UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

CORSO di CHIMICA AMBIENTALE A.A. 2022-23

3-1a – Chimica delle acque

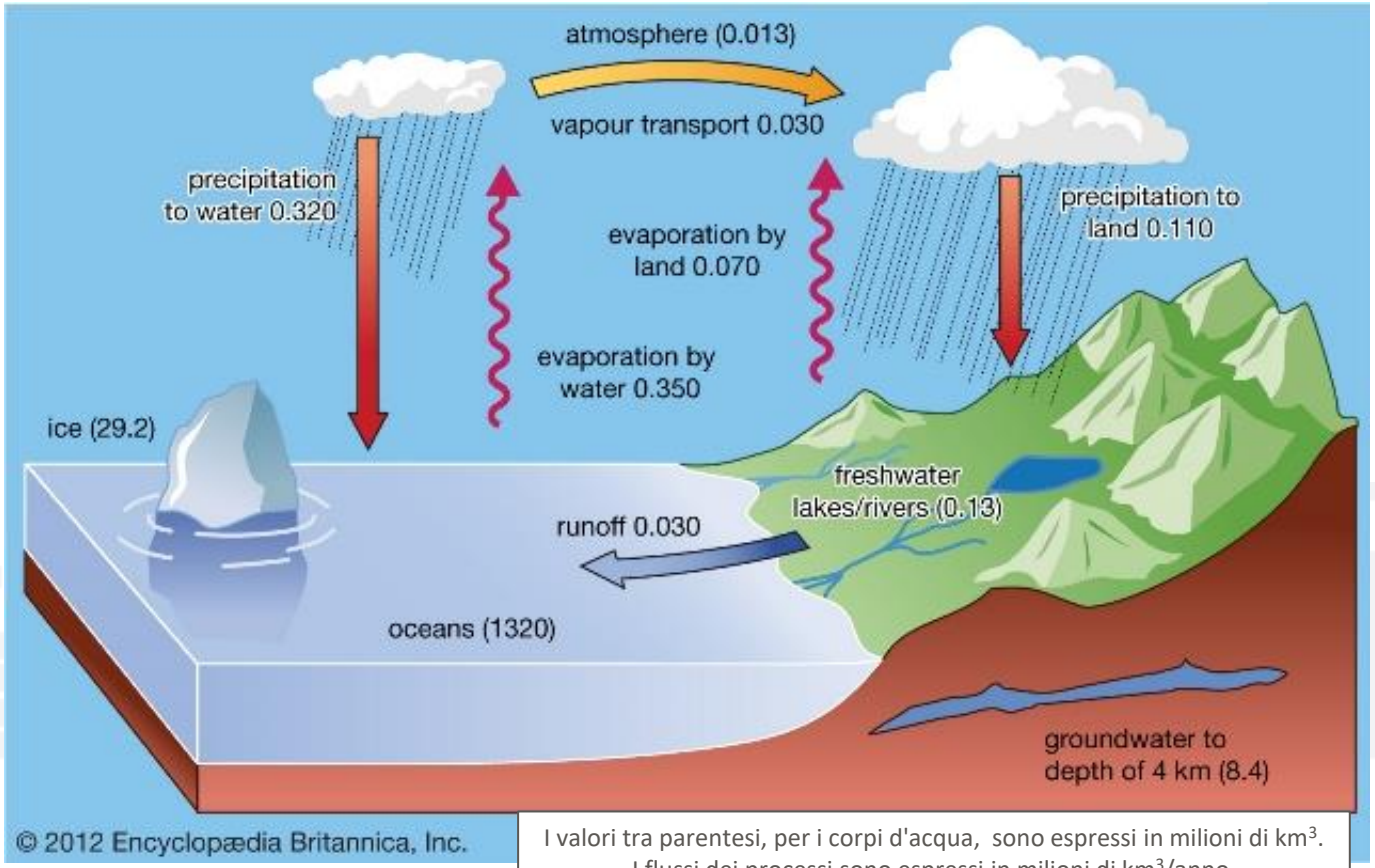
Docente:
Enrico Greco, PhD

(enrico.greco@units.it)

Assistant Professor, Department of Chemical and Pharmaceutical Sciences

Idrosfera

Le acque dolci disponibili sono solo 0.3-0.6%.

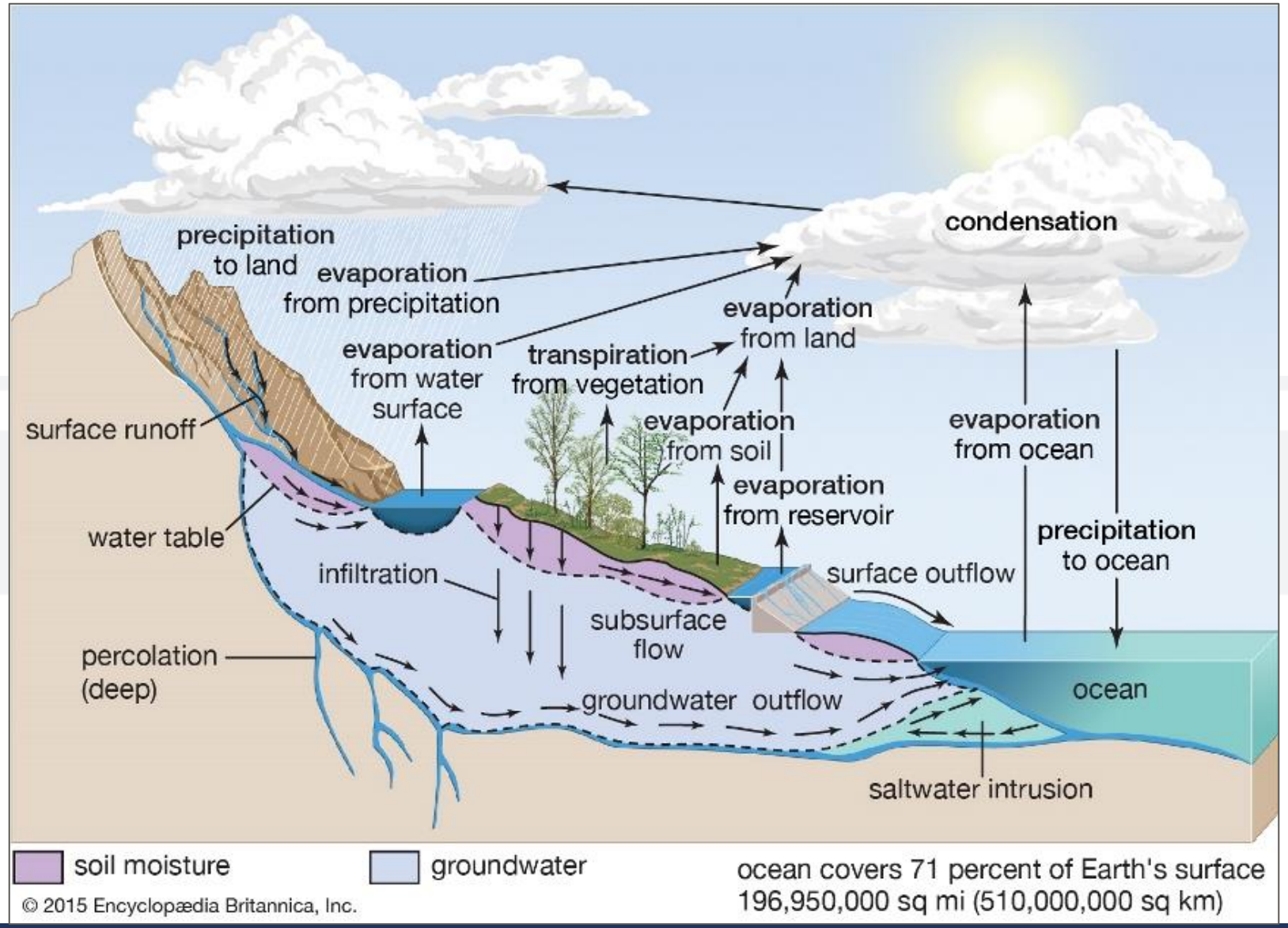


I valori tra parentesi, per i corpi d'acqua, sono espressi in milioni di km^3.
I flussi dei processi sono espressi in milioni di km^3/anno.

- **Acqua in evaporazione**: quasi-distillata
- **Acque meteoriche e acqua di dilavamento dei suoli**: ricche di inquinanti (piogge acide, composti organici, particolato, microorganismi)
- **Acque di falda** : filtrate ma con inquinanti solubili (sali, composti organici più solubili)

Fonti: https://www.britannica.com/science/hydrosphere/images-videos#/media/1/279025/69410

Ciclo dell'acqua



Fonti: https://www.britannica.com/science/atmosphere/images-videos#/media/1/41364/112177

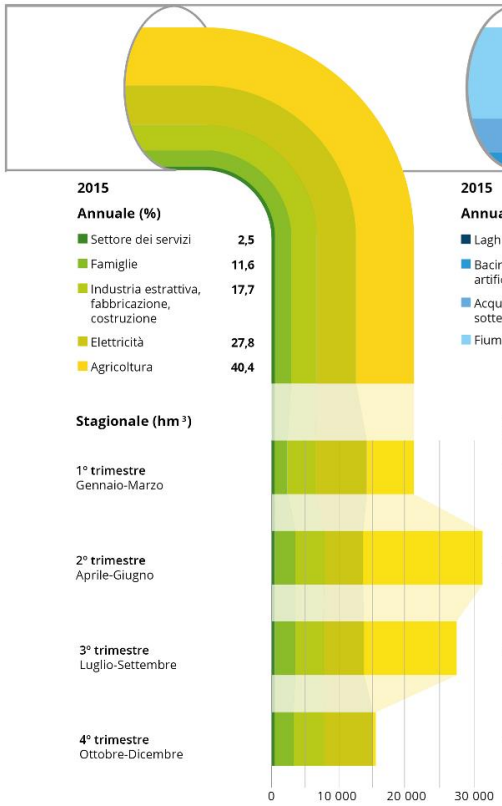
Uso dell'acqua in Europa

Il consumo di acqua in Europa

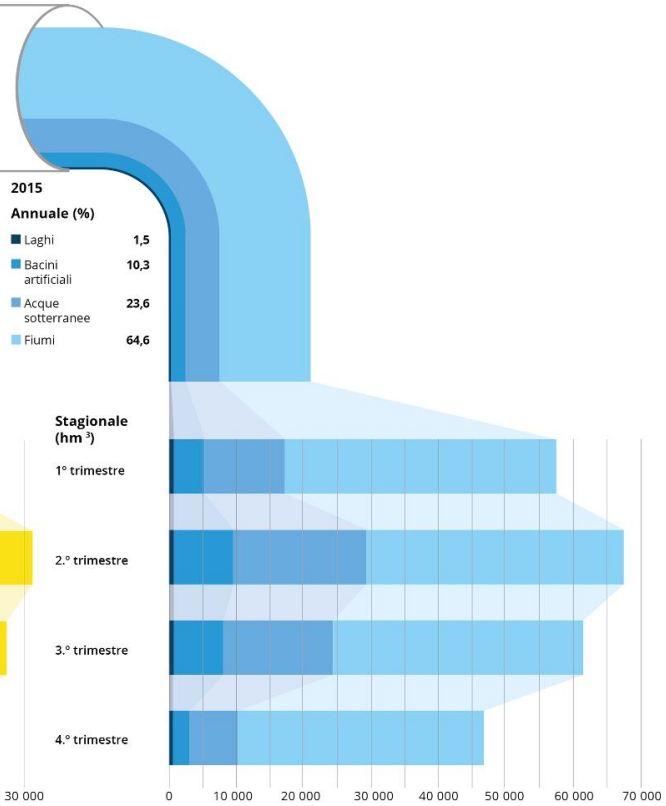
Secondo l'indice di sfruttamento idrico (WEI) dell'AEA, le attività economiche in Europa utilizzano in media circa 243 000 ettometri cubi di acqua all'anno. Sebbene gran parte di tale quantità (oltre 140 000 ettometri cubi – Hm^3) sia restituita all'ambiente, questa contiene spesso impurità o agenti inquinanti, fra cui sostanze chimiche pericolose.

Nonostante la relativa abbondanza di fonti di acqua dolce in alcune zone dell'Europa, la disponibilità di acqua e l'attività socioeconomica non sono distribuite in modo omogeneo, il che determina notevoli differenze nei livelli di stress idrico nelle diverse stagioni e regioni.

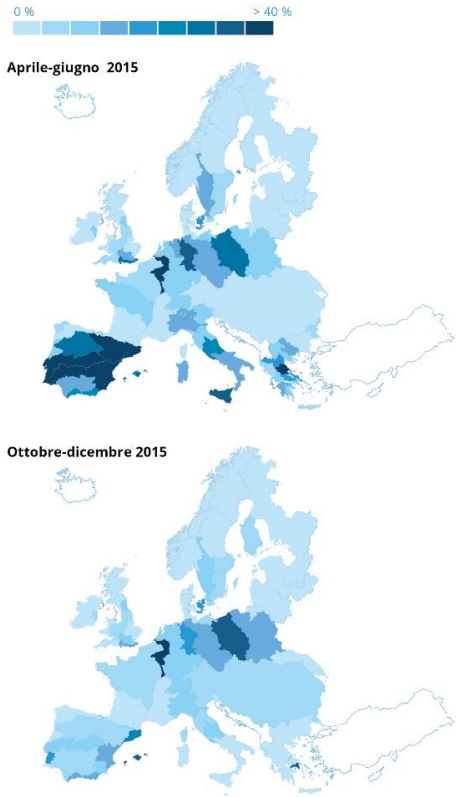
Utilizzo dell'acqua da parte dei settori economici



Estrazione di acqua dolce per fonte



Sfruttamento idrico per bacino idrografico (1)



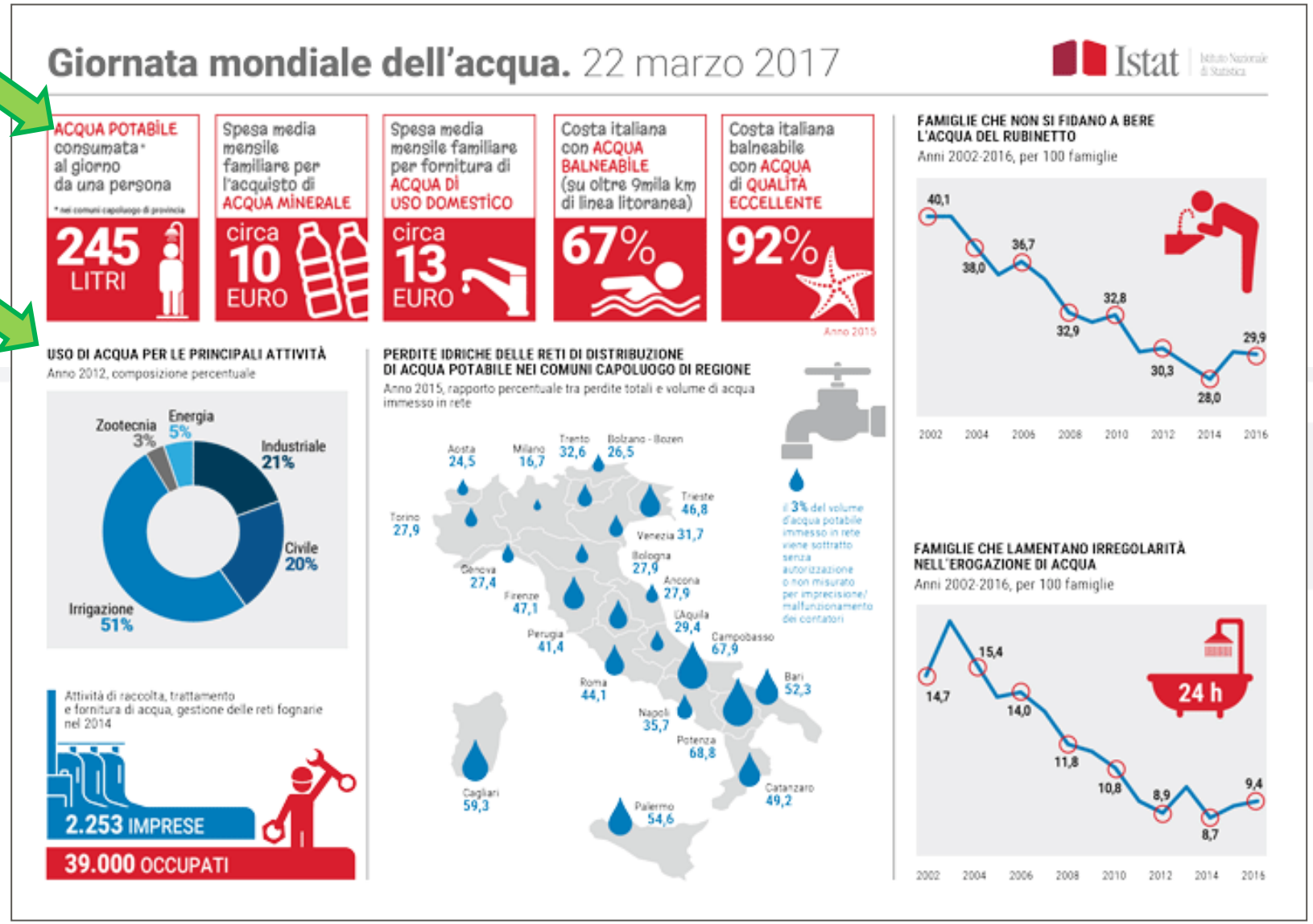
Fonte: indicatore dell'AEA sull'utilizzo delle fonti di acqua dolce.

Nota: (1) L'indice WEI+ (*Water Exploitation Index Plus*), che valuta il totale delle acque dolci utilizzate in percentuale del totale delle risorse di acqua dolce rinnovabili disponibili, costituisce un indicatore della pressione o dello stress sulle risorse di acqua dolce. Un WEI+ superiore al 20 % indica che un'unità idrica è minacciata, mentre un WEI+ superiore al 40 % indica una minaccia grave e un utilizzo della risorsa chiaramente non sostenibile (Raskin et al., 1997).

Fonti: https://www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2018/articoli/uso-dell2019acqua-in-europa-2014

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Utilizzo delle acque in Italia



Fonti: https://www.istat.it/it/archivio/198245

Impronta idrica di alcuni prodotti (*water footprint*)

Prodotto	Quantità di acqua (l)	Tipo di acqua
1 litro di birra	300	85% verde, 6% blu, 9% grigia
1 litro di latte	1'000	85% verde, 7% blu, 8% grigia
1 kg di grano	1'600	70% verde, 19% blu, 11% grigia
1 kg di zucchero di canna	1'800	67% verde, 27% blu, 6% grigia
1 kg di riso	2'500	69% verde, 20% blu, 11% grigia
1 kg di cotone	10'000	54% verde, 33% blu, 13% grigia
1 kg di carne di manzo	15'400	93% verde, 4% blu, 3% grigia

- **Acqua blu**: si riferisce al prelievo di acque superficiali e sotterranee destinate ad un utilizzo per scopi agricoli, domestici e industriali. È la quantità di acqua dolce che non torna a valle del processo produttivo nel medesimo punto in cui è stata prelevata o vi torna, ma in tempi diversi;
- **Acqua verde**: è il volume di acqua piovana che non contribuisce al ruscellamento superficiale e si riferisce principalmente all'acqua evapo-traspirata per un utilizzo agricolo;
- **Acqua grigia**: rappresenta il volume di acqua inquinata, quantificata come il volume di acqua necessario per diluire gli inquinanti al punto che la qualità delle acque torni sopra gli standard di qualità.

