

CICLI BIOGEOCHIMICI

**Un viaggio nella Natura
con gli elementi chimici**

F. Zammarchi e C. Mazzocchi
Liceo LEONARDO Brescia

1

INDICE

primo livello

Descrizione dei cicli ad un livello base: Vengono illustrati sinteticamente i vari cicli degli elementi presi in considerazione dandone una semplice descrizione d'insieme.

secondo livello

Alcune alterazioni dei cicli: In questo livello si vuole evidenziare la criticità dei cicli e sottolineare come l'uomo entri con la sua azione nella dinamica di flusso degli elementi chimici e ne alteri vistosamente l'equilibrio frutto di un lento divenire naturale!

terzo livello

Descrizione dei principali processi chimico-biologici nei cicli degli elementi descritti: vengono approfonditi alcuni aspetti che caratterizzano le dinamiche chimico-biologiche di alcuni elementi, evidenziando l'azione dei microrganismi attivi nelle varie fasi.

FLUSSI ED ECOSISTEMI

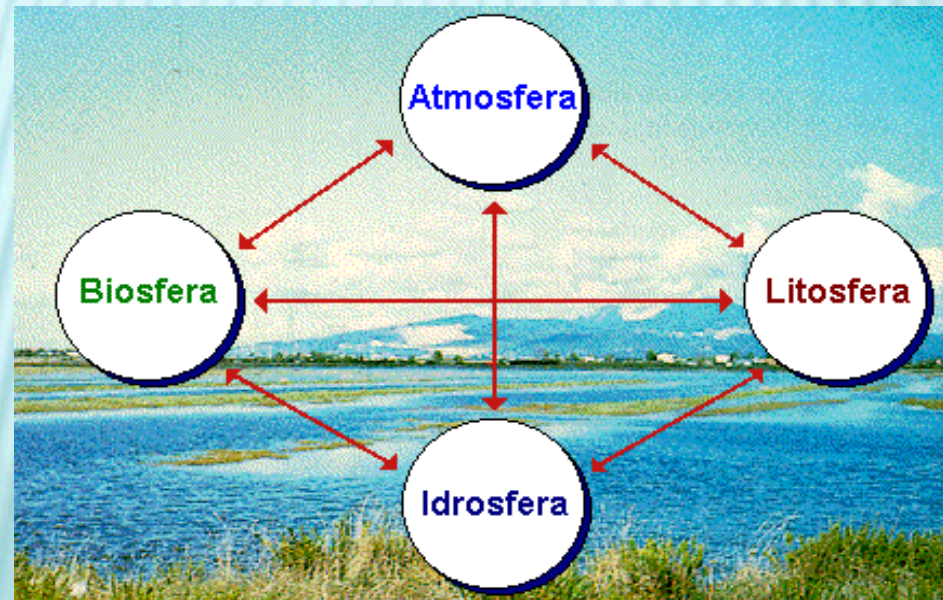
Ogni ecosistema è condizionato sempre e comunque da due variabili fondamentali:

- **Flusso di energia:** è il passaggio dell'energia all'interno dei viventi dal sole, fonte primaria (energia radiante), agli organismi (energia chimica). Ad ogni passaggio la sua entità diminuisce e non viene riciclata, quindi deve la sua azione solo al fatto che esiste una fonte primaria (il sole) o eccezionalmente alcune sorgenti geotermali.
- **Riciclaggio delle sostanze nutritive:** nelle reti alimentari anche le più semplici, i produttori fissano l'energia e gli elementi chimici sottoforma di vegetali; gli anelli successivi, consumatori primari (gli erbivori) e consumatori secondari (i carnivori) trasformano gli elementi chimici in altre molecole, (gli animali), che consumano l'energia disponibile contenuta nelle macromolecole. Solo l'intervento degli organismi detritivori ed alcune reazioni chimiche inorganiche permettono di riciclare gli elementi che altrimenti si esaurirebbero in tempi ridotti.

FLUSSI ED ECOSISTEMI

Le sostanze chimiche eseguono un movimento ciclico negli ecosistemi passando di volta in volta da un ambiente biotico (dei viventi), ad un ambiente abiotico (il suolo, l'acqua o l'aria). Atmosfera, litosfera e biosfera interagiscono quindi per formare un sistema di componenti che si reggono su equilibri chimico-fisico-biologici delicati.

L'Ecosistema è l'espressione di quest'unità che funziona in modo organico ed integrato $\Rightarrow$ "Ipotesi di Gaia"
(James Lovelock e Lynn Margulis, anni '70)



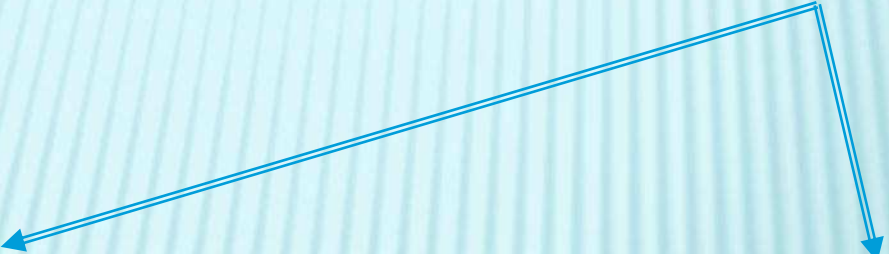


Gaia...la nostra casa

DEFINIZIONI

Il ciclo biogeochimico è il percorso seguito da un determinato elemento chimico all'interno della biosfera.

In ogni ciclo è possibile distinguere due comparti:



- × **un pool di riserva**, grande e stabile, dove l'elemento non è immediatamente disponibile per gli organismi e gli scambi sono poco attivi

- × **un pool di scambio**, labile, di dimensioni ridotte ma circolante attivamente, in cui l'elemento è disponibile per gli organismi e gli scambi tra questi e l'ambiente sono molto più attivi

Tipi di cicli

In base alla dislocazione del pool di riserva, i **cicli biogeochimici** vengono distinti in:

gassosi, se il pool di riserva è l'atmosfera o l'idrosfera

ciclo dell'acqua

ciclo dell'azoto

ciclo del carbonio

sedimentari, se il pool di riserva è la litosfera

ciclo del fosforo

ciclo dello zolfo

I GEOSISTEMI

I cicli attraversano diversi sistemi del pianeta Terra:

- **Atmosfera** ➡ è l'involucro di gas che circonda la Terra ed è costituito da ossigeno, azoto ed altri componenti gassosi; nei primi dieci chilometri (troposfera), avvengono le più importanti interazioni con i viventi.
- **Idrosfera** ➡ è costituita dal complesso delle acque, che coprono i sette decimi della superficie terrestre.
- **Litosfera** ➡ è l'involucro esterno rigido della terra, con spessore di 5-150 Km, suddiviso in placche mobili.
- **Biosfera** ➡ è l'insieme delle zone della Terra nelle quali troviamo i viventi.

