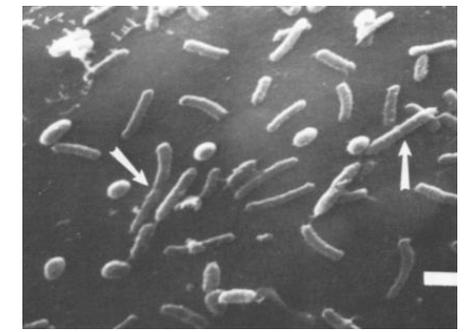


Profondità (m)	Pressione (1 atm / 10 m)	Temperatura	Luce	Forme di vita microbica
0		da -1 a 30 °C	Zona fotica	Fotoautotrofi Cianobatteri Alghe verdi
50	Barofili			Alghe brune
100				Alghe rosse
300		da 2 a 3 °C		Microrganismi chemioautotrofi e chemioeterotrofi
1000	Barofili estremi		Buio	
5000				
10000				

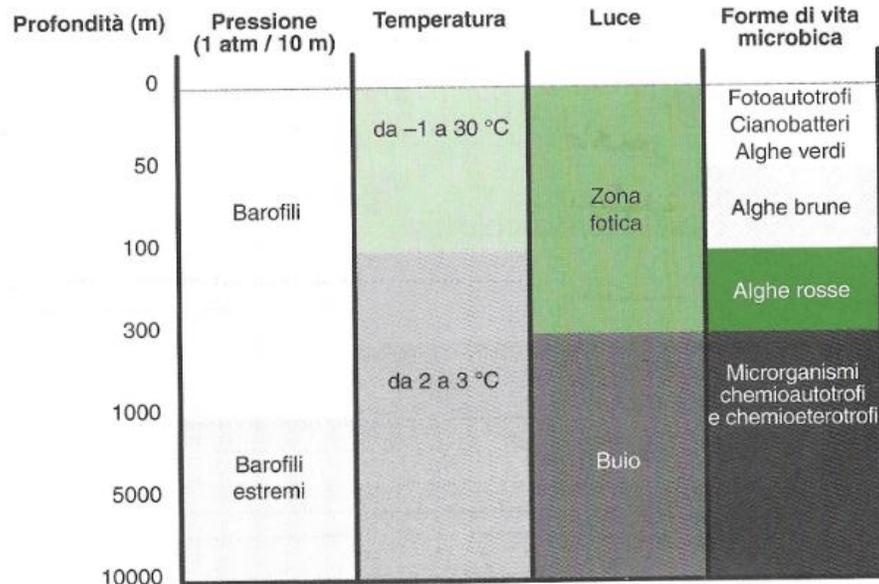
Anche i sedimenti, malgrado la profondità, risultano colonizzati da numerosi microrganismi.

## Caratteristiche dei **batteri marini autoctoni**

- Vivono a basse concentrazioni di nutrienti (**oligotrofi**);
- Tollerano o necessitano di elevate concentrazioni saline (**alofili** e **alotolleranti**);
- Vivono a basse temperature (**psicrotolleranti** e **psicrofili**);
- Presentano **piccole dimensioni** (elevato rapporto superficie/volume);
- Tollerano elevate pressioni idrostatiche (**barofili**);
- Sono capaci di aderire a superfici biotiche ed abiotiche di diversa natura;
- ...



Cellule di *Vibrio cholerae* adese alle superfici chitinose di copepode (zooplancton).



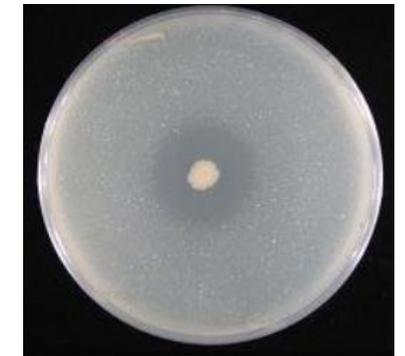
Difficile definire esattamente la **composizione delle comunità microbiche marine**.

Si stima che le attuali tecniche colturali consentono l'isolamento solo di una piccola parte (<1%) dei batteri effettivamente presenti.

La maggior parte dei batteri presenti nelle acque marine sono **Gram negativi**, mobili, aerobi o anaerobi facoltativi.



*Vibrio*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Spirillum*, *Alcaligenes*, ...



Colonia batterica in grado di digerire la chitina.

I **Gram positivi**, meno rappresentati, appartengono, prevalentemente, ai generi *Staphylococcus* e *Micrococcus*; popolano soprattutto gli strati superficiali.