Fonti: http://www.expo2015.org/magazine/it/sostenibilita/l-impronta-idrica.html; https://www.minambiente.it/pagina/cose-la-water-footprint

Proprietà dell'acqua ed interesse biologico-ambientale

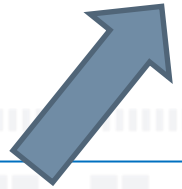
Proprietà	Effetti
Solvente	L'elevato potere solvente dell'acqua consente il trasporto di nutrienti e scarti biologici e quindi permette lo svolgersi dei processi biologici
Costante dielettrica	L'alta costante dielettrica promuove la solubilità di sostanze ioniche e la loro ionizzazione in soluzione
Tensione superficiale	L'alta tensione superficiale controlla fattori fisiologici e governa fenomeni di superficie e formazione di gocce (*drops*)
Trasparenza alla luce	La trasparenza alla luce visibile e alla frazione di ultravioletto a maggiore lunghezza d'onda consente lo svolgimento della fotosintesi anche a profondità considerevoli nei corpi idrici
Densità	Il massimo di densità in fase liquida a 4°C contrasta la circolazione verticale nei corpi idrici agevolando la stratificazione. Inoltre la densità minore in fase solida (ghiaccio) consente il galleggiamento sopra alla fase liquida.
Entalpia di vaporizzazione	E' elevata, promuove il trasferimento di calore e molecole d'acqua dai corpi d'acqua all'atmosfera.
Entalpia di fusione	E' elevata, promuove la stabilità della temperatura al punto di congelamento.
Capacità termica	E' elevata, promuove la stabilità delle temperature degli organismi e delle regioni geografiche.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Componenti della matrice acqua

ACQUE
(fiumi, laghi, paludi, estuari, mari, oceani)

Le specie e i materiali disciolti variano sensibilmente a seconda dell'ambiente acquatico considerato



Soluti:

- costituenti maggiori (concentrazione > 1 mg/l);
- costituenti minori (concentrazione < 1 mg/l);
- gas disciolti (O_2, CO_2, etc...)
- sali disciolti;
- nutrienti (N, P);
- sostanza organica (DOM - *dissolved organic matter*).

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Componenti della matrice acqua

ACQUE
(fiumi, laghi, paludi, estuari, mari, oceani)

Le specie e i materiali disciolti variano sensibilmente a seconda dell'ambiente acquatico considerato

Soluti:

- costituenti maggiori (concentrazione > 1 mg/l);
- costituenti minori (concentrazione < 1 mg/l);
- gas disciolti (O_2, CO_2, etc...)
- sali disciolti;
- nutrienti (N, P);
- sostanza organica (DOM - *dissolved organic matter*).

Materiale particellato:

- Silicati e alluminosilicati;
- Carbonati di calcio;
- Ossi e idrossidi (es. di Fe e Mn);
- sostanza organica (SOM - *suspended organic matter*).

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Parametri di qualità delle acque

PARAMETRI FISICI

- Solidi totali, sospesi e disciolti
- Torbidità
- Colore, odore, sapore
- Temperatura
- Conducibilità elettrica

PARAMETRI CHIMICI

- O_2 disciolto
- BOD (*Biochemical Oxygen Demand*)
- COD (*Chemical Oxygen Demand*)
- pH
- Nutrienti: P (fosforo totale, ortofosfato), N (azoto totale, ammoniacale, nitrico)
- Durezza
- Alcalinità

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

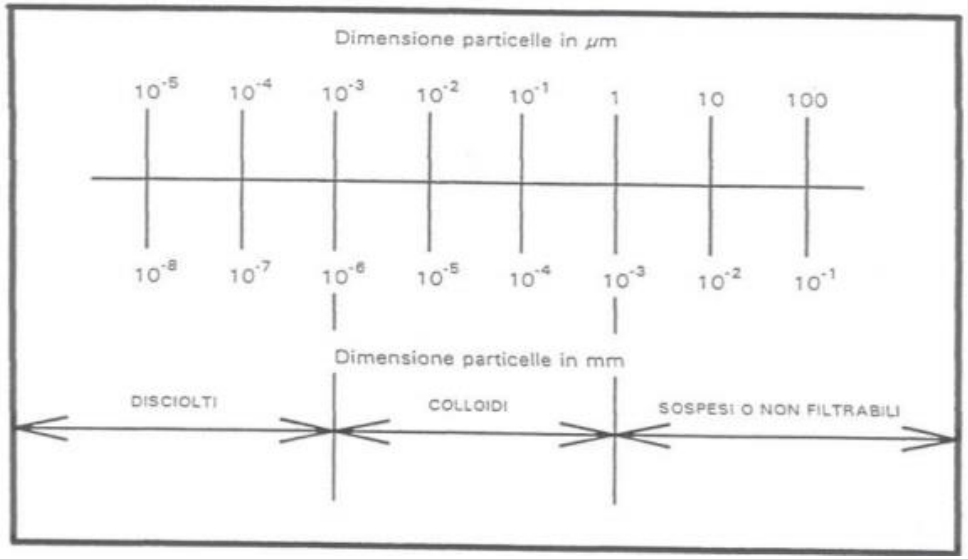
Classificazione dei solidi presenti in un'acqua

SOLIDI TOTALI
residuo secco a 180°C
(mg/l)

→ **SOLIDI SOSPESI**
filtrazione

→ **SOLIDI DISCIOLTI**

Classificazione dei solidi in acqua in base alle dimensioni



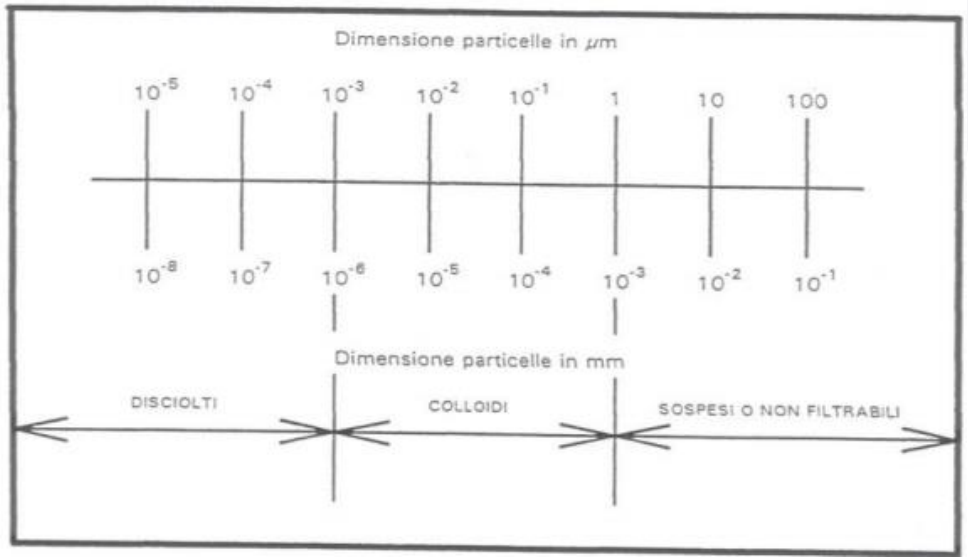
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Classificazione dei solidi presenti in un'acqua

SOLIDI TOTALI
residuo secco a 180°C
(mg/l)

- **SOLIDI SOSPESI**
  filtrazione
  - **SOLIDI SEDIMENTABILI**
    sedimentazione
  - **SOLIDI NON SEDIMENTABILI**
- **SOLIDI DISCIOLTI**

Classificazione dei solidi in acqua in base alle dimensioni



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Classificazione dei solidi presenti in un'acqua

SOLIDI TOTALI
residuo secco a 180°C
(mg/l)

SOLIDI SOSPESI
filtrazione

SOLIDI SEDIMENTABILI
sedimentazione

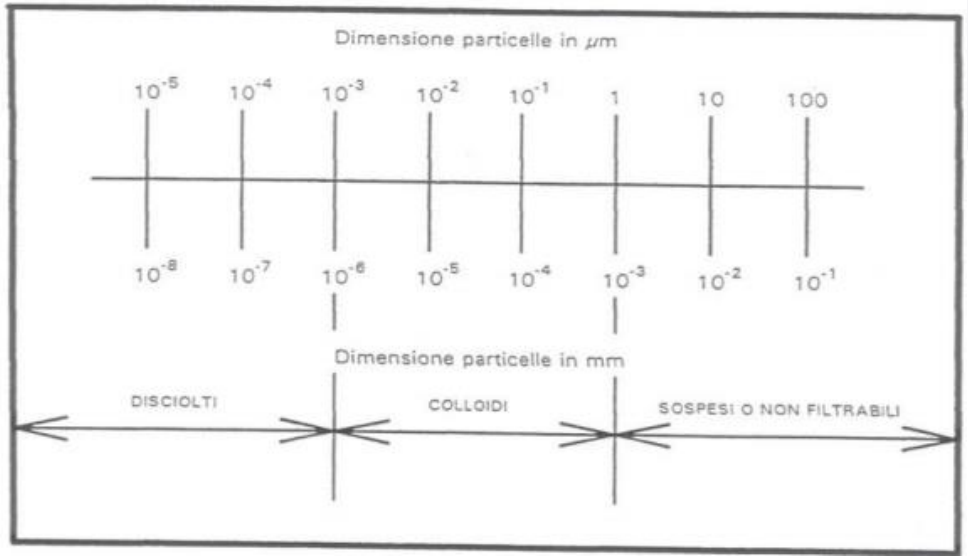
SOLIDI NON SEDIMENTABILI

SOLIDI DISCIOLTI
filtrazione

STV (volatili)
180-600°C (mg/l)

STNV (non volatili)
600°C (mg/l)

Classificazione dei solidi in acqua in base alle dimensioni



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Torbidità

La torbidità è correlata con il contenuto (e la dimensione) di solidi sospesi

- Diminuisce penetrazione luce (attività algale, specie ittiche)
- Influisce negativamente sull'uso (ricreazione, approvvigionamento)

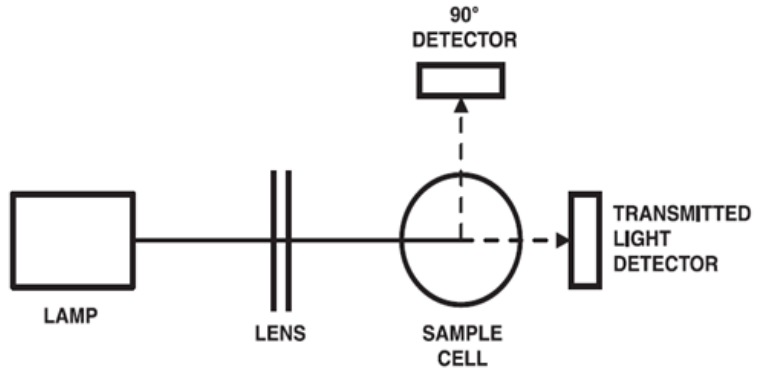
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Torbidità

La torbidità è correlata con il contenuto (e la dimensione) di solidi sospesi

- Diminuisce penetrazione luce (attività algale, specie ittiche)
- Influisce negativamente sull'uso (ricreazione, approvvigionamento)

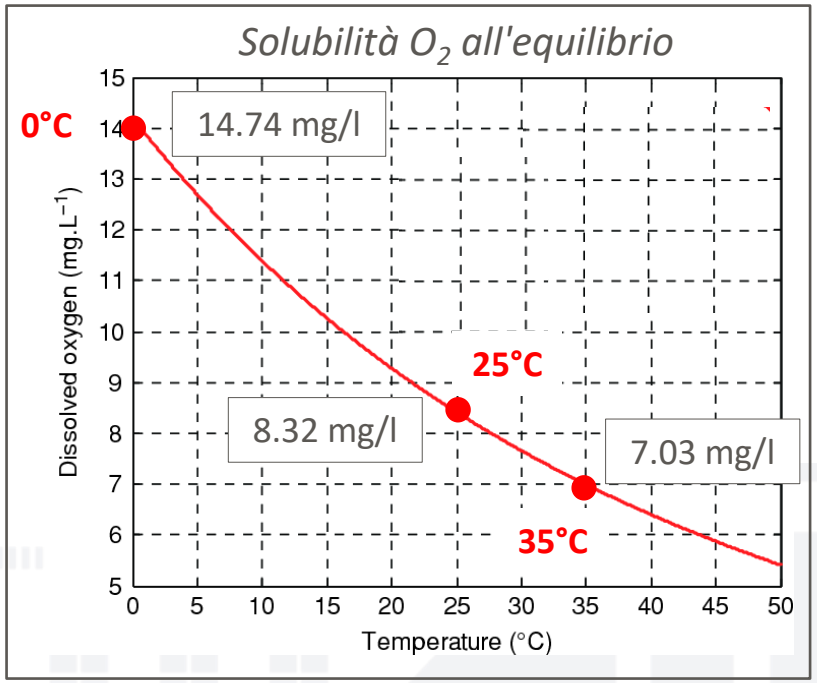
Si misura per via spettrofotometrica con il nefelometro:
% luce diffusa su perpendicolare al raggio incidente



Es. soluzione standard "Unità di silice": SiO_2 (mg/l)

Temperatura delle acque

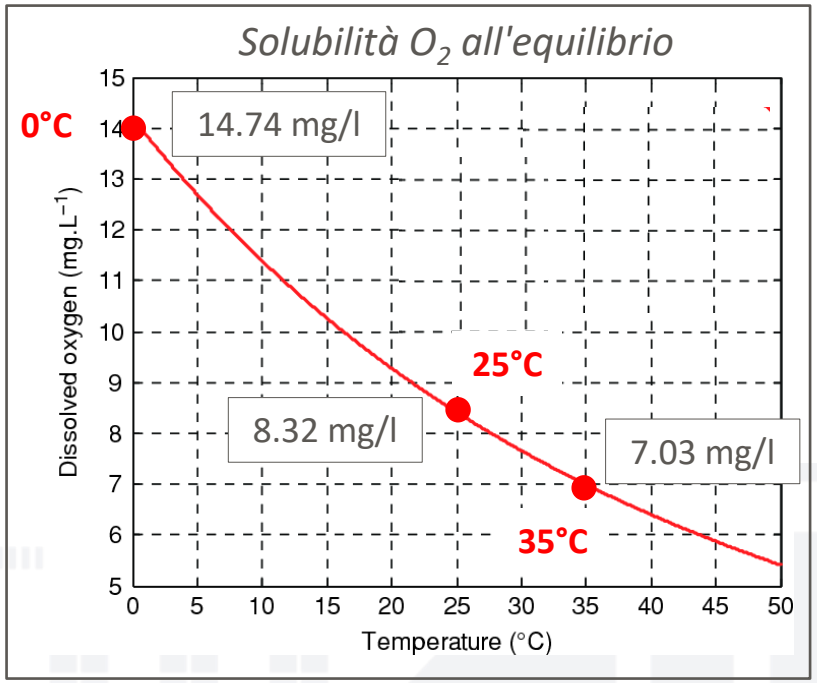
La **TEMPERATURA** (°C) è uno dei parametri fisici di base per la classificazione della qualità delle acque. Influenza la velocità delle reazioni, la solubilità dei composti, la densità dell'acqua (max a 4°C, stratificazione laghi).



Temperatura delle acque

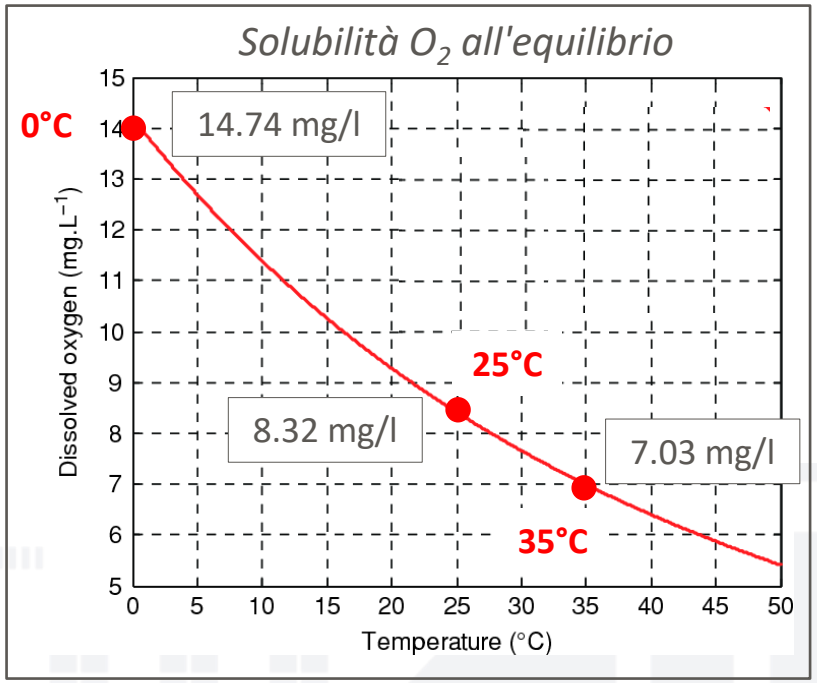
La **TEMPERATURA** (°C) è uno dei parametri fisici di base per la classificazione della qualità delle acque. Influenza la velocità delle reazioni, la solubilità dei composti, la densità dell'acqua (max a 4°C, stratificazione laghi).

Inquinamento termico



Temperatura delle acque

La **TEMPERATURA** (°C) è uno dei parametri fisici di base per la classificazione della qualità delle acque. Influenza la velocità delle reazioni, la solubilità dei composti, la densità dell'acqua (max a 4°C, stratificazione laghi).