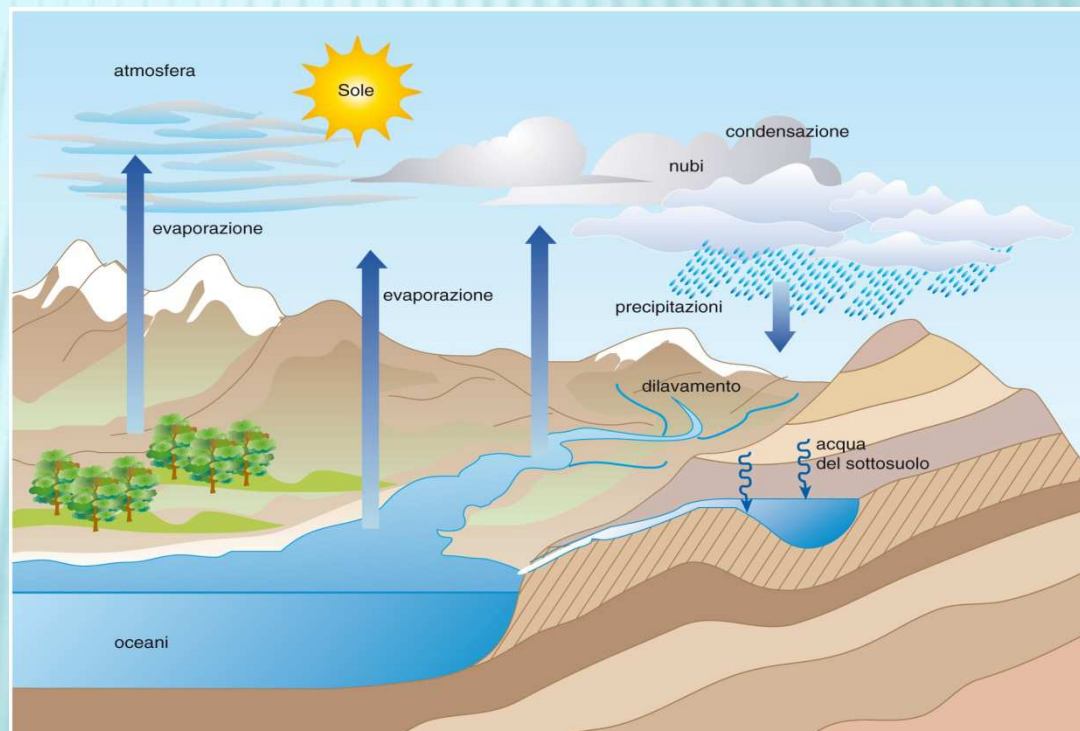
L'insieme delle quattro componenti (sfere) costituisce
l'**Ecosfera**.

CICLO DELL'ACQUA

Il ciclo dell'acqua è un ciclo “gassoso” che consiste nella circolazione dell'acqua tra l'atmosfera, la Terra, le acque superficiali, le acque sotterranee e gli organismi viventi.



In questi passaggi l'acqua cambia di stato fisico passando dalla fase solida, liquida e gassosa. E' importante sottolineare l'entità delle masse in gioco per percepirne la dinamica; il pool di riserva infatti è costituito dagli oceani.



CICLO DELL'ACQUA

L'acqua
negli
ambienti
terrestri



DISTRIBUZIONE DELL'ACQUA SULLA TERRA

- × Oceani e mari **97,3%**
- × Ghiacciai e ghiaccio polare **2,1%**
- × Laghi e corsi d'acqua **0,01%**
- × Acquiferi sotterranei **0,6%**
- × Atmosfera **0,001%**
- × Biosfera **0,00004%**

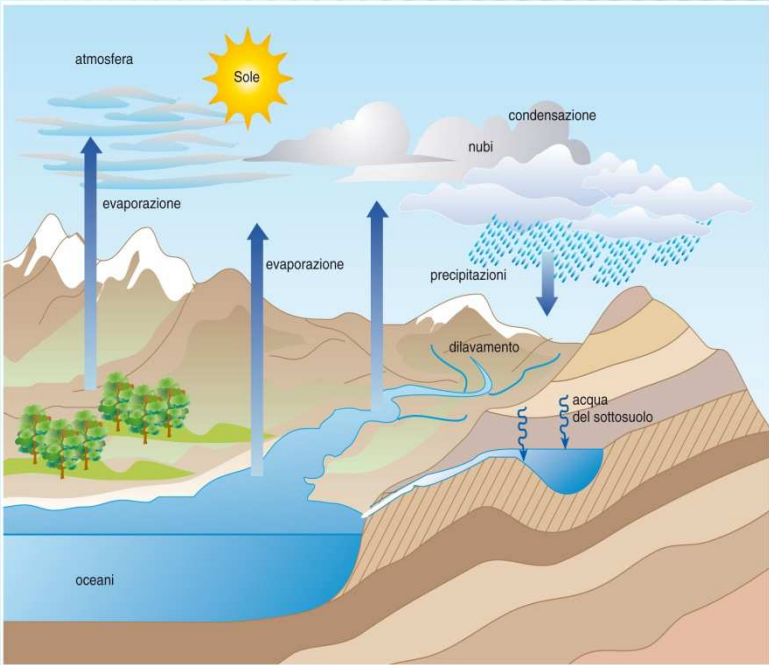
Ruolo del Sole nel ciclo

L'insieme dei passaggi dell'acqua dai mari e dagli oceani, all'atmosfera, alle terre emerse, e ritorno agli oceani, comporta passaggi dello stato fisico dell'acqua. Il grande motore di questi flussi è il **Sole** con la sua costante e smisurata energia. (1350W/m^2 al limite superiore dell'atmosfera).

Il totale dell'energia solare che raggiunge la superficie terrestre ammonta a **$6,15 \times 10^{20}$ kcal per anno** (615 miliardi di miliardi).

Il ciclo dell'acqua ne assorbe circa la metà, la stessa quantità viene poi ceduta in processi diversi ai quali va incontro nei vari passaggi.

PASSAGGI NEL CICLO DELL'ACQUA

- ✖ Evaporazione dalle superfici marine/oceaniche
 - ✖ Condensazione nell'atmosfera
 - ✖ Precipitazione: pioggia, neve e ghiaccio
- 
- Il diagramma illustra il ciclo dell'acqua in un paesaggio con montagne, laghi e oceani. Le etichette in italiano indicano: 'atmosfera' (atmosfera), 'Sole' (Sole), 'evaporazione' (evaporazione), 'condensazione' (condensazione), 'nubi' (nubi), 'precipitazioni' (precipitazioni), 'dilavamento' (dilavamento), 'acqua del sottosuolo' (acqua del sottosuolo) e 'oceani' (oceani). Le frecce blu mostrano l'evaporazione che porta l'acqua dalle superfici marine e terrestri nell'atmosfera, la condensazione che forma le nuvole, le precipitazioni che ricadono sulla terra e in mare, il dilavamento che scorre lungo le superfici, e l'infiltrazione che ricarica le falde sotterranee.
- ✖ Infiltrazione nel suolo e costituzione della falda acquifera
 - ✖ Deflusso superficiale: fiumi, laghi
 - ✖ Chiusura del ciclo con nuova evaporazione

Alcune varianti al ciclo classico dell'acqua

Si possono individuare alcune varianti che si caratterizzano per una diversa velocità di ritorno al mare/oceano.

