



Università degli Studi di Trieste
A.A. 2021-2022

Corso di Studio in
Corso di Studio in Scienze e
Tecnologie Biologiche

III anno – I Semestre

ECOLOGIA
Prof. Monia Renzi (BIO/07)
mrenzi@units.it

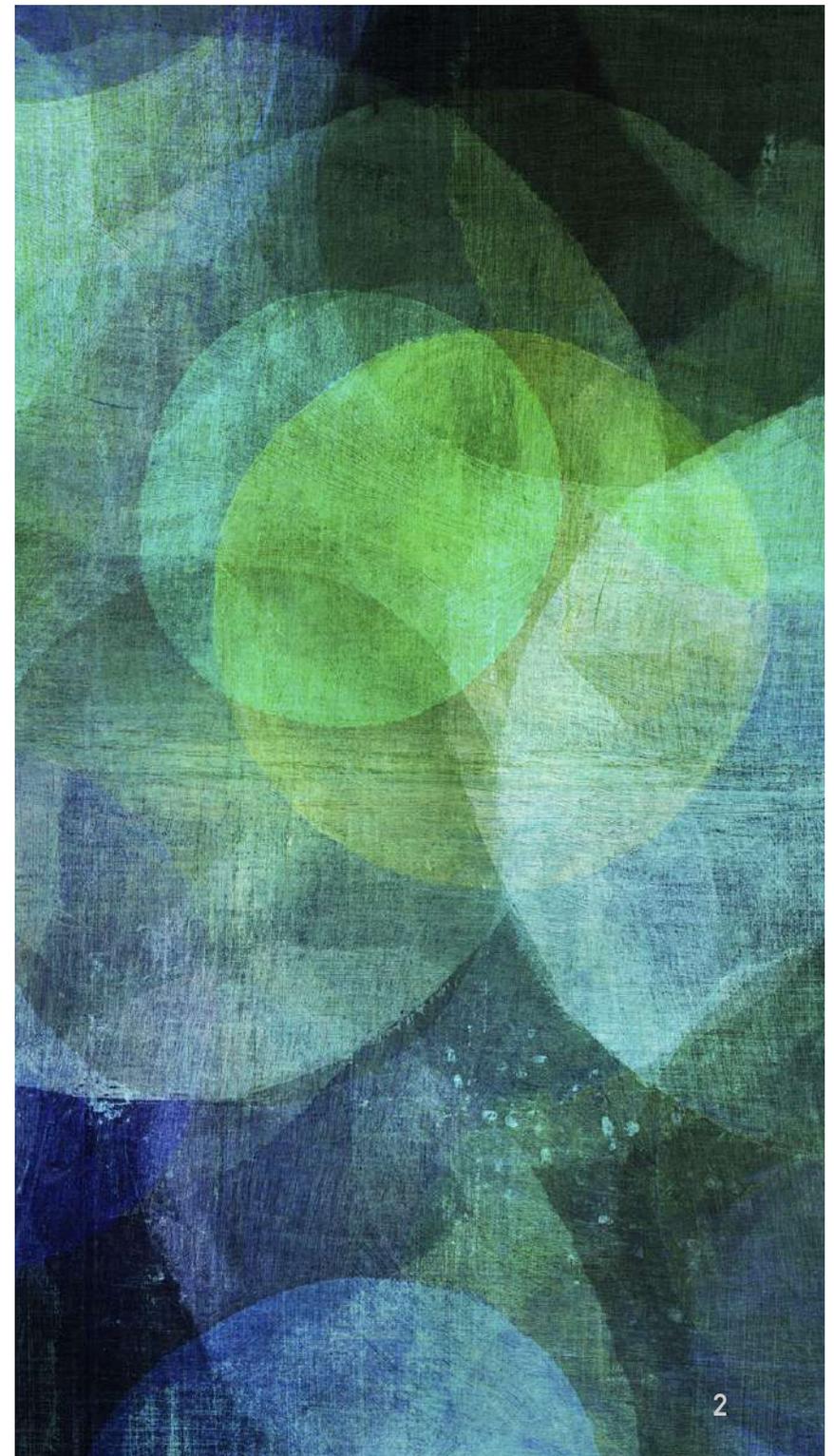


(*) Il materiale didattico fornito dal docente può contenere parti o immagini soggette a copyright, la diffusione e/o riproduzione non è autorizzata.

Flussi di materia

Cicli biogeochimici

- ❖ Concetti base
- ❖ Flussi di materia
- ❖ Cicli e bilanci biogeochimici
 - ❖ Acqua
 - ❖ Azoto
 - ❖ Fosforo
 - ❖ Zolfo
 - ❖ Ferro
 - ❖ Carbonio
- ❖ Alterazione dei cicli per azione umana
- ❖ Ciclo dei contaminanti



Siamo fatti da polvere di stelle

Oggi ci rendiamo conto che la materia di cui siamo fatti, il calcio nelle ossa, il ferro nel sangue e tutti gli altri elementi, sono derivati direttamente da supernove

“ L'astronomia ci ha insegnato che non siamo il centro dell'universo, come si è pensato a lungo e come qualcuno ci vuol far pensare anche oggi. Siamo solo un minuscolo pianeta attorno a una stella molto comune. Noi stessi, esseri intelligenti, siamo il risultato dell'evoluzione stellare, siamo fatti della materia degli astri. ”



Margherita Hack



Margherita Hack

12/06/1922 Firenze

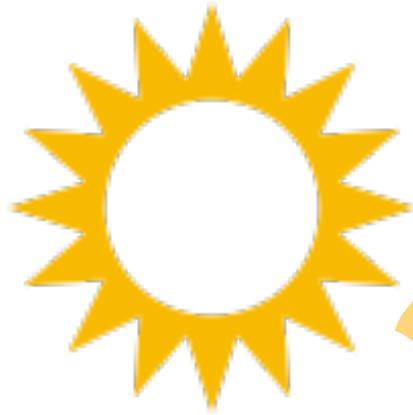
28/06/2013 Trieste

Via Lattea

Per gentile concessione di
Angela Tozzi, diritti riservati

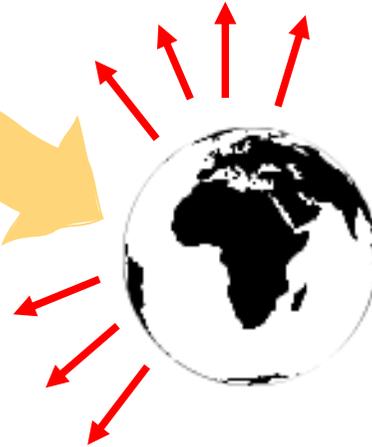


Flussi di materia

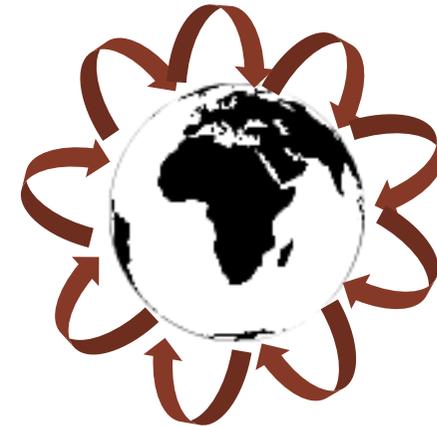


La Terra è un sistema termodinamicamente aperto rispetto all'energia

Calore



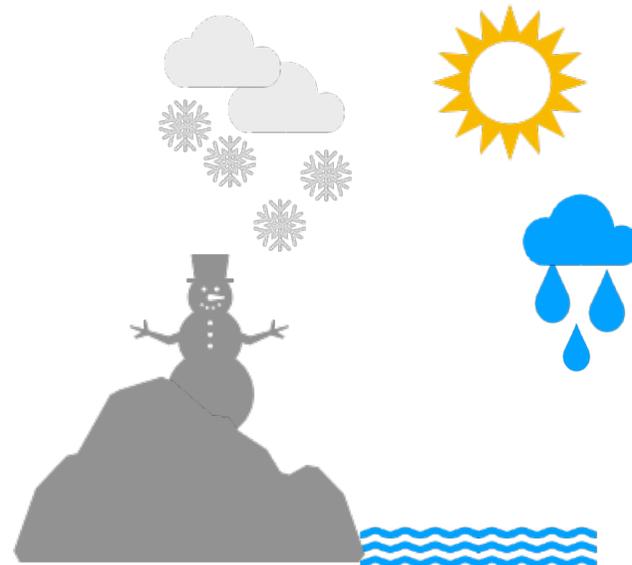
La Terra è un sistema chiuso per quanto riguarda la materia



La quantità degli elementi chimici presenti sul nostro pianeta non varia nel tempo

Equilibrio dinamico

Gli elementi non sono in una situazione statica; essi cambiano continuamente posizione, fase chimica e combinazione.



Apporto meteoritico



reazioni nucleari

Rare eccezioni di apporto materia

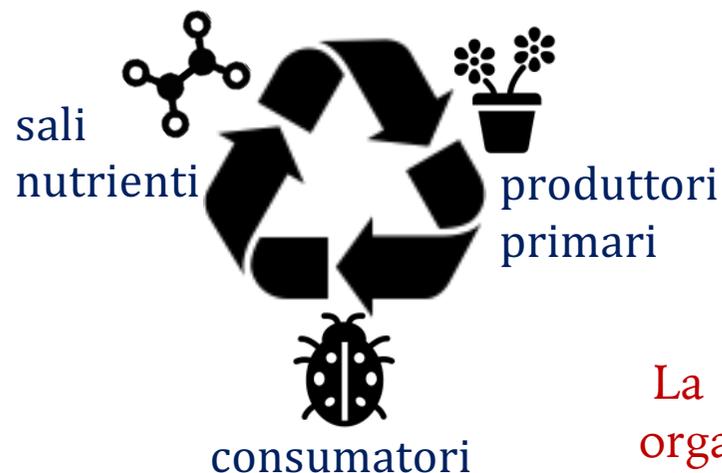
Cicli biogeochimici

Gli organismi hanno bisogno di 8 elementi in concentrazioni significative:



Carbonio
Idrogeno
Ossigeno
Azoto
Potassio
Calcio
Fosforo
Zolfo

Cicizzazione(*) degli elementi



(*) = movimento degli elementi essenziali per la vita

Molti di questi elementi si trovano nelle rocce e vengono rilasciati dall'erosione in fiumi, laghi e oceani, mentre alcuni si ritrovano, anche nell'atmosfera.



Al contrario dell'energia, che viene continuamente prelevata e perduta dall'ecosistema in un flusso unidirezionale, i nutrienti vengono riutilizzati continuamente.

La circolazione degli elementi chimici dall'ambiente agli organismi e di nuovo all'ambiente può essere analizzata a livello di biosfera, cicli biogeochimici, ed a livello di ecosistema, percorsi di ricicizzazione.

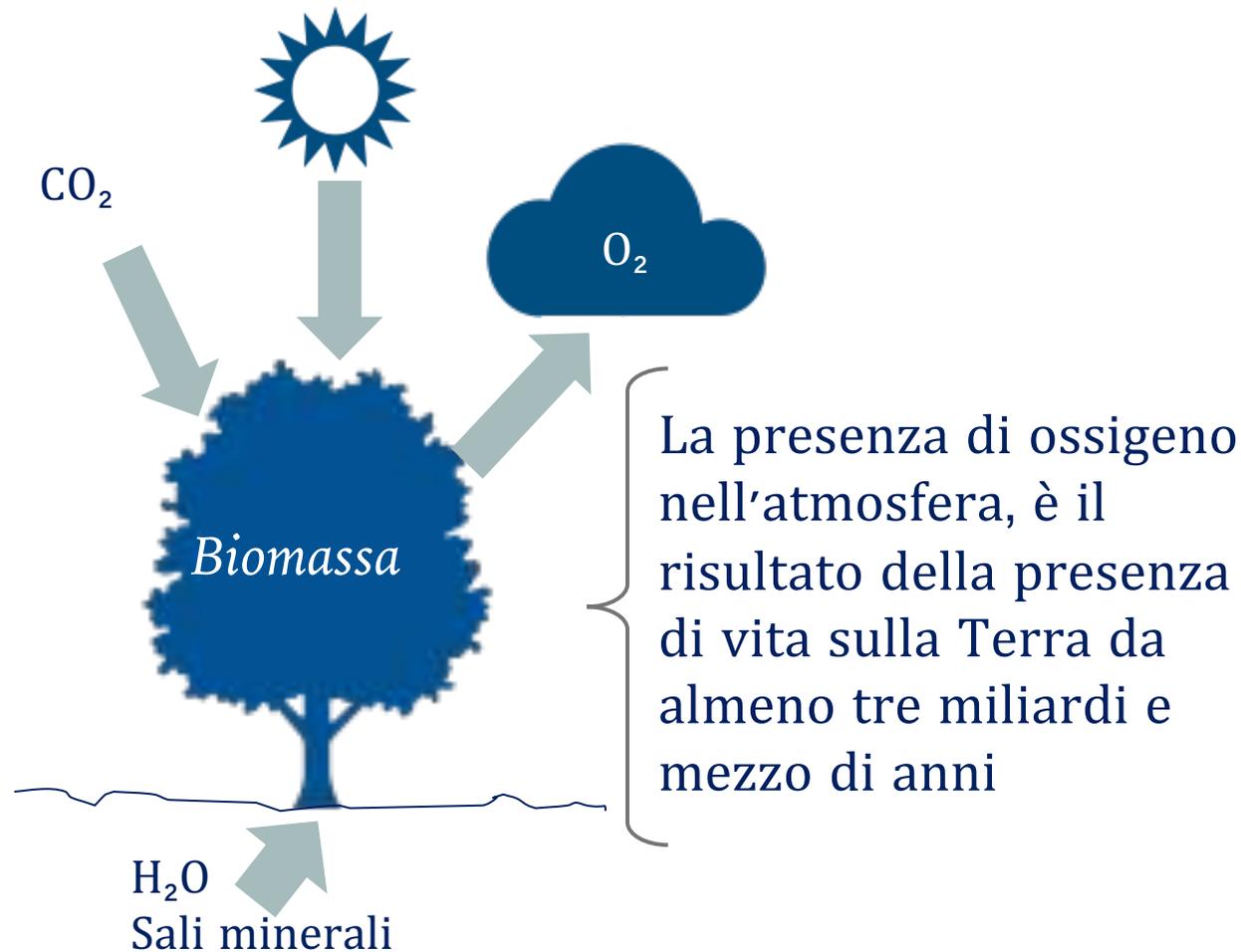
Cicli biogeochimici(*)

Lo studio della geochimica della superficie terrestre è in realtà uno studio della **biogeochimica**

(Schlesinger, 1991)

Il movimento dei nutrienti attraverso la biosfera è regolato da processi chimici e biologici, che costituiscono i **cicli biogeochimici**

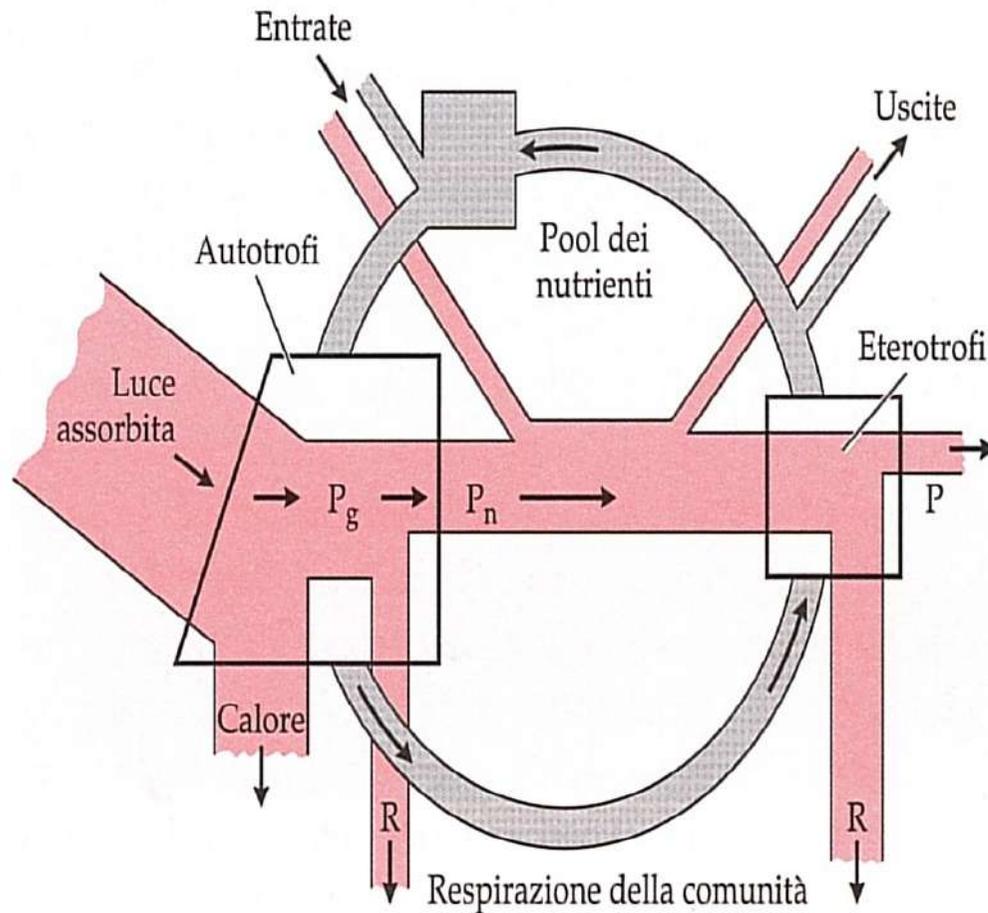
Gli elementi passano dalle loro sorgenti abiotiche (rocce, acqua e aria) agli organismi negli ecosistemi.



(*) La **biogeochimica** è la scienza che studia lo scambio degli elementi chimici tra le componenti viventi e non viventi della biosfera

(Vernadskii, 1926)

Un ciclo biogeochimico (circolo grigio) sovrapposto ad un diagramma semplificato di flusso energetico, pone in contrapposizione la ciclizzazione dei materiali con il flusso unidirezionale di energia.



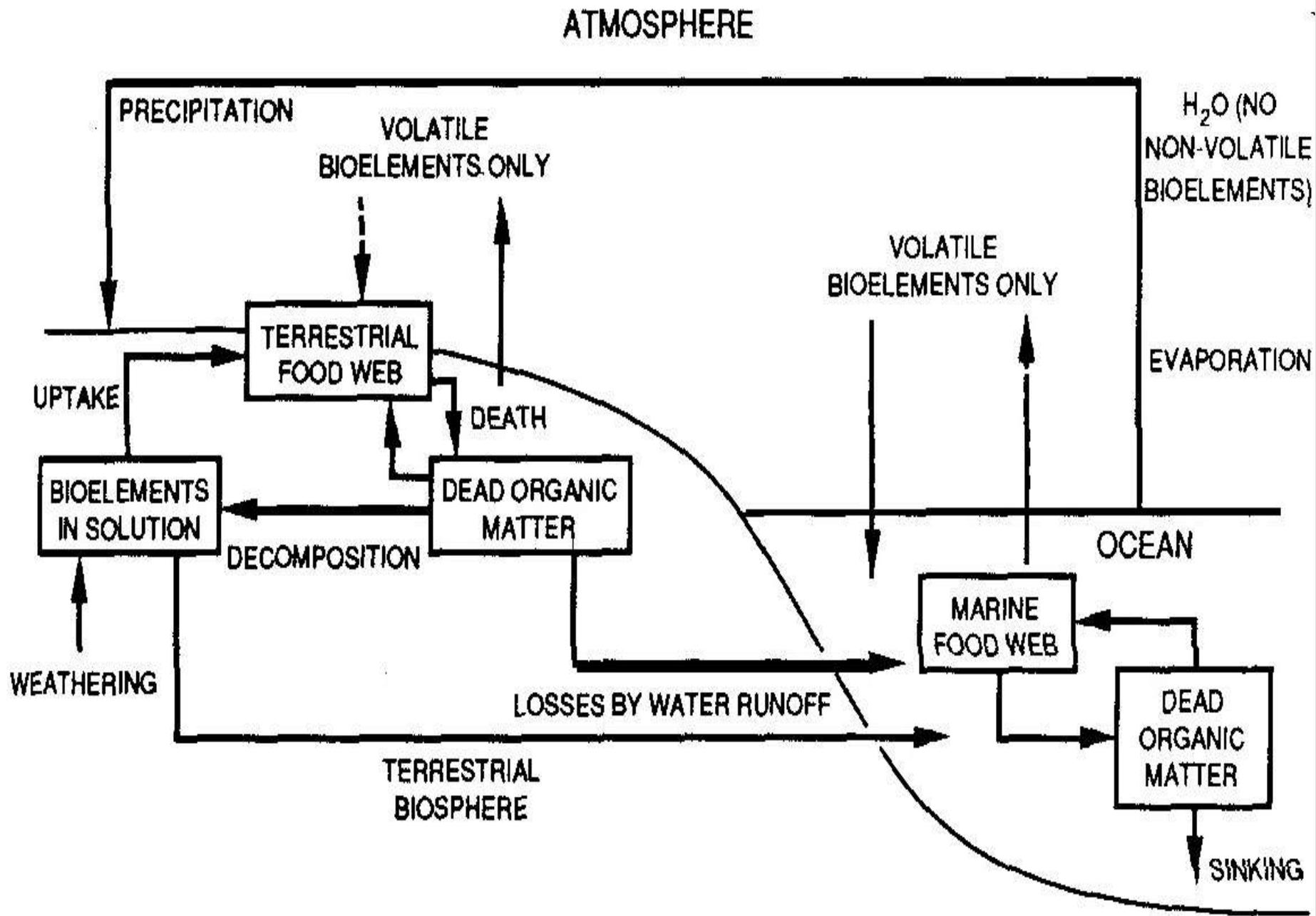
P_g = produzione lorda

P_n = produzione netta, che può essere utilizzata all'interno del sistema dagli eterotrofi o può essere esportata dal sistema