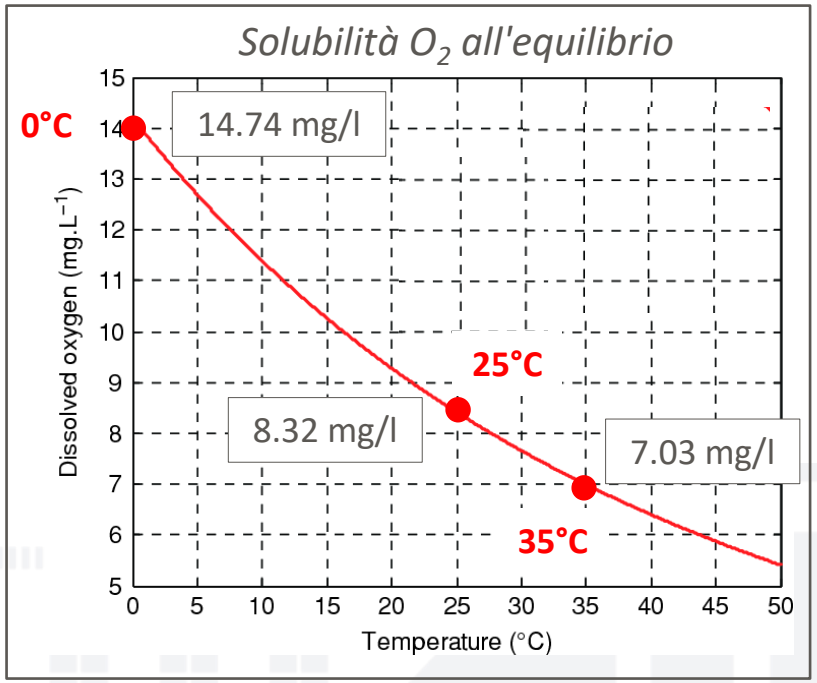


Inquinamento termico

Cause:
sversamento di acque di raffreddamento industriali (fino a 8-12°C)

Temperatura delle acque

La **TEMPERATURA** (°C) è uno dei parametri fisici di base per la classificazione della qualità delle acque. Influenza la velocità delle reazioni, la solubilità dei composti, la densità dell'acqua (max a 4°C, stratificazione laghi).



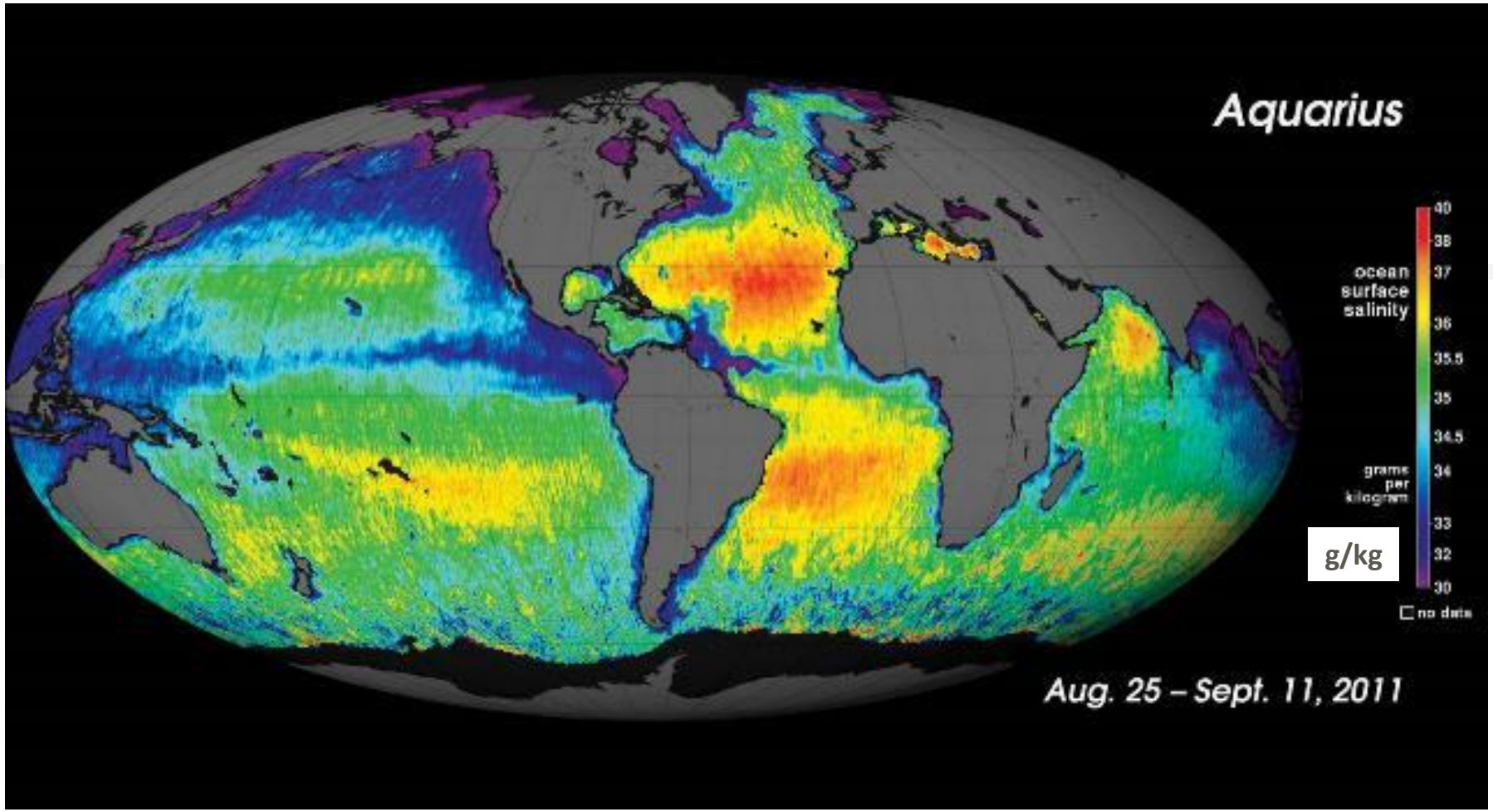
Inquinamento termico

Cause:
sversamento di acque di raffreddamento industriali (fino a 8-12°C)

Effetti:
- Riduzione O_2 disciolto;
- Aumento reazioni di autodepurazione;
- Alterazione delle condizioni naturali per le specie acquatiche.

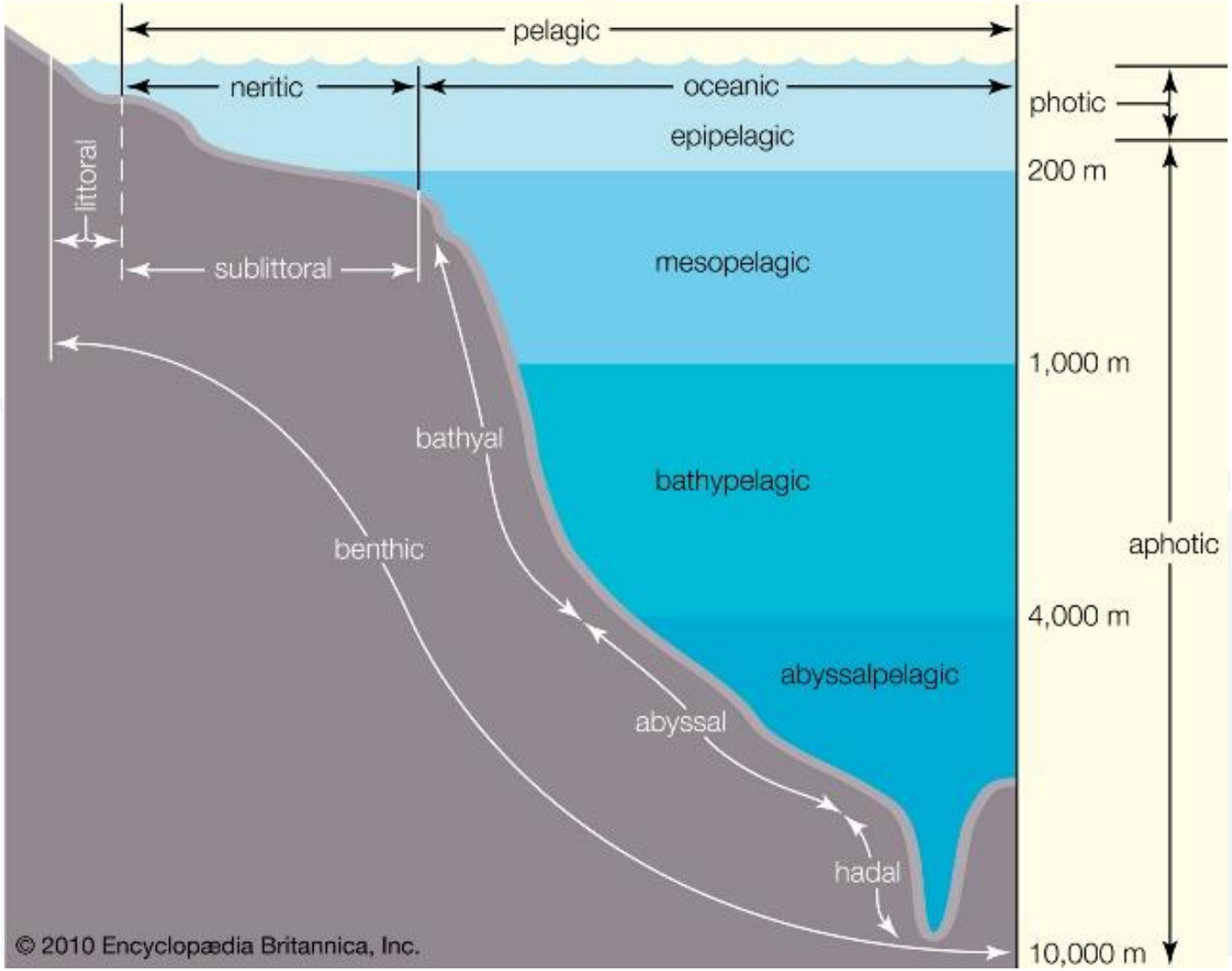
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Salinità



Fonti: https://www.britannica.com/science/ocean/images-videos#/media/1/424285/161414

Stratificazione degli oceani



fotosintesi

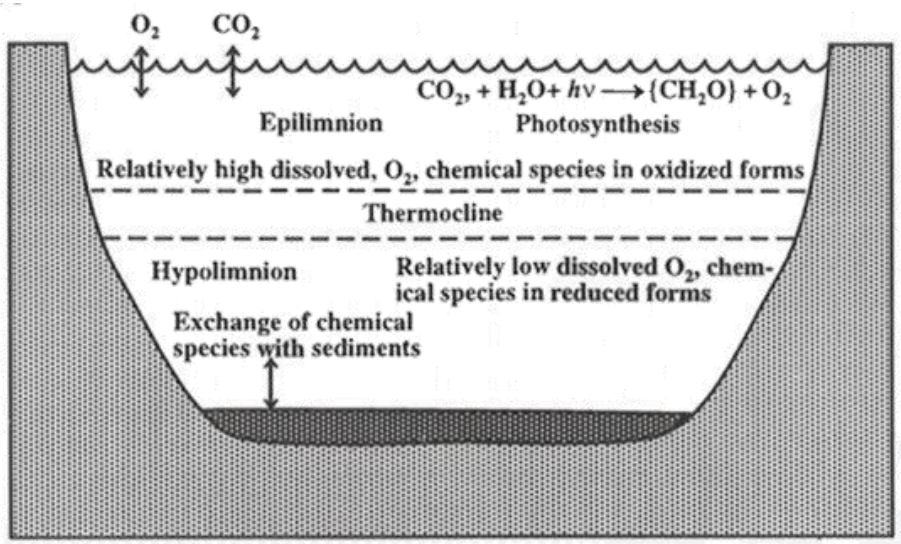
no fotosintesi

Fonti: https://www.britannica.com/science/ocean/images-videos#/media/1/424285/31

Stratificazione delle acque lacustri

Stratificazione termica

- Durante l'estate lo strato superficiale (**epilimnio**) è irraggiato dalla luce solare e, a causa della sua minore densità, galleggia sullo strato inferiore (**ipolimnio**);
- Lo strato di separazione tra i due è detto **termoclino**.

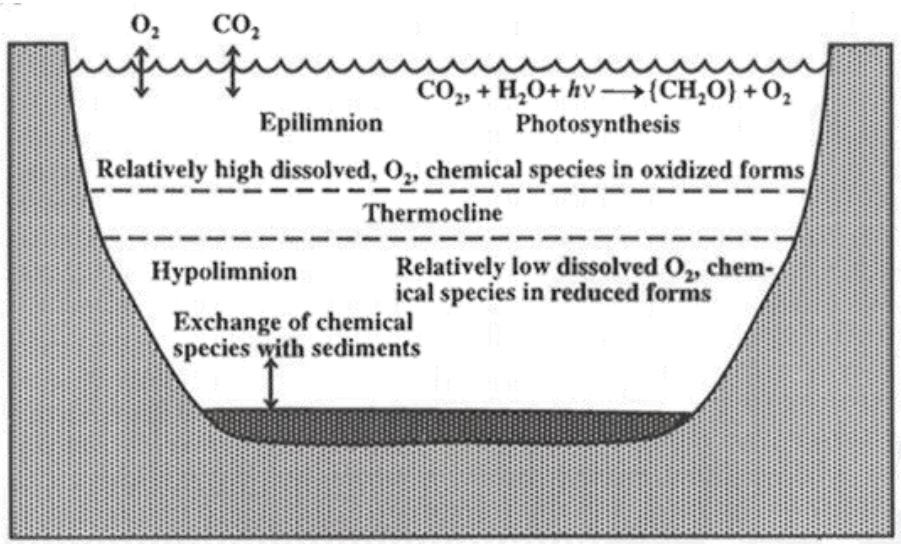


Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

Stratificazione delle acque lacustri

Stratificazione termica

- Durante l'estate lo strato superficiale (**epilimnio**) è irraggiato dalla luce solare e, a causa della sua minore densità, galleggia sullo strato inferiore (**ipolimnio**);
- Lo strato di separazione tra i due è detto **termoclino**.



- Se la differenza di temperatura è sensibile, i due strati **si comportano come comparti acquosi indipendenti** dal punto di vista delle proprietà chimiche e biologiche, che quindi possono essere anche molto differenti.

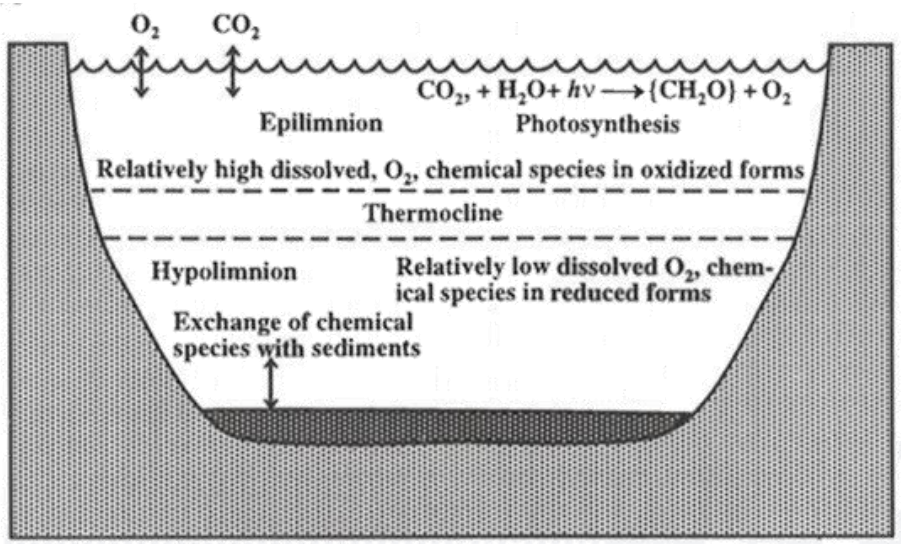
Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Stratificazione delle acque lacustri

Stratificazione termica

- Durante l'estate lo strato superficiale (**epilimnio**) è irraggiato dalla luce solare e, a causa della sua minore densità, galleggia sullo strato inferiore (**ipolimnio**);
- Lo strato di separazione tra i due è detto **termoclino**.



- Se la differenza di temperatura è sensibile, i due strati **si comportano come comparti acquosi indipendenti** dal punto di vista delle proprietà chimiche e biologiche, che quindi possono essere anche molto differenti.
- L'**epilimnio** può mostrare una elevata crescita di alghe per la presenza di luce, quindi con alta produzione di O_2 **(condizioni aerobiche**);

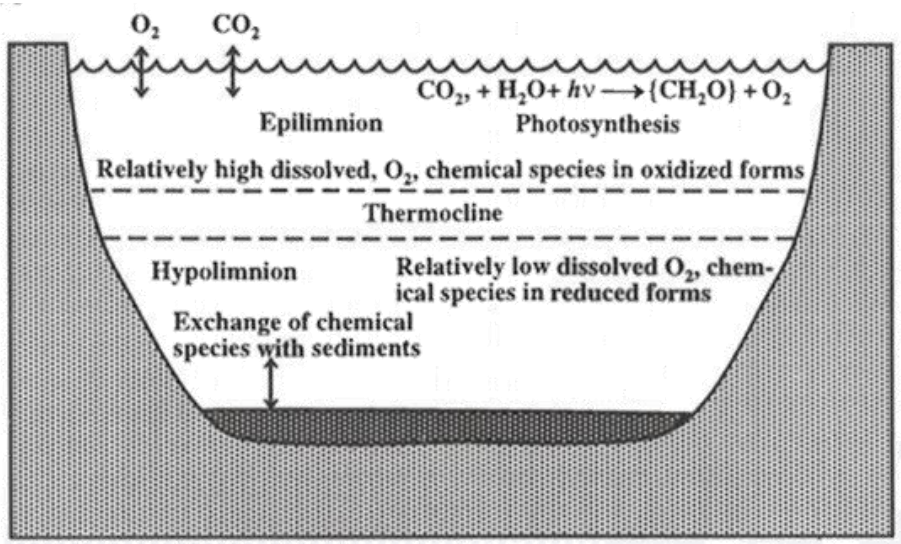
Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Stratificazione delle acque lacustri

Stratificazione termica

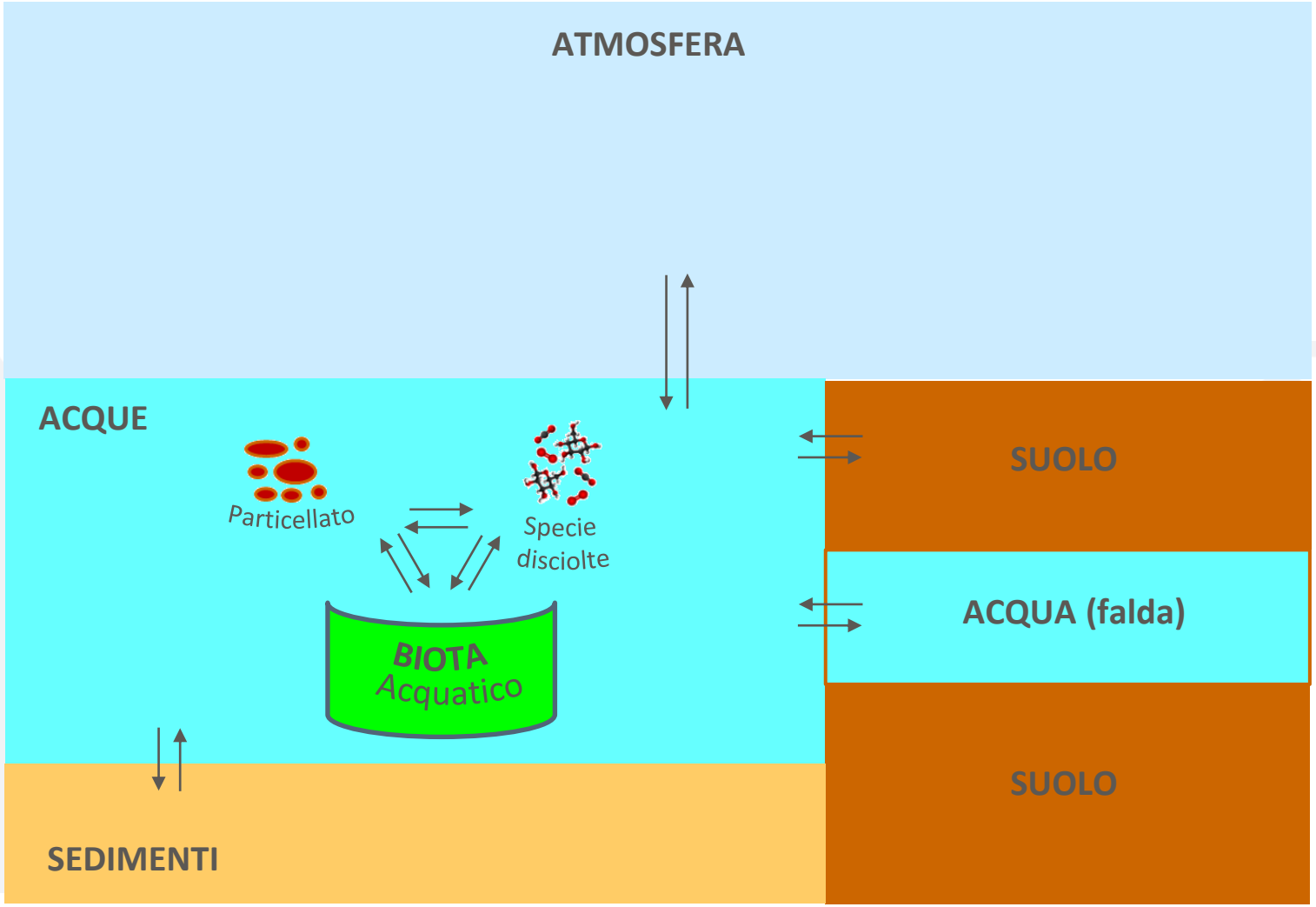
- Durante l'estate lo strato superficiale (**epilimnio**) è irraggiato dalla luce solare e, a causa della sua minore densità, galleggia sullo strato inferiore (**ipolimnio**);
- Lo strato di separazione tra i due è detto **termoclino**.