1. Flusso dalla terraferma all'atmosfera e ritorno senza passare dal mare (**Terra → aria** e **aria → Terra**).

2. Flusso di acqua dal mare all'atmosfera e repentino ritorno (**mare → atmosfera** e **atmosfera → mare**).

3. L'acqua condensa nelle nubi ed evapora senza toccare terra (**atmosfera → atmosfera**).

Evapotraspirazione

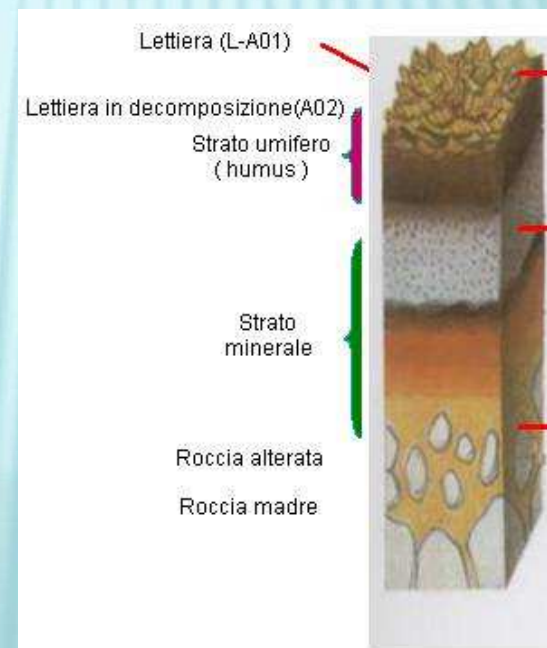
La traspirazione delle piante, necessaria per effettuare la fotosintesi, permette il ritorno di una notevolissima quantità di acqua nell'atmosfera. Le piante infatti sono classificabili anche tenendo conto della loro esigenza in acqua. (Il mais ad esempio è una pianta molto avida d'acqua: consumo medio giornaliero $40\text{m}^3/\text{ha}$).



Percolazione nei suoli

L'acqua nel sottosuolo attraversa strati di terreno e rocce con permeabilità e porosità diverse a seconda della loro genesi pedologica e geologica. La discesa verticale si interrompe quando viene raggiunto uno strato impermeabile generalmente costituito da roccia madre o strati argillosi. Da evidenziare il fatto che le acque di falda costituiscono il 98% delle acque dolci disponibili per l'uomo.

Struttura del suolo

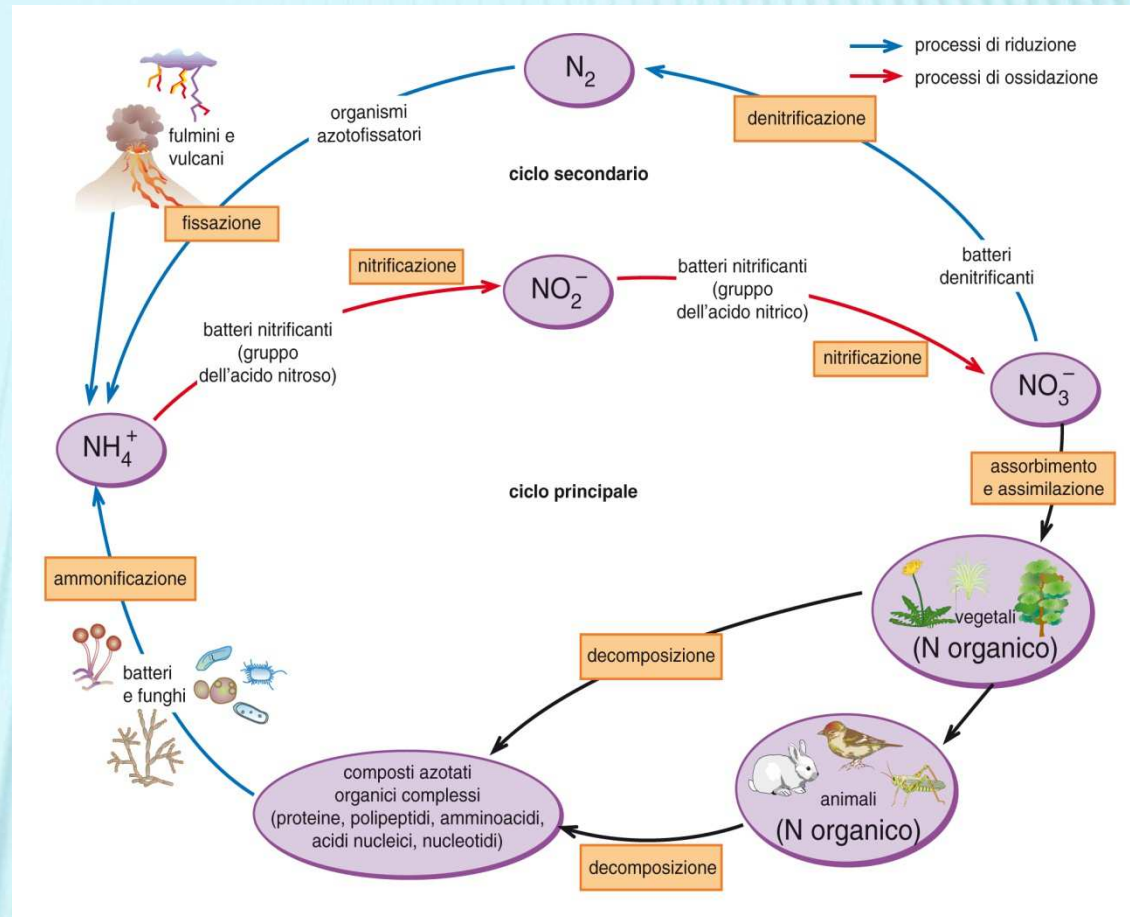


Permeabilità e porosità del suolo

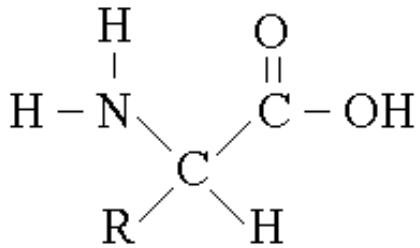
Tipo di sedimento	Porosità (% di spazio libero)	Permeabilità (capacità di lasciarsi attraversare dall'acqua)
Ghiaia media	Molto alta	Molto alta
Sabbia a grana grossa	Alta	Alta
Sabbia a grana fine	Moderata	Bassa
Arenaria media	Moderata bassa	Bassa
Argille fessurate	Bassa	Molto bassa
Argille	Molto bassa	Bassissima

CICLO DELL'AZOTO

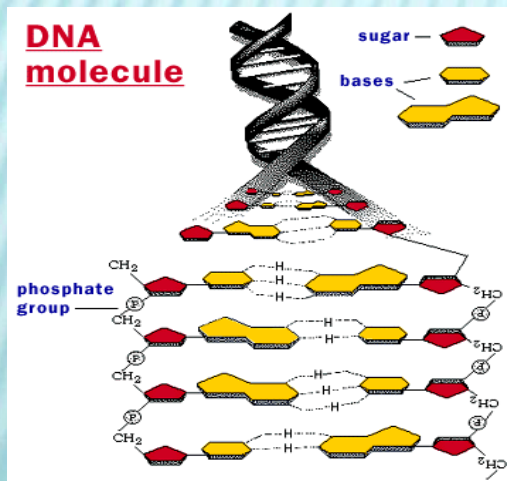
- × Questo ciclo viene definito gassoso poiché il pool di riserva, cioè il serbatoio di questo elemento chimico, è appunto l'atmosfera, dove l'azoto occupa circa il 78 % del volume totale.
- × Tutti gli esseri viventi devono assimilare l'azoto per la formazione di composti organici vitali, quali le **proteine** e gli **acidi nucleici**.
- × Ad eccezione di particolari batteri, l'azoto atmosferico non può però essere direttamente assorbito dall'atmosfera.