P = produzione secondaria

R = respirazione

Esempio di ciclo biogeochimico



Comparti ambientali

*Comparto di accumulo
o pool di riserva*

Costituisce il componente più
ampio, meno attivo e
generalmente non-biologico

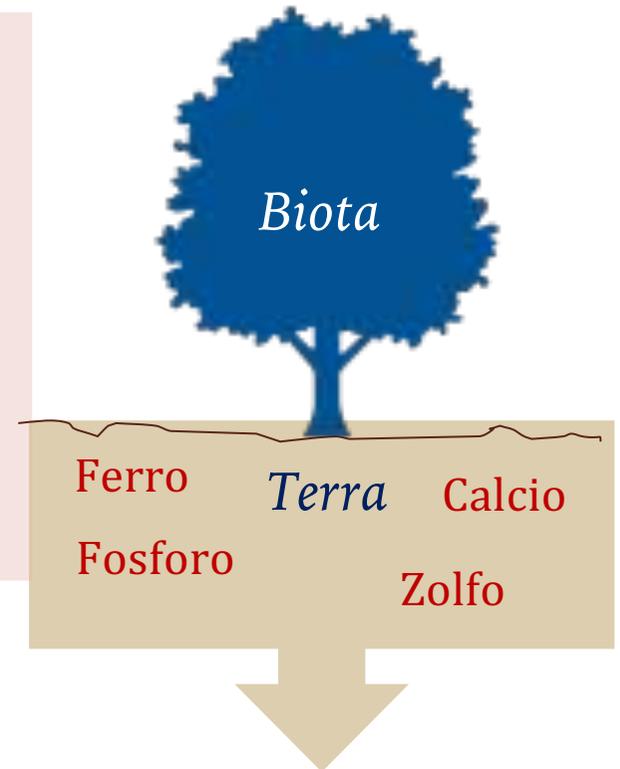
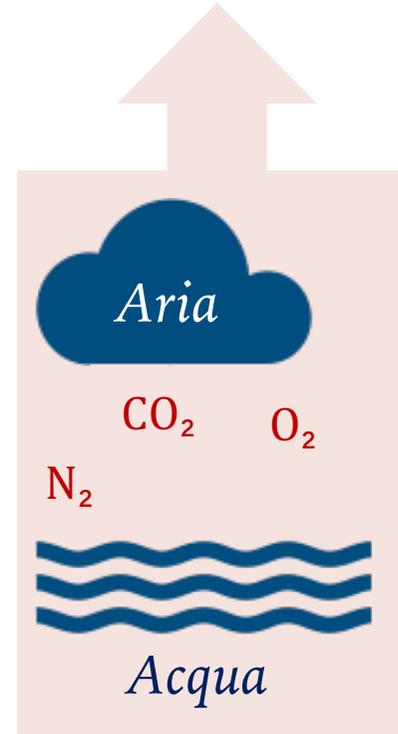


*Pool di
scambio o
pool labile*

Porzione più piccola, più attiva
ed in rapido movimento tra gli
organismi e l'ambiente

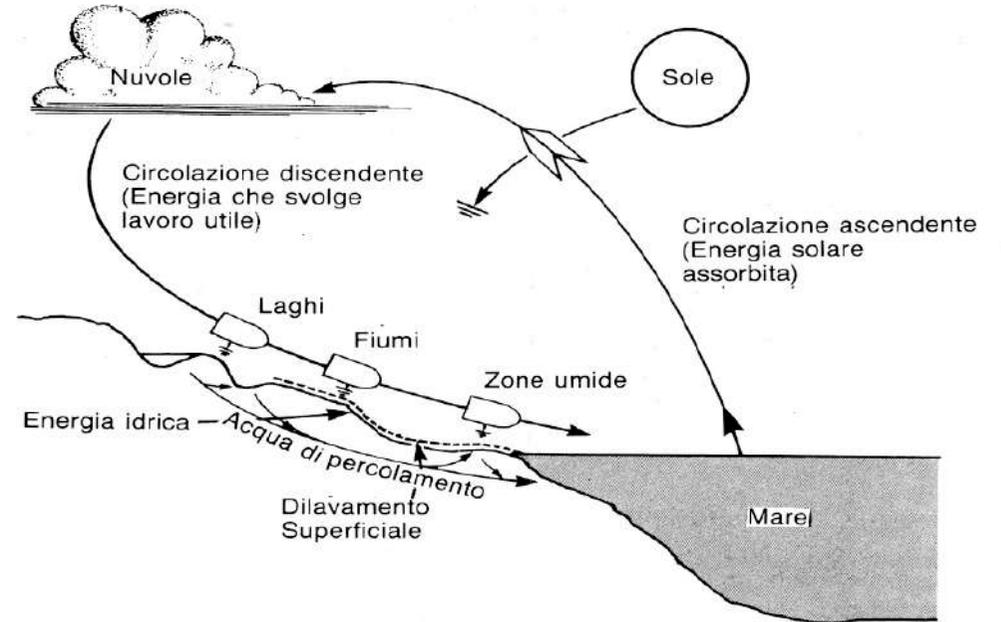
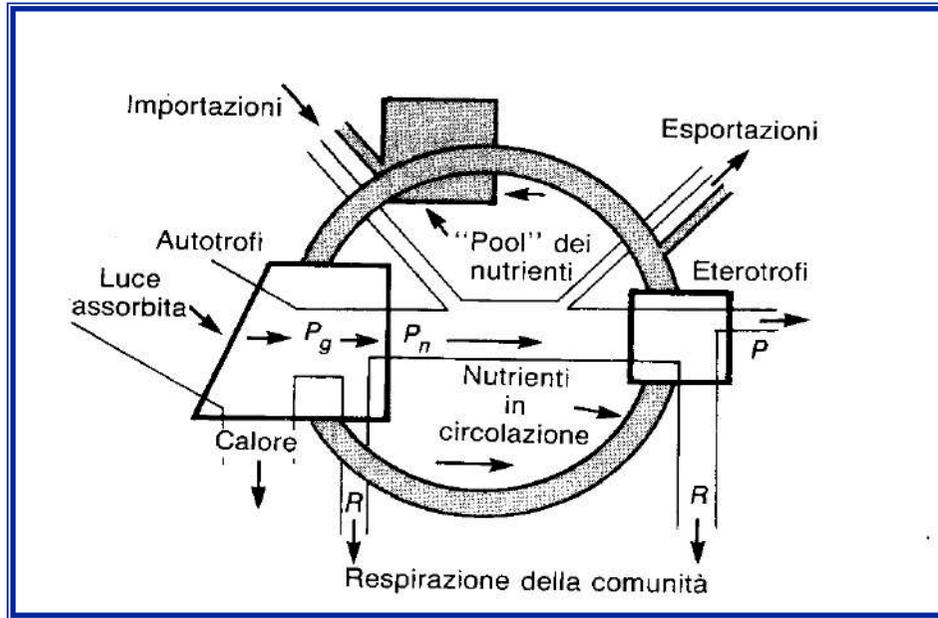
Tipologie cicli biogeochimici

Tipo gassoso
Il pool di riserva è
nell'atmosfera o
nell'idrosfera

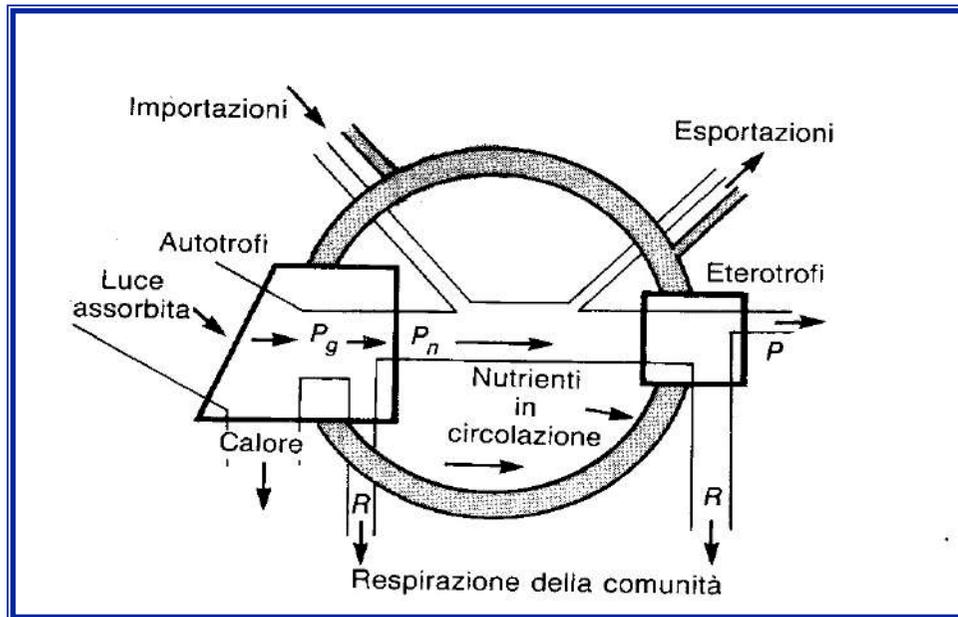


Tipo sedimentario
Il pool di riserva è nella
crosta terrestre

Cicli gassosi o perfetti



Cicli sedimentari o imperfetti



N.B. La grande maggioranza degli elementi hanno ciclo sedimentario

Tempi di ciclizzazione dei nutrienti



I detriti degli organismi marini, ad esempio, possono precipitare verso il fondo e restare incorporati nelle rocce sedimentarie che possono ritrovarsi in corrispondenza della superficie terrestre dopo milioni di anni.



(*) = tempo che un atomo o molecola spende nel comparto considerato

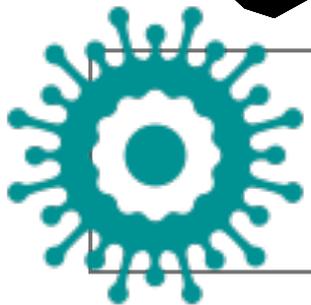
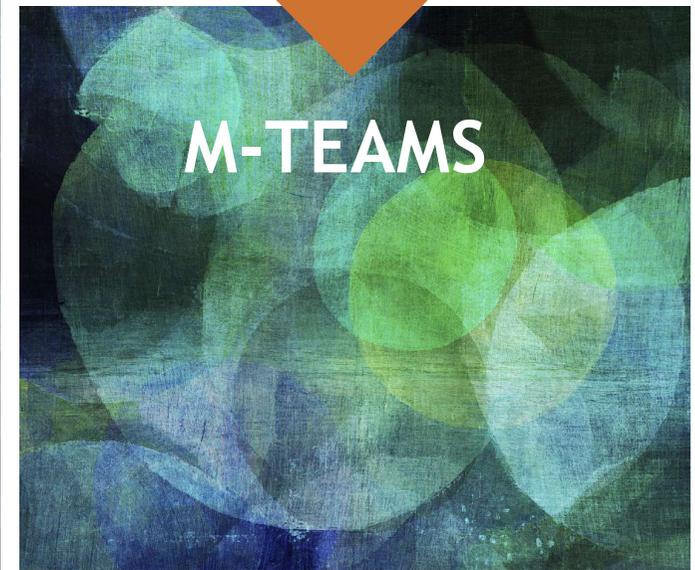
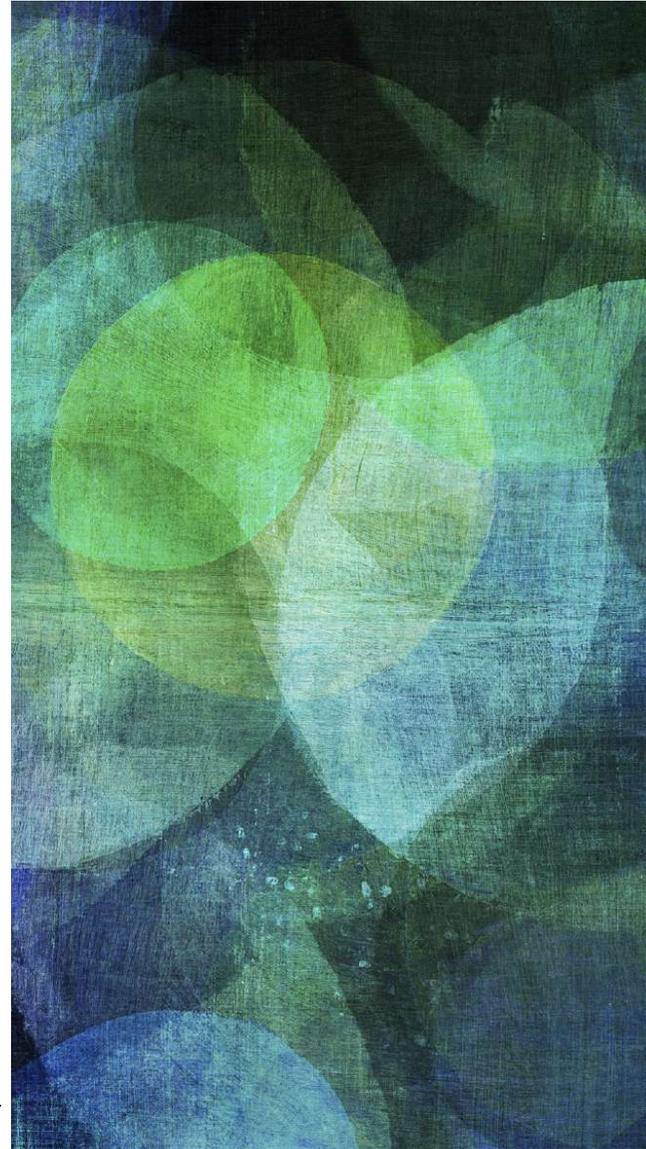
$$\text{Tempo di residenza (*)} = \frac{\text{Dimensione (costante nel tempo) del comparto}}{\text{Somma dei flussi entranti (o uscenti)}}$$

Se in un ciclo biogeochimico un comparto presenta tempi di residenza molto più lunghi di quelli degli altri comparti diciamo che tale comparto è inattivo

Cicli di nutrienti

- L'energetica si basa fundamentalmente sul metabolismo di composti di 3 elementi C,H,O
- La biomassa è tuttavia costituita da composti contenenti altri 30-40 elementi essenziali

<i>Element</i>	<i>Function</i>
C	Structure; energy storage in lipids and carbohydrates
H	Structure; energy storage in lipids and carbohydrates
N	Structure of proteins and nucleic acids
O	Structure; aerobic respiration for energy release
P	Structure of nucleic acids and skeletons; energy transfer within cells
S	Structure of proteins

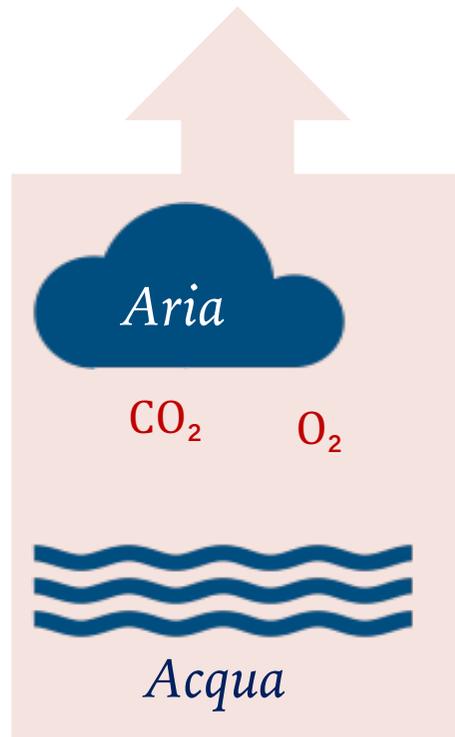


DOMANDE??