Frequente è anche l'isolamento di **attinomiceti**.

Anche alcuni **funghi** possono entrare a far parte delle comunità microbiche della acque marine:

*Candida*, *Torulopsis*, *Cryptococcus*,  
*Saccharomyces*, *Rhodotorula*.

### VIRUS (virioplancton)

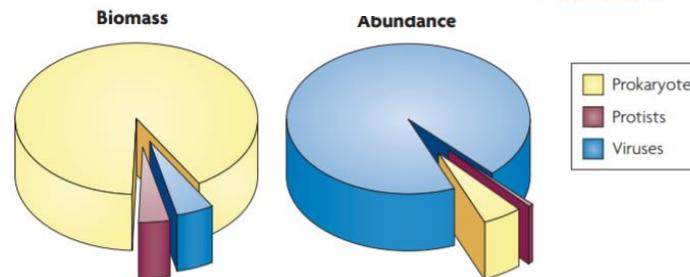
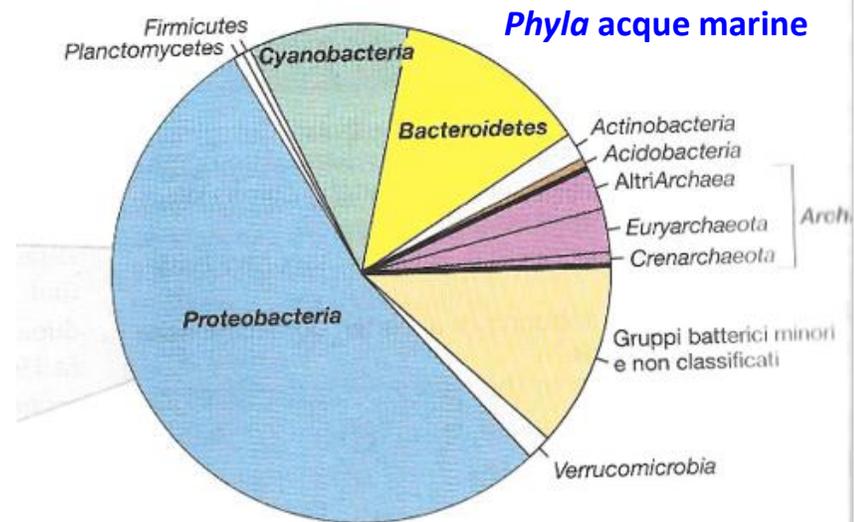
- $\sim 10^7$  virioni/ml (più numerosi dei microrganismi cellulari). Nelle acque costiere si possono raggiungere concentrazioni di  $\sim 10^8$  virioni/ml.
- Al di sotto dei 250 m di profondità la concentrazione virale diminuisce.
- Sono prevalentemente batteriofagi.



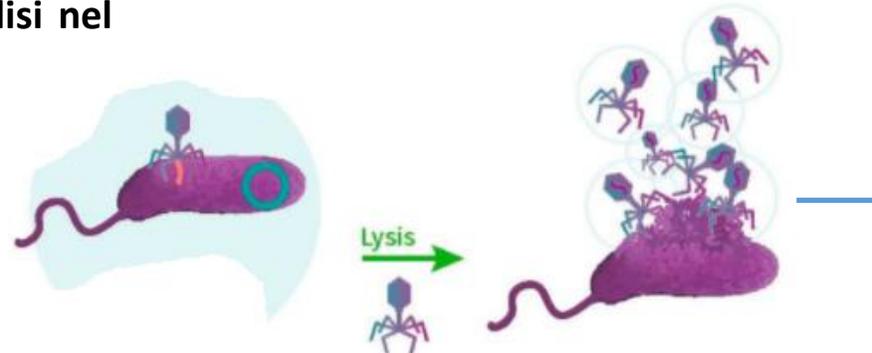
Controllano le popolazioni batteriche (inducono la lisi nel 10-50% dei procarioti).



Portando alla **lisi batterica**, i virus velocizzano il ciclo dei nutrienti arricchendo le acque di **POM** (0,45-200  $\mu\text{m}$ ) e **DOM** (<0,45  $\mu\text{m}$ ).



La maggior parte dei virioni che si liberano in seguito al ciclo litico, viene distrutta, a sua volta, dalla luce solare e dalla presenza di enzimi idrolitici.



Studi oceanografici, in passato, ritenevano che gran parte della **produzione primaria** entrasse nella **catena del pascolo** ("**grazing**"), trascurando il ruolo dei microrganismi marini.