- Se la differenza di temperatura è sensibile, i due strati **si comportano come comparti acquosi indipendenti** dal punto di vista delle proprietà chimiche e biologiche, che quindi possono essere anche molto differenti.
- L'**epilimnio** può mostrare una elevata crescita di alghe per la presenza di luce, quindi con alta produzione di O_2 **(condizioni aerobiche)**;
- Nell'**ipolimnio**, più lontano dalla luce, prevalgono condizioni di degradazione batterica con consumo di O_2 (**condizioni anaerobiche**);
- Quando le temperature, durante i cicli stagionali, diventano prossime avviene un **rimescolamento** e il bacino si comporta come un **corpo idrico unico**.

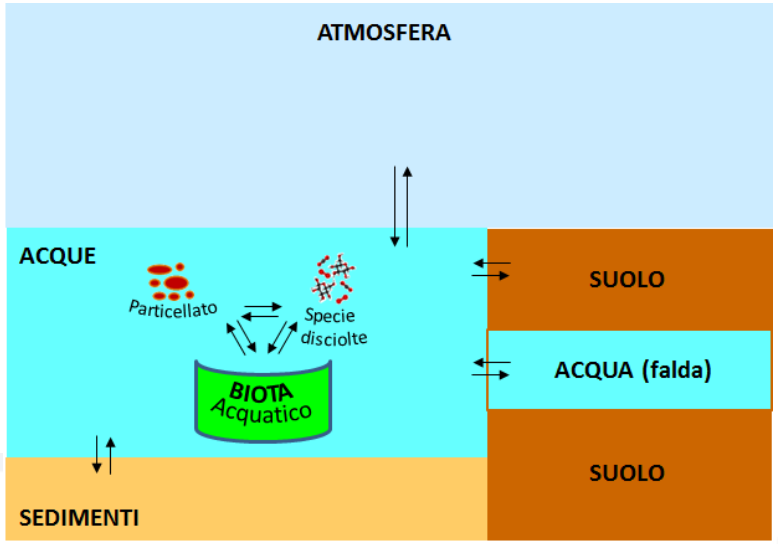
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Processi chimici nelle acque



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Processi chimici nelle acque (2)



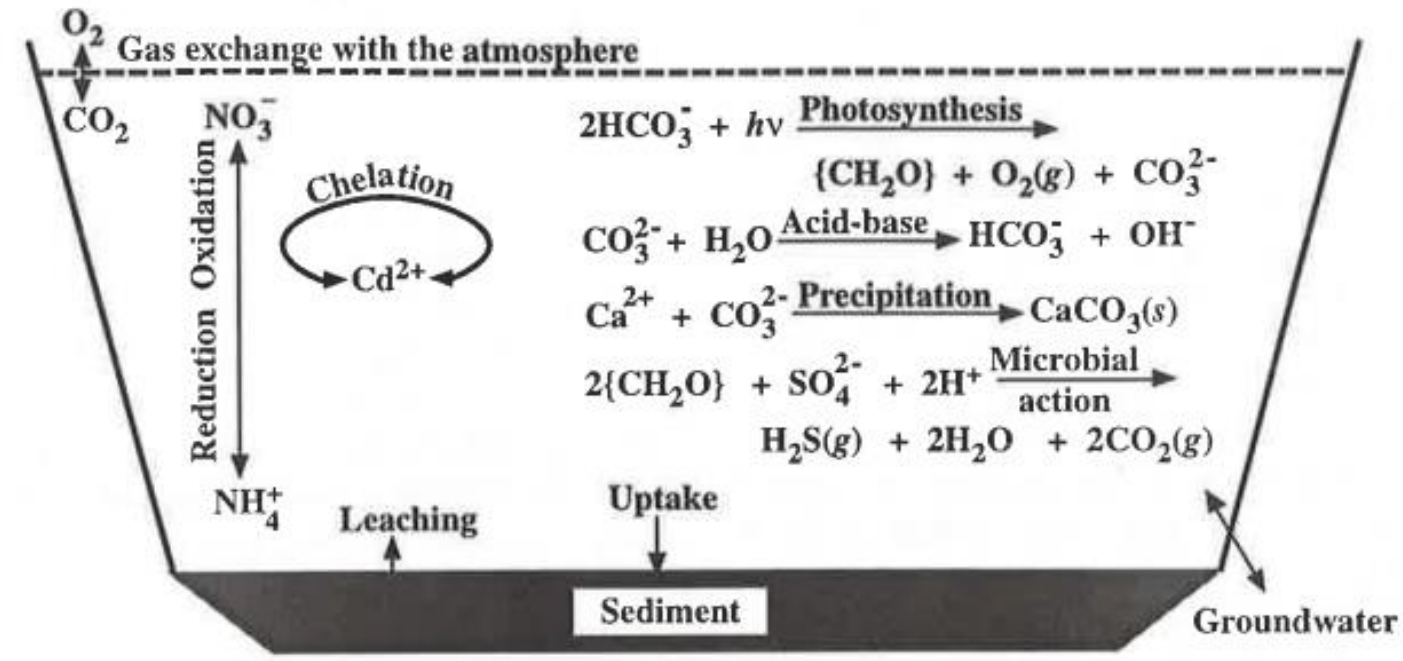


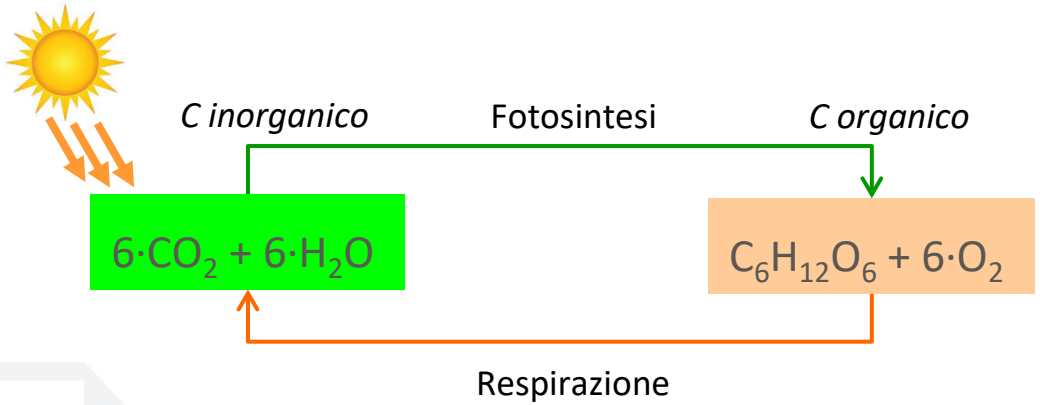
Figure 3.7. Major aquatic chemical processes.

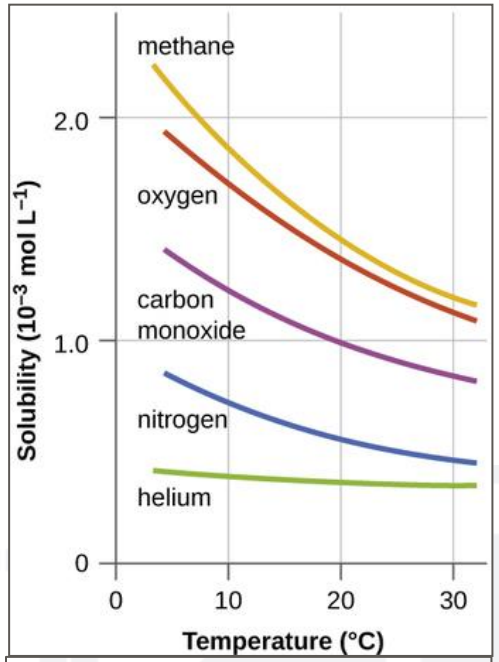
Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Presenza e solubilità dei gas in acqua

- Gas disciolti principali: O_2 e CO_2



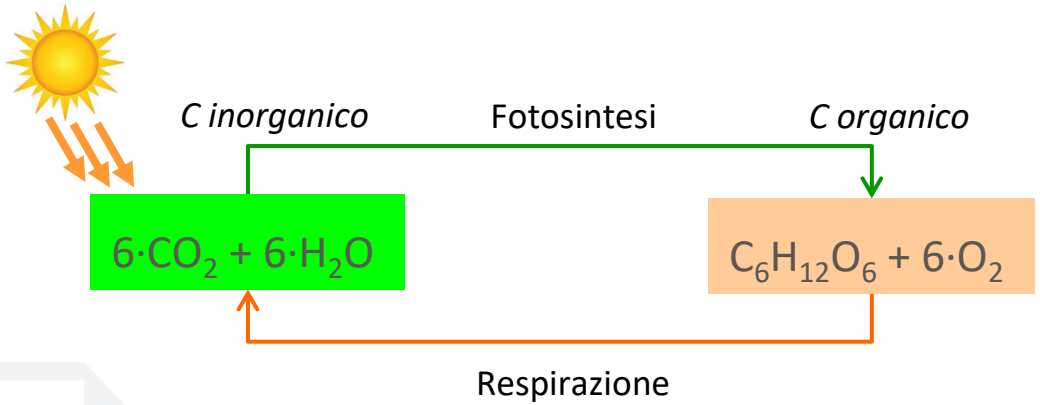


La solubilità diminuisce con l'aumentare della temperatura.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Presenza e solubilità dei gas in acqua

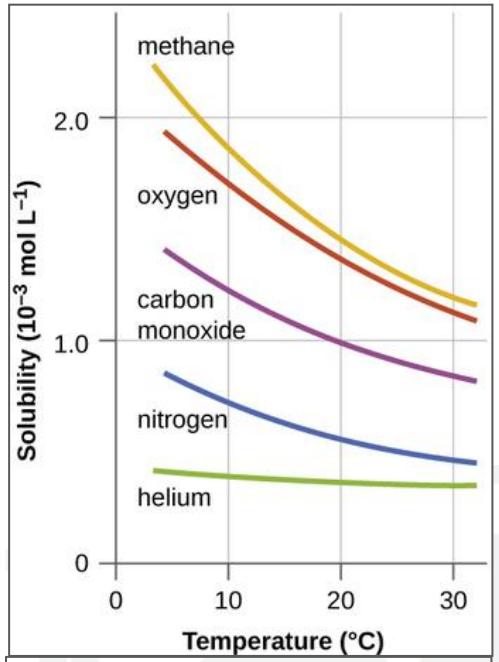
- Gas disciolti principali: O_2 e CO_2



- La solubilità è governata dalla legge di Henry:

$$[Gas_{(aq)}] = K_h \cdot P_{Gas}$$

La concentrazione in acqua è direttamente proporzionale alla pressione parziale del gas con una costante specifica per ogni gas che dipende dalla temperatura.



La solubilità diminuisce con l'aumentare della temperatura.

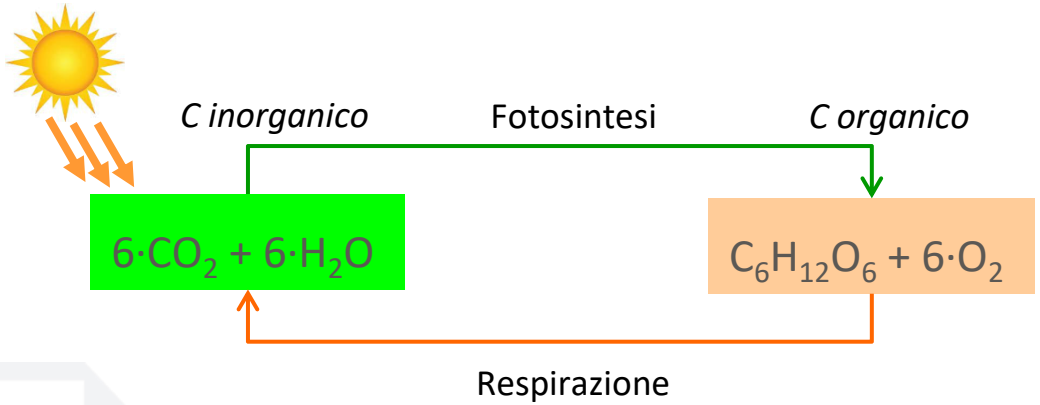
Gas	Henry's constant at 25°C
O_2	0.0013
CO_2	0.035
NH_3	59
N_2	0.00061
H_2	0.00078
CH_4	0.0014
H_2S	0.001

Unit: mol/atm·l (Perry e Chilton, 1993)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Presenza e solubilità dei gas in acqua

- Gas disciolti principali: O_2 e CO_2

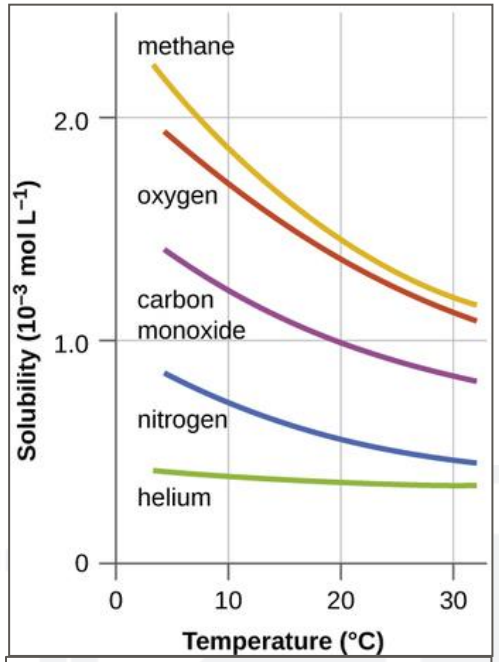


- La solubilità è governata dalla legge di Henry:

$$[Gas_{(aq)}] = K_h \cdot P_{Gas}$$

La concentrazione in acqua è direttamente proporzionale alla pressione parziale del gas con una costante specifica per ogni gas che dipende dalla temperatura.

- In genere la solubilità diminuisce all'aumentare della forza ionica (effetto *salting out*);
- La solubilità dipende dal pH per: CO_2, NH_3, SO_2.



La solubilità diminuisce con l'aumentare della temperatura.

Gas	Henry's constant at 25°C
O_2	0.0013
CO_2	0.035
NH_3	59
N_2	0.00061
H_2	0.00078
CH_4	0.0014
H_2S	0.001

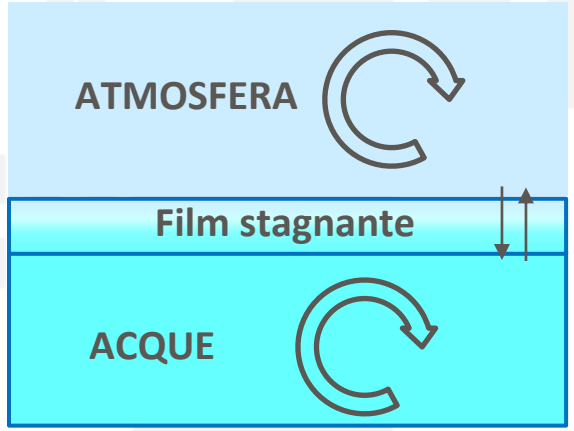
Unit: mol/atm·l (Perry e Chilton, 1993)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Scambio di gas con l'atmosfera: modello dello strato sottile

- In situazioni in cui non è raggiunto l'equilibrio, la **velocità di scambio** di gas alla superficie aria-bacino, può essere stimata dal **modello cinetico del comportamento del gas**;
- Il modello più comunemente usato è il **modello dello strato sottile**;

- In questo **modello**, si ipotizza che uno **strato sottile di acqua stagnante** agisca da **barriera** allo scambio di gas all'interfaccia aria-acqua.



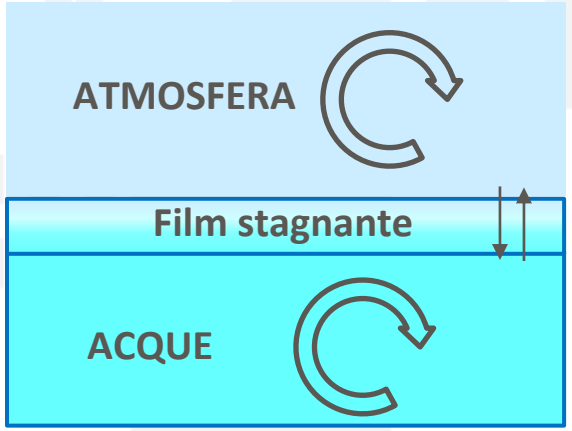
Scambio di gas con l'atmosfera: modello dello strato sottile

- In situazioni in cui non è raggiunto l'equilibrio, la **velocità di scambio** di gas alla superficie aria-bacino, può essere stimata dal **modello cinetico del comportamento del gas**;
- Il modello più comunemente usato è il **modello dello strato sottile**;

- In questo **modello**, si ipotizza che uno **strato sottile di acqua stagnante** agisca da **barriera** allo scambio di gas all'interfaccia aria-acqua.