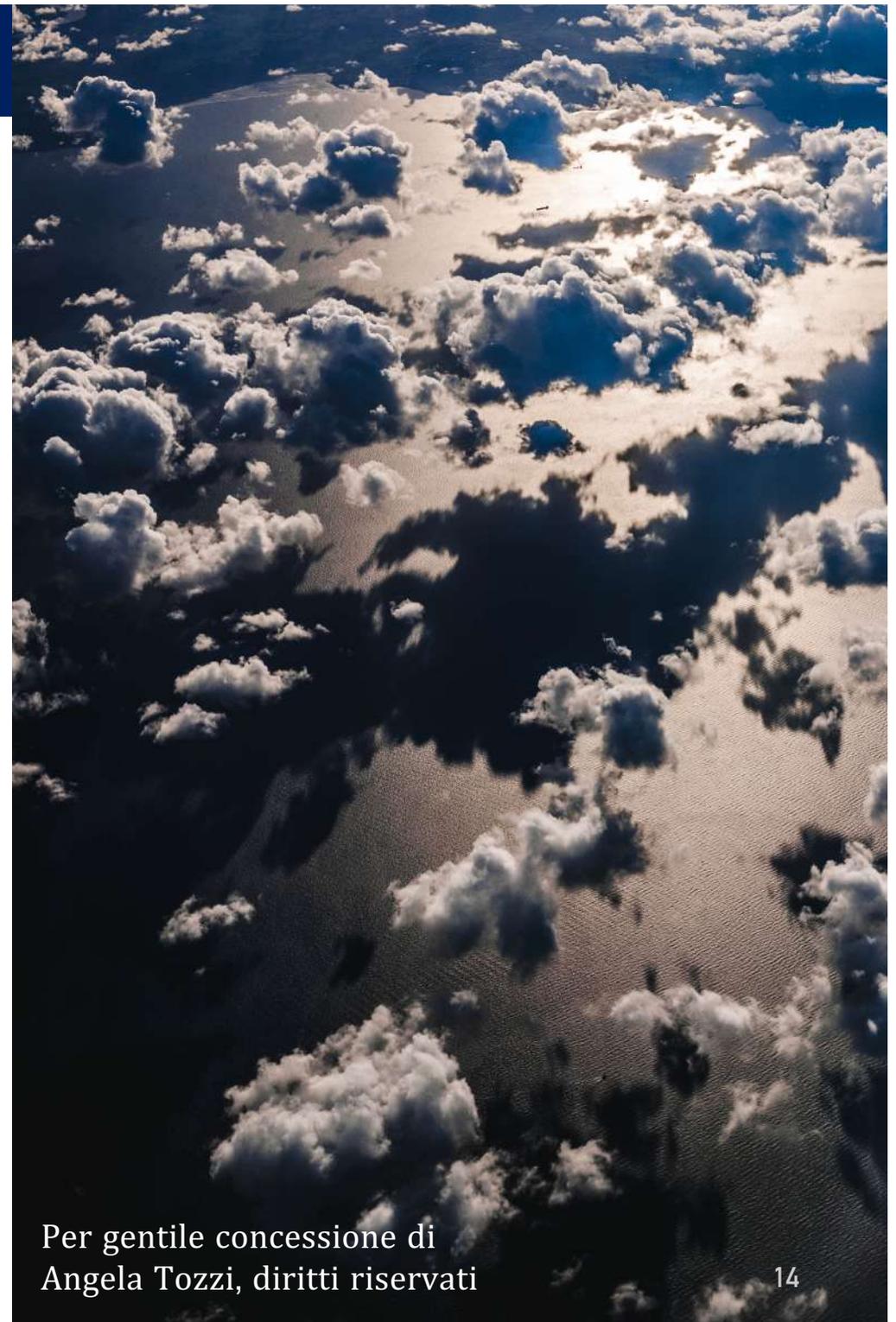
Cicli di tipo gassoso

Tipo gassoso

Il pool di riserva è
nell'atmosfera o nell'idrosfera



- ✓ *Ciclo dell'acqua*
- ✓ *Ciclo dell'azoto*

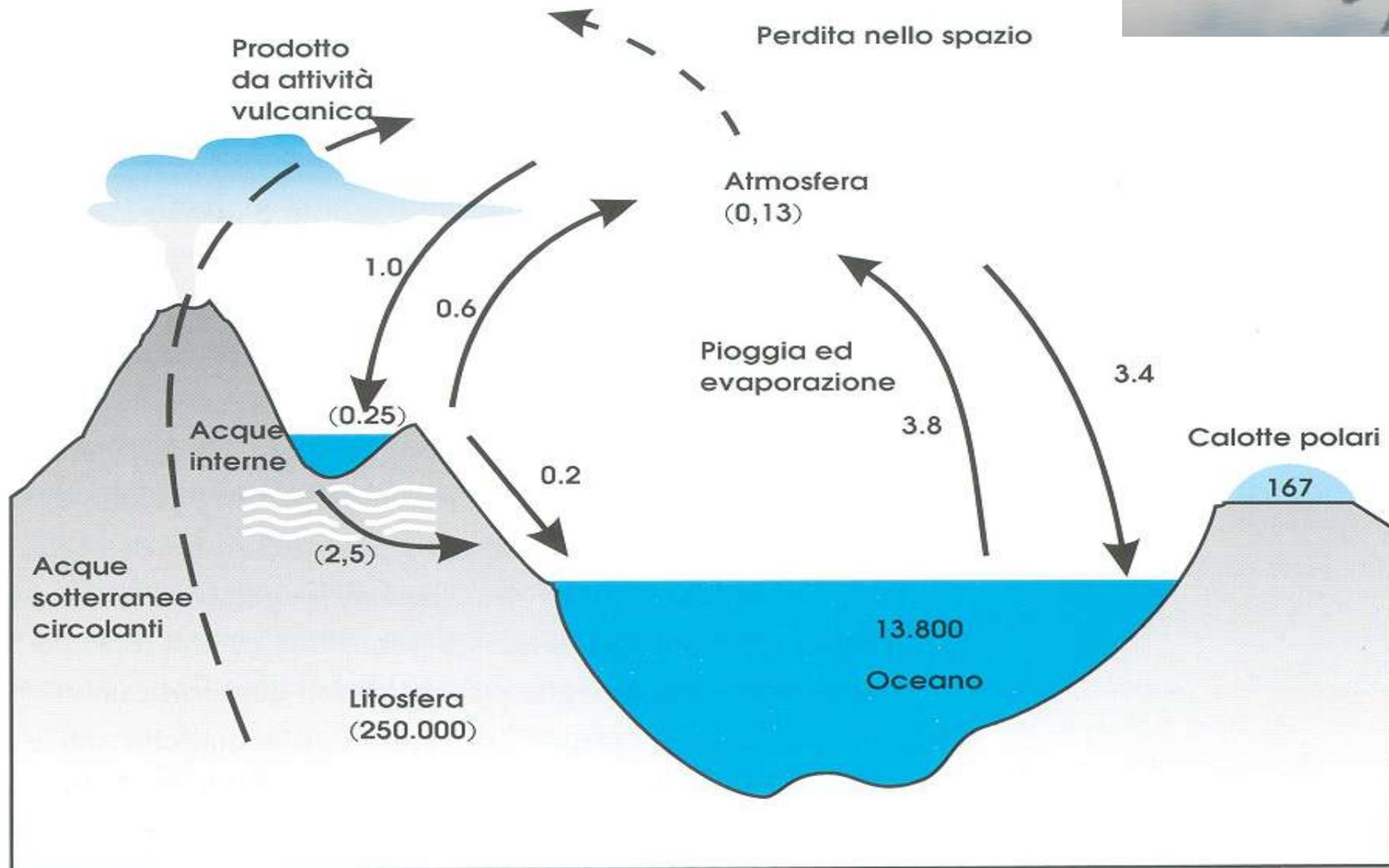


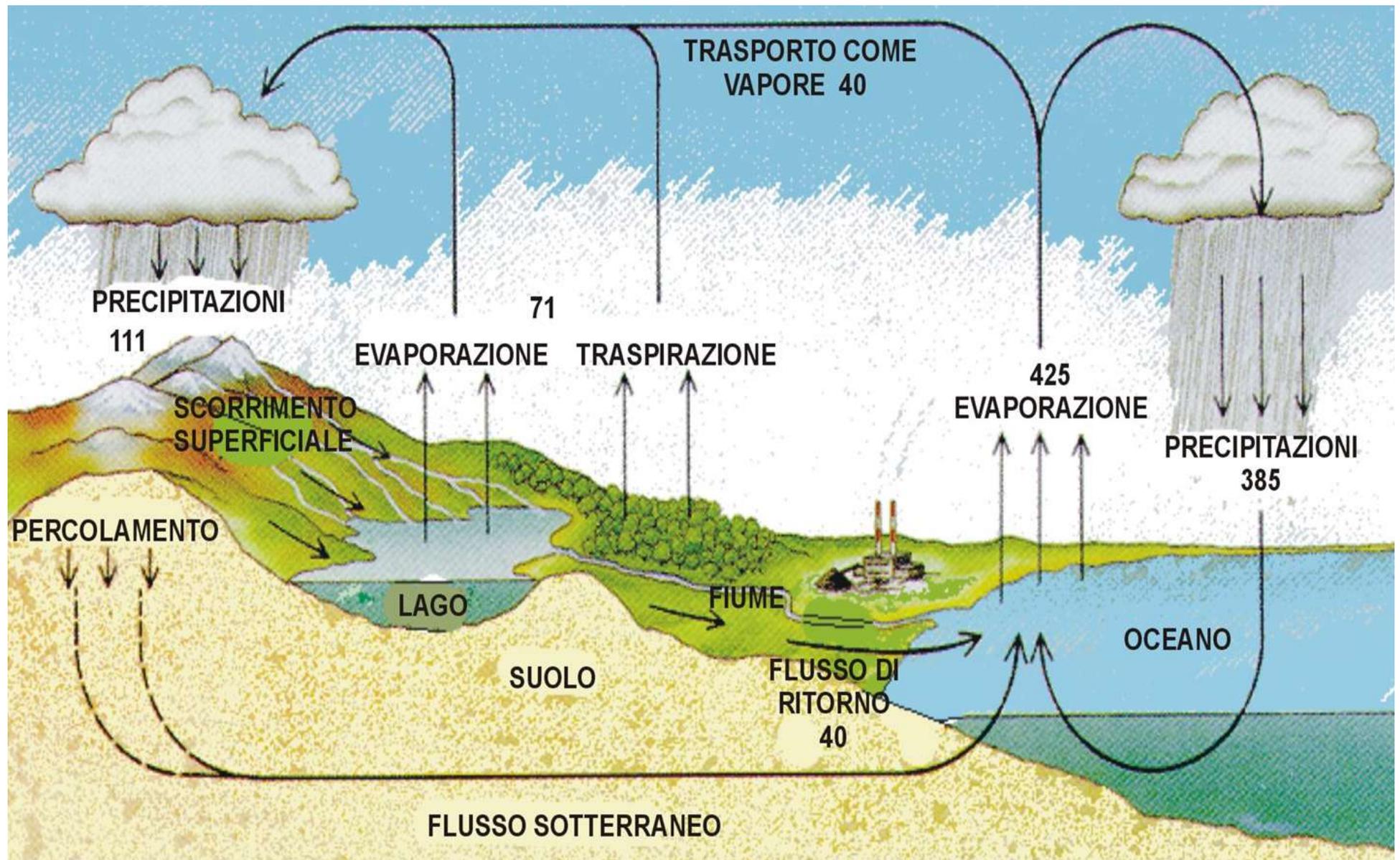
Per gentile concessione di
Angela Tozzi, diritti riservati

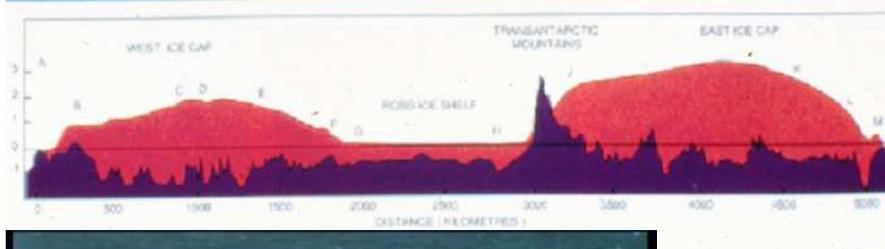
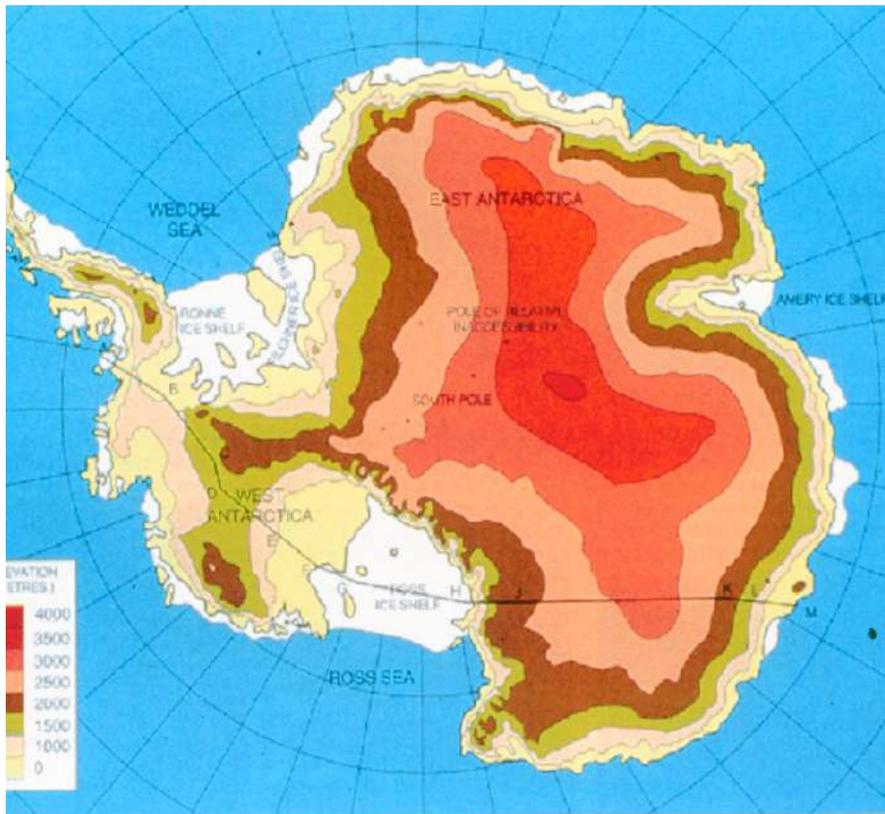
Per gentile concessione di
Silvano Focardi



IL CICLO DELL'ACQUA

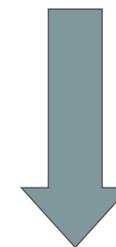




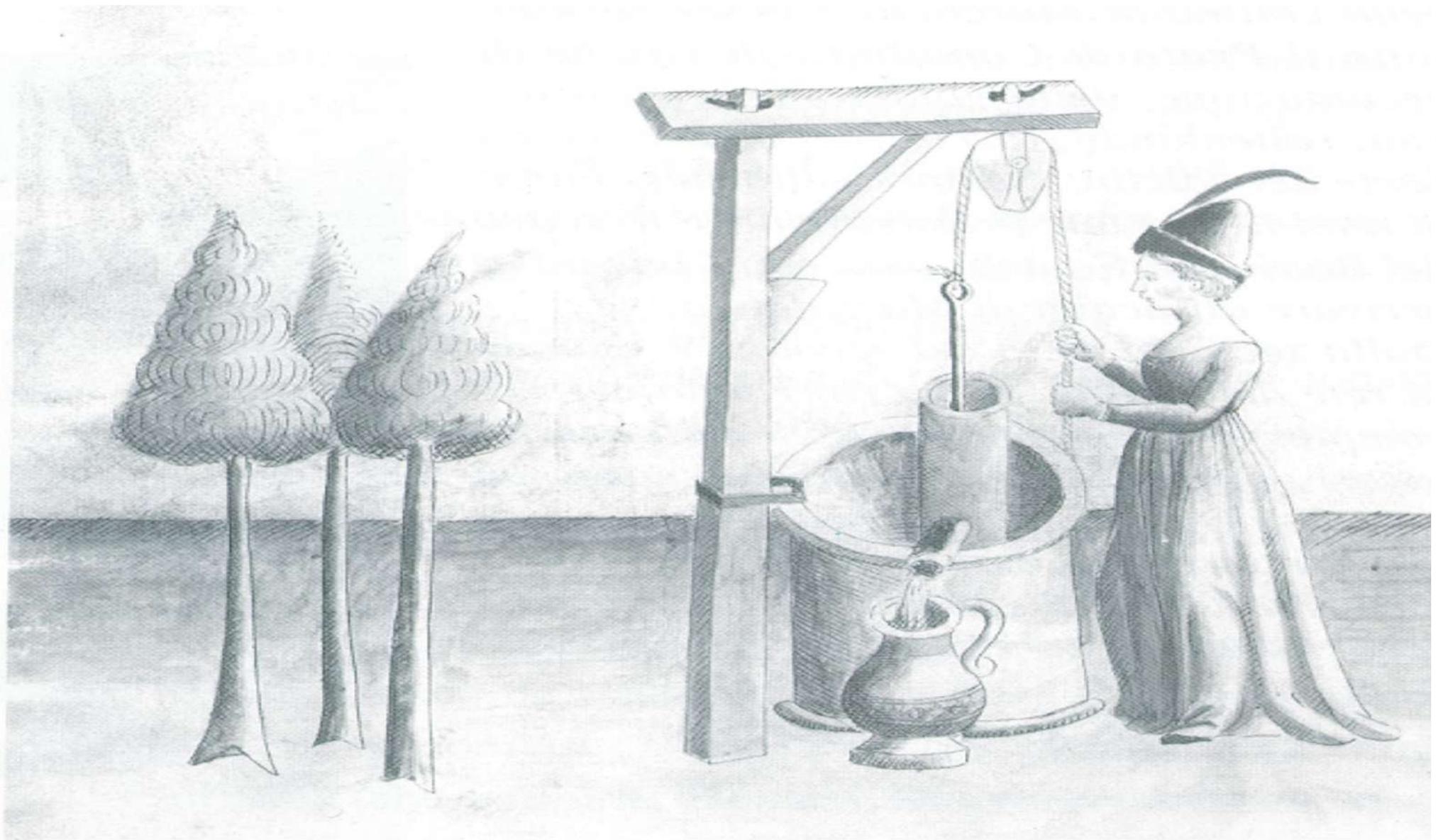


Acqua nel pianeta: 1,5 miliardi di km³

Acqua dolce nel pianeta: 38 milioni di km³

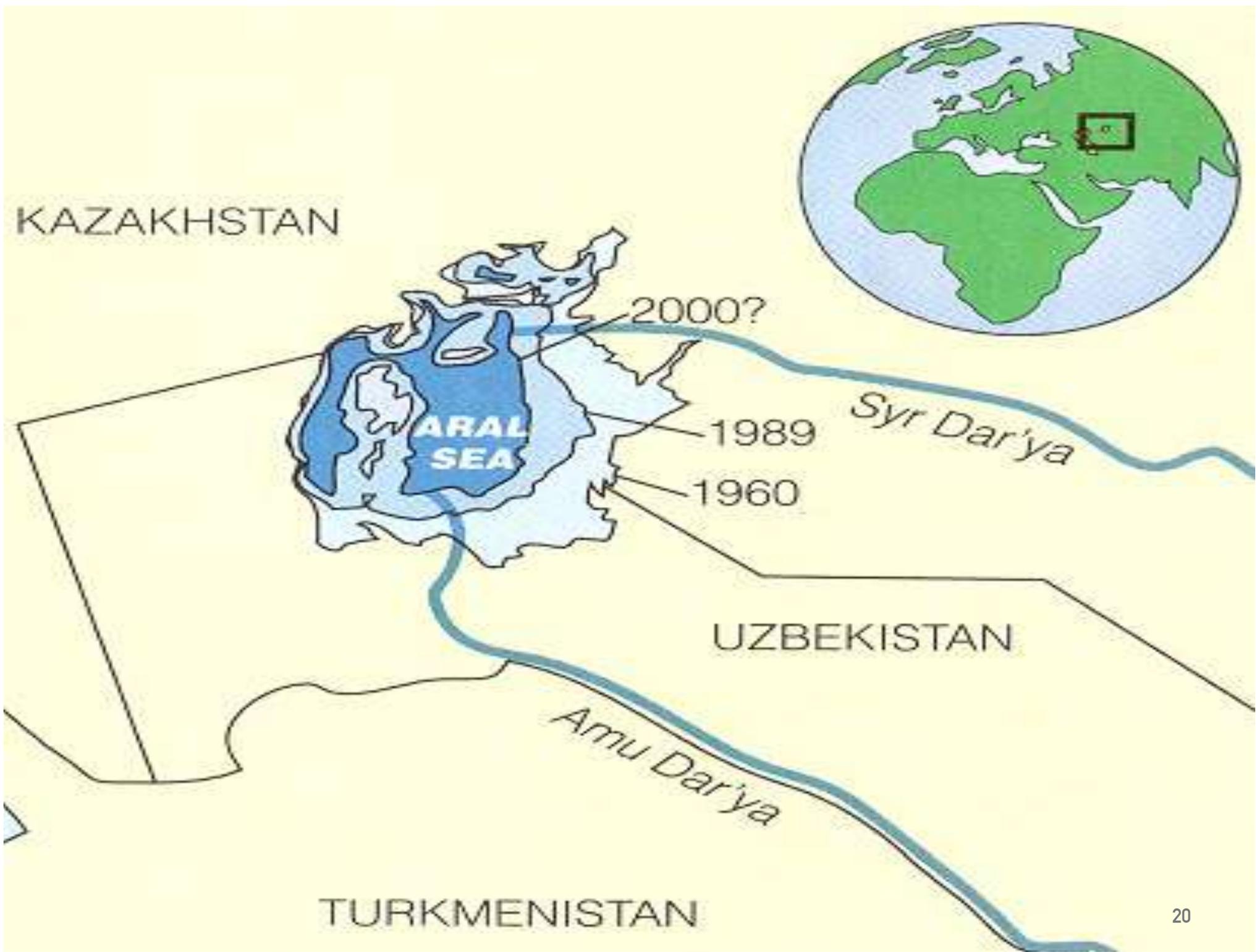


Volume dei ghiacci: 26,6 milioni di km³

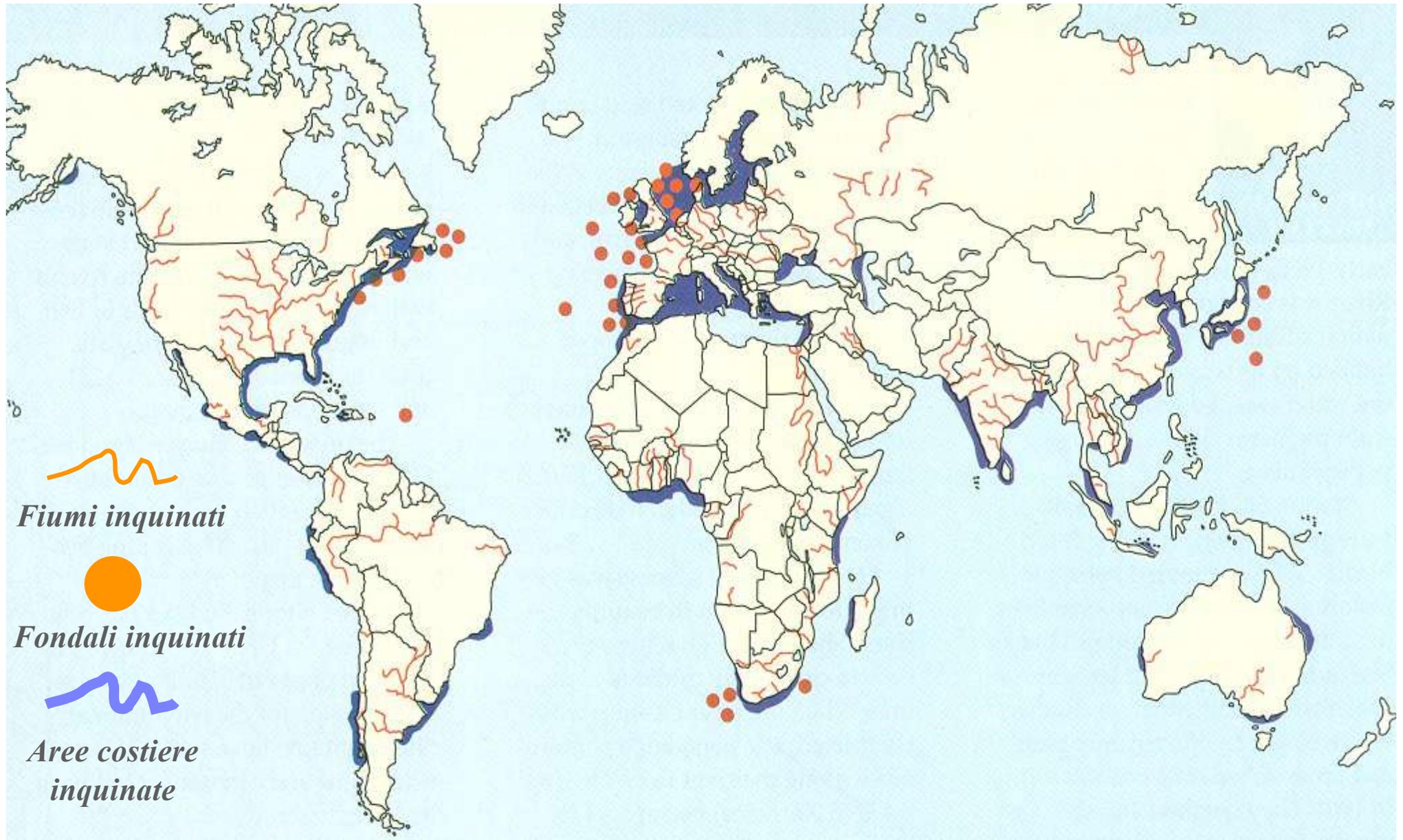


Finchè il pozzo non diventerà asciutto
non riusciremo a comprendere il reale
valore dell'acqua.

*Benjamin Franklin*¹⁹

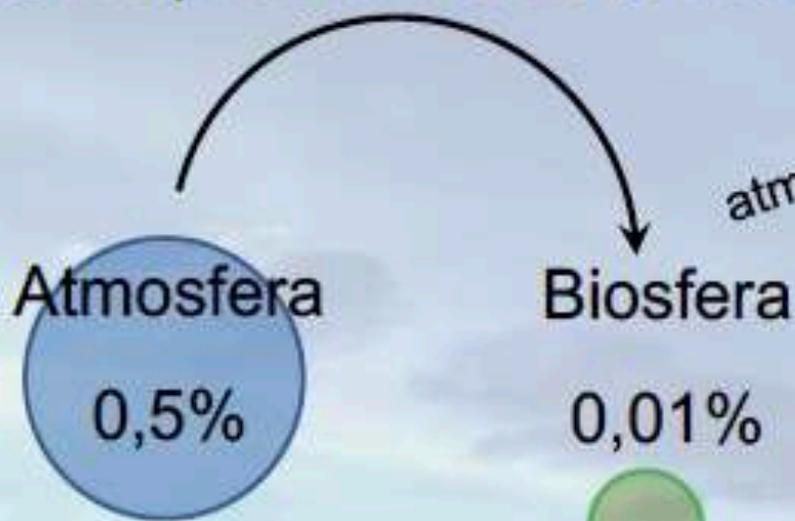


Inquinamento delle acque



Ciclo dell'ossigeno

Consumo
(80% respirazione e 20% ossidazione)

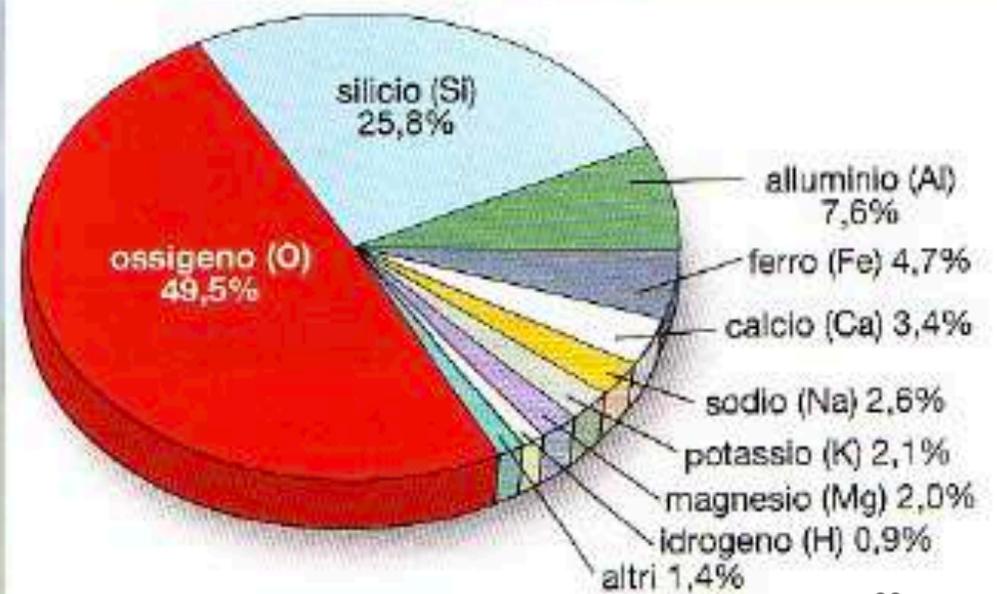


Agenti atmosferici/ossidazione

Litosfera
99,5%

Fotosintesi

(55% terra e 45% oceani)