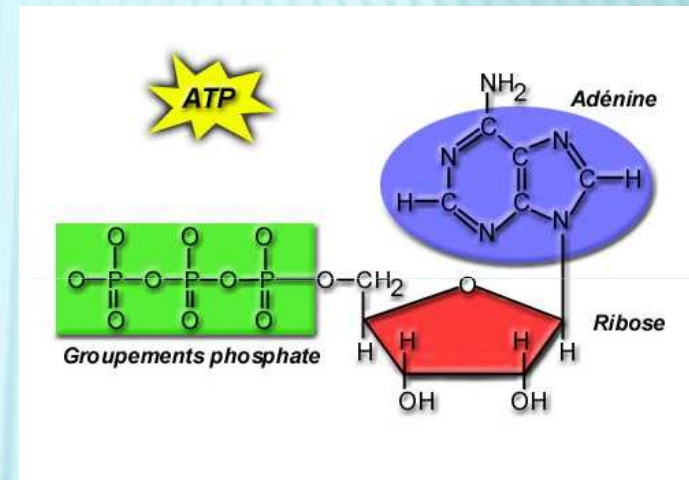
Le biomolecole contenenti azoto



Amminoacido, monomero delle proteine



Il DNA è un polimero di deossiribonucleotidi

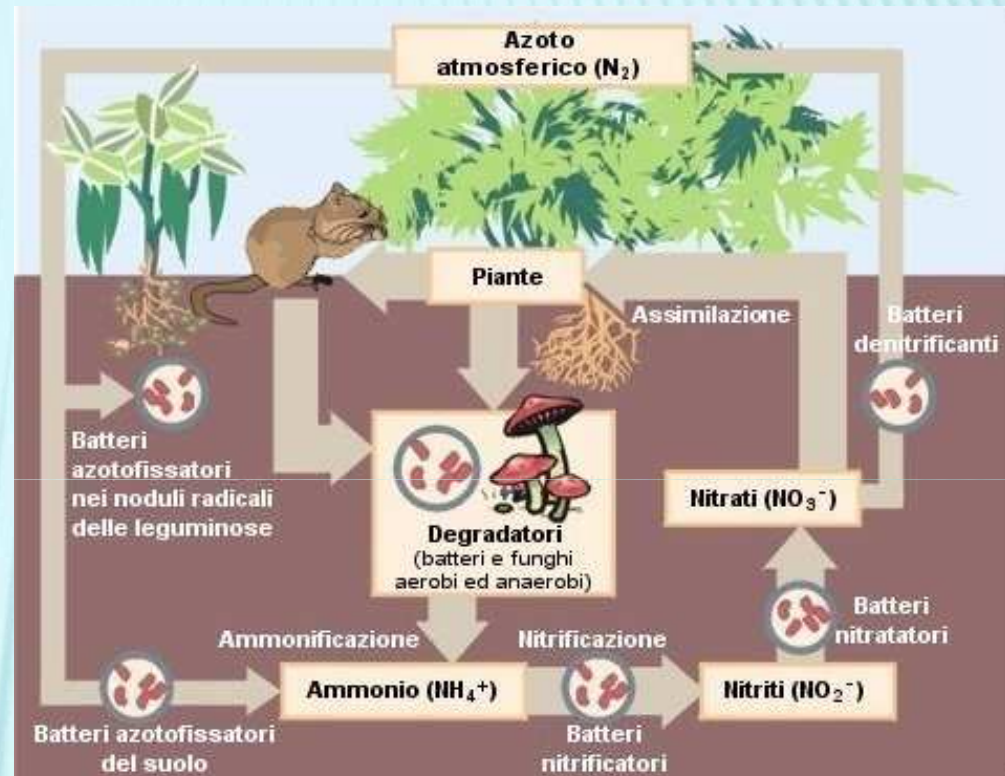


Adenosintrifosfato, un ribonucleotide anche monomero dell'RNA

PARTIZIONE DEL CICLO DELL'AZOTO

Il ciclo in sintesi si può suddividere in più passaggi:

- × **Fissazione abiologica:** fulmini e fenomeni geologici, (azoto juvenile)
- × **Fissazione biologica:** azotofissazione biochimica ad opera di microorganismi
- × **Ammonificazione:** trasformazione in ioni ammonio
- × **Nitrificazione:** trasformazione in ioni nitrito e nitrato
- × **Assimilazione:** organicazione da parte delle piante
- × **Denitrificazione:** da parte di microorganismi: chiusura ciclo



FISSAZIONE CHIMICA

E' operata dai fulmini che, quando si scaricano a terra durante le precipitazioni temporalesche, forniscono energia per far reagire l'azoto (N_2) con l'ossigeno (O_2) o con l'idrogeno (H_2) e formare ossidi di azoto (NO_x) o ammoniaca (NH_3). Annualmente si calcola che grandi quantitativi di azoto sono fissati da questo processo abiologico (10% dell'azoto fissato).

FISSAZIONE BIOLOGICA

Nelle reazioni biochimiche catalizzate dagli enzimi nitrogenasi dei microorganismi, i legami dell'azoto (molto stabili) sono resi reattivi da una serie di trasformazioni a catena che sinteticamente vengono rappresentate dall'equazione generale:



Lo ione ammonio (NH_4^+) viene poi utilizzato dagli organismi per i processi di biosintesi.

MINERALIZZAZIONE

Comprende tutti i processi che avvengono nel terreno e che trasformano l'azoto fissato nelle varie molecole disponibili e assimilabili per le piante.

Ammonificazione: comporta la degradazione biochimica dell'azoto in ammoniaca e ioni ammonio dalla trasformazione biochimica dei resti degli organismi in decomposizione/putrefazione.

Nitrificazione: avviene tramite batteri nitrificatori (formano nitriti) e nitratatori (formano nitrati).