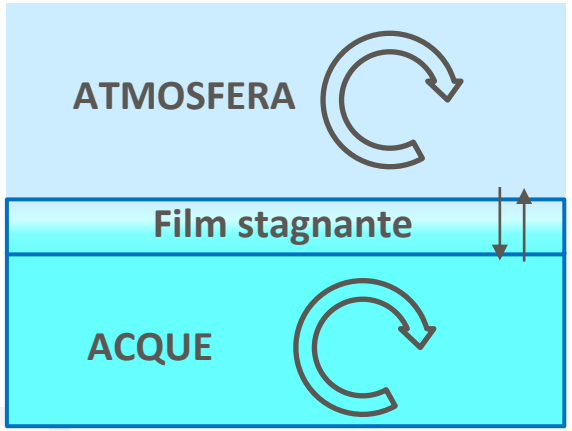
Si assume che:

- l'atmosfera al di sopra dello strato sottile e l'acqua al di sotto di esso, siano ben miscelate;
- la **parte superiore del film** sia in equilibrio **gassoso** con l'atmosfera soprastante;
- la **parte inferiore del film** contenga la stessa **concentrazione di gas** delle acque rimescolate sottostanti.



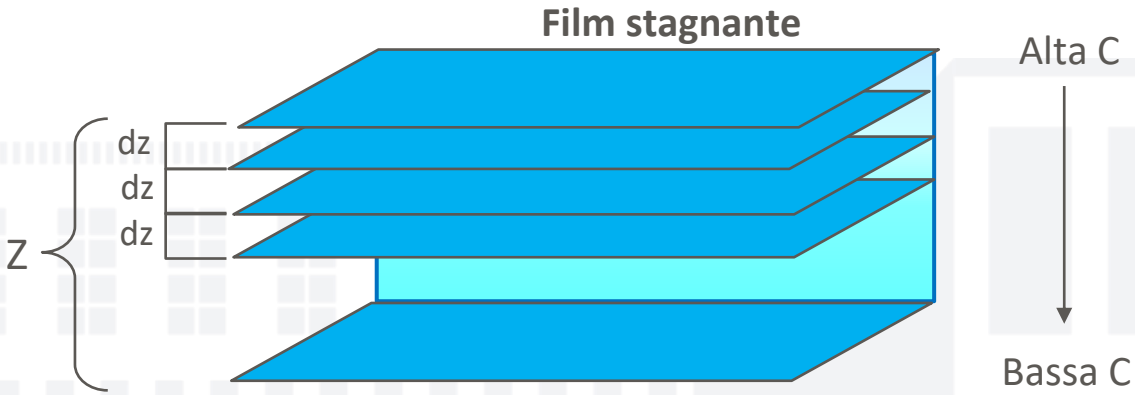
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Scambio di gas con l'atmosfera: modello dello strato sottile (2)



Legge di Fick: il flusso molecolare in ogni punto è proporzionale alla variazione di concentrazione per unità di percorso nella direzione in cui tale variazione è massima (segno "meno" nella formula).

$$F_{Gas} = - D_{Gas} \cdot \frac{d[C]}{dz}$$



F_{Gas} = flusso netto di molecole di gas per unità di area per unità di tempo ($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

D_{Gas} = coefficiente di diffusività molecolare ($m^2 \cdot s^{-1}$)

C = concentrazione ($mol \cdot m^{-3}$)

d[C]/dz = gradiente di concentrazione nel film stagnante

Z = spessore totale del film (m)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Scambio di gas con l'atmosfera: modello dello strato sottile (3)

Il flusso diffusivo netto di un gas dipende da diversi fattori:

- **Differenza di concentrazione (ΔC):** maggiore è la differenza tra la superficie e il fondo dello strato sottile stagnante, maggiore è il flusso di gas attraverso l'interfaccia aria-acqua;

$> \Delta C \qquad > F_{Gas}$

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Scambio di gas con l'atmosfera: modello dello strato sottile (3)

Il flusso diffusivo netto di un gas dipende da diversi fattori:

- **Differenza di concentrazione (ΔC):** maggiore è la differenza tra la superficie e il fondo dello strato sottile stagnante, maggiore è il flusso di gas attraverso l'interfaccia aria-acqua;

$> \Delta C \qquad > F_{Gas}$

- **Spessore del film**: maggiore è lo spessore minore è il flusso di gas attraverso l'interfaccia aria-acqua (lo spessore dello strato sottile stagnante varia da 10 a 60 µm, aumenta se alla superficie dell'acqua sono presenti microstrati di SOM con dimensioni variabili da 50 a 100 µm);

$> Z \qquad < F_{Gas}$

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Scambio di gas con l'atmosfera: modello dello strato sottile (3)

Il flusso diffusivo netto di un gas dipende da diversi fattori:

- **Differenza di concentrazione (ΔC):** maggiore è la differenza tra la superficie e il fondo dello strato sottile stagnante, maggiore è il flusso di gas attraverso l'interfaccia aria-acqua;

> ΔC > F_{Gas}

- **Spessore del film**: maggiore è lo spessore minore è il flusso di gas attraverso l'interfaccia aria-acqua (lo spessore dello strato sottile stagnante varia da 10 a 60 µm, aumenta se alla superficie dell'acqua sono presenti microstrati di DOM con dimensioni variabili da 50 a 100 µm);

> Z < F_{Gas}

- **Coefficienti di diffusività molecolare**: aumentano all'aumentare della temperatura e al diminuire della massa molecolare (questo comporta un aumento dei flussi di gas all'aumentare della temperatura e al diminuire del peso molecolare).

> T ; < MM > D_{Gas}

TABLE 6.3
Molecular Diffusivity Coefficients of Various Gases in Seawater

Gas	Molecular Weight, (g/mol)	Diffusion Coefficient ($\times 10^{-5}$ cm²/s) 0°C	24°C
H_2	2	2.0	4.9
He	4	3.0	5.8
Ne	20	1.4	2.8
N_2	28	1.1	2.1
O_2	32	1.2	2.3
Ar	40	.8	1.5
CO_2	44	1.0	1.9
Rn	222	.7	1.4

Source: From *Chemical Oceanography*, W. S. Broecker, copyright © 1974 by Harcourt, Brace, and Jovanovich Publishers, Orlando, FL, p. 127. Reprinted by permission. See Broecker and Peng (1982), p. 119, for data sources.

Scambio di gas con l'atmosfera: modello dello strato sottile (3)

Il flusso diffusivo netto di un gas dipende da diversi fattori:

- **Differenza di concentrazione (ΔC):** maggiore è la differenza tra la superficie e il fondo dello strato sottile stagnante, maggiore è il flusso di gas attraverso l'interfaccia aria-acqua;

> ΔC > F_{Gas}

- **Spessore del film**: maggiore è lo spessore minore è il flusso di gas attraverso l'interfaccia aria-acqua (lo spessore dello strato sottile stagnante varia da 10 a 60 µm, aumenta se alla superficie dell'acqua sono presenti microstrati di DOM con dimensioni variabili da 50 a 100 µm);

> Z < F_{Gas}

- **Coefficienti di diffusività molecolare**: aumentano all'aumentare della temperatura e al diminuire della massa molecolare (questo comporta un aumento dei flussi di gas all'aumentare della temperatura e al diminuire del peso molecolare).

> T ; < MM > D_{Gas}

> D_{Gas} > F_{Gas}

TABLE 6.3
Molecular Diffusivity Coefficients of Various Gases in Seawater

Gas	Molecular Weight, (g/mol)	Diffusion Coefficient ($\times 10^{-5}$ cm²/s) 0°C	24°C
H_2	2	2.0	4.9
He	4	3.0	5.8
Ne	20	1.4	2.8
N_2	28	1.1	2.1
O_2	32	1.2	2.3
Ar	40	.8	1.5
CO_2	44	1.0	1.9
Rn	222	.7	1.4

Source: From *Chemical Oceanography*, W. S. Broecker, copyright © 1974 by Harcourt, Brace, and Jovanovich Publishers, Orlando, FL, p. 127. Reprinted by permission. See Broecker and Peng (1982), p. 119, for data sources.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Diffusività turbolenta

- I coefficienti di diffusività molecolare variano $1x10^{-5}$ a $4x10^{-5}$ cm^2/s, le costanti di diffusività turbolenta variano in grandezza da 1 a 100 cm^2/s;
- in presenza di turbolenza verticale, come nell'acqua al di sotto del film stagnante, il trasporto dovuto al rimescolamento supera di molto quello dovuto a diffusione molecolare;

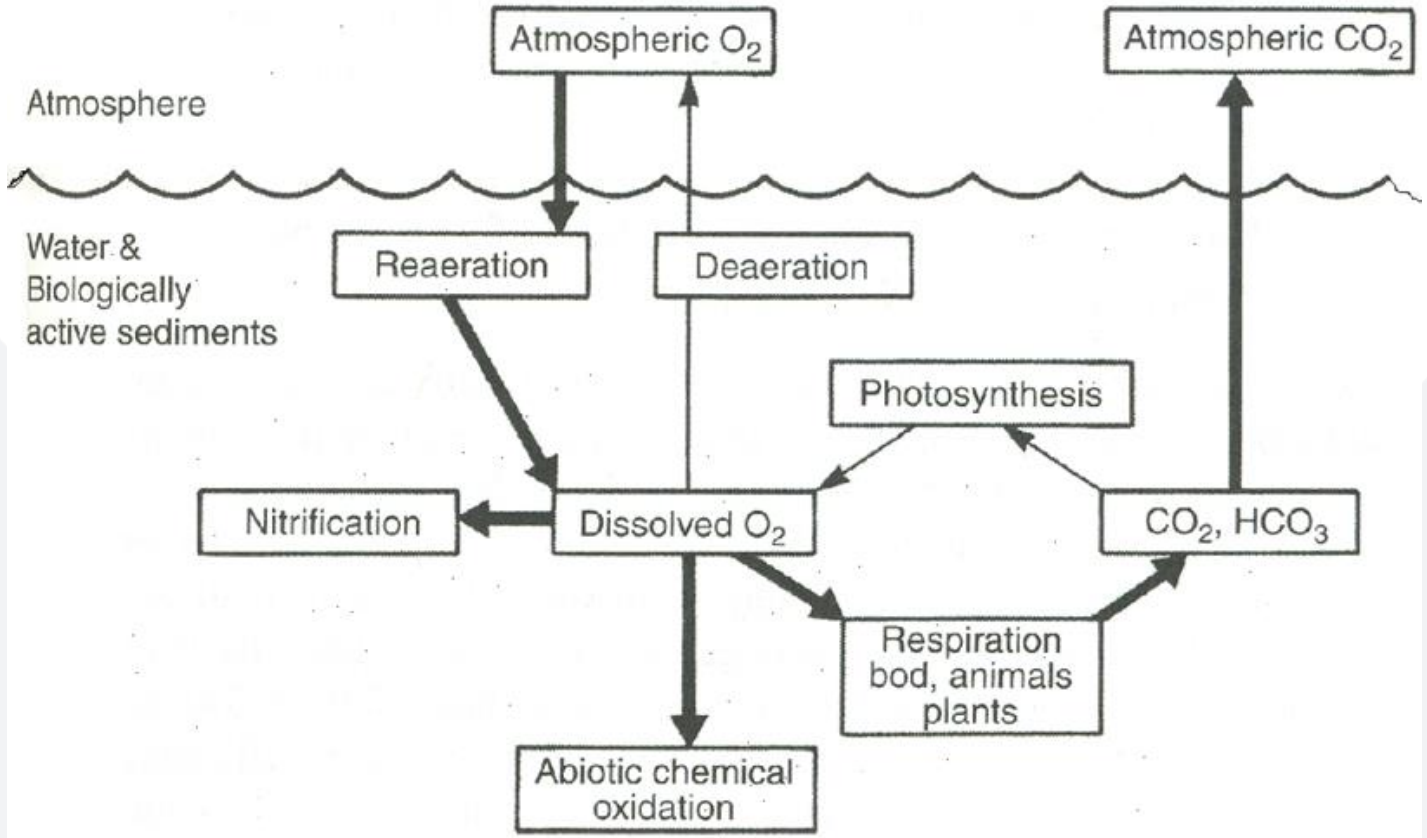
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Diffusività turbolenta

- I coefficienti di diffusività molecolare variano $1x10^{-5}$ a $4x10^{-5}$ cm^2/s, le costanti di diffusività turbolenta variano in grandezza da 1 a 100 cm^2/s;
- in presenza di turbolenza verticale, come nell'acqua al di sotto del film stagnante, il trasporto dovuto al rimescolamento supera di molto quello dovuto a diffusione molecolare;
- la diffusione molecolare è un meccanismo di trasporto significativo solo in condizioni di stagnazione;
- quando la turbolenza verticale è forte, si riduce lo spessore dello strato sottile stagnante;
- i venti aumentano i flussi di gas aumentando la superficie dell'interfaccia aria-acqua e causando iniezione di bolle.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Ossigeno in acqua

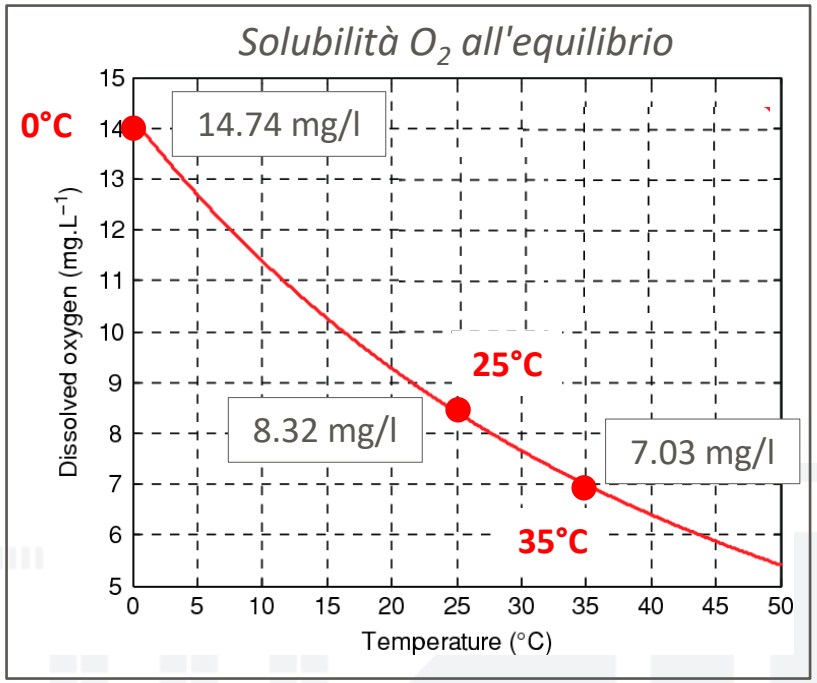


Basic concept of environmental chemistry - des. W. Connell – Taylor & Francis

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Ossigeno in acqua

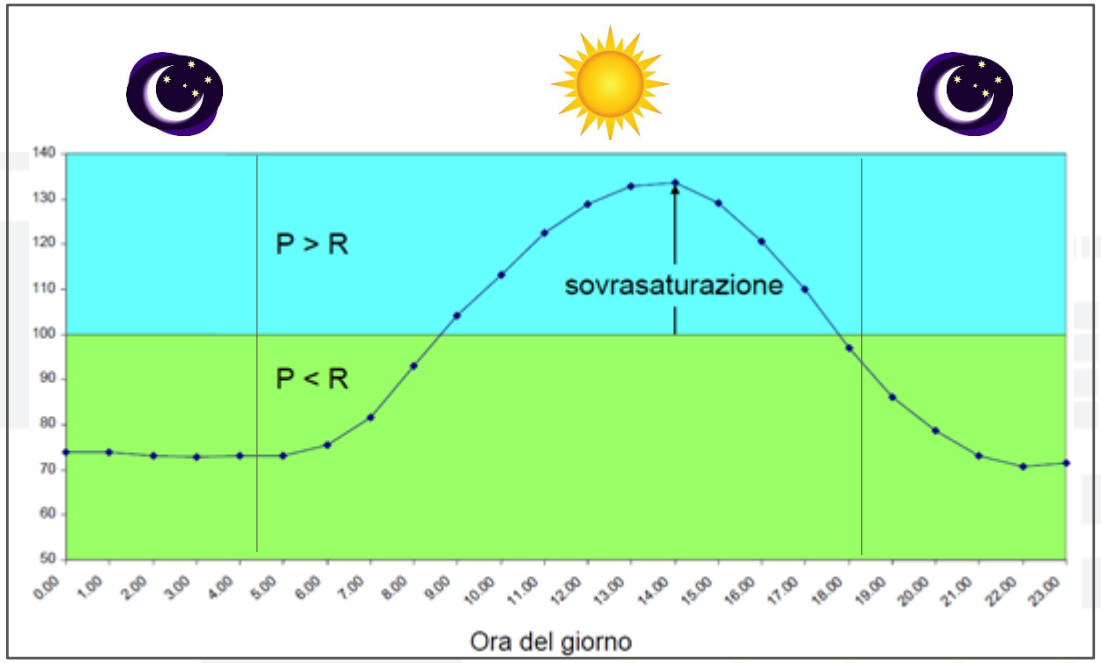
La maggior parte deriva dall'atmosfera, perciò è fondamentale la possibilità dell'acqua di entrare in contatto con l'atmosfera.

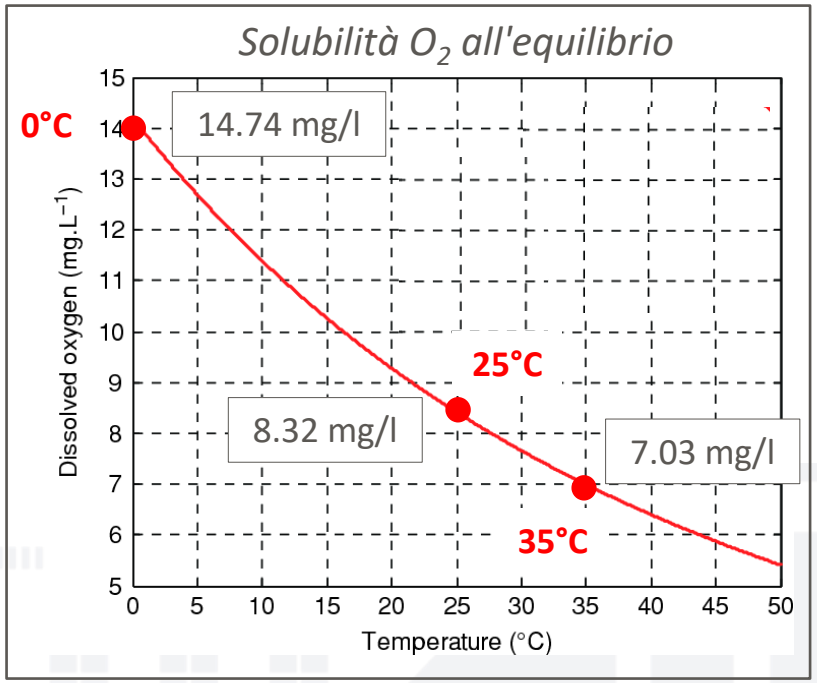


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Ossigeno in acqua

La maggior parte deriva dall'atmosfera, perciò è fondamentale la possibilità dell'acqua di entrare in contatto con l'atmosfera.