Per gentile concessione di
Angela Tozzi, diritti riservati

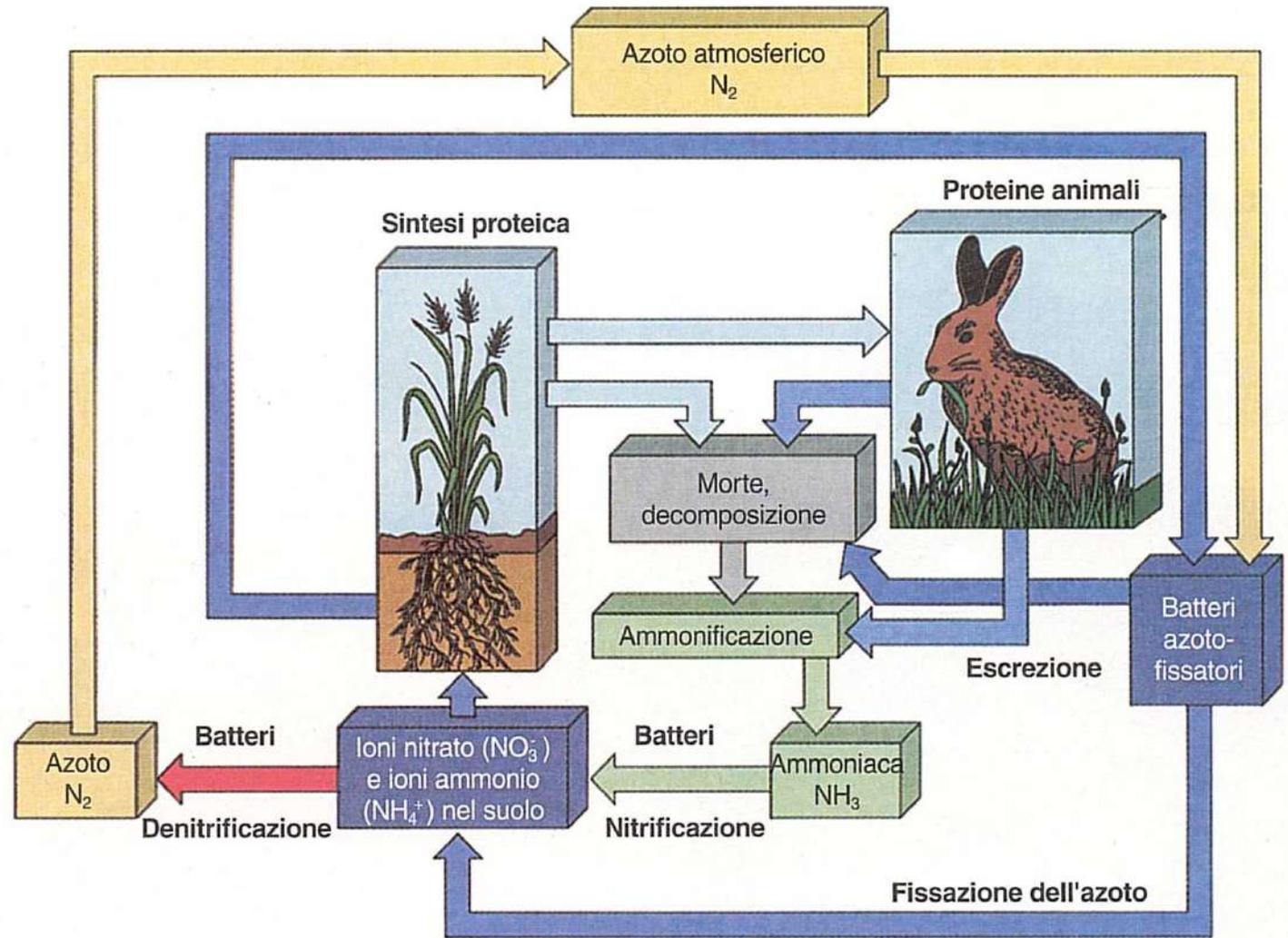
IL CICLO DELL'AZOTO

Componente fondamentale delle molecole organiche (proteine e acidi nucleici)

Componente maggiore (circa 80%) dell'atmosfera terrestre in forma di gas N_2

Azoto-fissatori = organismi tipicamente procarioti in grado di usare l'azoto gassoso

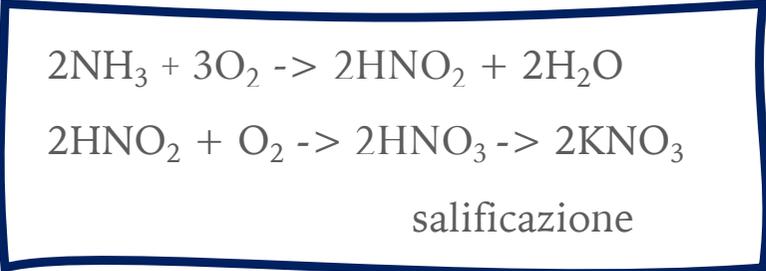
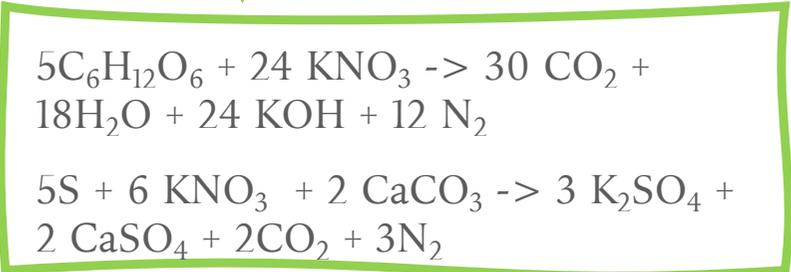
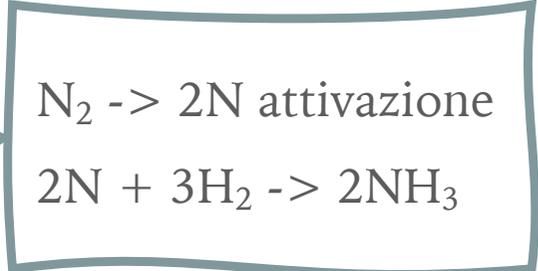
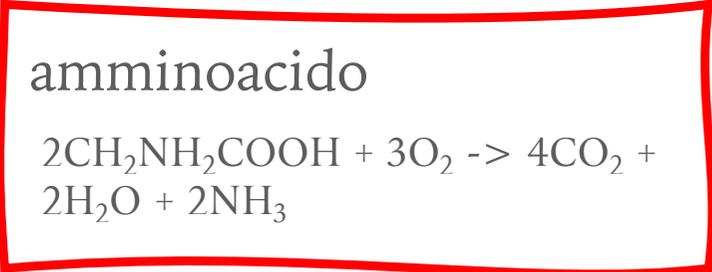
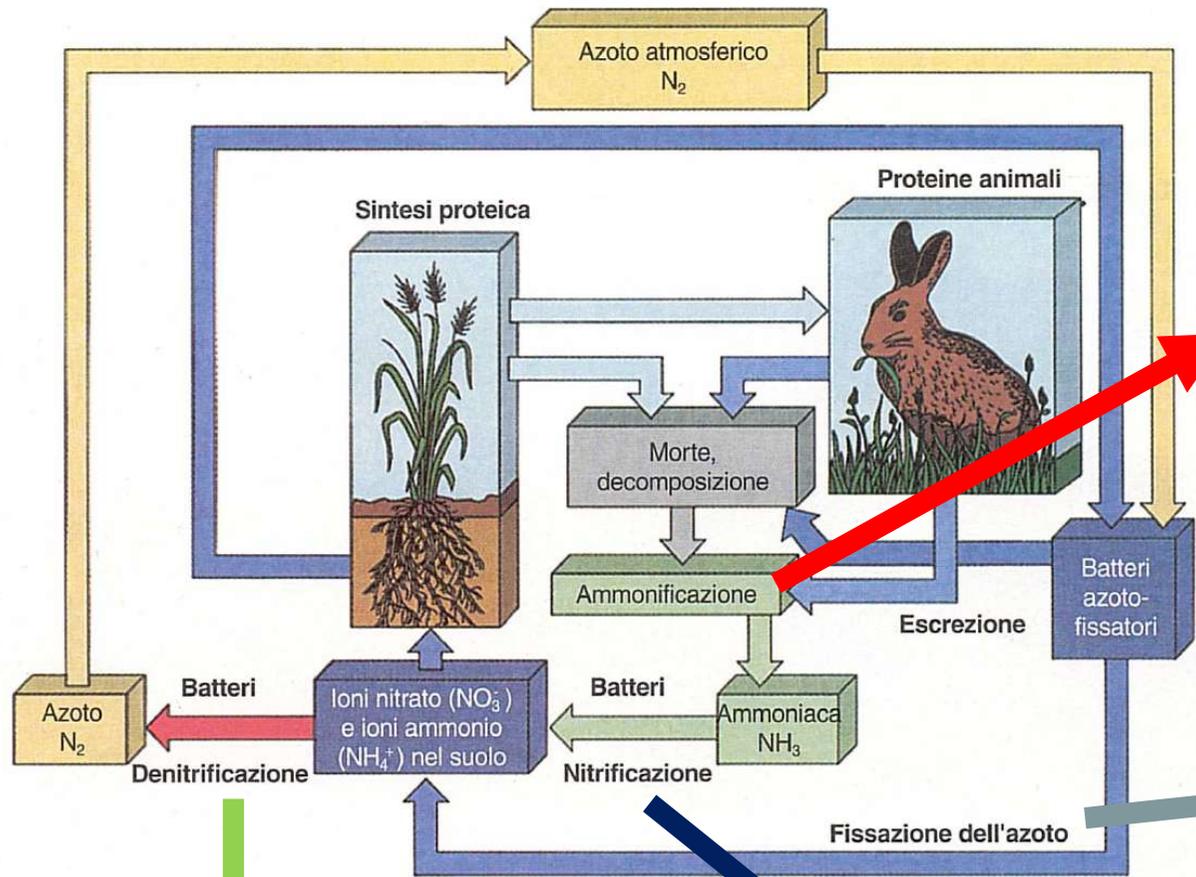
Fissano l'azoto nelle cellule in forma di ammonio (NH_4)

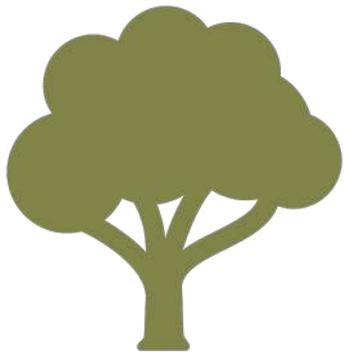


L'azoto atmosferico può essere fissato dalle scariche elettriche (**fissazione atmosferica**) con produzione di nitriti e nitrati.

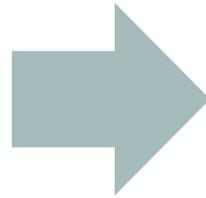
Anche le attività produttive umane possono fissare azoto (**fissazione industriale**).

PRINCIPALI REAZIONI DEL CICLO DELL'AZOTO

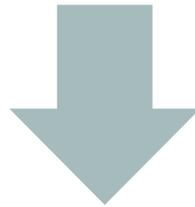




La velocità di **fissazione dell'azoto** è minore di quella di utilizzo da parte delle piante



L'azoto è **fattore limitante** per le colture

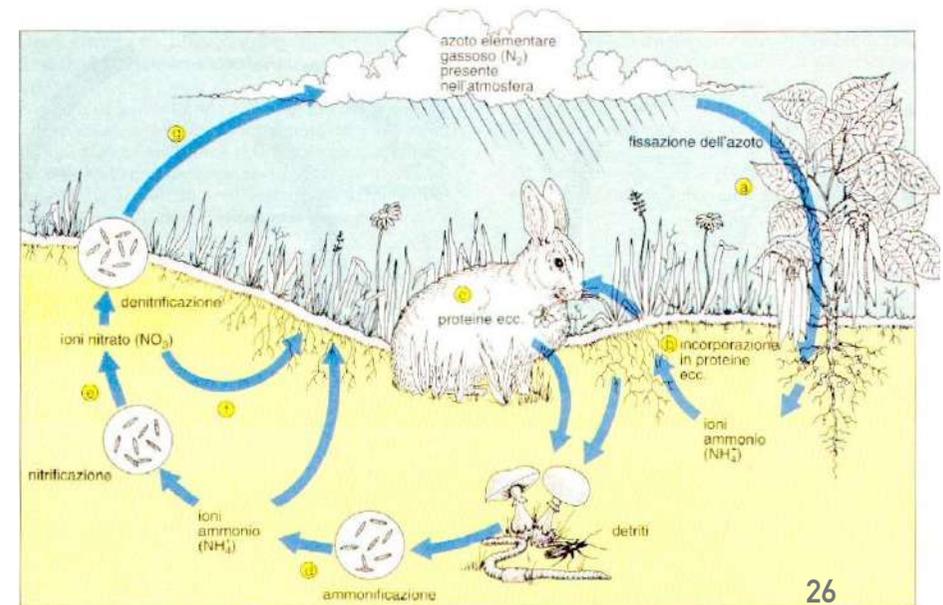


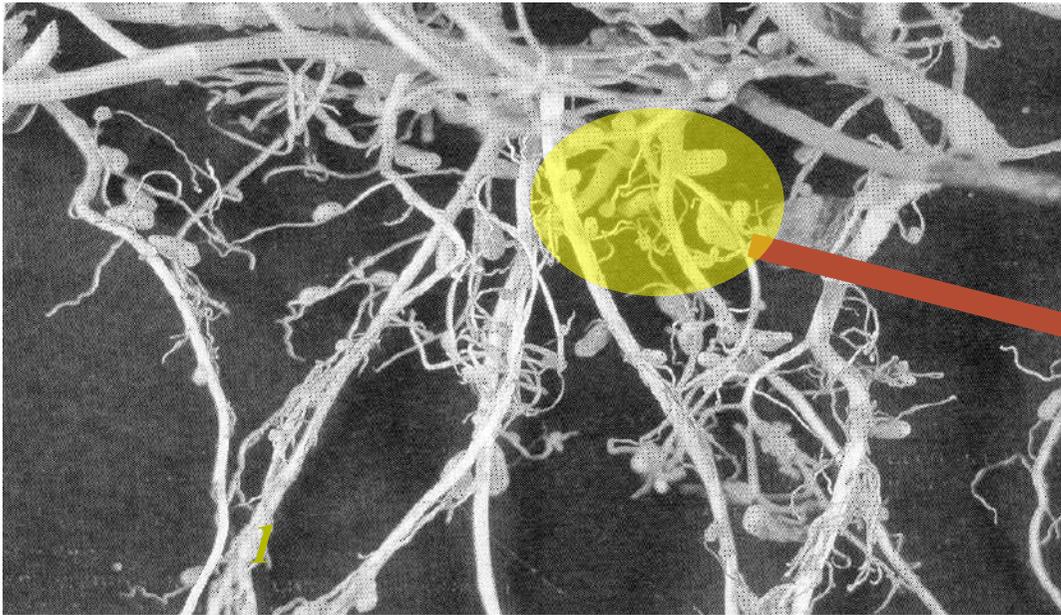
è uno dei componenti più comunemente aggiunti alle colture come fertilizzante

La conversione fra l'azoto nella forma organica a quella inorganica è estremamente complessa e realizzata da una serie di diverse specie di organismi specializzati.

Le piante sono in grado di assorbire tutte le forme dell'azoto attraverso le radici, ma lo ione ammonio è già nella forma ridotta, quella cioè che le piante usano per produrre aminoacidi, nucleotidi ed altri composti.

Se le piante assorbono i nitrati, necessitano di grandi quantità di ATP per ridurre l'azoto prima di poterlo utilizzare. I batteri nitrificanti sono molto comuni nei suoli, per cui lo ione NH_4^+ resta poco in quella forma e la componente più disponibile per le radici delle piante è sicuramente quella dei nitrati.



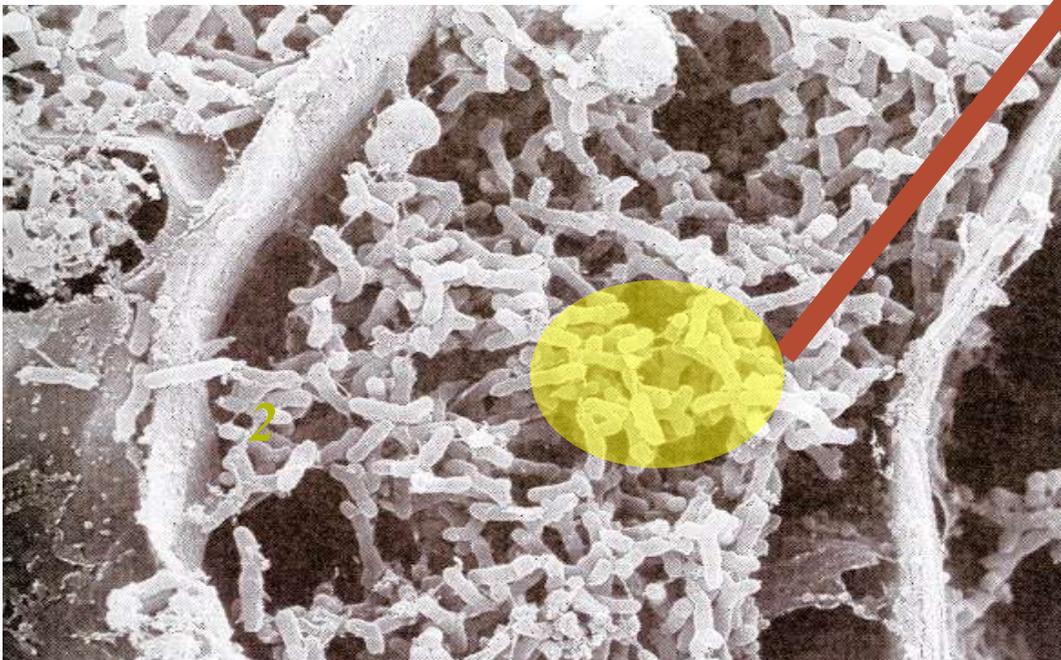


L'azoto atmosferico viene fissato da alcuni batteri terrestri, cianobatteri acquatici ed attinomiceti (**Biofissazione**)

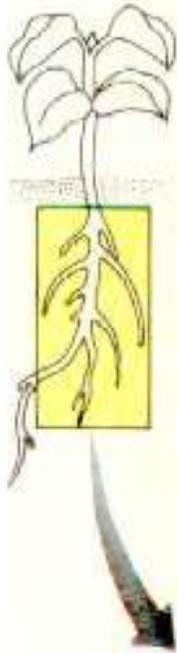
Numerosi batteri ed attinomiceti formano dei noduli sull'apparato radicale di alcune specie vegetali (es. leguminose)

I noduli racchiudono vere e proprie colonie batteriche (microscopio elettronico)

AZOTOFISSAZIONE



- ✓ *Rhizobium* (simbionte in associazione mutualistica con le leguminose)
- ✓ *Azotobacter* (in ambiente aerobico)
- ✓ *Clostridium* (in ambiente anaerobico)
- ✓ *Anabaena* (Cianobatteri, alga azzurra)
- ✓ *Nostoc*
- ✓ *Rhodospirillum* (batteri fotosintetici e azoto fissatori)
- ✓ *Attinomiceti* (funghi che vivono in stretta associazione con i noduli radicali)



Noduli sulle radici di
erba medica



Noduli granulosi
visti al SEM

I batteri azotofissatori presenti nei noduli radicali favoriscono la nutrizione di piselli, fagioli e ontani.

Ogni nodulo contiene migliaia di cellule di batteri del genere *Rizhobium*, capaci di trasformare l'azoto atmosferico in ammoniaca (NH_3)

NITRIFICAZIONE

I decompositori trasformano l'azoto contenuto negli organismi morti in ioni ammonio (NH_4^+). Questo subisce poi la nitrificazione ad opera di batteri del suolo (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*) che ossidano l'azoto a ione nitrito (NO_2^-).

Di seguito altri batteri (*Nitrobacter*, *Nitrococcus*) proseguono nel processo di ossidazione formando ioni nitrato (NO_3^-).

NITRIFICAZIONE

Gli anioni nitrato (NO_3^-) sono facilmente lisciviati dal suolo con l'acqua. Gli ioni ammonio, invece, essendo cationi tendono a venire adsorbiti alle cariche negative del suolo stesso e quindi sono più resistenti alla lisciviazione.