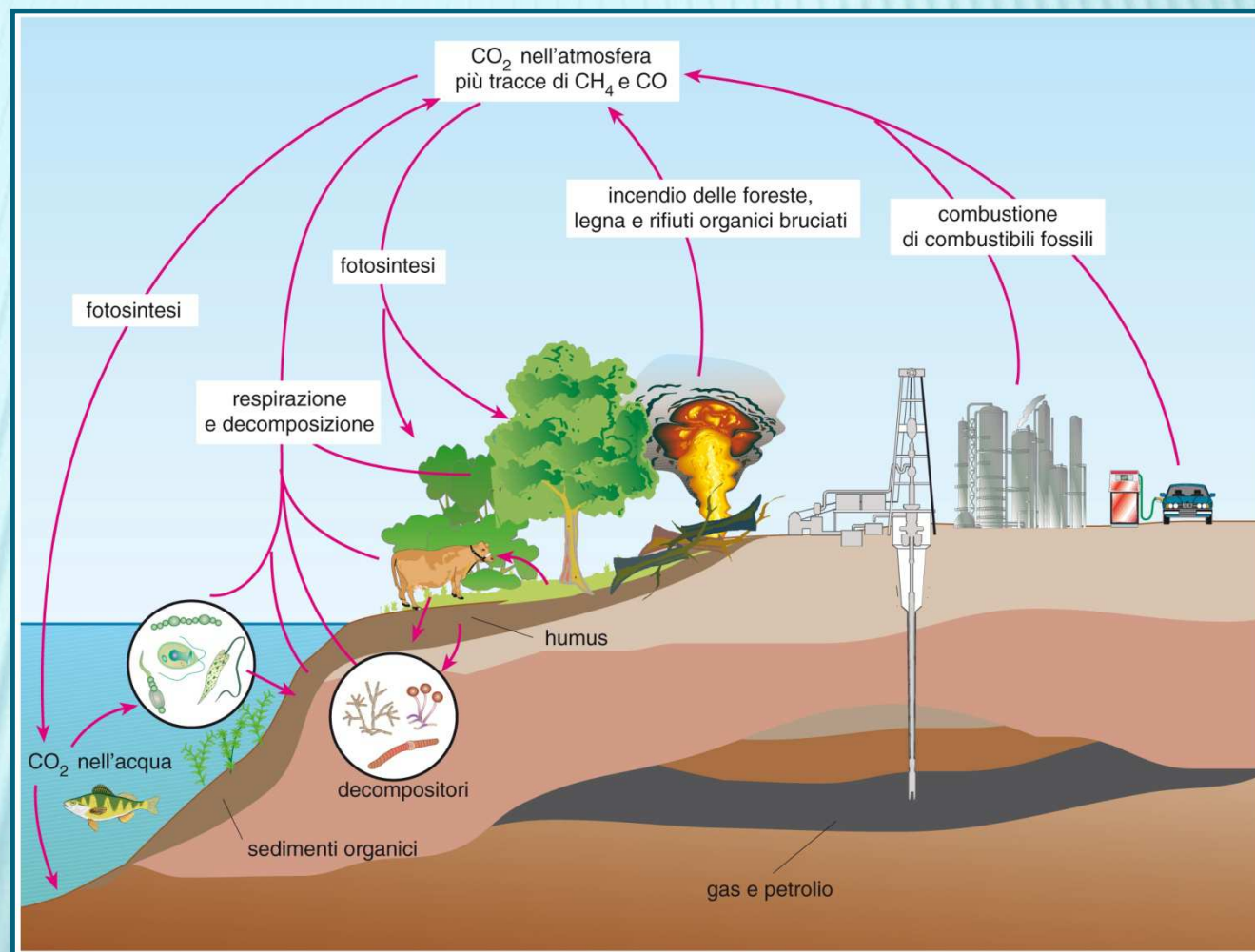
DENITRIFICAZIONE

E' un importante processo chimico/biochimico di chiusura del ciclo dell'azoto che comporta, come risultato finale, il ritorno dell'elemento chimico nell'atmosfera (pool di riserva gassoso).

E' presieduto da batteri del genere **Pseudomonas** e **Clostridium** in condizioni di anaerobiosi (assenza di ossigeno).

CICLO DEL CARBONIO

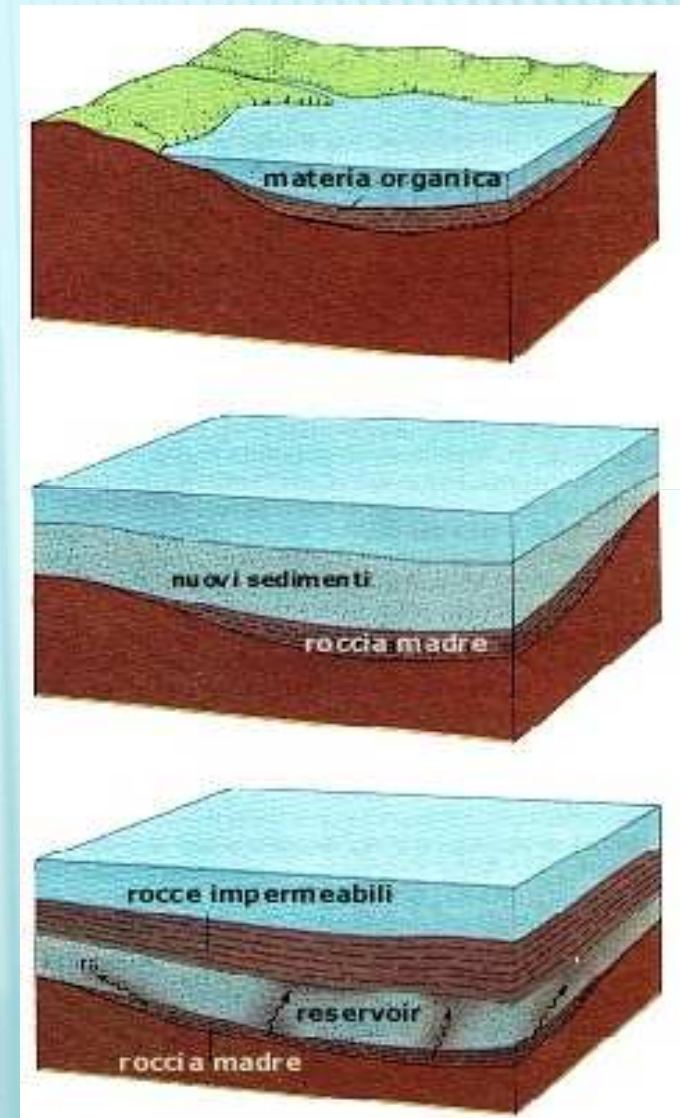
Il Carbonio è l'elemento cardine dei viventi, quindi il suo ciclo è molto importante perché strettamente dipendente dai processi di fotosintesi e respirazione e coinvolge l'intera biosfera.



Idrocarburi

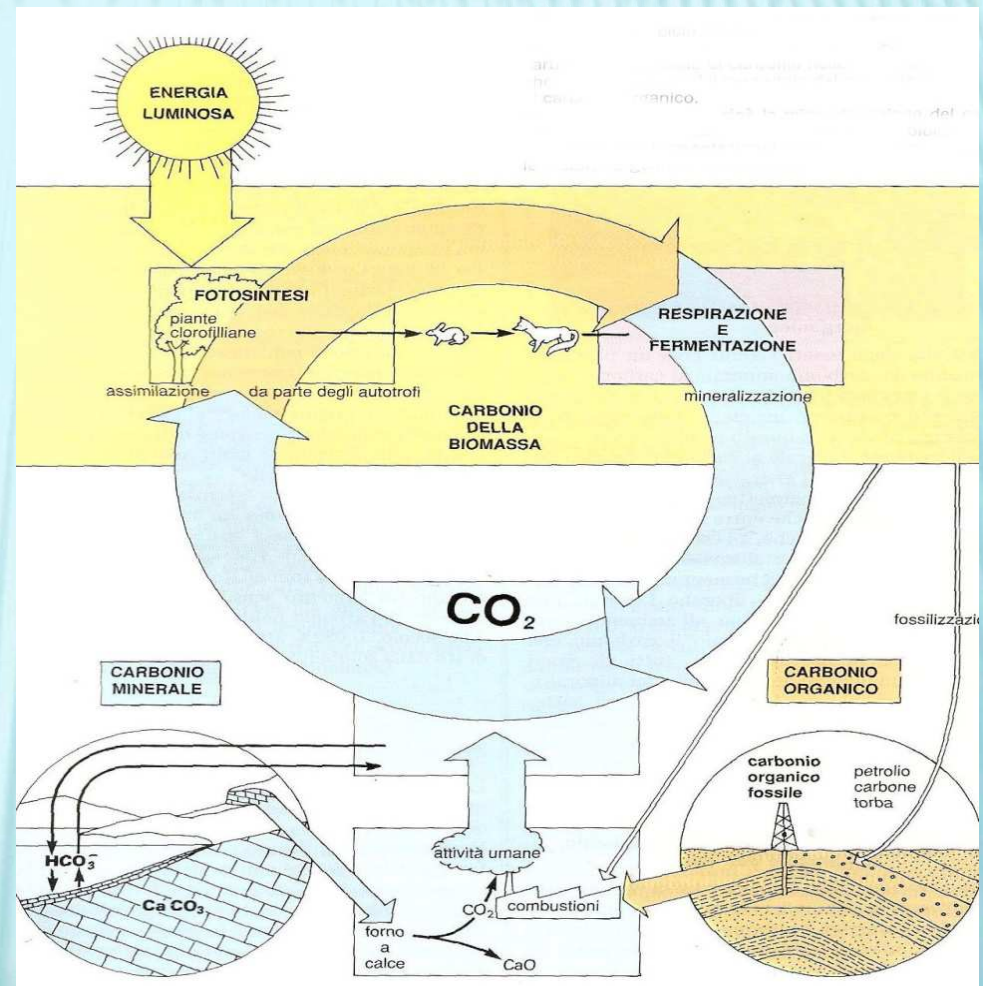
La fotosintesi costituisce il mezzo di fissazione organica del carbonio che viene trasformato in macromolecole organiche che costituiscono tutti gli esseri viventi. Con la respirazione e decomposizione della materia organica la CO_2 viene restituita all'atmosfera e il ciclo generale si chiude. Una variante fondamentale al ciclo è la costituzione di depositi di idrocarburi che, formatisi da complessi processi chimici e biochimici in milioni di anni, ne interrompe la rapida chiusura.

Sia l'atmosfera che gli oceani costituiscono il pool di riserva del carbonio; gli organismi sono un anello d'unione tra questi due grandi geosistemi.



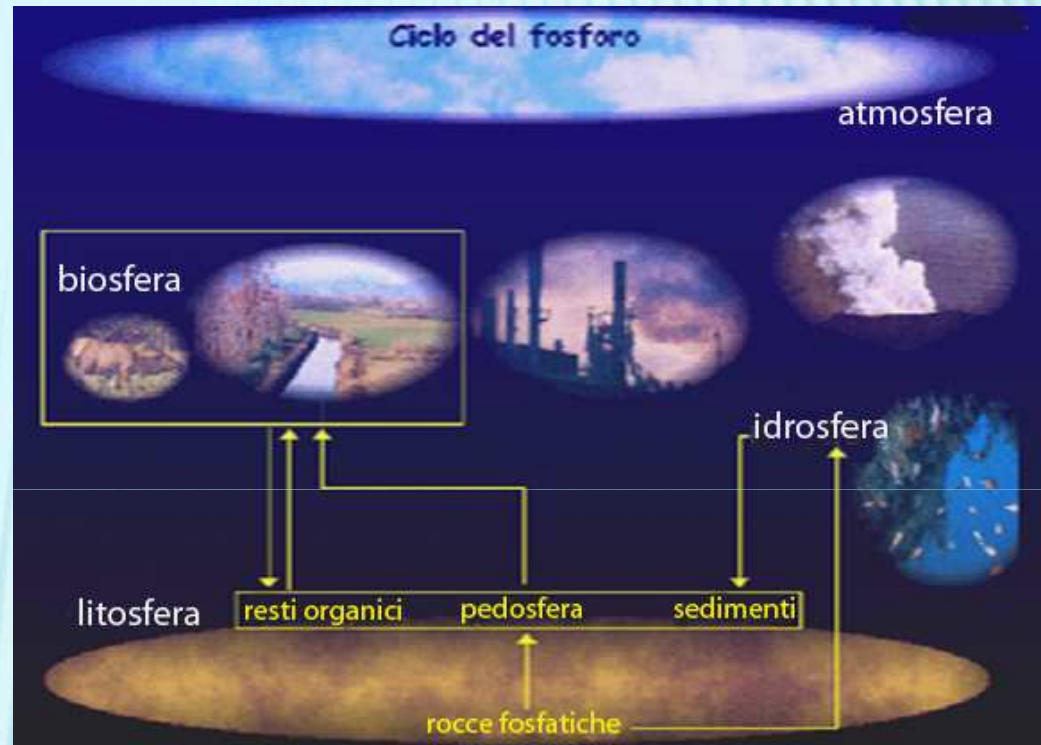
EQUILIBRIO DEL CICLO DEL CARBONIO

La stretta relazione tra fotosintesi e respirazione farebbe supporre una sostanziale uguaglianza tra la CO₂ che viene fissata dalle piante e la CO₂ emessa dagli animali. Di fatto l'intervento dell'attività umana sul ciclo, negli ultimi 200 anni, ha fortemente alterato questo delicato equilibrio portando ad un sensibile aumento della CO₂ nell'atmosfera provocando il noto "effetto serra".