Nella zona eufotica, gli **organismi fotosintetici** fissano la  $\text{CO}_2$  disciolta nell'acqua; parte della produzione primaria, in seguito ad **essudazione** e **lisi cellulare**, viene trasformata in sostanza organica particolata (**POM**) e disciolta (**DOC**).

La produzione di **esoenzimi** (proteasi, glucosidasi, fosfatasi, ...) e la **mineralizzazione** di POM e DOM, da parte dei **microrganismi chemiorganotrofi**, porta alla formazione di  $\text{CO}_2$  → disponibile per i metabolismi autotrofi.

In seguito, i microrganismi chemiorganotrofi vengono predati da parte di piccoli **protozoi batterivori**, i quali, a loro volta, vengono predati dallo **zooplancton** (**microbial loop**). Lo zooplancton viene predato dai metazoi.

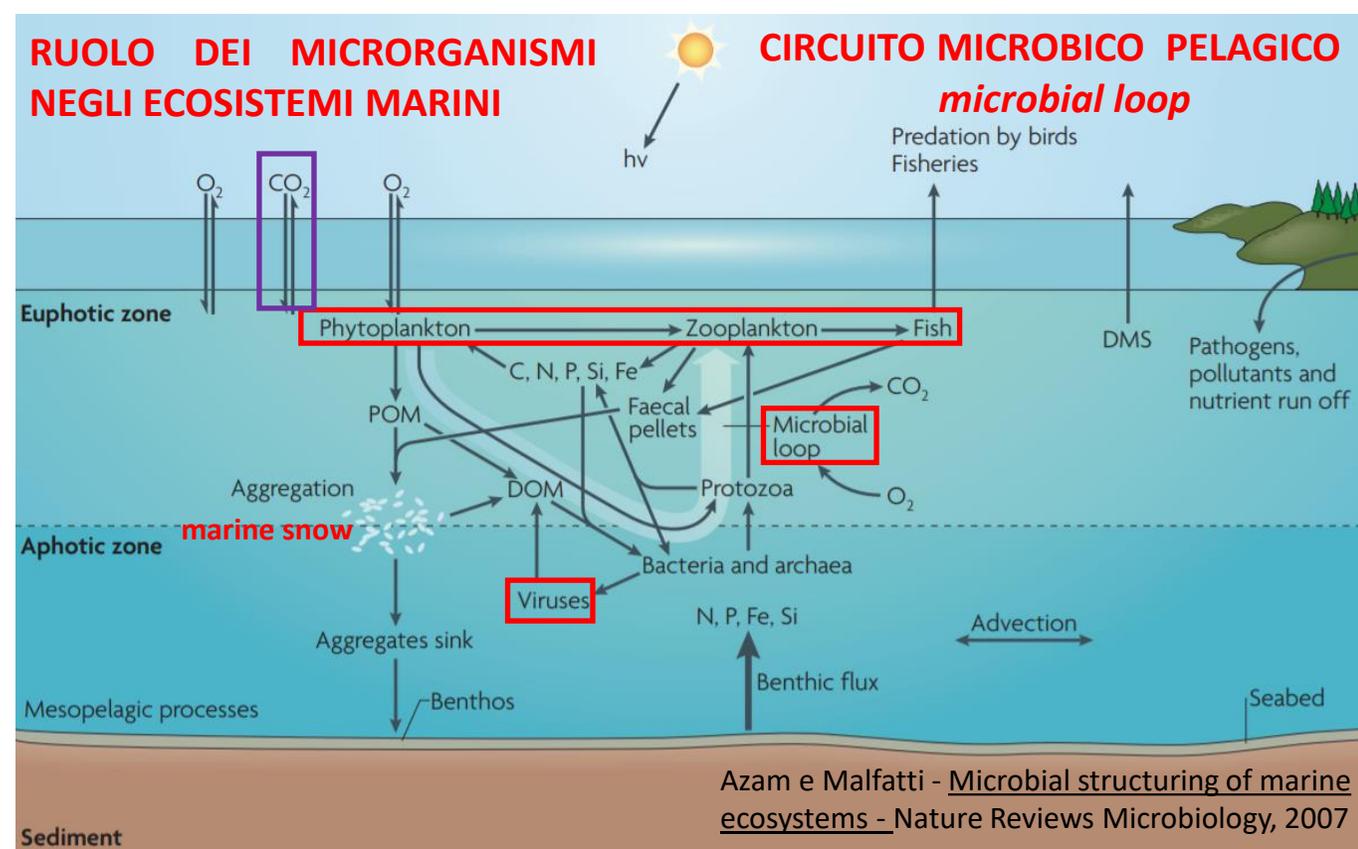
Il **detrito** e le **fecal pellets** prodotti dallo zooplancton e dai metazoi contribuiscono alla formazione di POM e DOM.