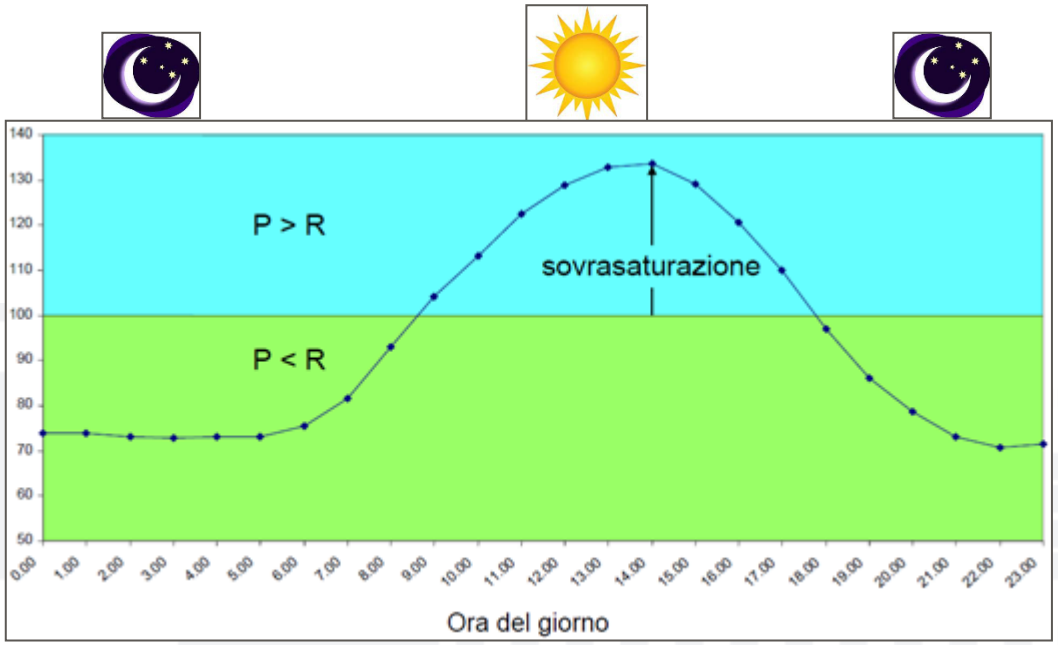
P = Fotosintesi (Produzione ossigeno per fotosintesi)

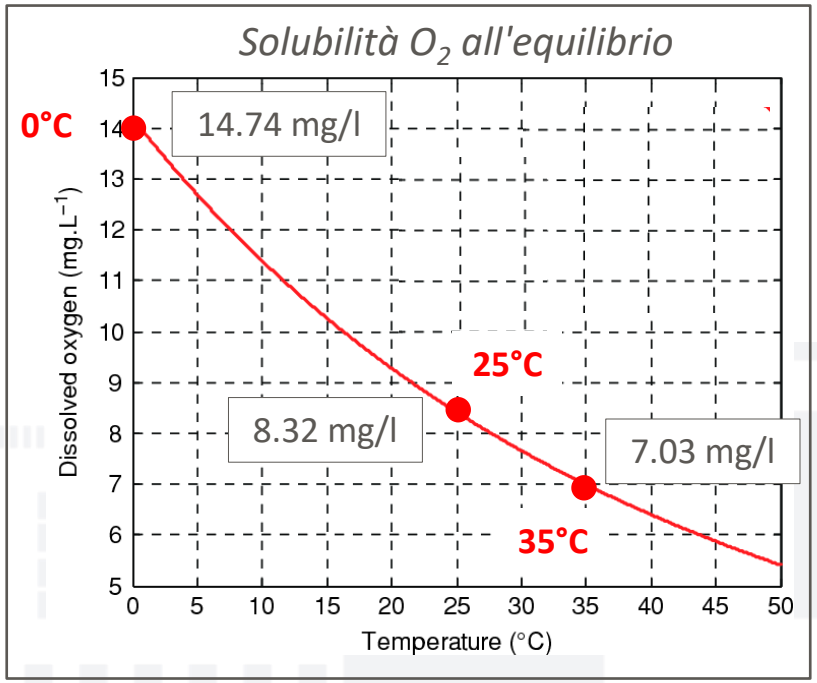
R = Respirazione (Consumo di ossigeno)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Ossigeno in acqua

La maggior parte deriva dall'atmosfera, perciò è fondamentale la possibilità dell'acqua di entrare in contatto con l'atmosfera.





P = Fotosintesi (Produzione ossigeno per fotosintesi)
R = Respirazione (Consumo di ossigeno)

La concentrazione di O_2 disciolto dipende:

- dalla **cinetica** dello scambio all'interfaccia acqua-atmosfera;
- dal suo **consumo** in processi di degradazione della materia organica;
- dal processo di **fotosintesi**.

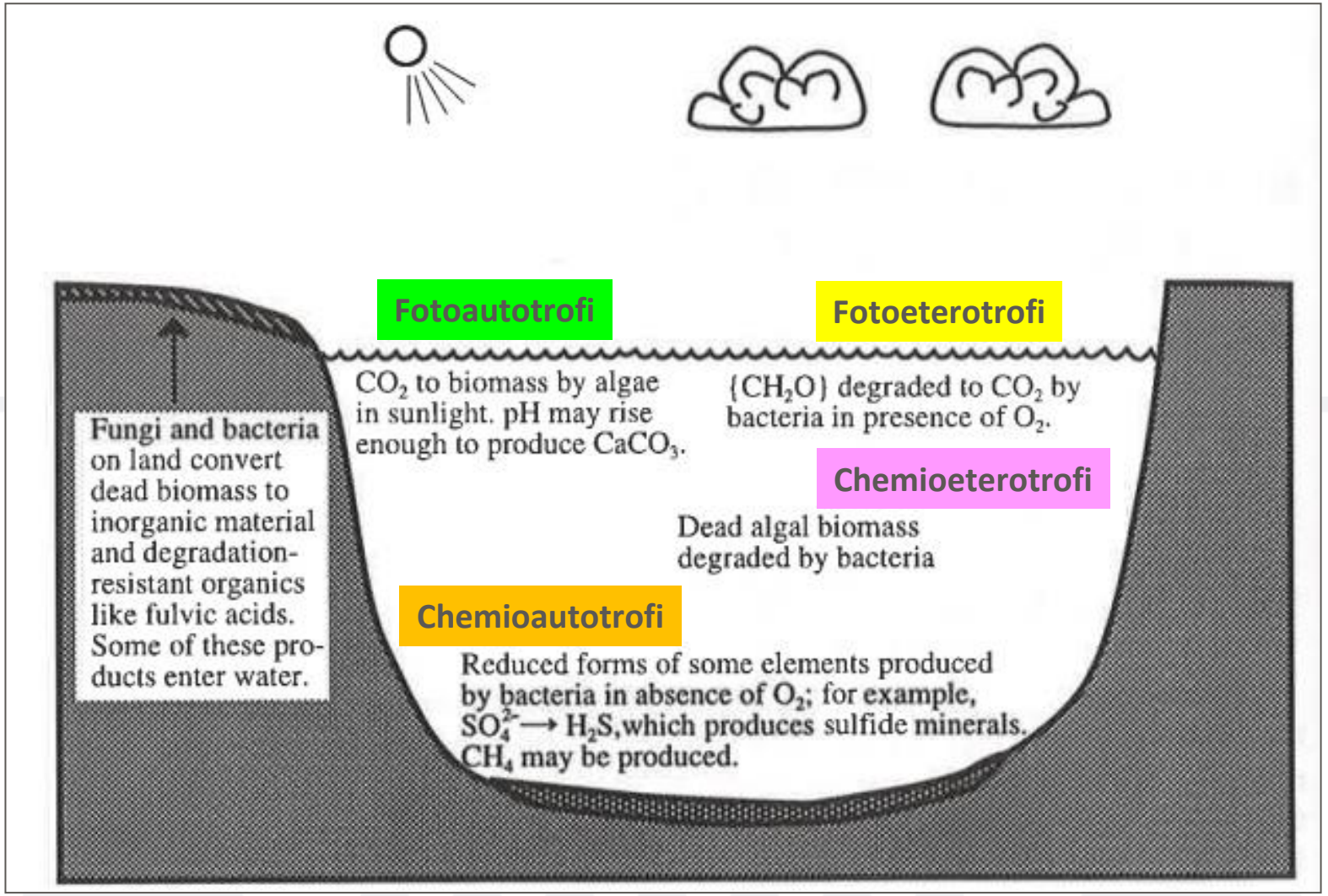
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Classificazione dei microorganismi

Fonte di carbonio ↓ / Fonte di energia →	Chimica	Fotochimica (luce)
Carbonio organico	**Chemioeterotrofi** Funghi e protozoi, molti batteri. Usano il materiale organico sia come fonte di energia che di carbonio	**Fotoeterotrofi** Pochi batteri specializzati nell'utilizzare la luce come fonte di energia, ma sono dipendenti dal materiale organico per produrre biomassa
Carbonio inorganico (CO_2, HCO_3^-)	**Chemioautotrofi** Usano CO_2 per produrre biomassa e ossidano sostanze come H_2 (*Pseudomonas*), NH_4^+ (*Nitrosomonas*), S (*Thiobacillus*) per ottenere energia	**Fotoautotrofi** Alghe, cianobatteri ("alga blu-verde"), batteri fotosintetici che usano la luce per convertire CO_2 (o HCO_3^-) in biomassa.

Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

Microorganismi nelle acque



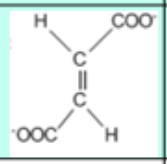
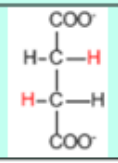
$\{CH_2O\}$ = composti organici

Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Metabolismo batterico

La principale distinzione tra batteri risiede nell'**accettore terminale** nella catena di trasporto degli elettroni originata **quando i batteri generano energia ossidando i nutrienti**.

ACCETTORE DI ELETTRONI	**Prodotto finale**	**NOME DEL PROCESSO**
O_2	H_2O	RESPIRAZIONE AEROBIA
NO_3^-	NO_2^-, NH_3 or N_2	RESPIRAZIONE ANAEROBIA: denitrificazione *(Bacillus, Pseudomonas)*
$SO_4^=$	S or H_2S	RESPIRAZIONE ANAEROBIA : riduzione solfati *(Desulfovibrio)*
fumarato 	succinato 	RESPIRAZIONE ANAEROBIA : con accettore organico di e- *(E.Coli)*
CO_2	CH_4	METANOGENESI *(Archea)*

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Reazioni redox mediate da batteri

Sequenza ossidativa in presenza di eccesso di O_2:

- Respirazione aerobica
- Ossidazione dei solfuri
- Nitrificazione
- Ossidazione del Fe(II)
- Ossidazione di Mn(II)

Sequenza ossidativa in presenza di eccesso di materiale organico:

- Respirazione aerobica
- Denitrificazione
- Riduzione dei nitrati
- Fermentazione
- Riduzione dei solfati
- Fermentazione metanica
- Fissazione dell'azoto

Principal Microbially Mediated Oxidation and Reduction Reactions

Oxidation	$pE^0(w)$[a]
(1) $\frac{1}{4}\{CH_2O\} + \frac{1}{4}H_2O \leftrightarrow \frac{1}{4}CO_2 + H^+(w) + e^-$	−8.20
(1a) $\frac{1}{2}HCOO^- \leftrightarrow \frac{1}{2}CO_2(g) + \frac{1}{2}H^+(w) + e^-$	−8.73
(1b) $\frac{1}{2}\{CH_2O\} + \frac{1}{2}H_2O \leftrightarrow \frac{1}{2}HCOO^- + \frac{1}{2}H^+(w) + e^-$	−7.68
(1c) $\frac{1}{2}CH_3OH \leftrightarrow \frac{1}{2}\{CH_2O\} + H^+(w) + e^-$	−3.01
(1d) $\frac{1}{2}CH_4(g) + \frac{1}{2}H_2O \leftrightarrow \frac{1}{2}CH_3OH + H^+(w) + e^-$	−2.88
(2) $\frac{1}{8}HS^- + \frac{1}{2}H_2O \leftrightarrow \frac{1}{8}SO_4^{2-} + \frac{9}{8}H^+(w) + e^-$	−3.75
(3) $\frac{1}{8}NH_4^+ + \frac{3}{8}H_2O \leftrightarrow \frac{1}{8}NO_3^- + \frac{5}{4}H^+(w) + e^-$	+6.16
(4)[a] $FeCO_3(s) + 2H_2O \leftrightarrow FeOOH(s) + HCO_3^-(1\times10^{-3}) + 2H^+(w) + e^-$	−1.67
(5)[a] $\frac{1}{2}MnCO_3(s) + H_2O \leftrightarrow \frac{1}{2}MnO_2 + \frac{1}{2}HCO_3^-(1\times10^{-3}) + \frac{1}{2}H^+(w) + e^-$	−8.5
Reduction	
(A) $\frac{1}{4}O_2(g) + H^+(w) + e^- \leftrightarrow \frac{1}{2}H_2O$	+13.75
(B) $\frac{1}{5}NO_3^- + \frac{6}{5}H^+(w) + e^- \leftrightarrow \frac{1}{10}N_2 + \frac{3}{5}H_2O$	+12.65
(C) $\frac{1}{8}NO_3^- + \frac{5}{4}H^+(w) + e^- \leftrightarrow \frac{1}{8}NH_4^+ + \frac{3}{8}H_2O$	+6.15
(D) $\frac{1}{2}\{CH_2O\} + H^+(w) + e^- \leftrightarrow \frac{1}{2}CH_3OH$	−3.01
(E) $\frac{1}{8}SO_4^{2-} + \frac{9}{8}H^+(w) + e^- \leftrightarrow \frac{1}{8}HS^- + \frac{1}{2}H_2O$	−3.75
(F) $\frac{1}{8}CO_2(g) + H^+(w) + e^- \leftrightarrow \frac{1}{8}CH_4(g) + \frac{1}{4}H_2O$	−4.13
(G) $\frac{1}{6}N_2 + \frac{4}{3}H^+(w) + e^- \leftrightarrow \frac{1}{3}NH_4^+$	−4.68

Sequence of Microbial Mediation

Model 1: Excess of organic material (water initially contains O_2, NO_3^-, SO_4^{2-}, and HCO_3^-). Examples: Hypolimnion of a eutrophic lake, sediments, sewage treatment plant digester.

Process	Combination	$pE^0(w)$[b]	$\Delta G^0(w)$, kcal
Oxic respiration	(1) + (A)	21.95	−29.9
Denitrification	(1) + (B)	20.85	−28.4
Nitrate reduction	(1) + (C)	14.36	−19.6
Fermentation[c]	(1b) + (D)	4.67	−6.4
Sulfate reduction	(1) + (E)	4.45	−5.9
Methane fermentation	(1) + (F)	4.07	−5.6
N-fixation	(1) + (G)	3.52	−4.8

Model 2: Excess O_2 (water initially contains organic matter, SH^-, NH_4^+, and possibly Fe(II) and Mn(II)). Examples: Oxic waste treatment, self-purification in streams, epilimnion of lake.

Process	Combination	$pE^0(w)$[b]	$\Delta G^0(w)$, kcal
Oxic respiration	(A) + (1)	21.95	−29.9
Sulfide oxidation	(A) + (2)	17.50	−23.8
Nitrification	(A) + (3)	7.59	−10.3
Iron(II) oxidation[d]	(A) + (4)	15.42	21.0
Manganese(II) oxidation[d]	(A) + (5)	5.75	−7.2

Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Consumo di ossigeno

- Un'**acqua naturale** può contenere diverse concentrazioni di **sostanze ossidabili**;
- **Maggiore** è la quantità di tali sostanze **maggiore** è la quantità di **ossigeno** che sarà necessario per ossidarle tramite processi aerobici.

$$\{CH_2O\} + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + \text{altri prodotti}$$

A 25°C l'acqua contiene 8.32 mg/l di O_2

7.8 mg di materia organica consumano circa 8.3 mg di O_2

Consumo di ossigeno

- Un'**acqua naturale** può contenere diverse concentrazioni di **sostanze ossidabili**;
- **Maggiore** è la quantità di tali sostanze **maggiore** è la quantità di **ossigeno** che sarà necessario per ossidarle tramite processi aerobici.

$$\{CH_2O\} + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + \text{altri prodotti}$$

A 25°C l'acqua contiene 8.32 mg/l di O_2

7.8 mg di materia organica consumano circa 8.3 mg di O_2

L'immissione anche di una piccola quantità di effluente contaminato può influire pesantemente sulla qualità dell'acqua

ANOSSIA

Consumo di ossigeno

- Un'**acqua naturale** può contenere diverse concentrazioni di **sostanze ossidabili**;
- **Maggiore** è la quantità di tali sostanze **maggiore** è la quantità di **ossigeno** che sarà necessario per ossidarle tramite processi aerobici.

$$\{CH_2O\} + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + \text{altri prodotti}$$