La nitrificazione è quindi un processo con due aspetti negativi per le piante:

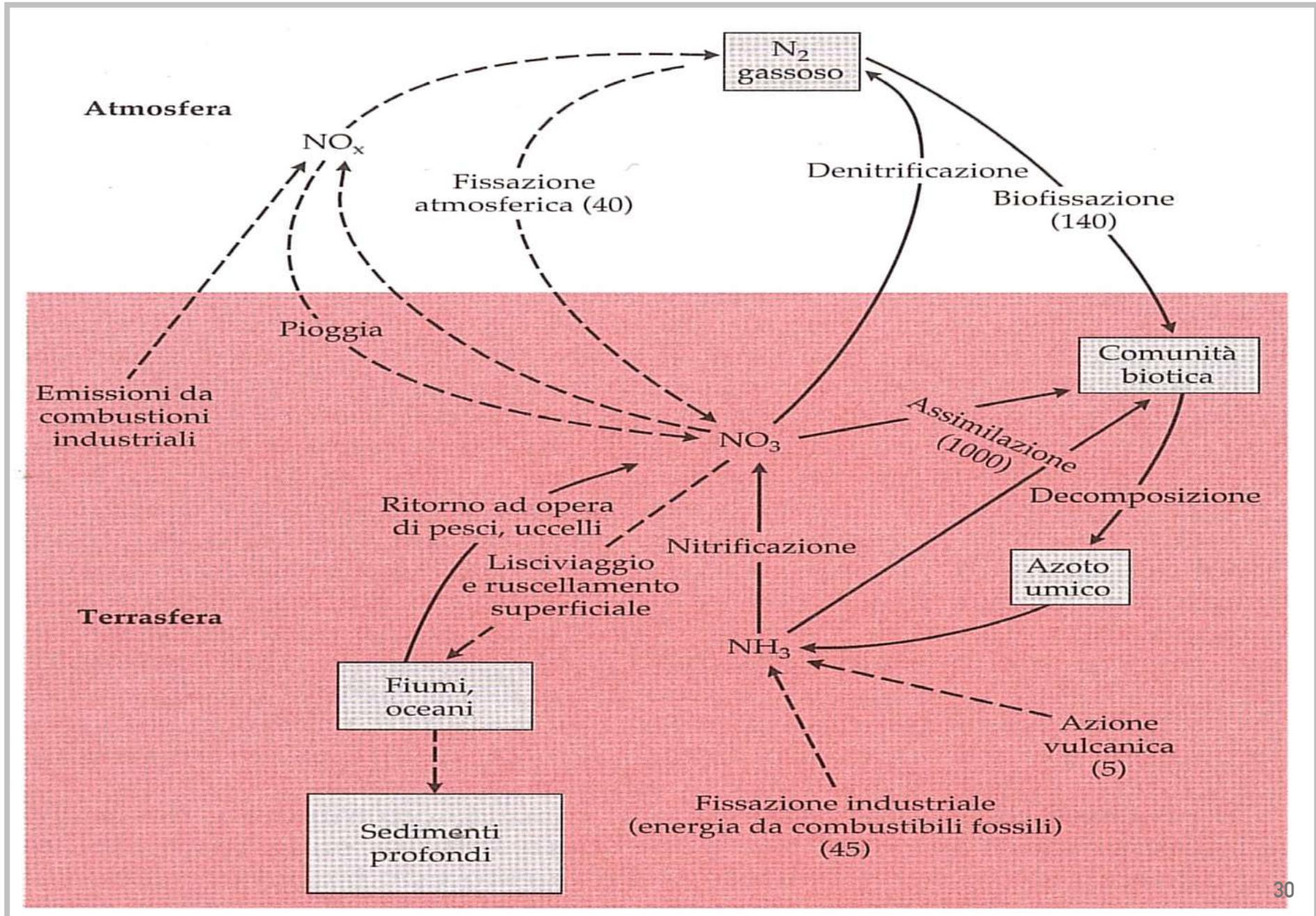
- ✓ trasforma l'azoto in una forma meno vantaggiosa dal punto di vista energetico,
- ✓ questa forma è più facilmente rimossa ad opera delle piogge con la lisciviazione.

DENITRIFICAZIONE

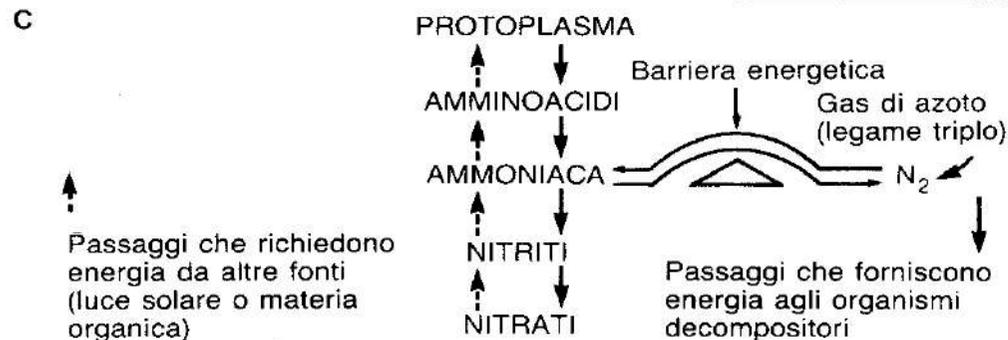
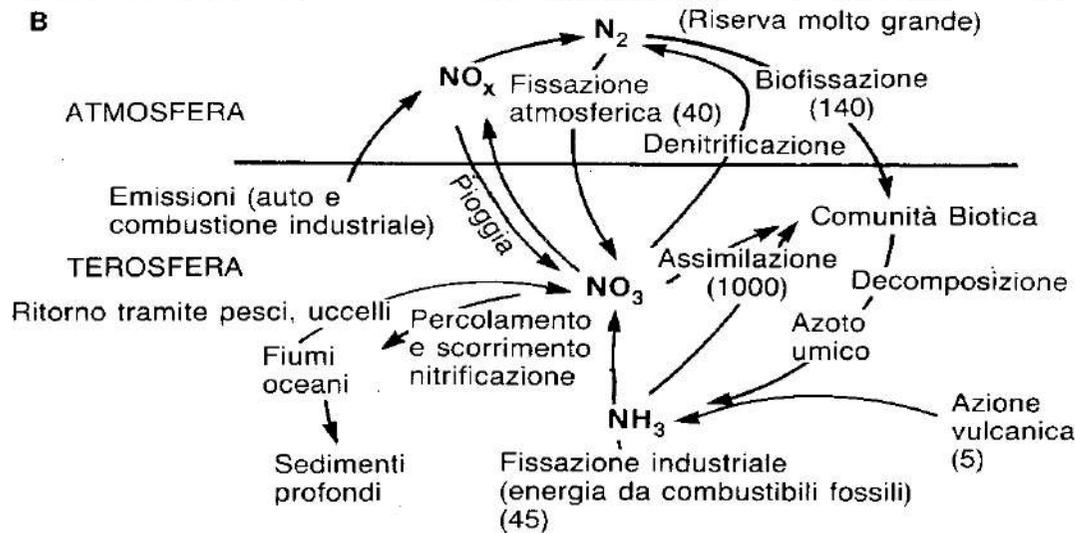
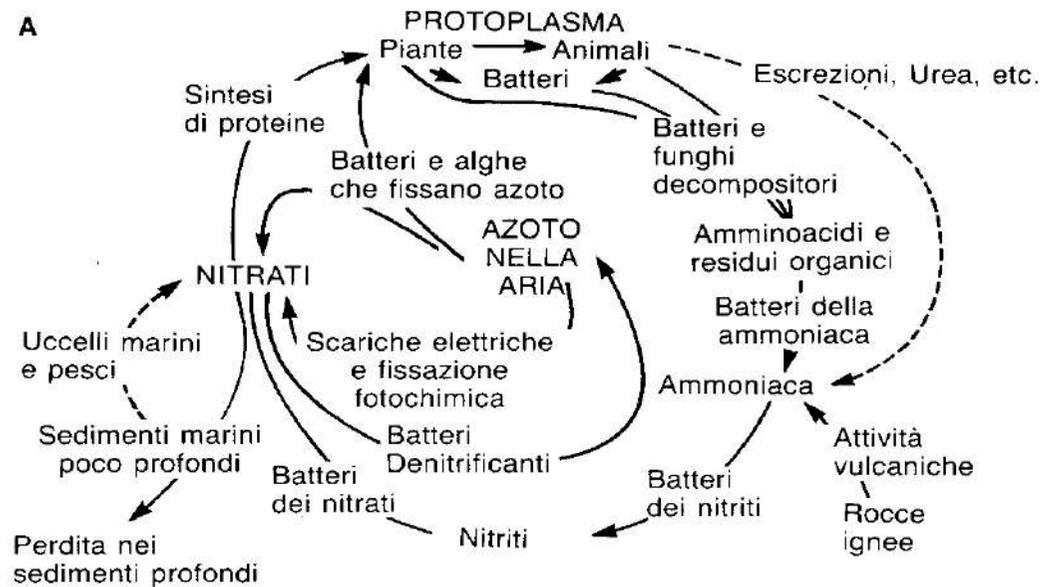
Parte dell'azoto che circola negli ecosistemi ritorna all'atmosfera con il processo della **denitrificazione**, operato da batteri denitrificanti che si trovano nei fondi fangosi di paludi, laghi eutrofici ed estuari ed anche nei fondali oceanici. Questi batteri usano nitriti e nitrati come accettori di elettroni nel processo di chemiosintesi che permette loro di ottenere energia, con liberazione di azoto in forma gassosa (2N_2).

STIME DEI GRANDI FLUSSI NEL CICLO DELL'AZOTO

1 Tg (teragrammo) = 10^6 tonnellate

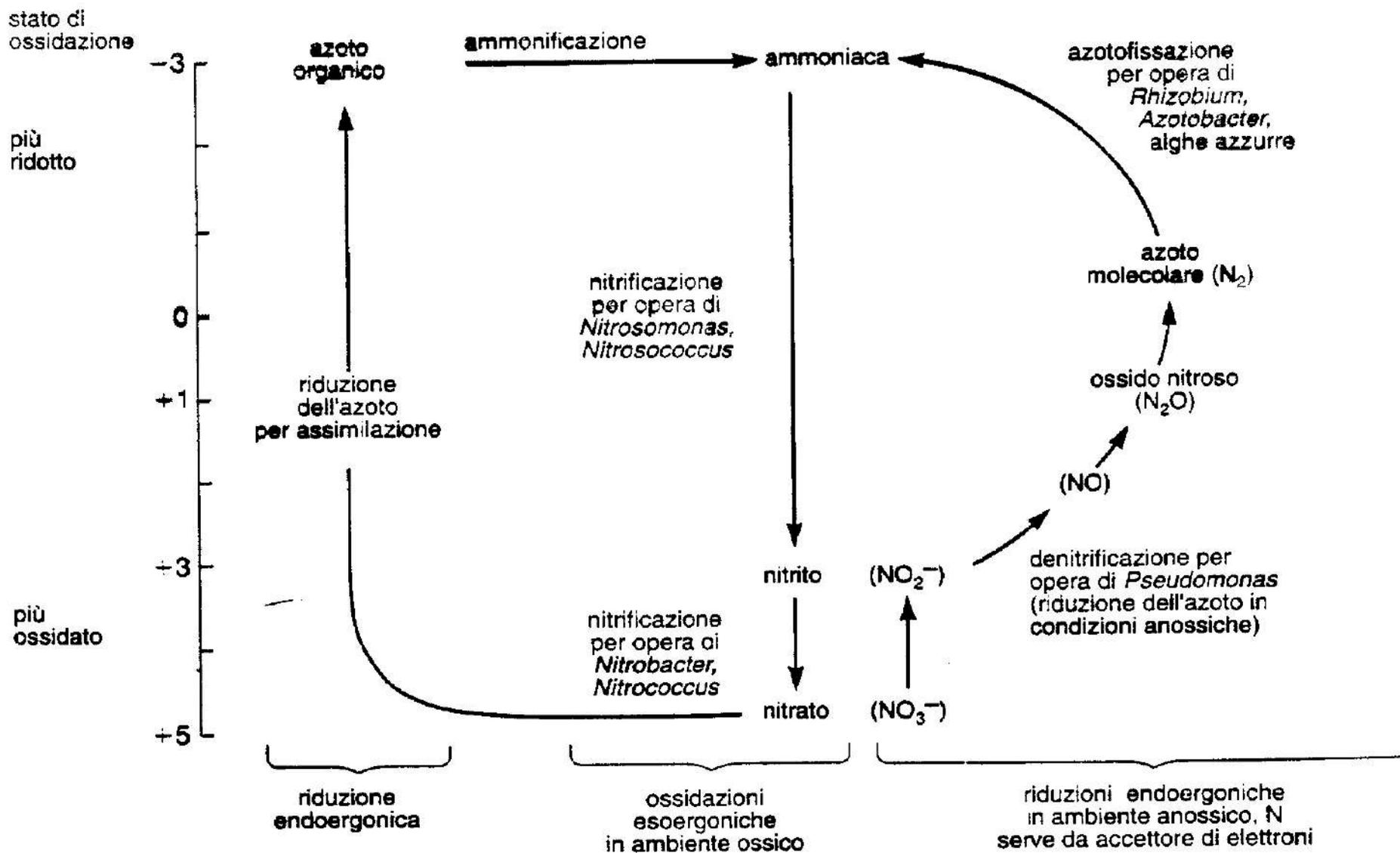


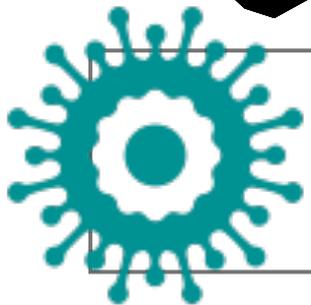
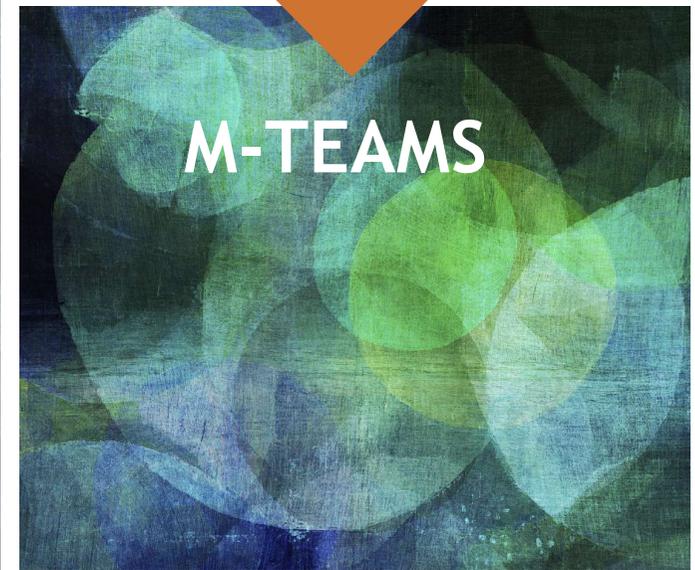
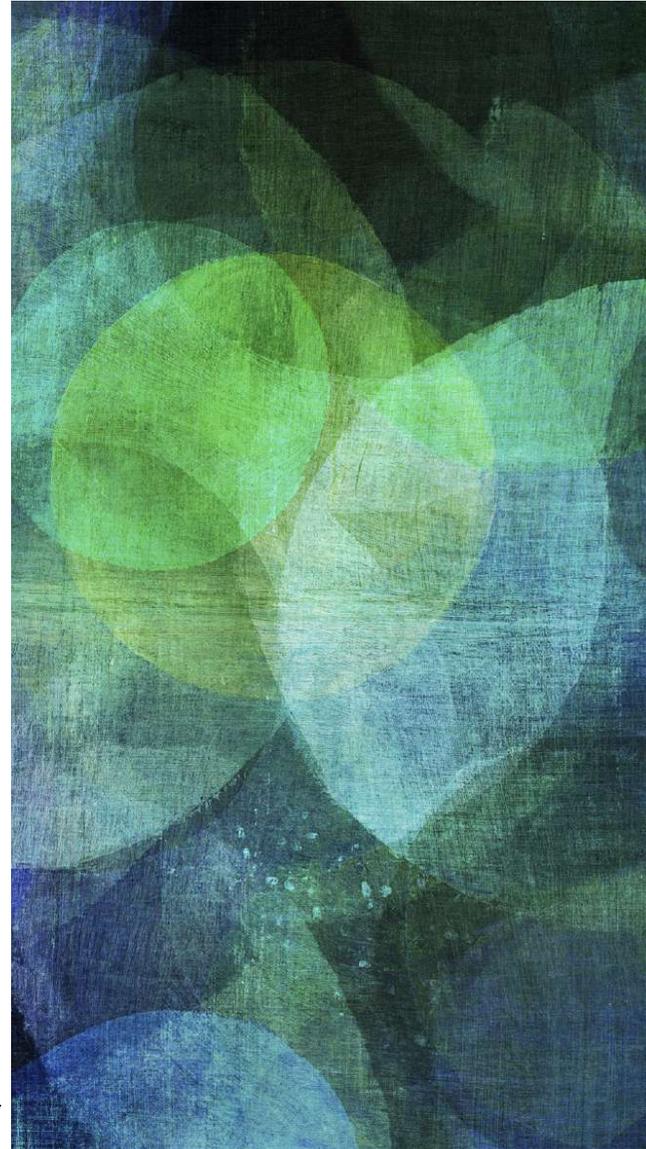
CIRCOLAZIONE DELL'AZOTO TRA ORGANISMI E AMBIENTE



TRASFERIMENTI DI ENERGIA NEL CICLO DELL'AZOTO

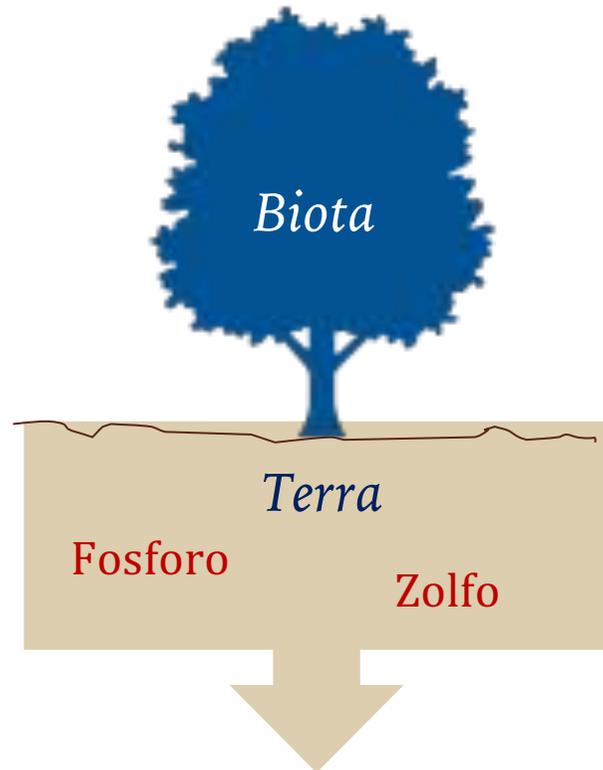
REAZIONI ENDOERGONICHE ED ESOERGONICHE NEL CICLO DELL'AZOTO





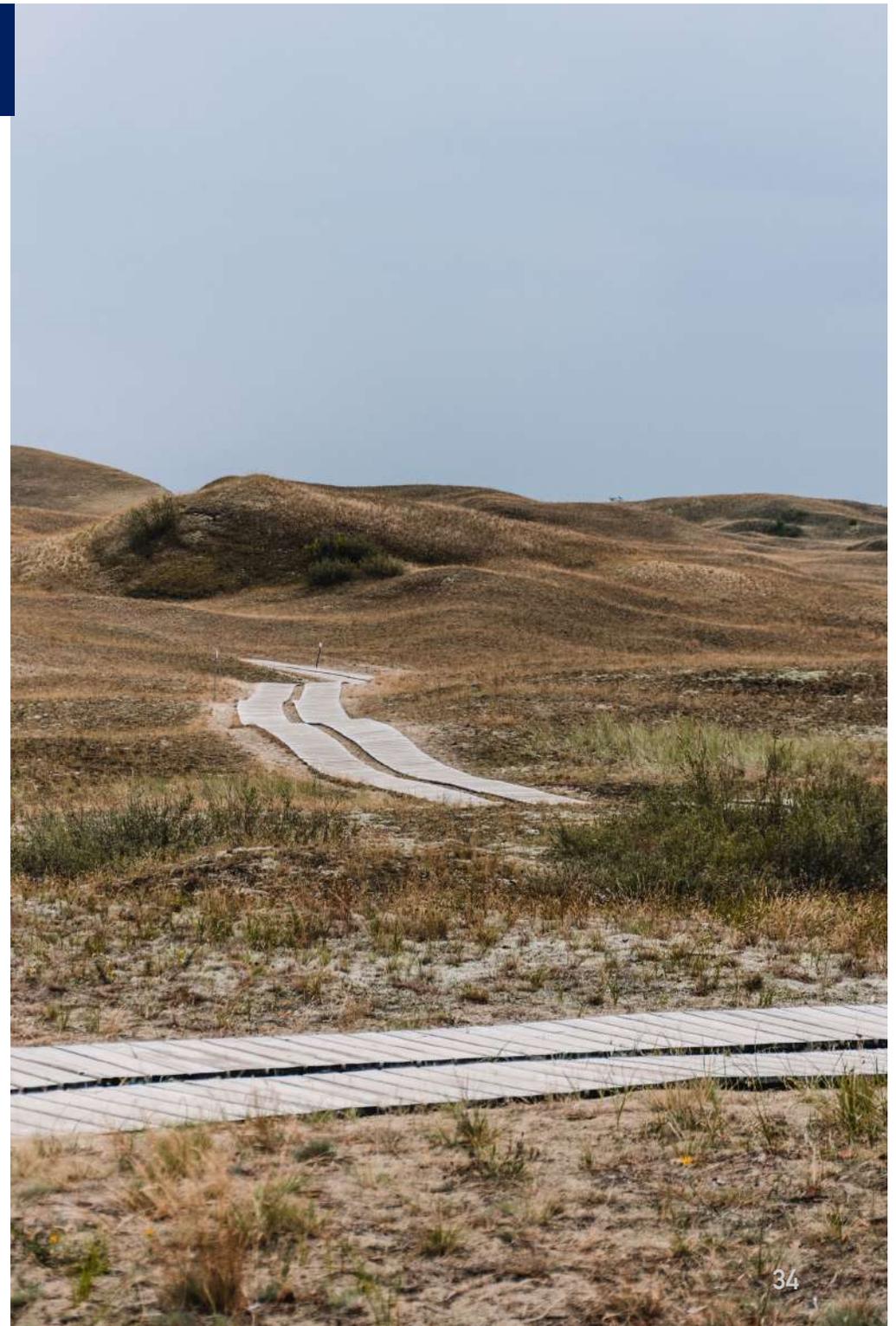
DOMANDE??

Cicli di tipo sedimentario



Tipo sedimentario
Il pool di riserva è nella
crosta terrestre

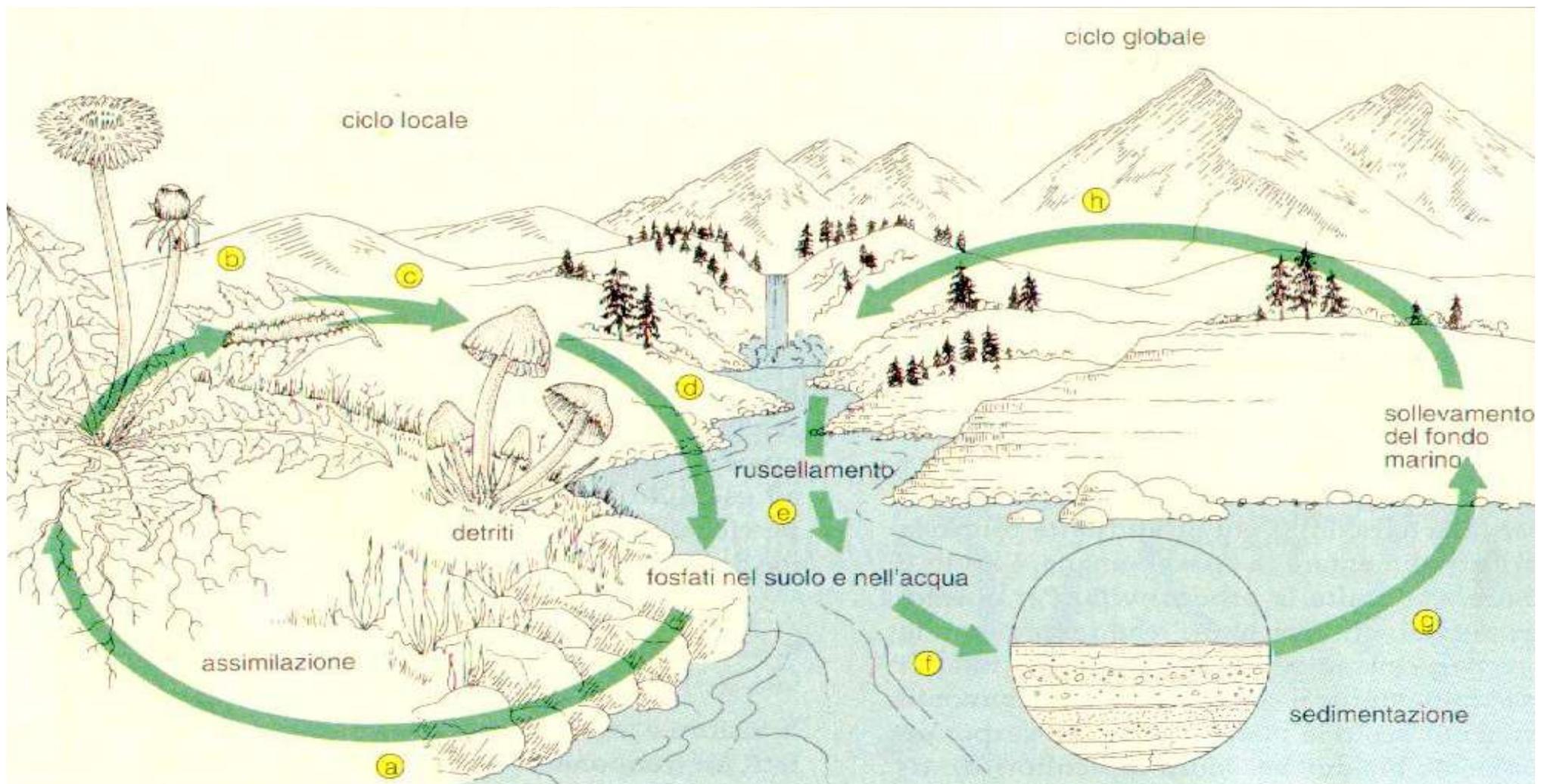
- ✓ *Ciclo del fosforo*
- ✓ *Ciclo dello zolfo*
- ✓ *Ciclo del carbonio*



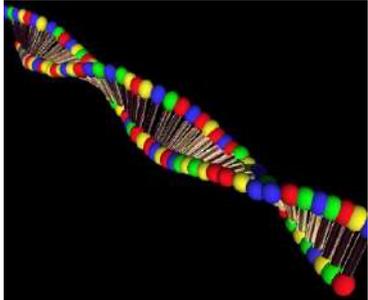


IL CICLO DEL FOSFORO

CICLO DEL FOSFORO LOCALE (BREVE TERMINE) E GLOBALE (LUNGO TERMINE)



IL CICLO DEL FOSFORO



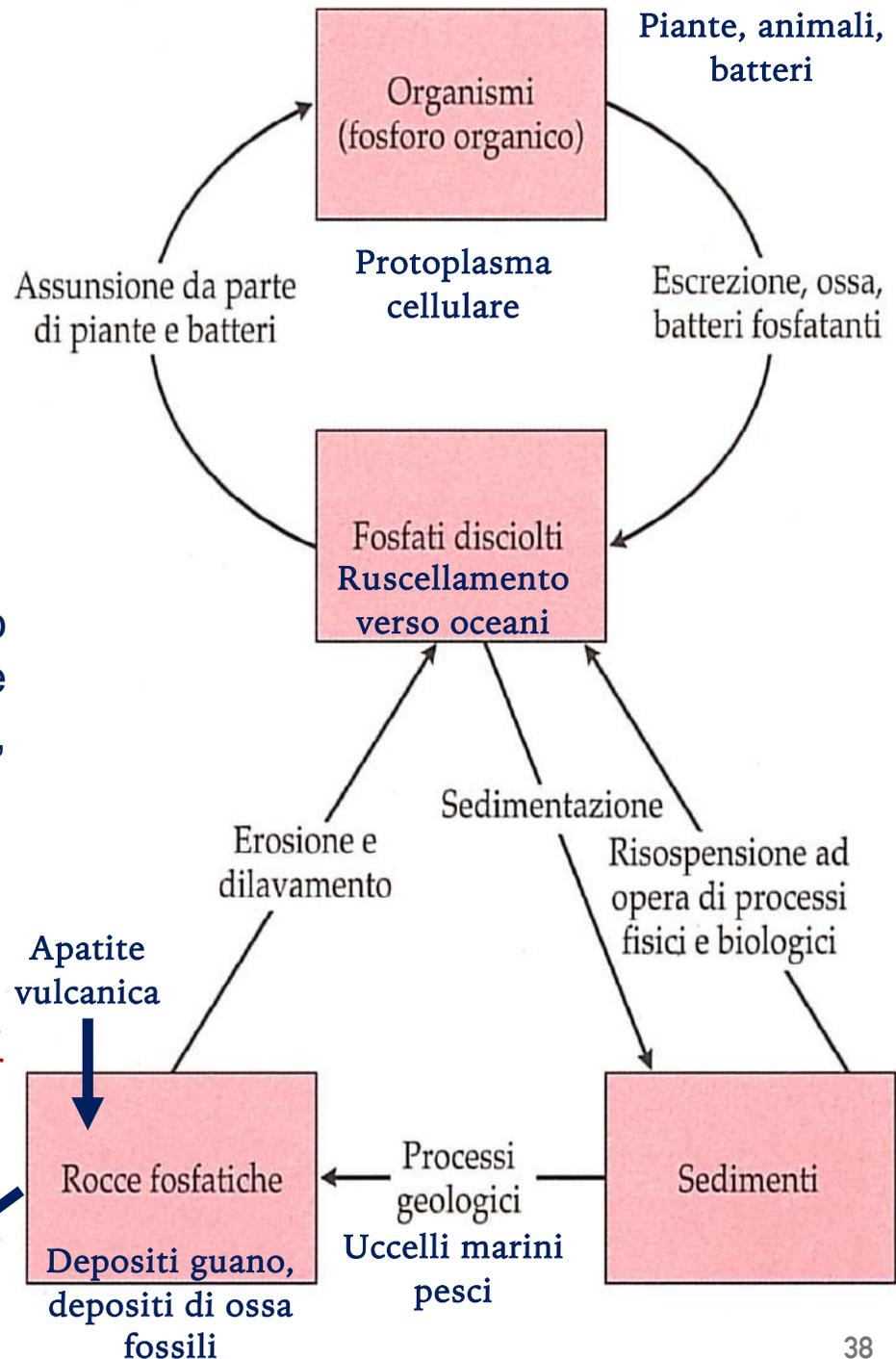
Acidi nucleici
Fosfolipidi di
membrana

Forma lo scheletro, le conchiglie o i
denti (molti animali)

Negli ecosistemi terrestri è molto
efficiente, anche se si hanno continue
piccole perdite attraverso ruscelli e fiumi,
verso gli oceani.

Rispetto all'azoto il
fosforo è raro, il
ritorno verso la terra
è poco efficiente per
la perdita nei
sedimenti profondi

Perdita sedimenti
profondi



EFFETTI DELL'EROSIONE SUL CICLO DEL FOSFORO

Gli ecosistemi terrestri però trattengono gran parte del fosforo che circola al loro interno; i fosfati infatti si assorbono alle particelle del suolo, e questo contribuisce a costituire una scorta per la crescita delle piante.

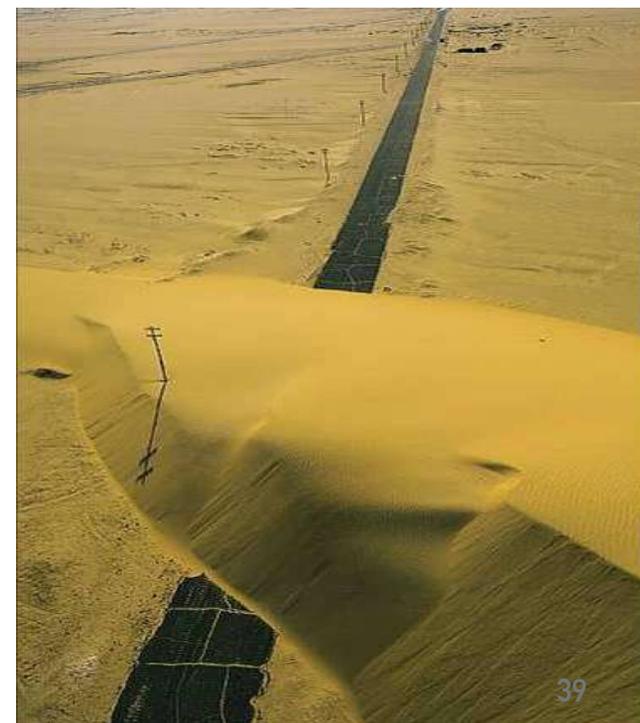
L'erosione dei suoli determina una perdita di fosforo, per sostituire la quale, i processi naturali di degradazione delle rocce impiegano migliaia di anni.

In ambiente acquatico il fosforo si trova in un rapporto con l'azoto di circa 1 : 23.



L'erosione chimica delle rocce è stata stimata, negli Stati Uniti, in circa 34 t/km²/y.

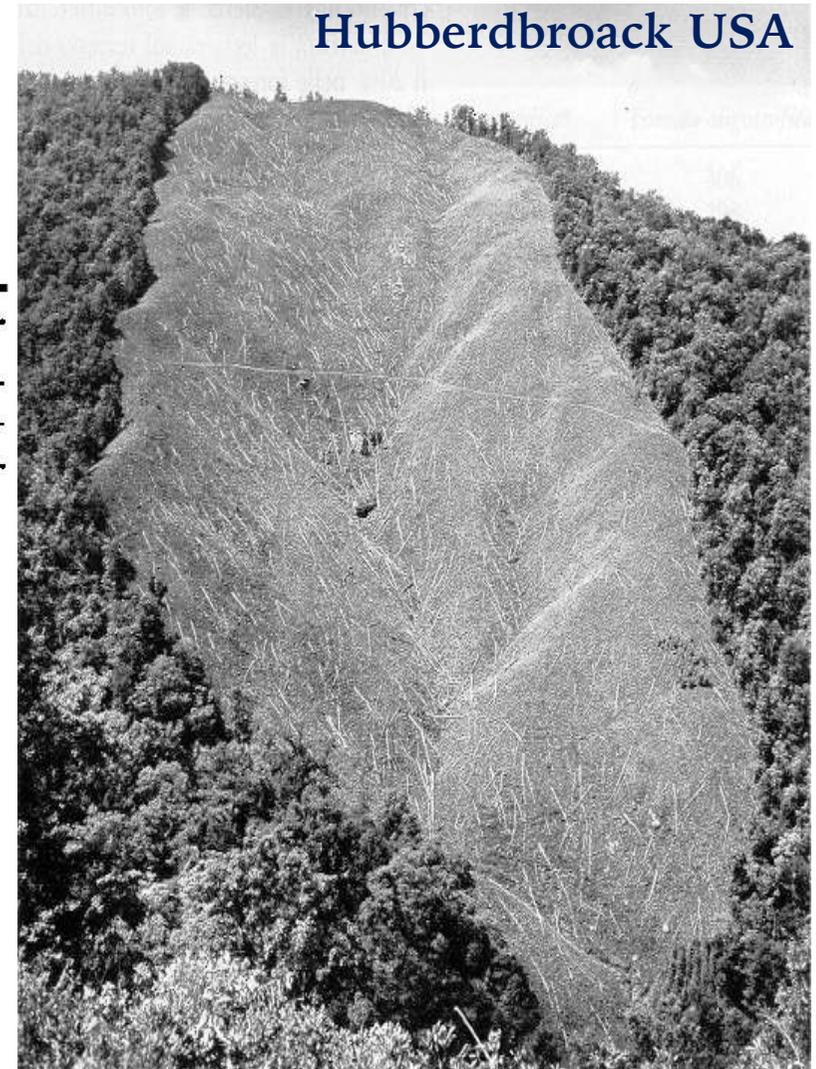
Cinquant'anni di coltivazione di suoli vergini del Middle West hanno causato una diminuzione nel contenuto in P₂O₅ del 36%.



Nutrienti	Input da precipitazioni	Output fluviale	Perdita netta o guadagno
Acqua	171,8	89,4	-
Ca	3,0	12,2	-9,2
Mg	0,8	3,4	-2,6
K	0,8	2,4	-1,6
Na	1,8	8,8	-7,0
N(NH ₄)	2,6	0,2	+2,4
N(NO ₃)	5,2	2,8	+2,4
S(SO ₄)	16,0	19,3	-3,3
Cl	5,2	5,3	-0,1
C(HCO ₃)	a	0,5	-0,5
Si(SiO ₂)	a	17,0	-7,0

	Tonnellate/km ² /anno			
	1966-67		1967-68	
	W2	W6	W2	W6
Ca ⁺⁺	-7,5	-0,8	-9,0	-0,9
K ⁺	-2,3	-0,1	-3,6	-0,2
Al ⁺⁺	-1,7	-0,1	-2,4	-0,3
Mg ⁺⁺	-1,6	-0,3	-1,8	-0,3
Na ⁺	-1,7	-0,6	-1,7	-0,7
NH ₄ ⁺	+0,1	+0,2	+0,2	+0,3
NO ₃ ⁻	-43,0	+1,5	-62,8	+1,1
SO ₄ ⁻	-0,5	-0,8	0	-1,0
HCO ₃ ⁻	-0,1	-0,2	0	-0,3
Cl	-0,1	+0,2	-0,4	0
SiO ₂ (aq.)	-6,6	-3,6	-6,9	-3,6
Totale	-65,0	-4,6	-88,4	-5,9

EFFETTO DELLA VEGETAZIONE SULLA RITENZIONE DEI NUTRIENTI





IL CICLO DELLO ZOLFO

Gli organismi hanno necessità di utilizzare piccole quantità di **zolfo** per sintetizzare le proteine.

Le piante lo ottengono assorbendo solfati dal suolo e lo zolfo ritorna al suolo con la morte degli organismi.

Una sorgente abiotica significativa di questo elemento sono le esplosioni vulcaniche, che rilasciano biossido di zolfo (SO_2) e idrogeno solforato (H_2S) nell'atmosfera, contribuendo al 10-20% della quantità complessiva utilizzata dagli organismi.

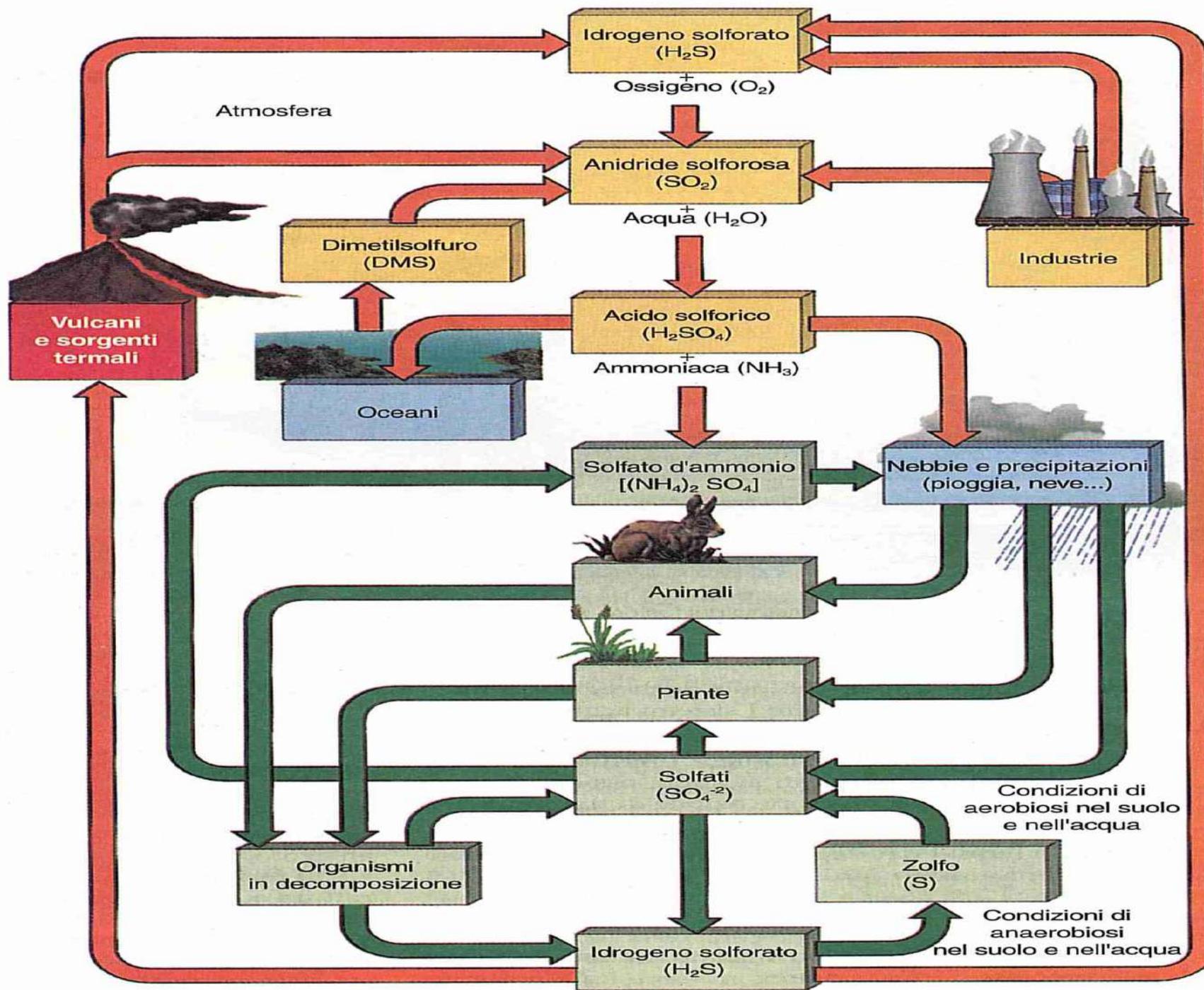
Eruzione Etna (Italia)



Componenti importanti del ciclo dello zolfo sono i solfobatteri, organismi produttori che utilizzano H_2S invece dell' H_2O per ottenere gli atomi di idrogeno necessari al processo di trasferimento dell'energia solare nelle molecole organiche. In questo processo non viene liberato ossigeno, ma zolfo.

In presenza di ossigeno questo zolfo viene ossidato a solfiti (SO_3^{2-}) e solfati (SO_4^{2-}), questi ultimi vengono facilmente assorbiti dalle piante.

I solfiti invece possono formare idrogeno solforato, che viene riciclato dai solfobatteri, o possono reagire con il ferro del suolo per formare solfito di ferro insolubile.



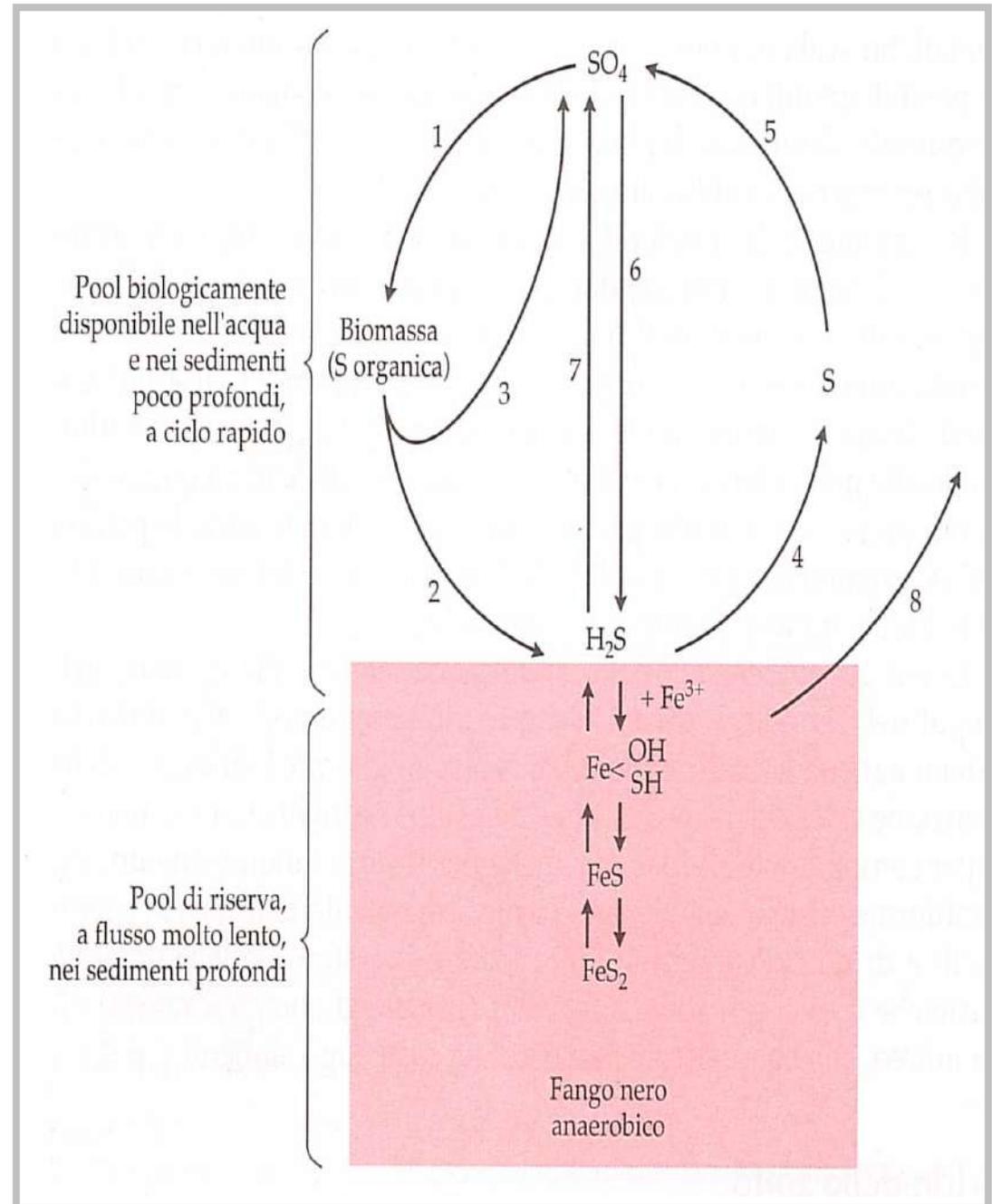
La prima tappa avviene ad opera delle piante (produzione primaria).

Le tappe 2-7 avvengono ad opera soprattutto di microrganismi specializzati:

- 2, decomposizione da parte dei microrganismi eterotrofi;
- 3, escrezione animale;
- 4-5, batteri dello zolfo incolori, verdi e purpurei;
- 6, batteri anaerobi (Desulfovibrio) che riducono lo zolfo;
- 7, batteri aerobi (Thiobacillus) che ossidano i solfuri.

La tappa 8 rappresenta la conversione dello zolfo da una forma non disponibile ad una disponibile, tramite la formazione di solfuri di ferro.

Questa fase ci mostra anche come il ciclo di un elemento vitale (il ferro) possa influire su un altro (lo zolfo).





IL CICLO DEL CARBONIO

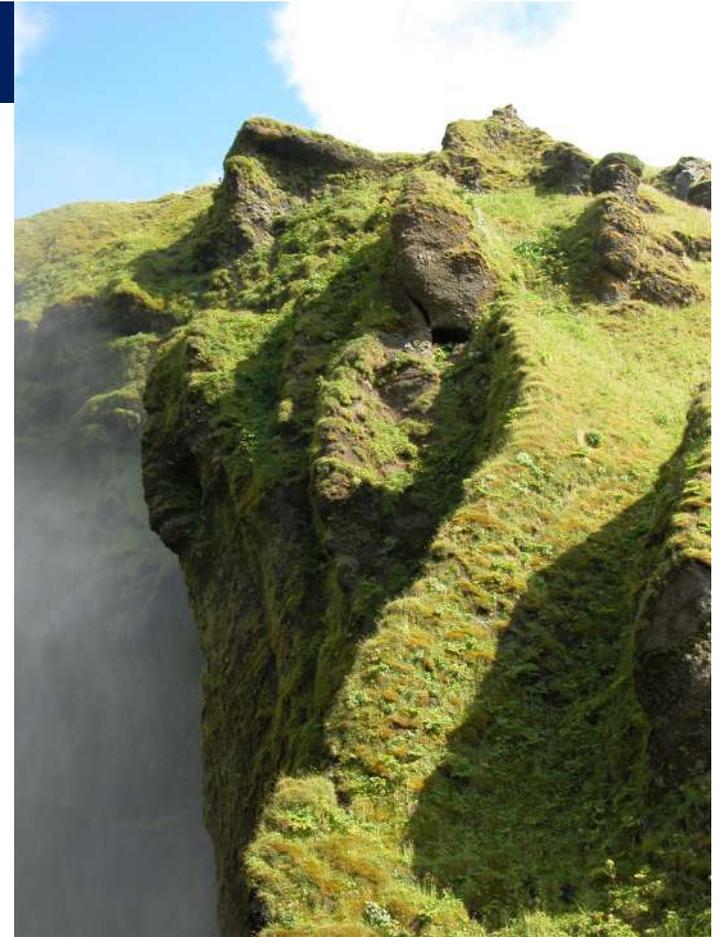
CICLO DEL CARBONIO

Il carbonio si muove in un **ciclo atmosferico** in quanto si ritrova soprattutto in forma gassosa come anidride carbonica (CO_2) e metano (CH_4) nell'atmosfera, ma anche nelle rocce, e disciolto nell'acqua.

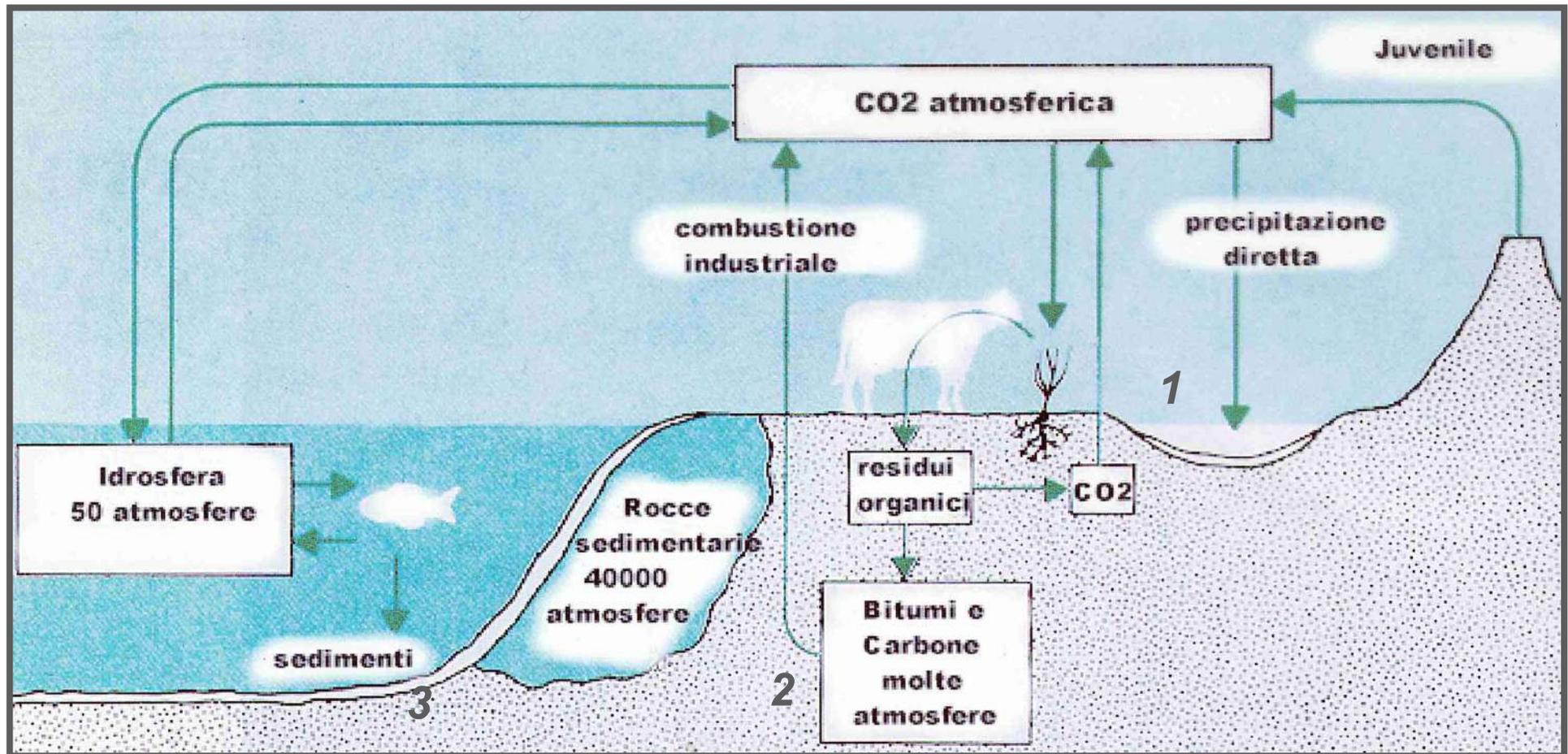
Gran parte del carbonio raggiunge gli organismi viventi e passa di nuovo all'atmosfera attraverso la fotosintesi e la respirazione. Infatti con la fotosintesi il carbonio viene fissato sotto forma di molecole organiche, che la respirazione frammenta fino, a riformare l'anidride carbonica che ritorna all'atmosfera.

Nei sistemi acquatici gli scambi avvengono tra gli organismi viventi e la CO_2 disciolta nell'acqua (anche sotto forma di bicarbonato HCO_3^- e carbonato CO_3^{2-}).

Il metano invece viene rilasciato dagli organismi anaerobi, come quelli presenti negli impianti di smaltimento dei rifiuti, sul fondo melmoso delle paludi e nei sistemi digerenti delle termiti o dei ruminanti. L'anidride carbonica costituisce circa lo 0,03% dell'atmosfera (300 ppm o parti per milione), mentre, il metano lo 0,0002% (2 ppm).



CICLIZZAZIONE DEL CARBONIO



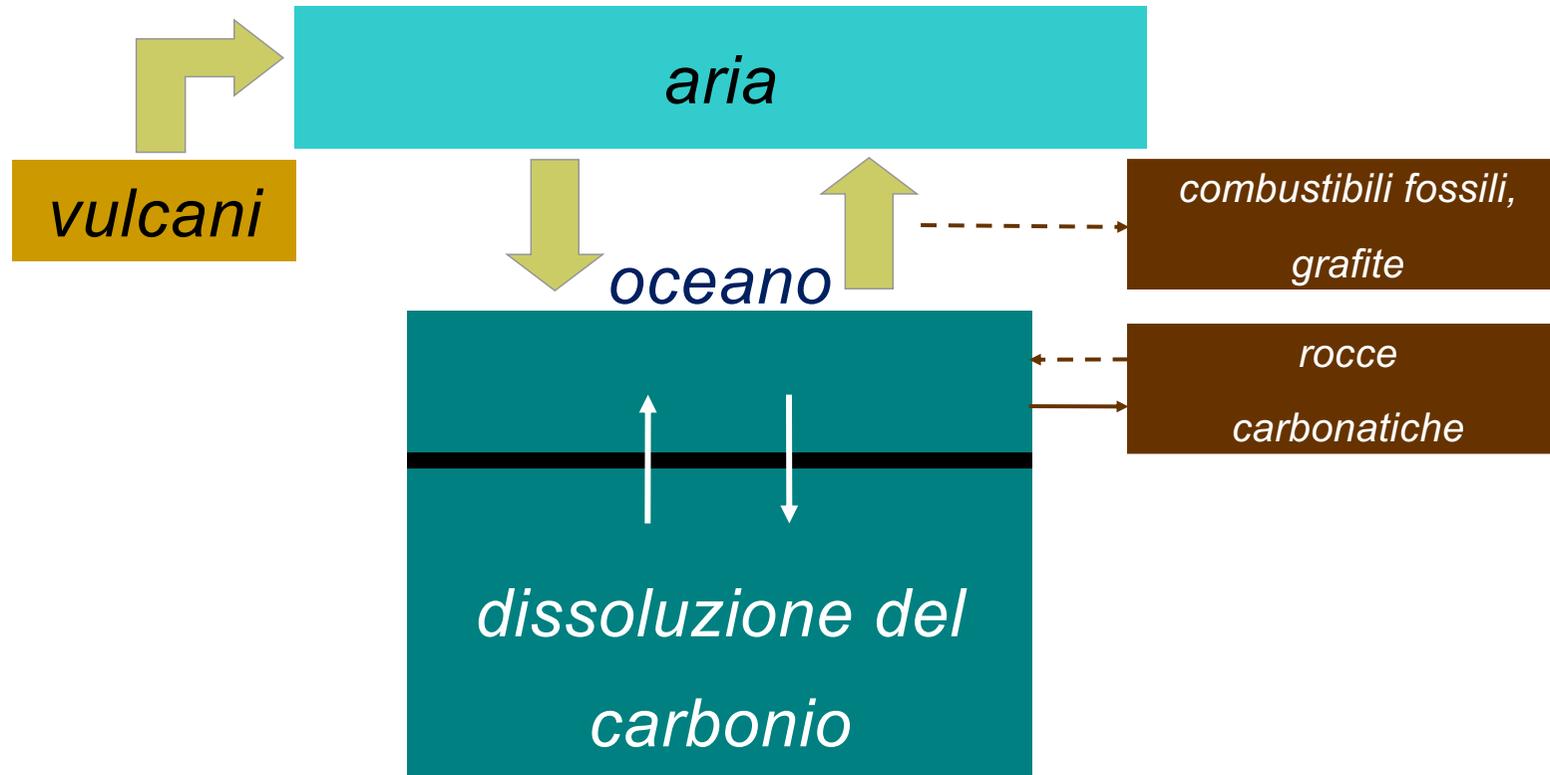
Si possono però individuare tre ordini di ciclizzazione:

1. un ciclo a breve termine tra animali e piante;
2. un ciclo che coinvolge i depositi di sostanze organiche ridotte di interesse oggi per le attività umane;
3. un ciclo tra terra e mare con durate medie assimilabili alle ere geologiche.

Un processo a lungo termine è quello dei materiali carbonatici delle conchiglie di animali marini e di organismi unicellulari come i Foraminiferi, che dopo la morte si depositano su rocce sedimentarie marine sotto forma di calcare e dolomite. Dopo milioni di anni queste rocce possono sollevarsi al di sopra del livello del mare ed esporsi così all'erosione che riporta il carbonio nei fiumi e nei laghi sotto forma di carbonato o bicarbonato, utilizzabile dagli organismi.



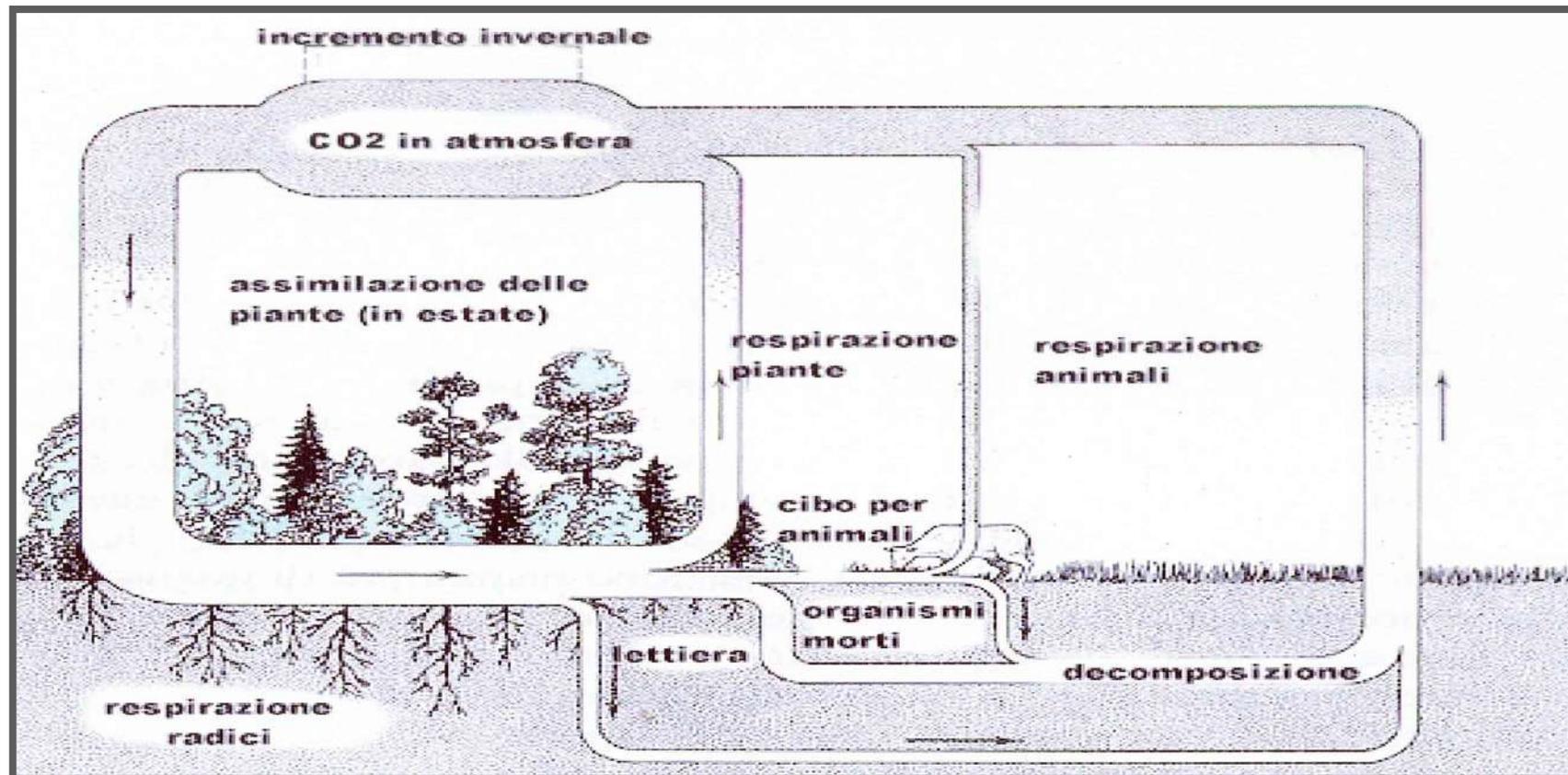
CICLO DEL CARBONIO SU SCALA GEOLOGICA



Un altro processo a lungo termine è quello che vede parte del carbonio accumulare sotto forma di materia organica non decomposta negli strati di torba degli acquitrini o delle lande, restando indisponibile per moltissimo tempo. Anche i depositi di carbone, petrolio e gas naturale, ricchi in carbonio, si sono formati allo stesso modo con la produttività netta di ecosistemi di centinaia di milioni di anni fa.

Questi combustibili fossili sono infatti ciò che rimane degli organismi che furono bruciati prima che potessero decomporsi e sono stati così trasformati dal tempo e dai processi geologici.

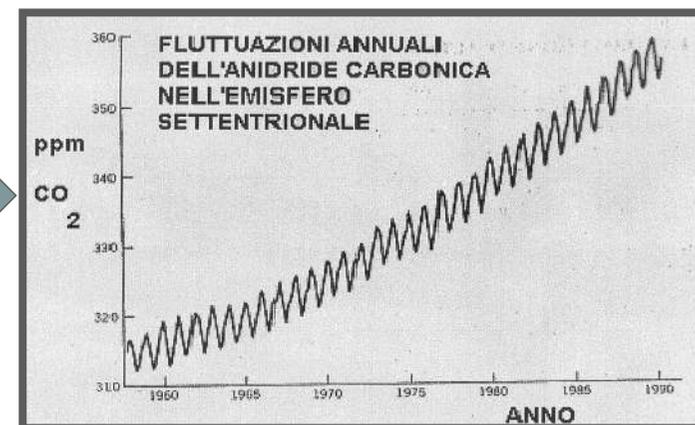
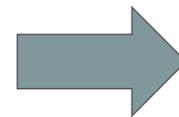
CICLO ECOSISTEMICO DELL'ANIDRIDE CARBONICA



Le piante assimilano solo d'estate, la respirazione procede tutto l'anno.

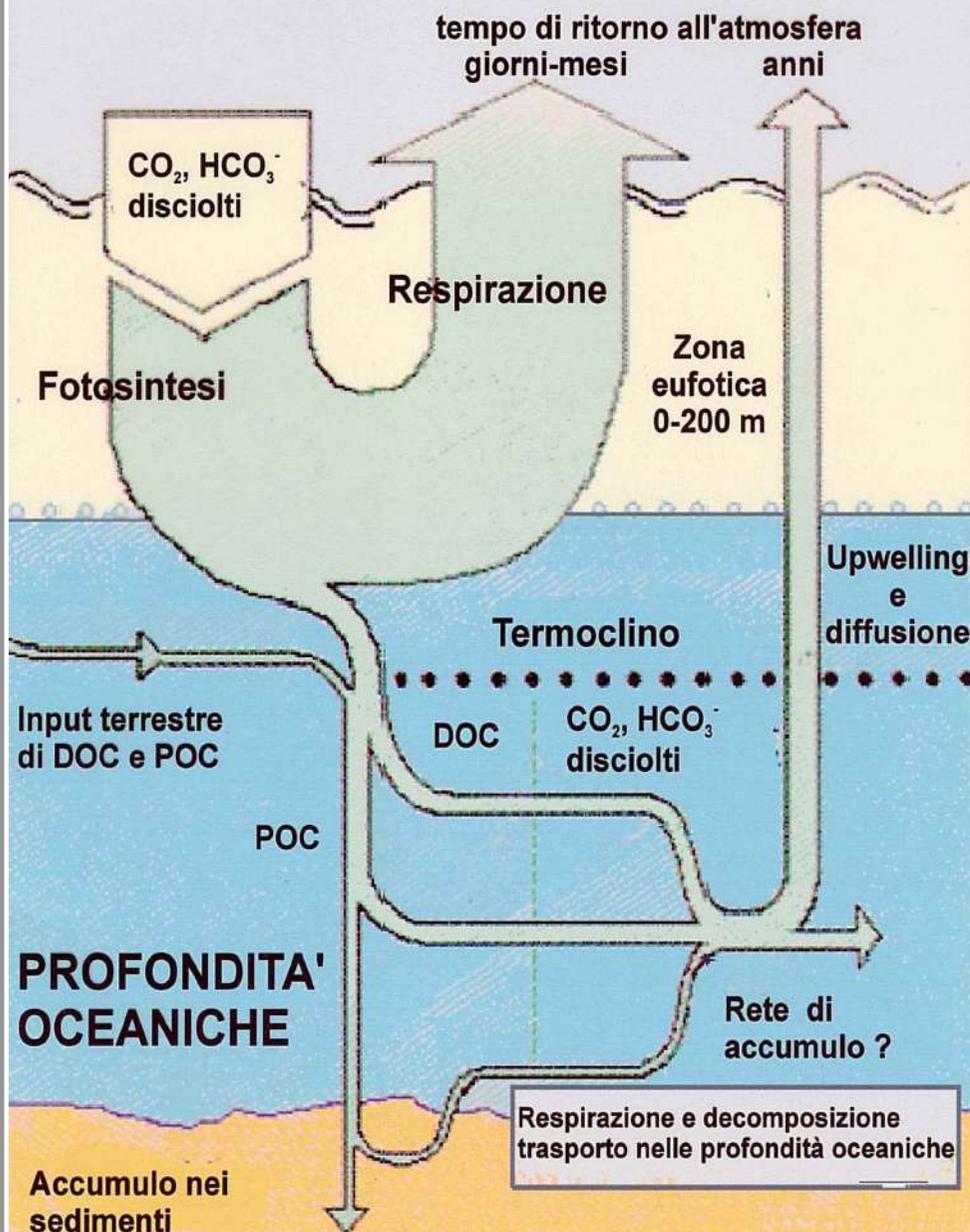
Le pulsazioni misurate a Mauna Loa riflettono la stagionalità dell'emisfero settentrionale.

Si nota anche l'aumento delle concentrazioni negli anni recenti.



ATMOSFERA

Assorbimento e rilascio di CO₂



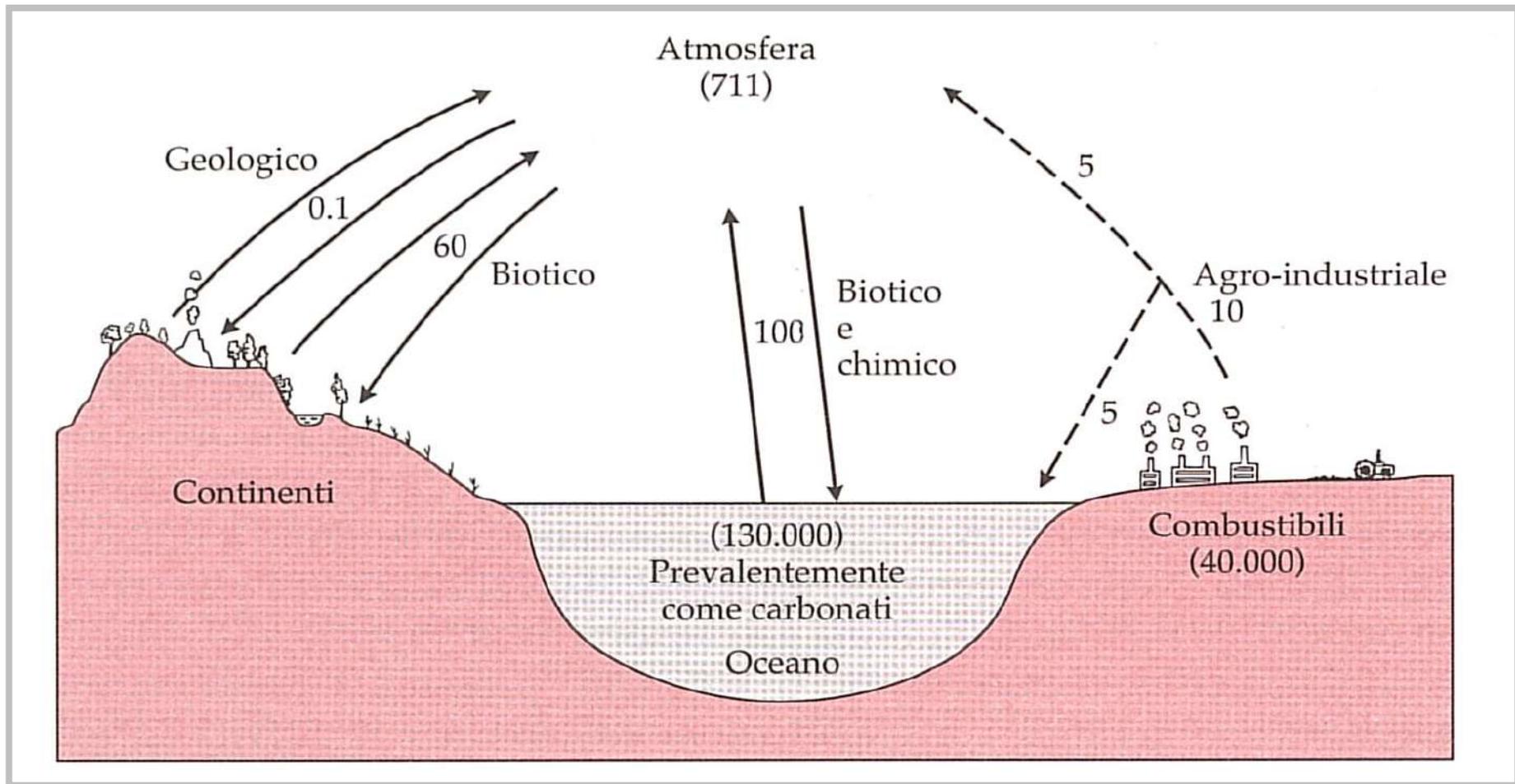
Un articolo dal titolo "*Smarrite un miliardo di tonnellate di carbonio*" cercava di spiegare, che l'uomo deve ancora imparare molto sul ciclo del carbonio nella biosfera.

La quantità di carbonio incorporata annualmente dalle piante è all'incirca della stessa dimensione di quella rilasciata dagli organismi con la respirazione.

Le attività umane rilasciano però una quantità aggiuntiva di CO₂ pari a circa *7 miliardi di tonnellate l'anno*, con la deforestazione e bruciando combustibili fossili e legname, *la metà delle quali restano nell'atmosfera*.

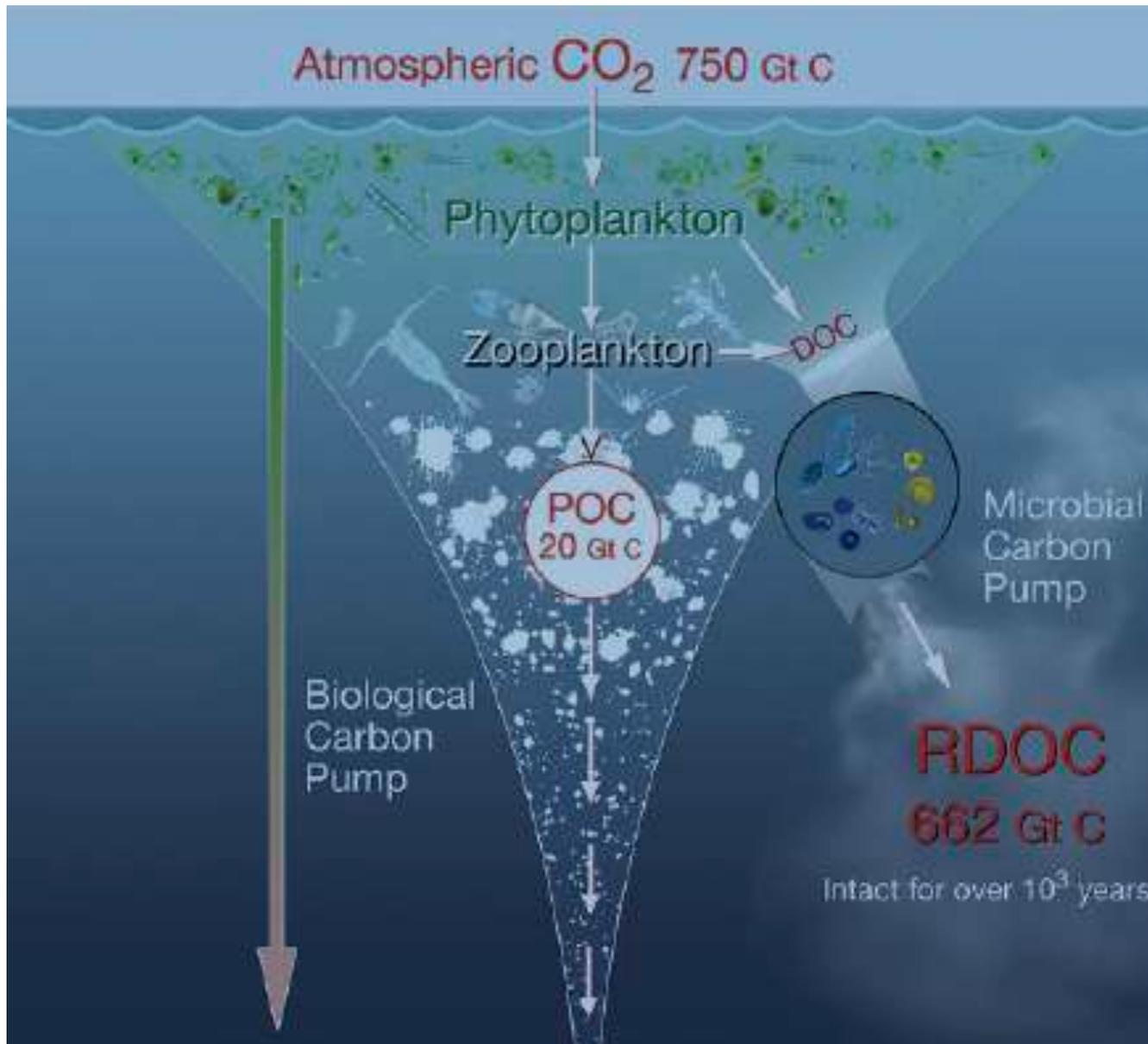
Dove vanno questi 3 o 4 miliardi di tonnellate di CO₂?

Almeno *2 miliardi di tonnellate sono disciolte negli oceani* che costituiscono quindi un importante *serbatoio* di accumulo di questa risorsa.



Quella che resta nell'atmosfera (le concentrazioni di CO₂ sono infatti in aumento) può causare fenomeni particolari quali **l'effetto serra**, che potrebbe portare ad un aumento della temperatura media terrestre in un periodo relativamente breve, alterando il clima delle varie regioni del pianeta.

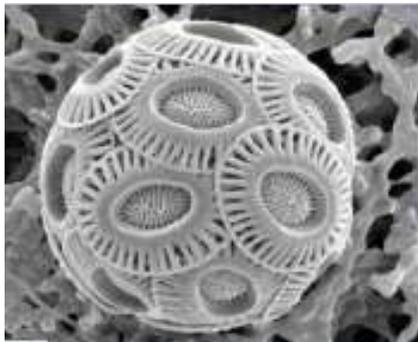
SEQUESTRO DI CO₂



L'insieme dei processi ha portato nel corso del tempo ad immagazzinare negli oceani un quantitativo di carbonio sotto forma di DOC quasi pari alla CO₂ atmosferica.

Le attività antropiche producono circa 30 Gt all'anno.

POMPA BIOLOGICA (CARBONATE PUMP)



Molti organismi marini inglobano CO_2 anche sotto forma di carbonato di calcio.

Questo costituisce gran parte delle strutture calcaree di molluschi, echinodermi, spugne e organismi fitoplanctonici (coccolitoforidi).



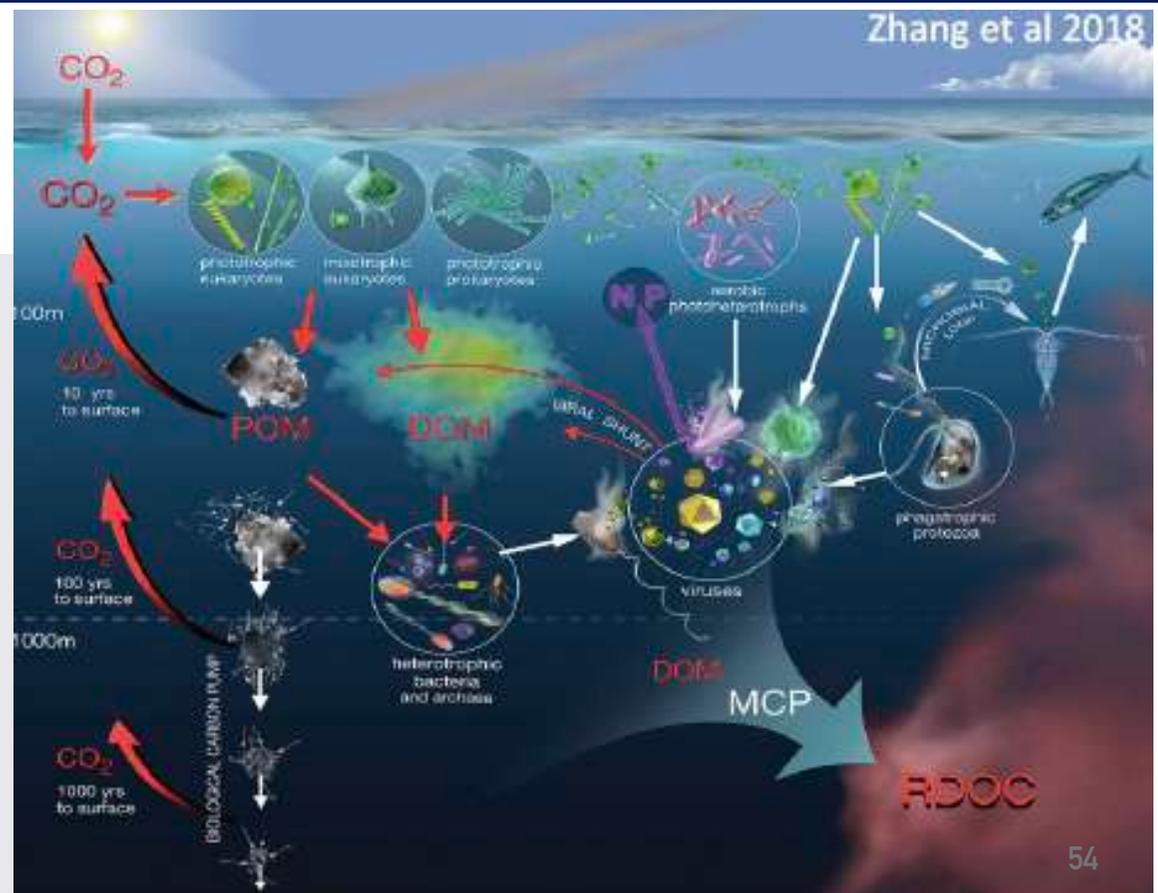
Nella zona eufotica gli organismi fotosintetizzanti fissano la CO_2 e producono sostanza organica.

Questa è utilizzata dagli eterotrofi che producono nuovamente CO_2 .

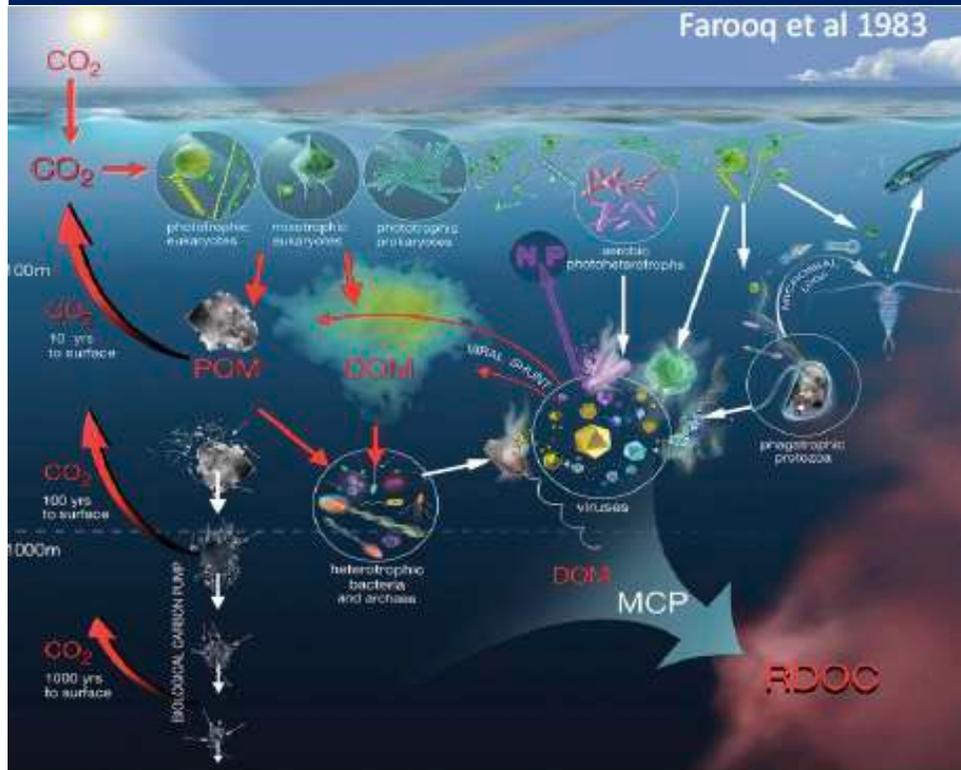
Una piccola parte della POM affonda e raggiunge il fondo venendo incorporata dal sedimento.

Da qui può essere utilizzata dal benthos del sedimento oppure restare intrappolata nella matrice spostando carbonio dalla superficie al fondo degli oceani.

POMPA BIOLOGICA (SOFT PUMP)



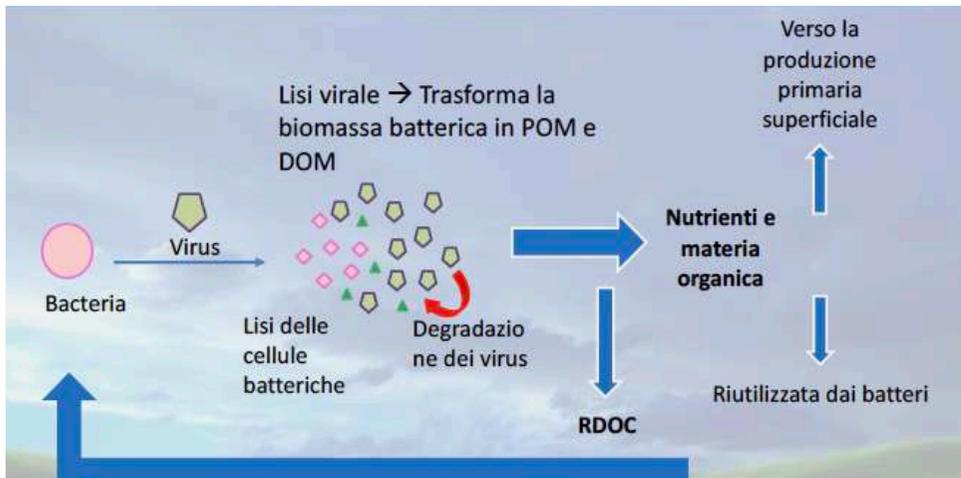
MICROBIAL LOOP & MICROBIAL CARBON PUMP



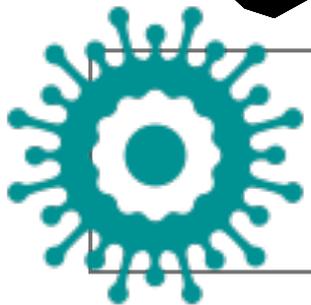
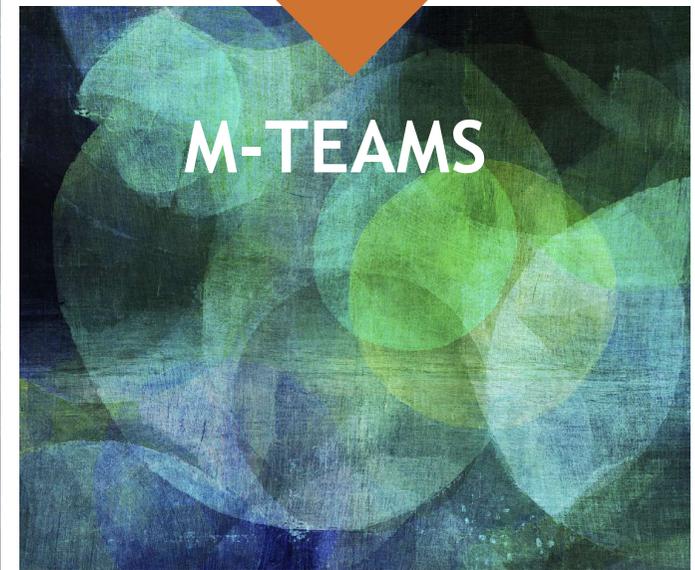
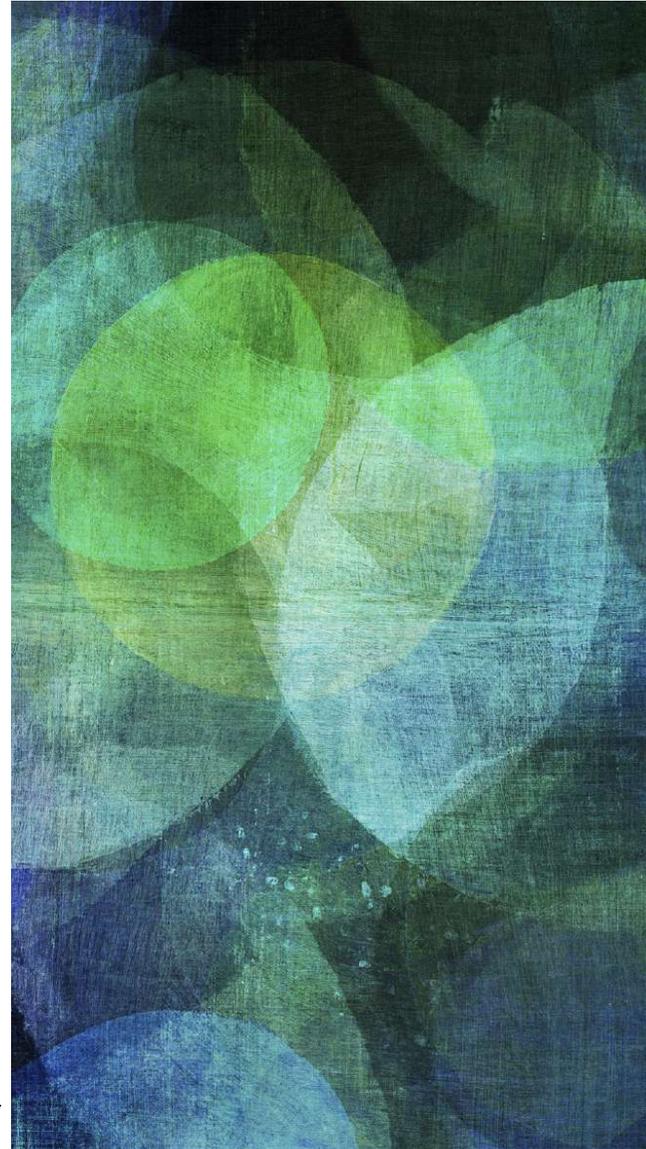
Il loop microbico è un circuito trofico nel quale la sostanza organica disciolta e quella particolata sono intercettate e incorporate nella biomassa batterica.

Questo consente alla sostanza organica di essere disponibile per gli organismi eterotrofi del plancton e rientrare nel circuito superficiale.

La pompa microbica media la trasformazione della sostanza organica labile in sostanza organica refrattaria (lignina) che costituisce la maggior parte del DOC (662 Gt C) negli oceani e persiste per millenni (4000-6000 anni).



La viral shunt rilascia a scala globale 37-50 milioni t C/y rappresentando una sorgente labile di C molto importante per i sistemi marini profondi.



DOMANDE??