Il **microbial loop** decorre in modo parallelo e complementare alla **catena del pascolo**. I **microrganismi fungono da anello di congiunzione fra pool detritale e catena del pascolo**.

Man mano che la POM sedimenta e giunge sul fondo, continua la mineralizzazione da parte dei batteri. →

## RUOLO DEI MICRORGANISMI NEGLI ECOSISTEMI MARINI

## CIRCUITO MICROBICO PELAGICO *microbial loop*



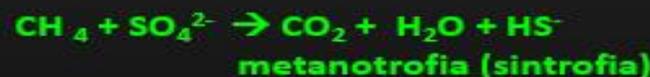
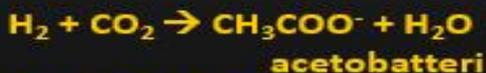
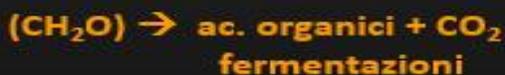
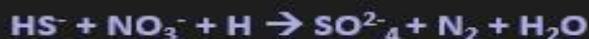
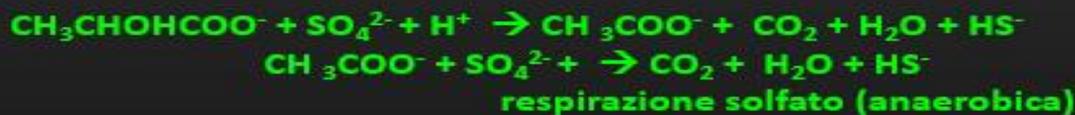
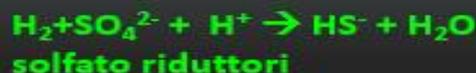
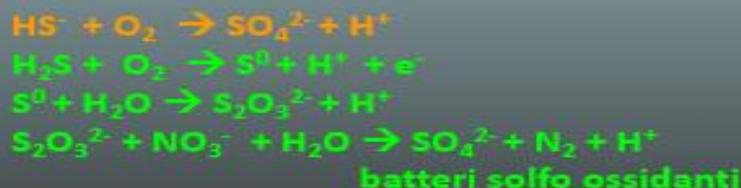
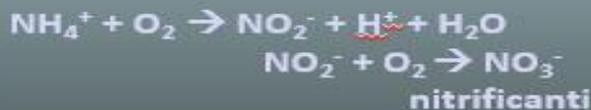
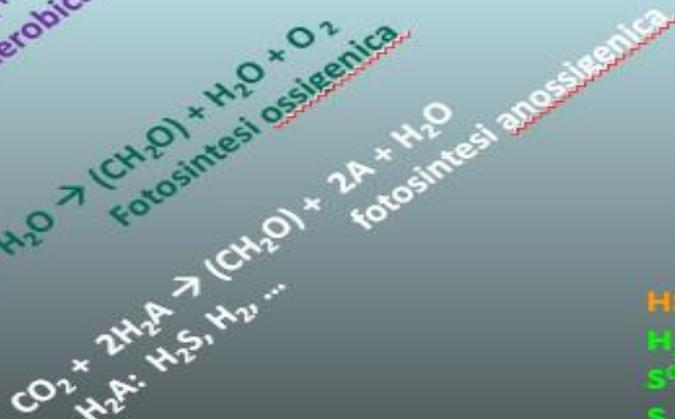
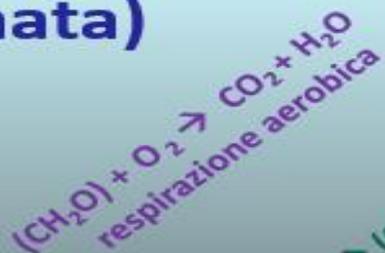
I **VIRUS** inducono la lisi delle cellule batteriche contribuendo al rilascio di POM e DOM (**viral loop**); la DOM, permanendo nella zona eufotica (bassi coefficienti sedimentazione), rende disponibili nutrienti molto importanti (**N, P, Fe, ...**), le cui carenze limiterebbero la produzione primaria.

Una volta nei sedimenti, la sostanza organica può essere utilizzata dagli organismi bentonici e rimanere intrappolata nella matrice minerale. Questo equivale ad un trasferimento di carbonio dalla superficie al fondo degli oceani.



# Diversità microbica nella colonna d'acqua

## Zona ossica (illuminata)



## Zona anossica ed afotica