A 25°C l'acqua contiene 8.32 mg/l di O_2

7.8 mg di materia organica consumano circa 8.3 mg di O_2

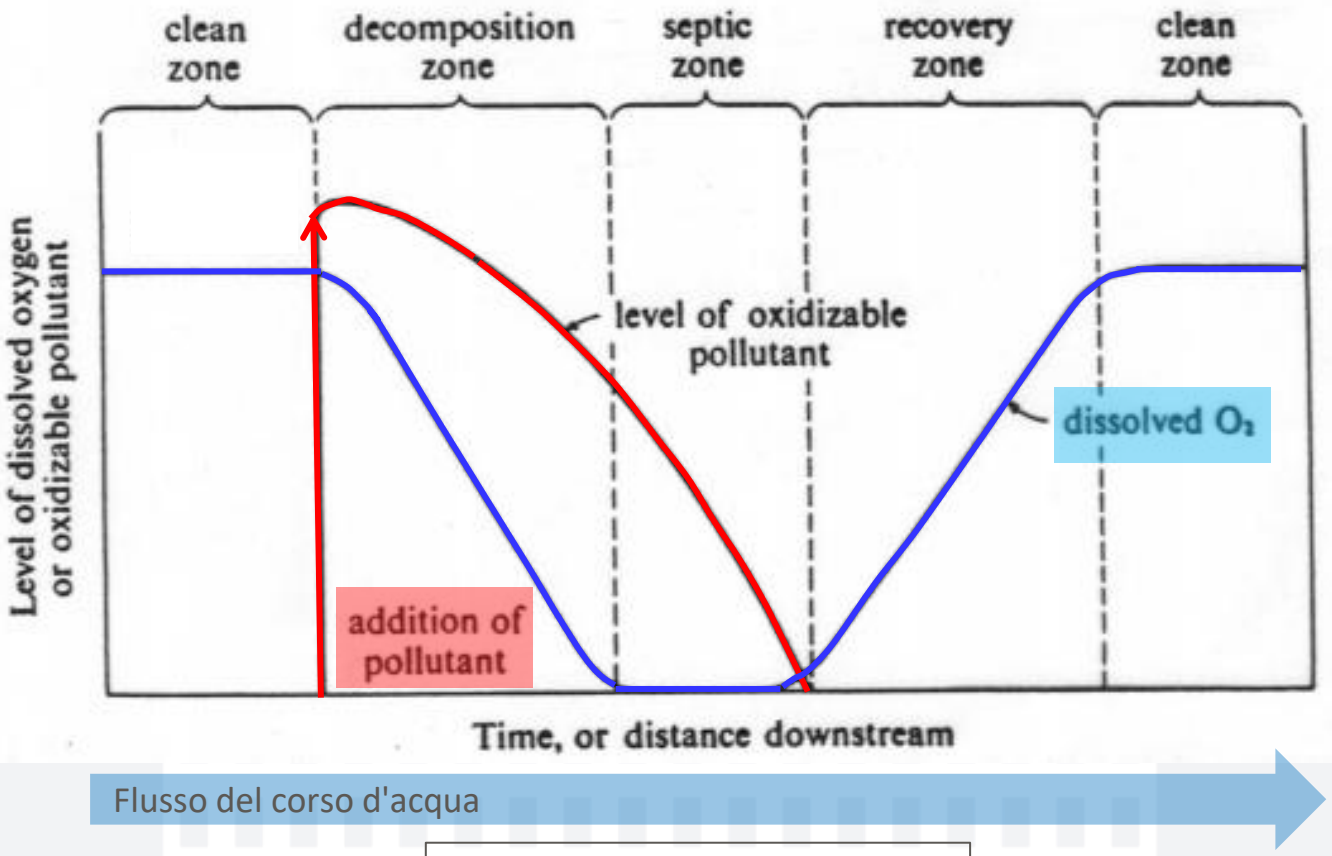
L'immissione anche di una piccola quantità di effluente contaminato può influire pesantemente sulla qualità dell'acqua → ANOSSIA

Inoltre ci sono anche batteri che consumano ossigeno per la trasformazione di sali inorganici

$$NH_4^+ \xrightarrow[\textit{Nitrosomonas}]{O_2} NO_2^- \xrightarrow[\textit{Nitrobacter}]{O_2} NO_3^-$$

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Effetti dell'aggiunta di inquinanti ossidabili sulla concentrazione di O_2



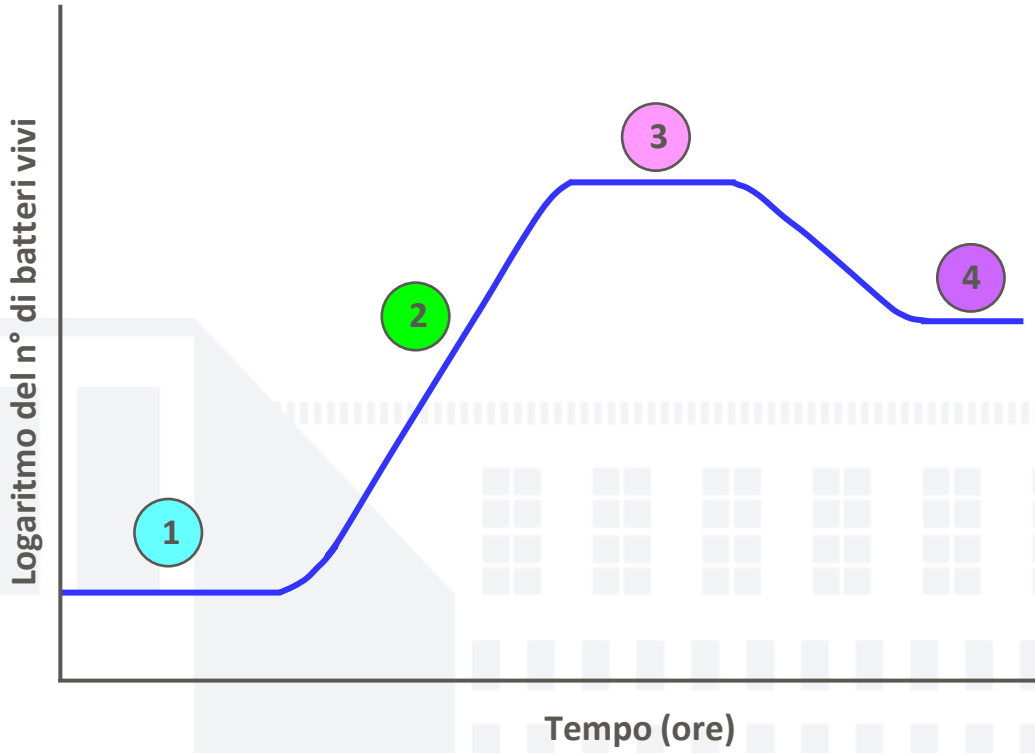
Valori tipici do O_2 disciolto:

- fiume pulito: 8 - 12 mg/l
- fiume inquinato: 4 - 8 mg/l
- depuratore 1 - 2 mg/l

Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Effetti dell'aggiunta di inquinanti ossidabili sulla carica batterica



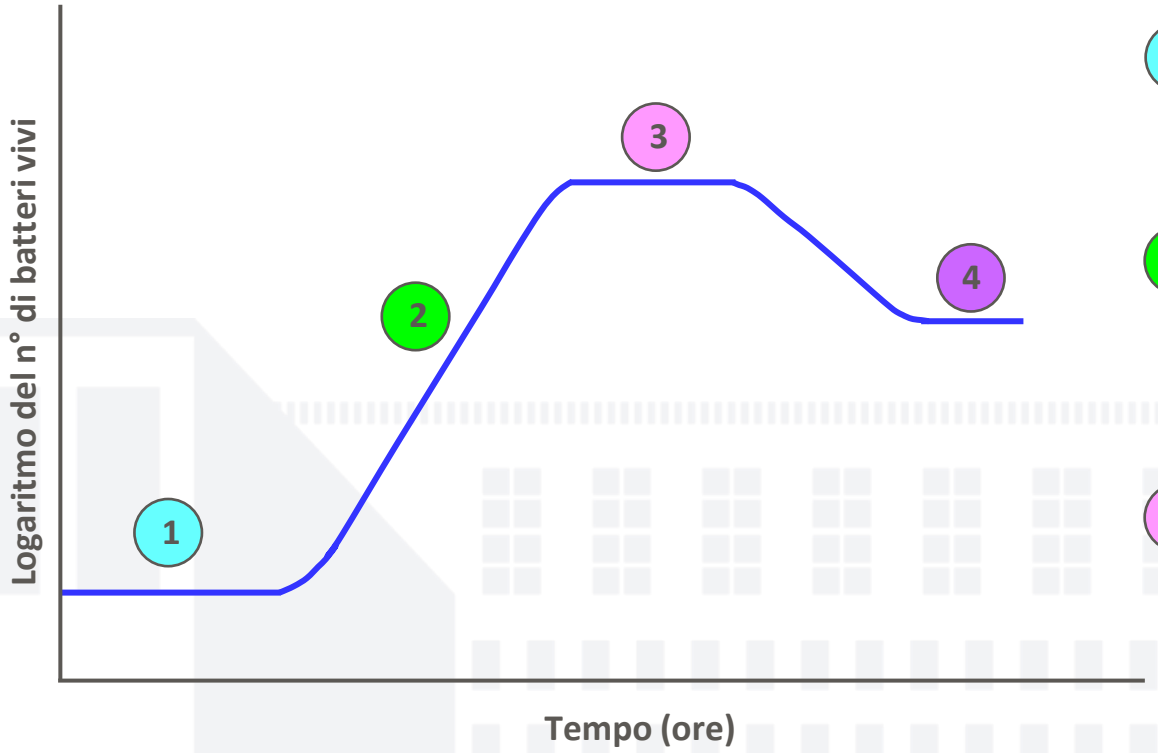
1 - **FASE DI LATENZA (lag):** fase di adattamento dei microrganismi al mezzo di coltura, la velocità di crescita è zero;

2 - **FASE ESPONENZIALE (log):** fase in cui i batteri si accrescono alla velocità massima. Il numero di batteri raddoppia ad intervalli regolari di tempo

Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Effetti dell'aggiunta di inquinanti ossidabili sulla carica batterica



1 - **FASE DI LATENZA (lag):** fase di adattamento dei microrganismi al mezzo di coltura, la velocità di crescita è zero;

2 - **FASE ESPONENZIALE (log):** fase in cui i batteri si accrescono alla velocità massima. Il numero di batteri raddoppia ad intervalli regolari di tempo

3 - **FASE STAZIONARIA:** la mancanza di nutrienti e l'accumulo di metaboliti tossici rallentano la crescita fino ad azzerarla. Il numero di microrganismi è costante.

4 - **FASE DI MORTE:** il numero di cellule vitali decresce in modo esponenziale (il numero di microrganismi dimezza ad intervalli costanti di tempo.

Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

Disponibilità di ossigeno nelle acque

Per monitorare la disponibilità di O_2 delle acque, utile allo sviluppo della vita acquatica ed alla prevenzione della formazione di gas ridotti, vengono usati due tipi di determinazione:

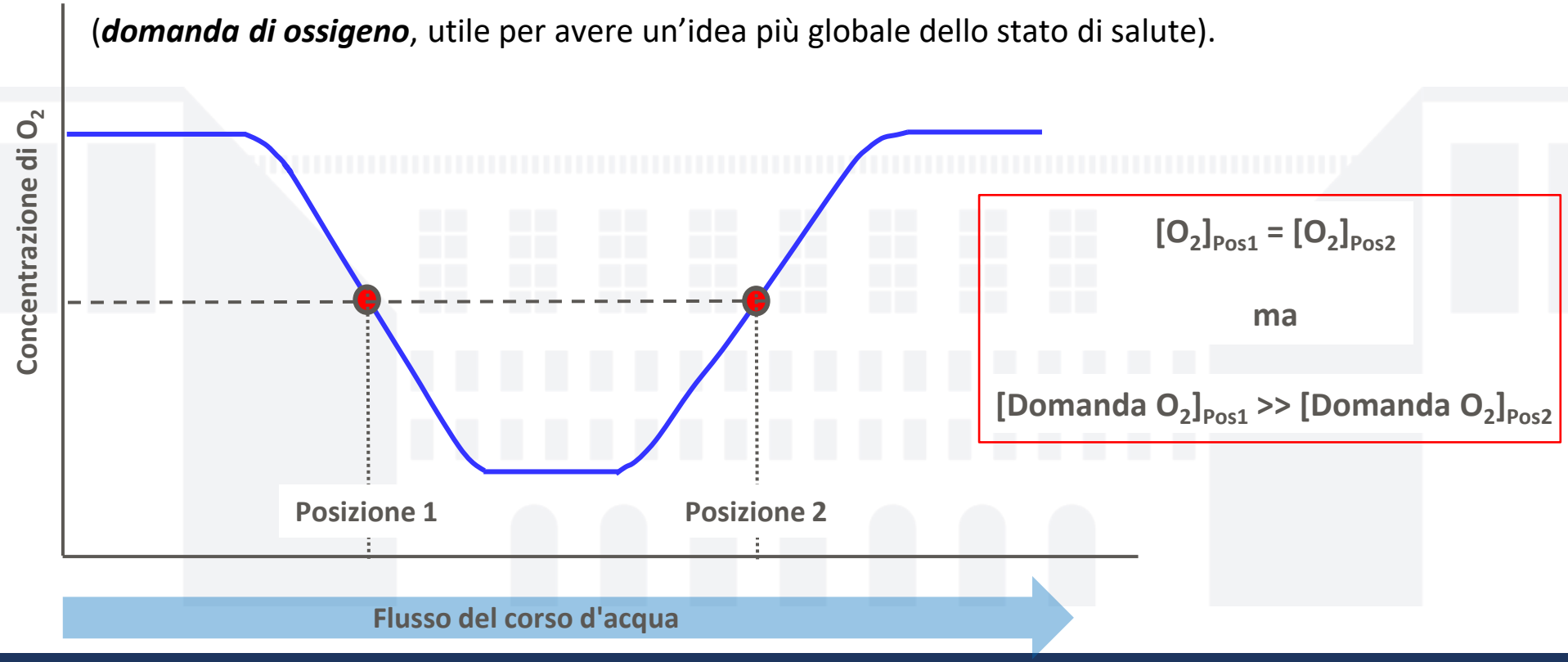
- ✓ **misurazione della concentrazione di O_2 nel campione** (utile ad indicare la salute di un corso d'acqua in un dato sito ed al momento del campionamento);
- ✓ **misurazione** della quantità di **materiale** che, nel tempo, **può consumare l'O_2** nel corpo d'acqua (***domanda di ossigeno***, utile per avere un'idea più globale dello stato di salute).

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Disponibilità di ossigeno nelle acque

Per monitorare la disponibilità di O_2 delle acque, utile allo sviluppo della vita acquatica ed alla prevenzione della formazione di gas ridotti, vengono usati due tipi di determinazione:

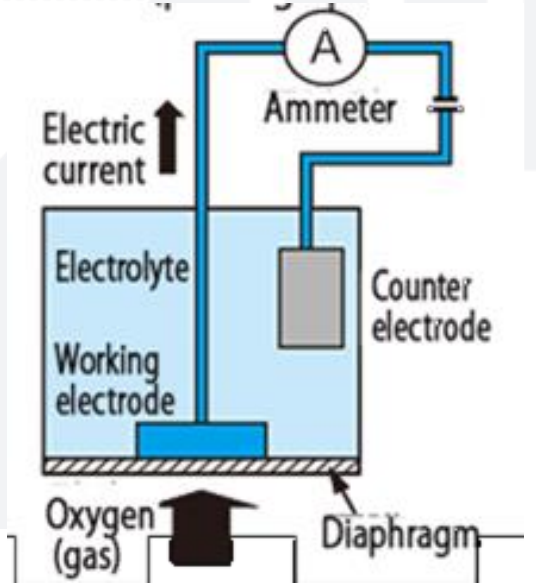
- ✓ **misurazione della concentrazione di O_2 nel campione** (utile ad indicare la salute di un corso d'acqua in un dato sito ed al momento del campionamento);
- ✓ **misurazione** della quantità di **materiale** che, nel tempo, **può consumare l'O_2** nel corpo d'acqua (***domanda di ossigeno***, utile per avere un'idea più globale dello stato di salute).



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

O_2 disciolto - Determinazione amperometrica

- L'O_2 disciolto passa attraverso una **membrana** e si riduce al catodo polarizzato di una cella elettrolitica
- La sottile membrana, dello spessore di ~ 0.1 mm, costituita da un polimero organico, protegge il sistema elettrodico da altre specie riducibili presenti in acqua e permette il passaggio solo di una frazione delle molecole di ossigeno
- Il **segnale di corrente**, controllato dalla diffusione dell'O_2 attraverso la membrana, è amplificato e l'intensità è proporzionale all'attività dell'O_2 in soluzione.
- **Dopo calibrazione** (alla stessa temperatura del campione), si immerge il dispositivo nell'acqua e si legge il valore della concentrazione di O_2 (precisione ± 0.1 mg/L).



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

O_2 disciolto - metodo Winkler

- Il metodo si basa sull' ossidazione dell'idrossido di manganese (II) a ossido di manganese (IV) idrato da parte dell'ossigeno disciolto.
- Per successiva acidificazione in presenza di ioduro, il manganese si riduce a manganese (II), liberando iodio in quantità equivalente all'ossigeno inizialmente presente nel campione.

$$2 \cdot Mn(OH)_2 + O_2 \longrightarrow 2 \cdot MnO(OH)_2$$

$$MnO(OH)_2 + 4 \cdot H^+ + 2 \cdot I^- \longrightarrow Mn^{2+} + I_2 + 3 \cdot H_2O$$

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

O_2 disciolto - metodo Winkler

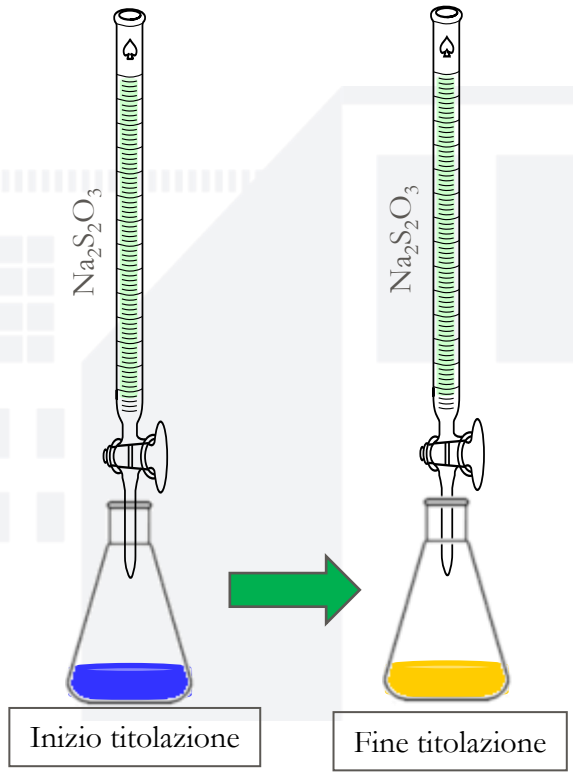
- Il metodo si basa sull' ossidazione dell'idrossido di manganese (II) a ossido di manganese (IV) idrato da parte dell'ossigeno disciolto.
- Per successiva acidificazione in presenza di ioduro, il manganese si riduce a manganese (II), liberando iodio in quantità equivalente all'ossigeno inizialmente presente nel campione.

$$2 \cdot Mn(OH)_2 + O_2 \longrightarrow 2 \cdot MnO(OH)_2$$

$$MnO(OH)_2 + 4 \cdot H^+ + 2 \cdot I^- \longrightarrow Mn^{2+} + I_2 + 3 \cdot H_2O$$

- Lo iodio liberato viene titolato con una soluzione a concentrazione nota di tiosolfato sodico in presenza di salda d' amido come indicatore.
- La fine della titolazione è indicata dalla scomparsa della colorazione azzurra dovuta alla salda d'amido in presenza di iodio

$$I_2 + 2 \cdot S_2O_3^{2-} \longrightarrow 2 \cdot I^- + S_4O_6^{2-}$$



- Il risultato viene espresso come mg/l di O_2

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

BOD (*Biochemical Oxygen Demand*)

- Il saggio del BOD esprime la quantità di O_2 necessaria per **l'ossidazione biochimica** delle sostanze contenute in un'acqua nelle condizioni in cui viene eseguito il saggio stesso
- E' una **misura indiretta** del contenuto di **sostanza biodegradabile**, (prevalentemente organica e composti azotati) misurando il consumo di O_2 (mg/l) che viene effettuato da parte di **batteri aerobici** nella loro attività di ossidazione degradativa
- I batteri sono già presenti nel campione oppure, se si tratta di scarichi industriali, sono da inoculare e acclimatare.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

BOD (*Biochemical Oxygen Demand*)

- Il saggio del BOD esprime la quantità di O_2 necessaria per **l'ossidazione biochimica** delle sostanze contenute in un'acqua nelle condizioni in cui viene eseguito il saggio stesso
- E' una **misura indiretta** del contenuto di **sostanza biodegradabile**, (prevalentemente organica e composti azotati) misurando il consumo di O_2 (mg/l) che viene effettuato da parte di **batteri aerobici** nella loro attività di ossidazione degradativa
- I batteri sono già presenti nel campione oppure, se si tratta di scarichi industriali, sono da inoculare e acclimatare.