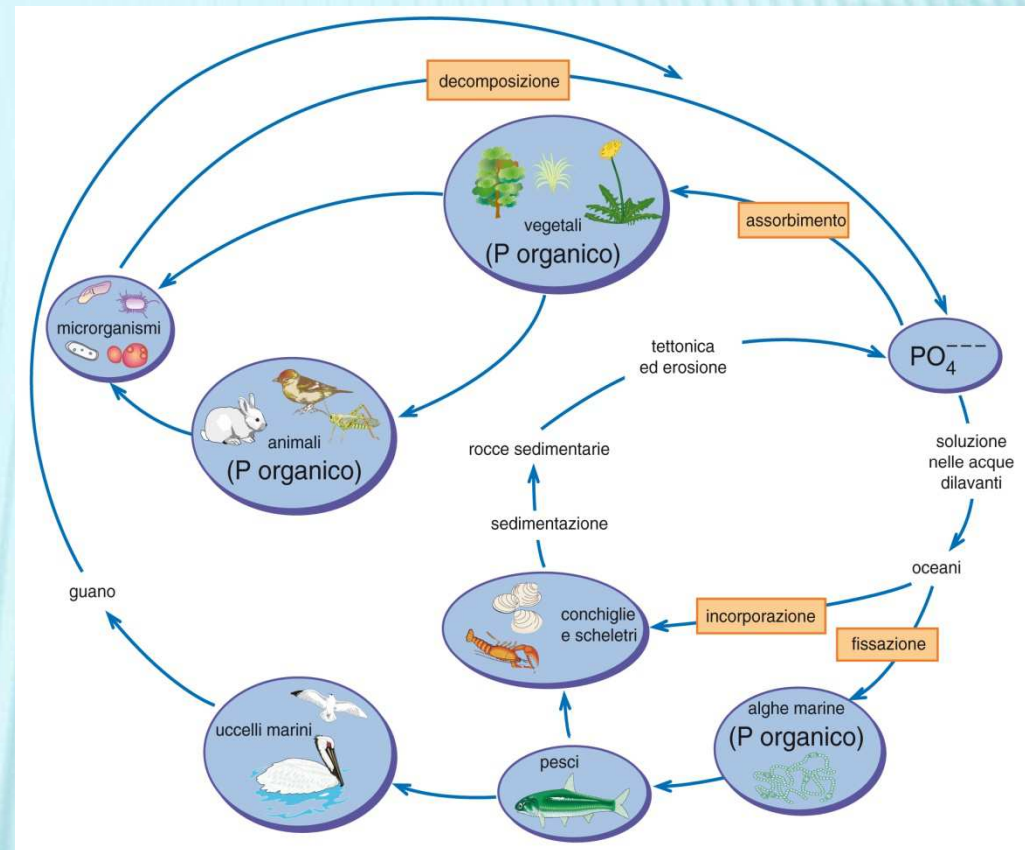
CICLO DEL FOSFORO

- × Il fosforo è necessario agli organismi così come l'azoto e il potassio sebbene in modo diversificato.
- × Viene veicolato lentamente poiché gradualmente liberato nell'acqua a seguito della disgregazione delle rocce che lo contengono.
- × I fosfati disciolti nell'acqua circolante sulle micelle del suolo vengono assorbiti dalle radici delle piante e passano attraverso le catene alimentari per arrivare infine ai decompositori.
- × Il fosforo contenuto nel suolo viene in parte dilavato dallo scorrimento delle acque piovane e raggiunge gli oceani costituendo il materiale del sedimento marino.
- × Con lo scorrere del tempo geologico, i sedimenti andranno incontro a processi di disgregazione e trasformazione chimica e biochimica così da completare il ciclo dell'elemento e verrà nuovamente rimesso in circolazione.

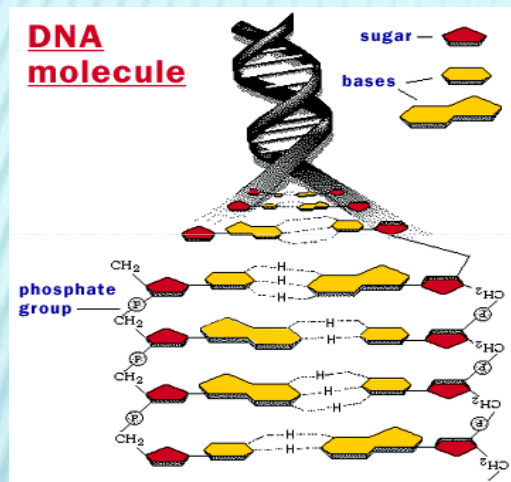


SINTESI DEL CICLO DEL FOSFORO

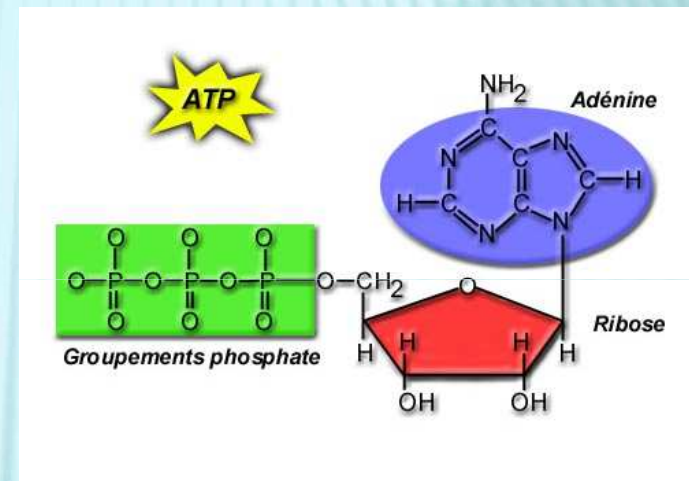
- **Dilavamento dei fosfati dalle rocce (mediante agenti atmosferici).**
- **Assimilazione da parte dei vegetali (sottoforma di fosfati)**
- **Passaggio nelle catene/reti alimentari.**
- **Sedimentazione nei fondali (processi di dilavamento operato dalle acque).**
- **Costituzione del pool di riserva (rocce fosfatiche), in tempi geologici.**
- **Chiusura del ciclo con la formazione delle rocce fosfatiche: può rimanere “bloccato” per tempi lunghissimi.**



Le biomolecole contenenti fosforo



Acido deossiribonucleico



Adenosintrifosfato

FOSFORO E AGRICOLTURA

Il ciclo del fosforo è tipicamente sedimentario in quanto il pool di riserva è identificabile con le rocce che lo contengono. L'apatite, $\text{Ca}_5[(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})/(\text{PO}_4)_3]$, costituisce la fonte principale per di fosforo in agricoltura.

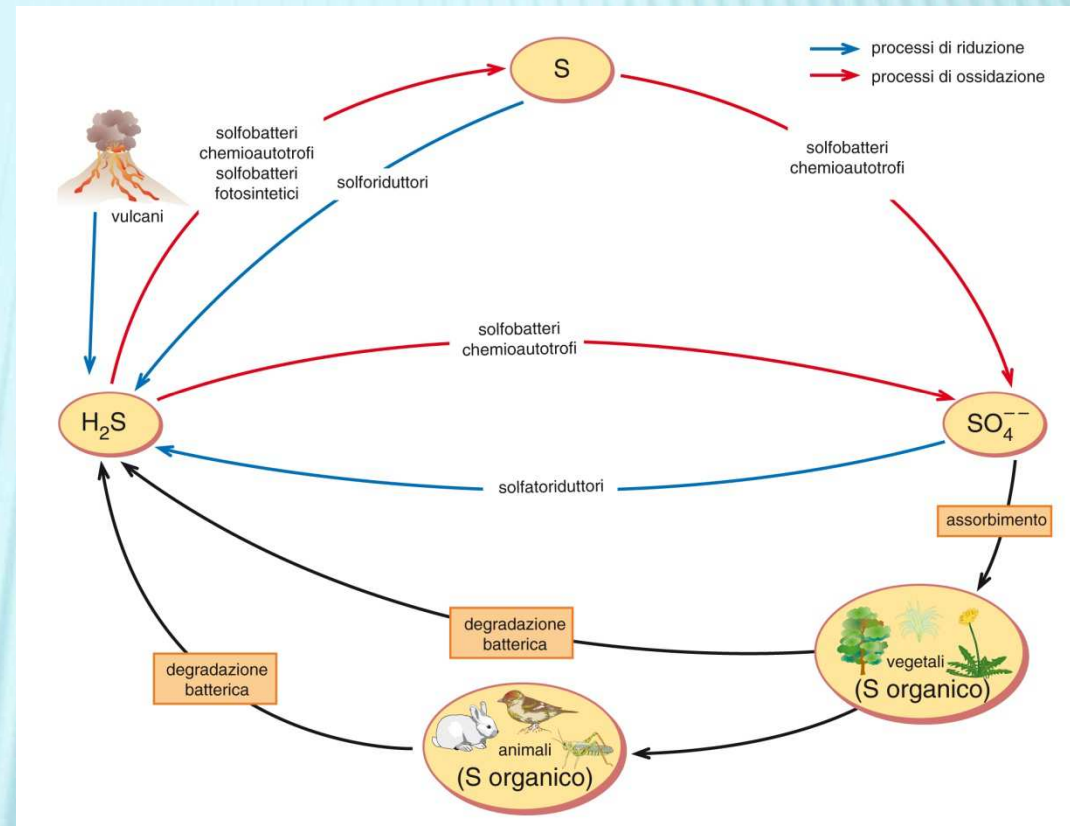
La via maggiormente utilizzata per la veicolazione dell'elemento è costituita dalle soluzioni circolanti nel terreno che l'uomo ha sfruttato da sempre per favorire la produttività dei suoli adibiti a coltivazione. Il fosforo infatti è insieme all'azoto e al potassio il principale fertilizzante (macronutriente) utilizzato in agricoltura.

È un ciclo globalmente deficitario negli ecosistemi in quanto il continuo drenaggio di fosfati dalla terra al mare non è compensato da un reintegro equivalente (in situazioni naturali). Il ritorno al mare/oceano è accelerato dall'uomo che con le proprie attività canalizza i reflui contenenti fosforo direttamente nelle acque con apporti e velocità decisamente superiori rispetto al ciclo naturale.



CICLO DELLO ZOLFO

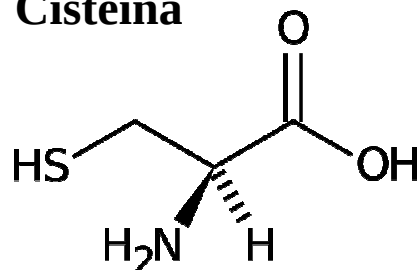
Lo zolfo è presente nel terreno in forma minerale soprattutto come ione solfato (SO_4^{--}), così viene assorbito dalle piante e trasformato in zolfo organico che passa agli animali lungo la catena alimentare. Alla morte degli organismi, la degradazione batterica libera lo zolfo sotto forma di idrogeno solforato (H_2S), che può provenire anche dai vulcani. Tutte le altre trasformazioni del ciclo sono effettuate da microrganismi.



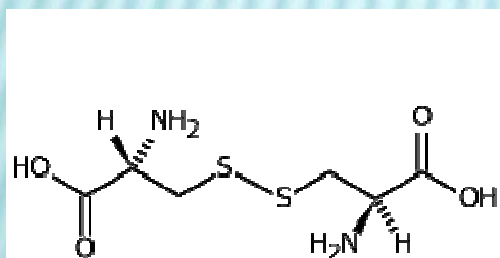
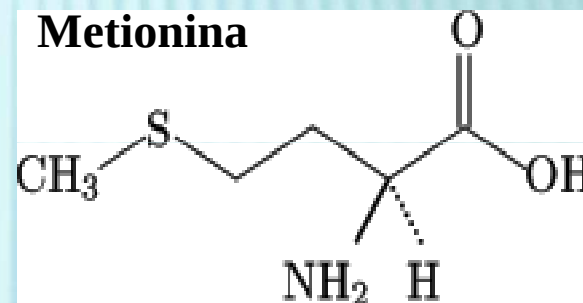
Le biomolecole contenenti zolfo: tiocomposti

Lo zolfo è contenuto nelle vitamine del complesso B tiamina e biotina: la quantità maggiore è contenuta negli aminoacidi metionina, cistina e cisteina e quindi nelle proteine con maggiore contenuto di questi aminoacidi.

Cisteina

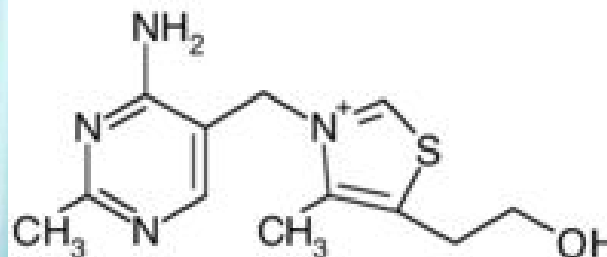


Metionina



Cistina

Tiamina, la vitamina B₁



Lo zolfo nell'ambiente

Lo zolfo che partecipa al ciclo biogeochimico, oltre che nei tiocomposti, è presente nell'ambiente sotto forma di H_2S , zolfo elementare, biossido di zolfo (SO_2) liberato in atmosfera da processi industriali o dalle combustioni. Quest'ultimo, grazie ad un processo di ossidazione fotochimica, diventa triossido di zolfo (SO_3) che, a sua volta, si scioglie nell'acqua piovana formando acido solforico H_2SO_4 , responsabile del fenomeno delle piogge acide e della formazione di solfati. Anche le rocce che contengono il gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o la pirite (FeS_2) possono diventare fonte di zolfo, in seguito a trasformazione batterica.



pirite



gesso

FISSAZIONE DELLO ZOLFO

Le piante verdi e i batteri assorbono lo ione solfato e tramite reazioni redox lo "attivano" per sintetizzare aminoacidi solforati ed altre molecole. Organismi incapaci di ridurre lo zolfo lo assorbono sotto forma di cisteina (già ridotta). Lo zolfo, una volta organicato, chiude il ciclo attraverso le demolizioni metaboliche o la morte degli organismi; i tiocomposti vengono decomposti da popolazioni di microorganismi aerobi e anaerobi fino a SO_4^{--} , e H_2S .

INTERAZIONI

Ogni ciclo si interseca con gli altri in un divenire continuo tra elementi abiotici (l'ambiente nel suo complesso) e gli organismi che ne derivano, in un fluire di elementi chimici ed energia; si possono pensare gli esseri viventi anche come uno dei numerosi passaggi della materia, benché la vita costituisca comunque un'entità unica, irripetibile e da salvaguardare.