La **richiesta di ossigeno** è dovuta generalmente a 3 classi di sostanze:

- **Classe A**: composti organici, i cui atomi di C vengono utilizzati dai microrganismi come alimento per le varie attività vitali
- **Classe B**: composti ossidabili dell'N utilizzati come fonte di energia da batteri specifici (es. *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*)
- **Classe C**: Sostanze inorganiche, es. Fe(II), solfuri e solfiti, facilmente ossidate da O_2 presente nelle acque (processi generalmente solo chimici)

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

BOD (*Biochemical Oxygen Demand*)

Si basa sulla determinazione di **O_2 disciolto** nel campione da analizzare prima e dopo incubazione di **5 giorni**, al buio ed alla T=20°C, con pH compreso tra 6.5 e 8.5.
La differenza tra le due determinazioni dà il valore del **BOD_5**, in mg/L di O_2.

$$\{CH_2O\} + O_2 \xrightarrow{\text{microrganismi}} CO_2 + H_2O + \text{altri prodotti}$$

Interferenze positive
Sono date da tutte quelle sostanze che vengono ossidate chimicamente dall'O_2 disciolto, ad es. nitriti, Fe(II), solfuri e solfiti.

Interferenze negative
Possono essere provocate dalla presenza di cloro libero o metalli tossici a causa della loro azione inibitrice dell'attività dei microrganismi.

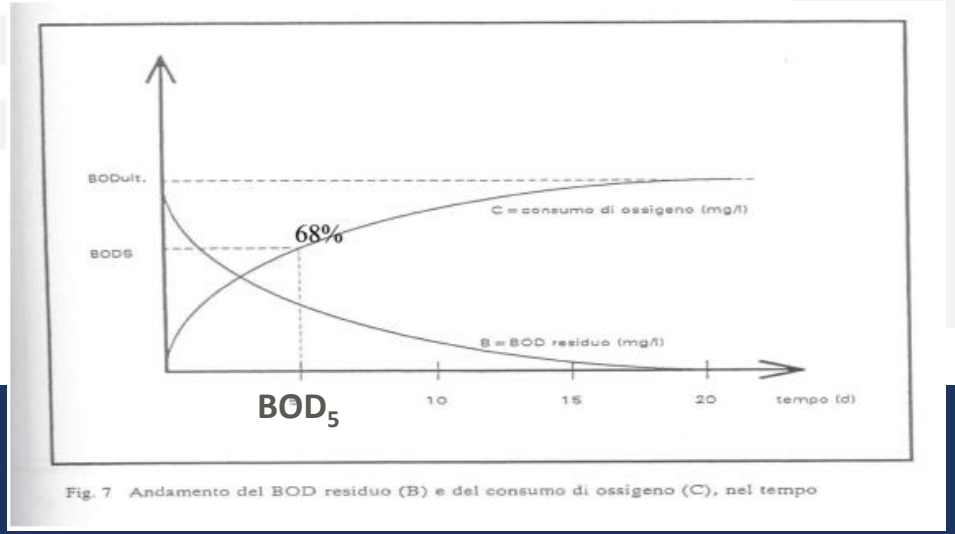


Fig. 7 Andamento del BOD residuo (B) e del consumo di ossigeno (C), nel tempo

BOD (*Biochemical Oxygen Demand*)

Per un'acqua non inquinata è dell'ordine di pochi mg/l.

Grado di inquinamento	*BOD_5 (mg/L O_2)*
Molto pulito	< 1.0
Pulito	1.1 – 1.9
Moderatamente inquinato	2.0 – 2.9
Inquinato	3.0 – 3.9
Molto inquinato	4.0 – 10.0
Estremamente inquinato	> 10.0

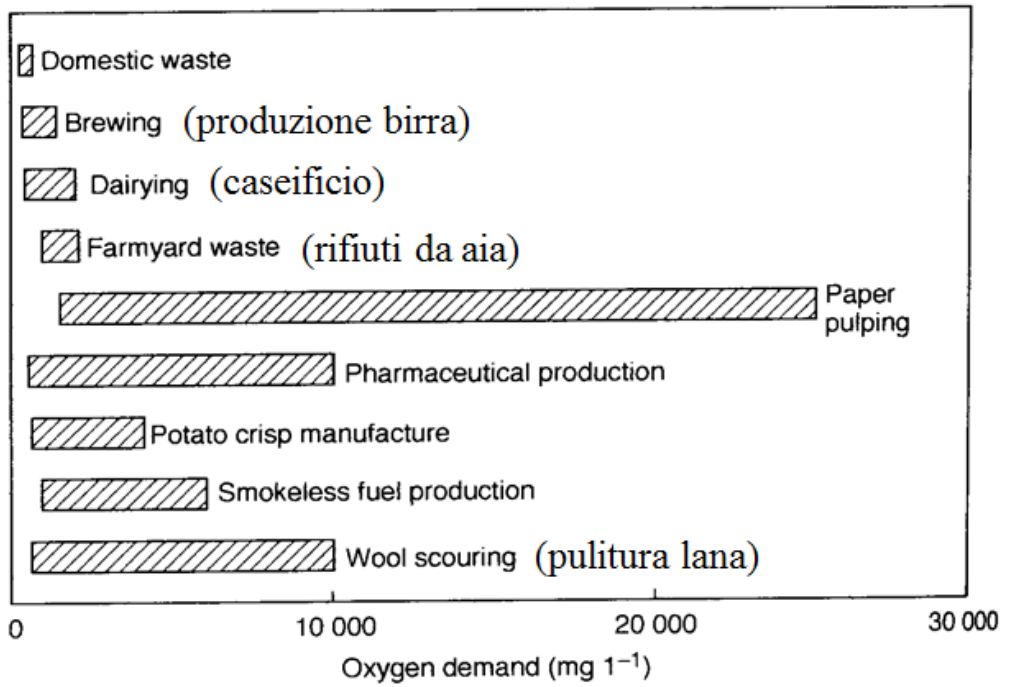
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

BOD (*Biochemical Oxygen Demand*)

Per un'acqua non inquinata è dell'ordine di pochi mg/l.

Grado di inquinamento	*BOD_5 (mg/L O_2)*
Molto pulito	< 1.0
Pulito	1.1 – 1.9
Moderatamente inquinato	2.0 – 2.9
Inquinato	3.0 – 3.9
Molto inquinato	4.0 – 10.0
Estremamente inquinato	> 10.0

Molti effluenti apparentemente innocui possiedono un valore elevato di BOD.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

COD (*Chemical Oxygen Demand*)

- Il saggio del COD esprime la quantità di ossidante chimico necessaria per **l'ossidazione chimica** delle sostanze contenute in un'acqua nelle condizioni in cui viene eseguito il saggio stesso
- E' una **misura indiretta** del contenuto di **sostanza organica** (anche non biodegradabile) e **inorganica** misurando il consumo di **ossidante chimico** ($K_2Cr_2O_7$) necessario per l'ossidazione.

$$\{CH_2O\} + K_2Cr_2O_7 \xrightarrow[H_2SO_4]{Ag_2SO_4} CO_2 + H_2O + Cr^{3+} + \text{altri prodotti}$$

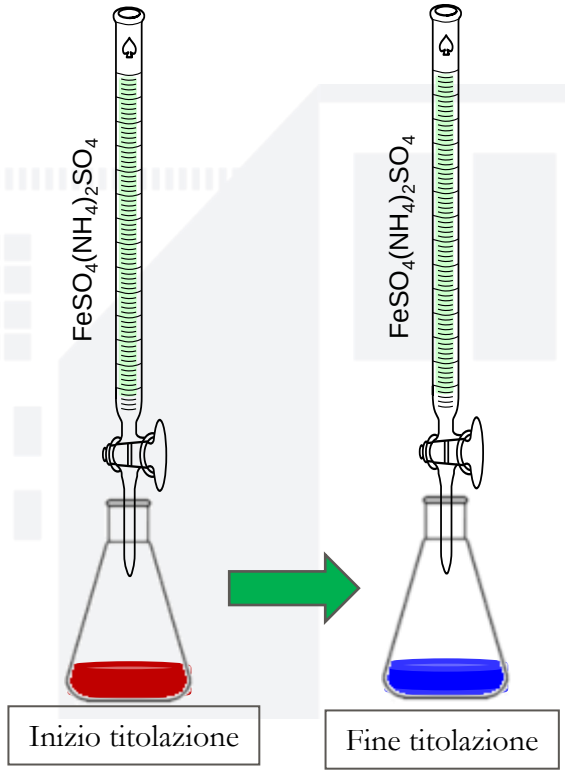
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

COD (*Chemical Oxygen Demand*)

- Il saggio del COD esprime la quantità di ossidante chimico necessaria per **l'ossidazione chimica** delle sostanze contenute in un'acqua nelle condizioni in cui viene eseguito il saggio stesso
- E' una **misura indiretta** del contenuto di **sostanza organica** (anche non biodegradabile) e **inorganica** misurando il consumo di **ossidante chimico** ($K_2Cr_2O_7$) necessario per l'ossidazione.

$$\{CH_2O\} + K_2Cr_2O_7 \xrightarrow[H_2SO_4]{Ag_2SO_4} CO_2 + H_2O + Cr^{3+} + \text{altri prodotti}$$

- Al campione viene aggiunta una quantità nota di $K_2Cr_2O_7$;
- A reazione avvenuta **si titola il $K_2Cr_2O_7$ in eccesso** con una soluzione di $FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$ (solfato ferroso ammonico - sale di Mohr) e indicatore ferroina;
- La differenza tra la quantità iniziale e finale di denota la quantità di **O_2 "consumabile" con rapporto 1:1.5 per $K_2Cr_2O_7/O_2$**.



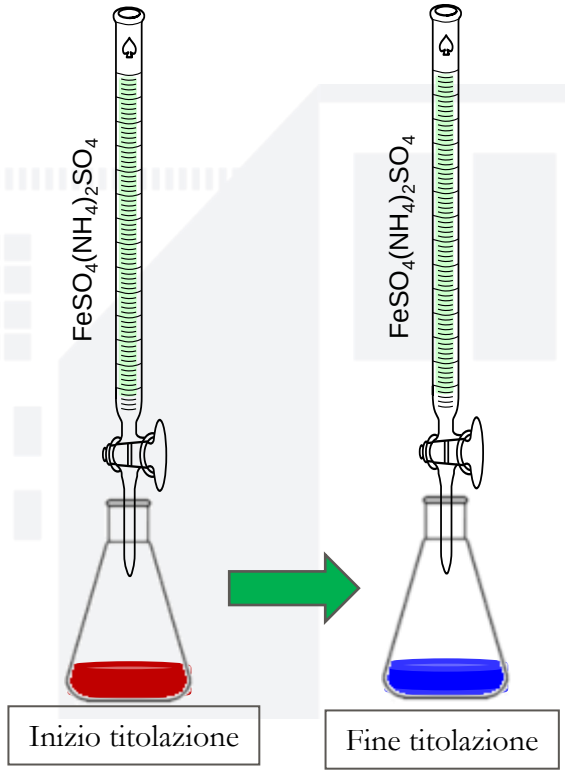
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

COD (*Chemical Oxygen Demand*)

- Il saggio del COD esprime la quantità di ossidante chimico necessaria per **l'ossidazione chimica** delle sostanze contenute in un'acqua nelle condizioni in cui viene eseguito il saggio stesso
- E' una **misura indiretta** del contenuto di **sostanza organica** (anche non biodegradabile) e **inorganica** misurando il consumo di **ossidante chimico** ($K_2Cr_2O_7$) necessario per l'ossidazione.

$$\{CH_2O\} + K_2Cr_2O_7 \xrightarrow[H_2SO_4]{Ag_2SO_4} CO_2 + H_2O + Cr^{3+} + \text{altri prodotti}$$

- Al campione viene aggiunta una quantità nota di $K_2Cr_2O_7$;
- A reazione avvenuta **si titola il $K_2Cr_2O_7$ in eccesso** con una soluzione di $FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$ (solfato ferroso ammonico - sale di Mohr) e indicatore ferroina;
- La differenza tra la quantità iniziale e finale di denota la quantità di **O_2 "consumabile" con rapporto 1:1.5 per $K_2Cr_2O_7/O_2$**.



Metodo alternativo per la determinazione del $K_2Cr_2O_7$ in eccesso (analisi spettrofotometrica): "*Procedura di misurazione per la determinazione della Richiesta Chimica di Ossigeno (COD) mediante test in cuvetta: Metodo 5135*" (ISPRA)

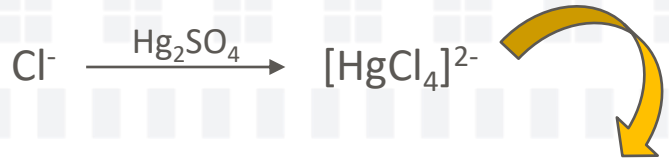
https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/manuali-e-linee-guida/procedura-di-misurazione-per-la-determinazione-della-richiesta-chimica-di-ossigeno-cod-mediante-test-in-cuvetta-metodo-5135

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

COD (*Chemical Oxygen Demand*) (2)

Interferenze

- **Non** tutte le sostanze organiche **vengono ossidate** in maniera completa dal bicromato di potassio.
- L'impiego di Ag_2SO_4 come catalizzatore aumenta la resa di reazione, ma alcuni composti (benzene e congeneri, IPA, ecc.) vengono ossidati parzialmente ed altri (piridina, ecc.) non subiscono ossidazione.
- I **cloruri** vengono ossidati dal cromato e possono dare interferenza positiva se presenti in elevate quantità (**si elimina con aggiunta di $HgSO_4$**).



Reazione di complessazione che sottrae i cloruri dalla possibile reattività con il dicromato:

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Confronto tra i test BOD e COD

BOD

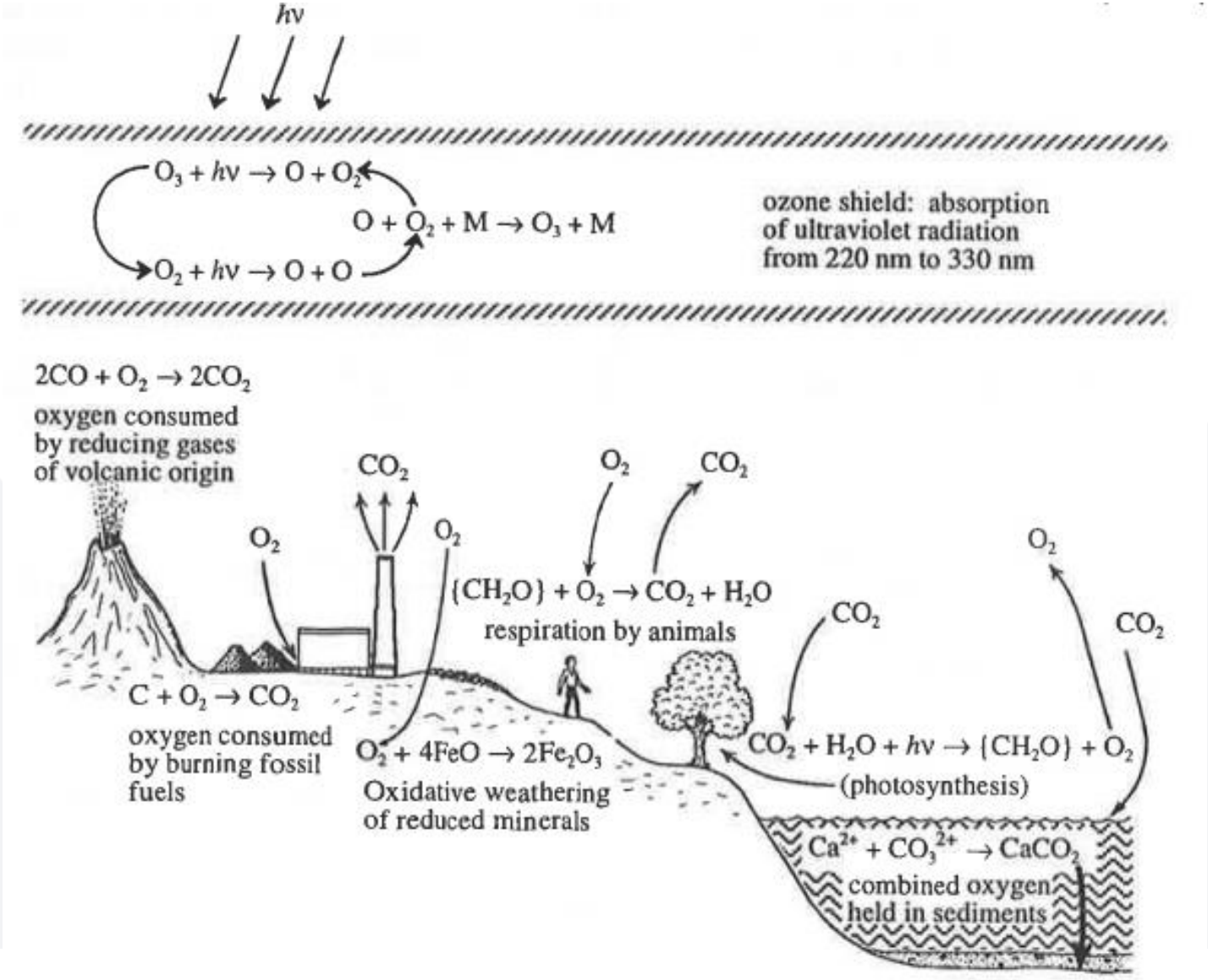
- → Strettamente legato ai processi naturali
- → 5 giorni di tempo di analisi
- → Difficoltà di riproducibilità, sia intra che interlaboratorio

COD

- → Più scarsa relazione con i processi naturali
- → Rapidità di analisi
- → Buona riproducibilità
- → Può analizzare acque pesantemente inquinate

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Ciclo biogeochimico dell'ossigeno



Fonti: Manahan S.E., "Environmental Chemistry" 2000, 7th edition, Taylor & Francis

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE