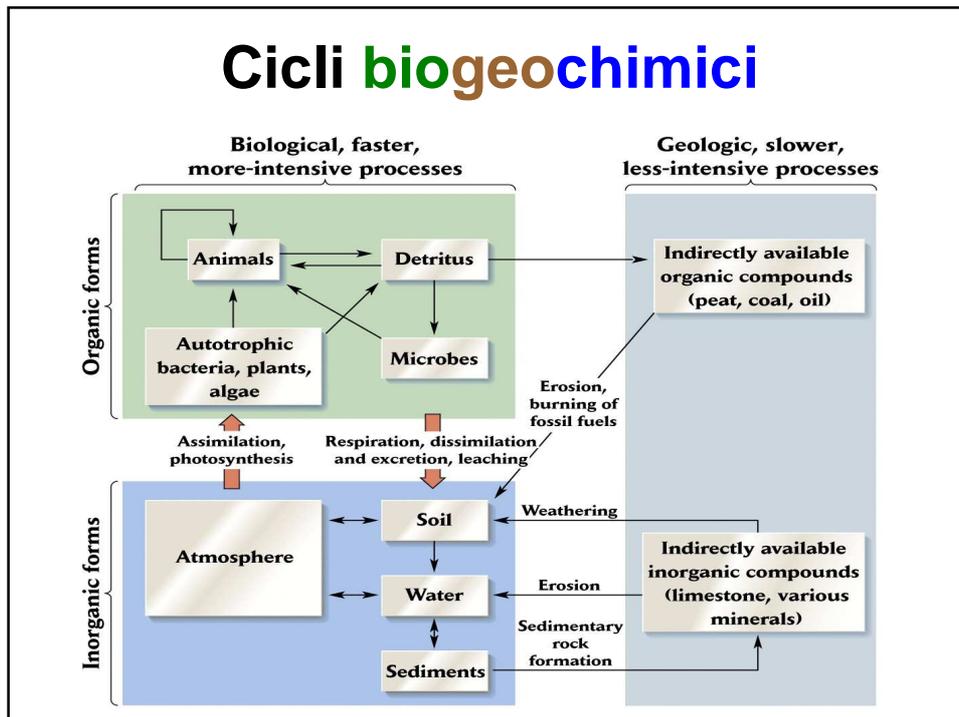


Cicli **bi**geo**ch**imici

- La materia circola negli/fra gli ecosistemi
- Esistono comparti ben identificabili, che tuttavia scambiano materia fra loro:
 - l'atmosfera
 - la litosfera
 - l'idrosfera
 - la biosfera
- I processi di scambio sono di natura:
 - **bi**ologica
 - geologica
 - **ch**imica

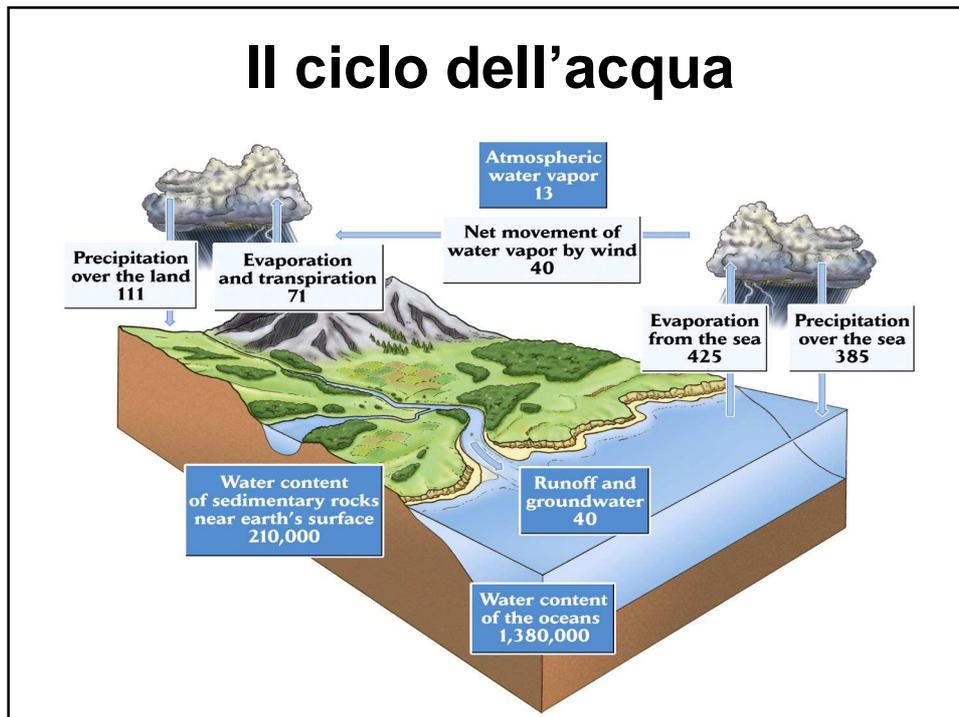
Cicli biogeochimici



Il ciclo dell'acqua

- La biosfera contiene 1.400.000 teratonnellate (TT, 10^{12} t) di acqua
- Il 97% dell'acqua della biosfera è negli oceani
- Gli altri comparti contengono:
 - calotte polari e ghiacciai (29.000 TT)
 - acque sotterranee (8.000 TT)
 - laghi e fiumi (100 TT)
 - umidità del suolo (100 TT)
 - atmosfera (13 TT)
 - biota (1 TT)

Il ciclo dell'acqua



Il ciclo dell'acqua

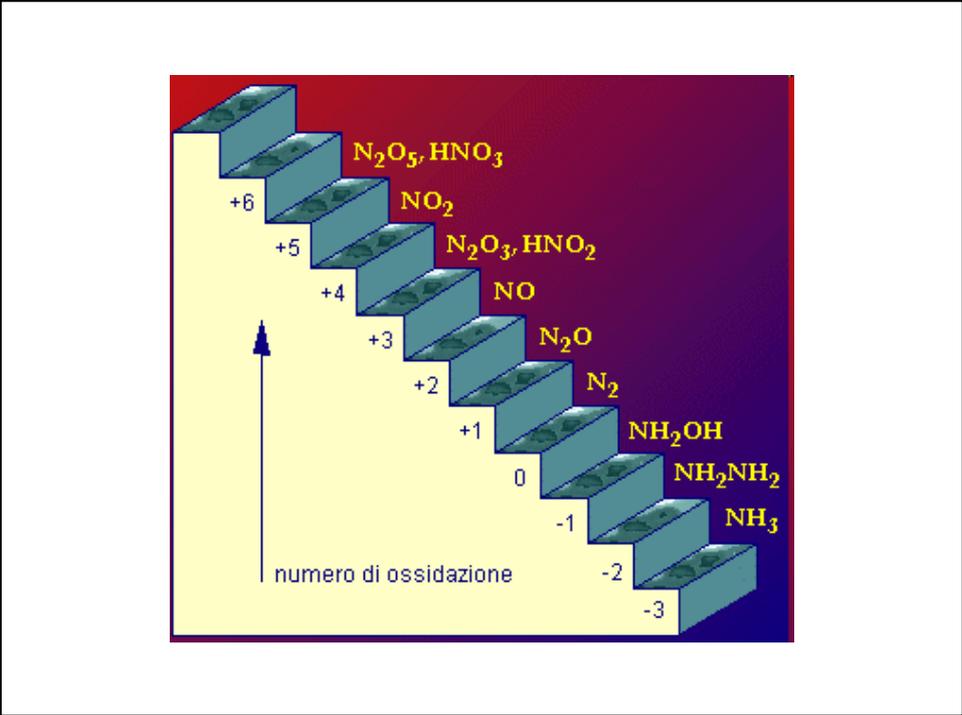
- Il ciclo dell'acqua è spinto dall'energia solare (utilizza $\frac{1}{4}$ dell'energia disponibile sotto forma di radiazione incidente)
- Le **precipitazioni** sulle terre emerse superano l'**evaporazione** dalle stesse di 40 TT anno⁻¹ (che rappresentano la portata dei fiumi)
- Questa differenza corrisponde a quella fra l'**evaporazione** delle acque degli oceani e le **precipitazioni** in mare
- Infatti, queste 40 TT anno⁻¹ sono il vapore (le nuvole!) che i venti spingono dal mare verso le terre emerse

Ciclo dell'azoto

- L'azoto inorganico viene convertito in forma organica attraverso la fissazione biologica
- L'azoto è necessario alla sintesi proteica in tutti gli organismi viventi
- L'azoto è il nutriente più limitante la produzione primaria nella maggior parte degli ecosistemi
- Le attività antropiche (es. agricoltura) hanno forte impatto sul ciclo dell'azoto

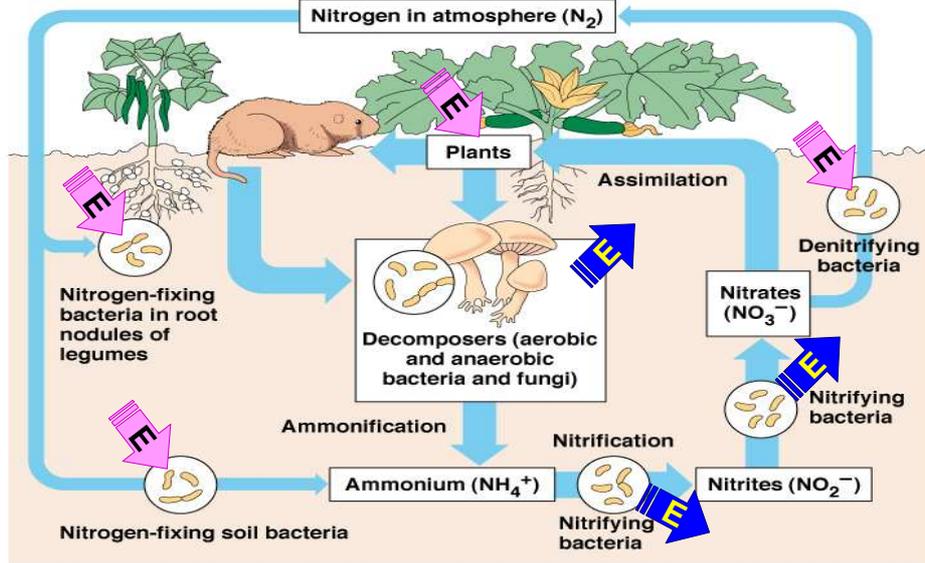
Ciclo dell'azoto

- Il "serbatoio" più grande è quello atmosferico, dove l'azoto si trova in forma molecolare (N_2)
- La forma molecolare è molto stabile per il suo triplo legame con energia di dissociazione di 941 kJ per mole (circa il doppio di quello dell' O_2)
- Una quantità più limitata di azoto è disciolta nelle acque degli oceani
- L'azoto non si trova nelle rocce native, mentre è presente in quelle ignee (da cui possono essere immesse nel ciclo piccole quantità)
- L'azoto entra nella biosfera attraverso la fissazione
- I processi che regolano il ciclo dell'azoto sono più complessi di quelli del ciclo del carbonio perché l'azoto è presente in molte più forme, sia ossidate che ridotte

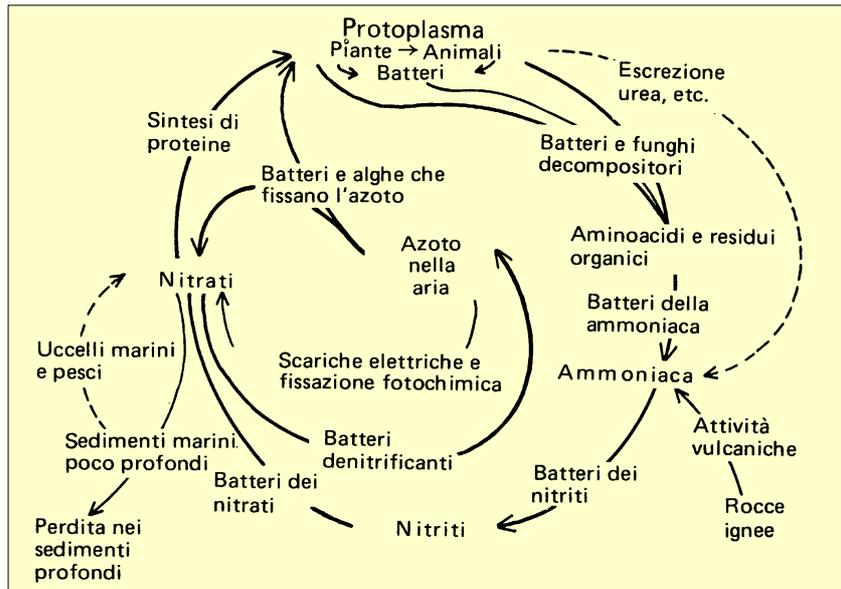


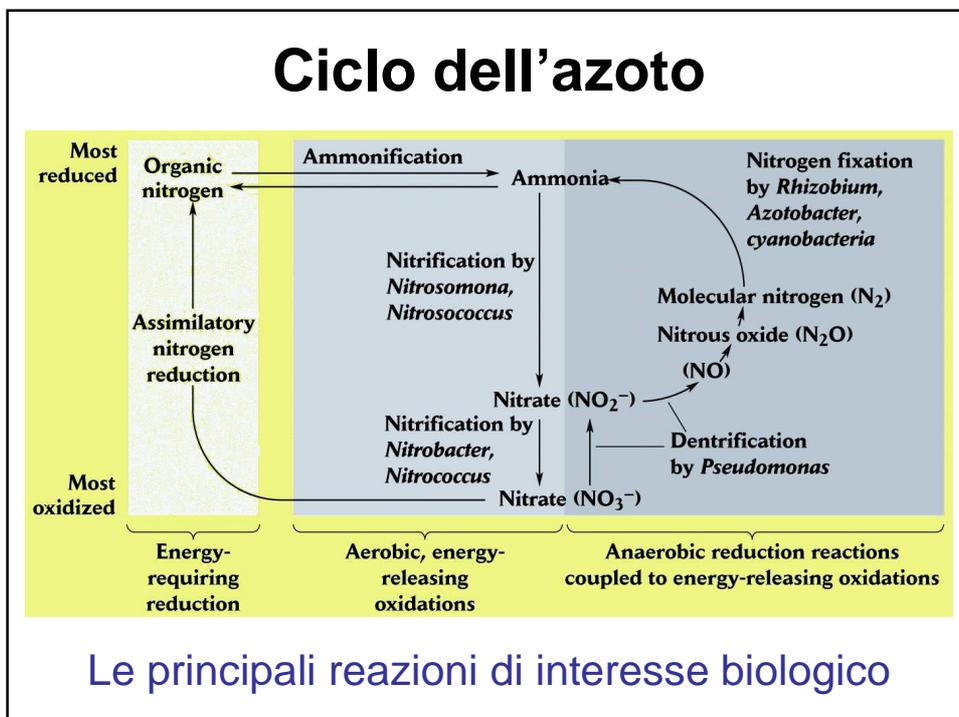
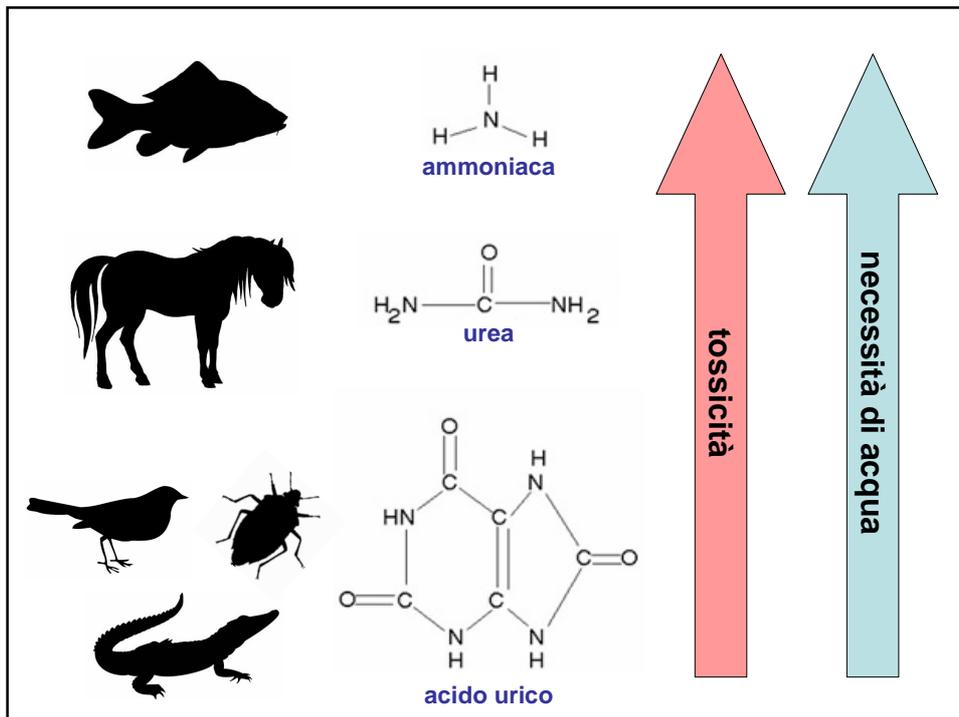
Comparto	Utilizzabile in minima parte!	Quantità (10 ⁹ t N)
Litosfera	crosta terrestre	14.000.000
	sedimenti	4.000.000
	pedosfera	610
Atmosfera		3.900.000
Idrosfera		23.000
Biosfera		13

Ciclo dell'azoto



Ciclo dell'azoto

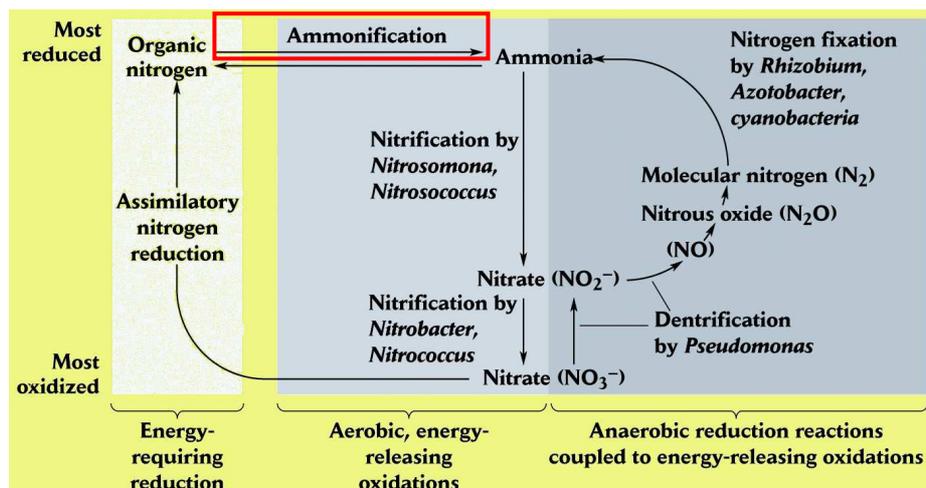




Ciclo dell'azoto

- Le piante assimilano l'azoto inorganico nelle proteine, che vengono poi passate ai livelli trofici superiori
- L'**ammonificazione** viene effettuata da tutti i consumatori:
 - le proteine vengono “smontate” nei loro aminoacidi costituenti mediante reazioni di idrolisi
 - Il carbonio (non l'azoto!) degli aminoacidi viene ossidato, liberando ammonica (NH_3)

Ciclo dell'azoto

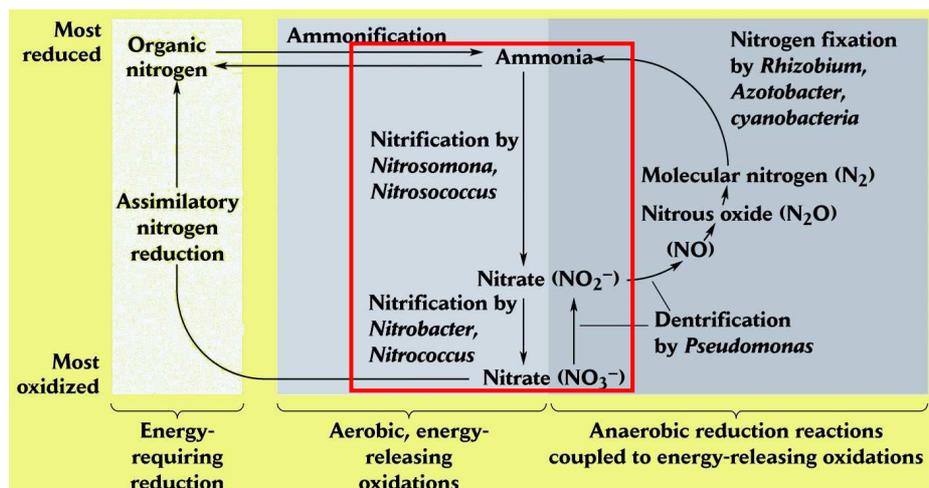


Le principali reazioni di interesse biologico

Ciclo dell'azoto

- La **nitrificazione** è l'ossidazione dell'azoto ammoniacale
- La nitrificazione è un **processo aerobico** ed i batteri coinvolti sono **chemioautotrofi**
- Il primo passo è l'ossidazione dell'ammoniaca, che produce nitrito (NO_2^-) e che è effettuata da *Nitrosomonas* nei suoli e da *Nitrosococcus* negli oceani
- Il nitrito viene poi ossidato a nitrato (NO_3^-) da *Nitrobacter* nei suoli e da *Nitrococcus* negli oceani

Ciclo dell'azoto

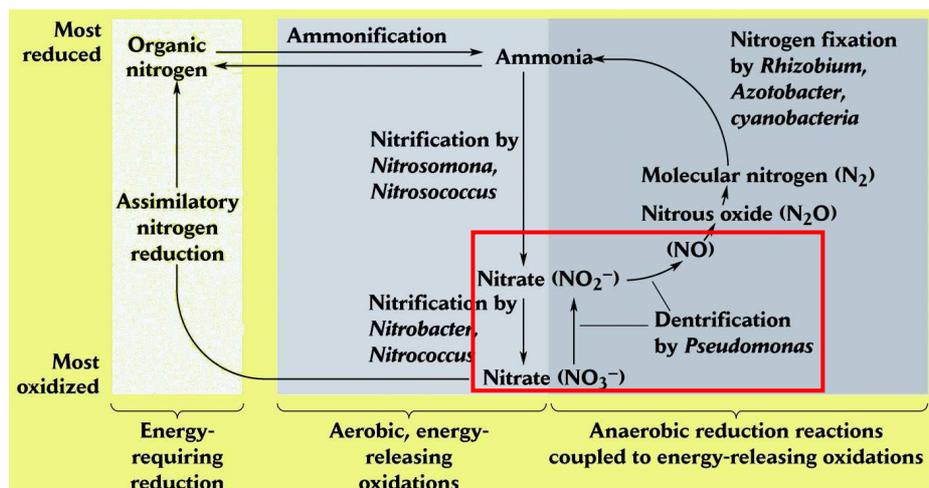


Le principali reazioni di interesse biologico

Ciclo dell'azoto

- La **denitrificazione** è la riduzione dello ione nitrato (NO_3^- , disciolto) a monossido di azoto (NO , gas)
- Si verifica in condizioni di anossia o ipossia (suoli con elevato contenuto d'acqua e condizioni anaerobiche, fanghi anossici ed acque di fondo di ecosistemi acquatici)
- Viene effettuata da batteri eterotrofi (es. *Pseudomonas denitrificans*)
- Il monossido d'azoto può poi essere ulteriormente ridotto a protossido d'azoto (N_2O , il gas esilarante) o ad azoto molecolare (N_2)
- La denitrificazione è una delle cause della scarsità di azoto negli ecosistemi marini

Ciclo dell'azoto



Le principali reazioni di interesse biologico

Ciclo dell'azoto

- Il flusso di azoto molecolare verso l'atmosfera generato dalla denitrificazione è bilanciato dalla **azotofissazione** (2% del ciclo globale)
- L'**azotofissazione** può avvenire per effetto di processi elettrochimici o biologici, poiché richiede energia
- L'energia è fornita, nel caso dei processi biologici, dall'ossidazione della sostanza organica (batteri non simbiotici), dagli zuccheri forniti dalle piante (batteri simbiotici) o dalla fotosintesi (cianobatteri)
- Gli azotofissatori sono essenziali soprattutto nei primi stadi di colonizzazione di nuovi substrati

Ciclo dell'azoto



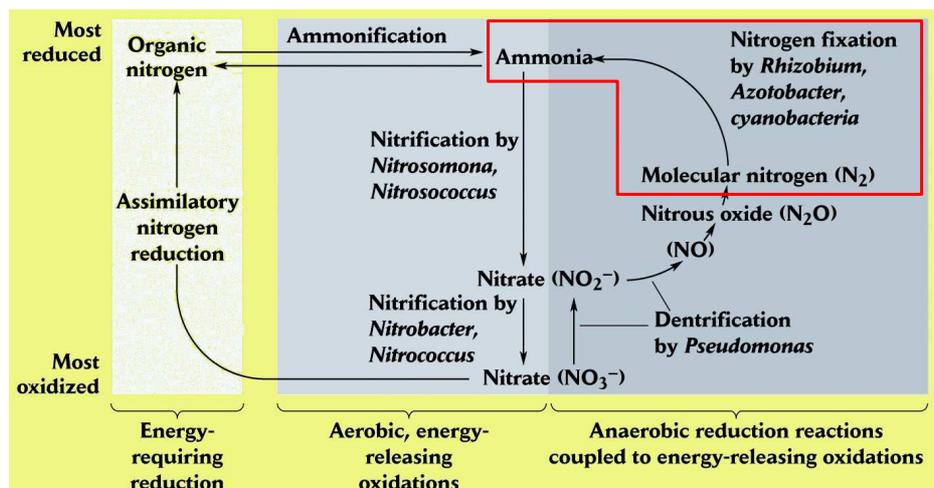
La maggior parte dei batteri azoto-fissatori della famiglia *Rhizobia* (1) formano noduli radicali simbiotici

Esistono batteri azoto-fissatori aerobi, anaerobi, simbiotici, non simbiotici [es. *Clostridium* spp. (anaerobi, 2), *Azotobacter* spp. (aerobi, 3), etc.]

Ciclo dell'azoto

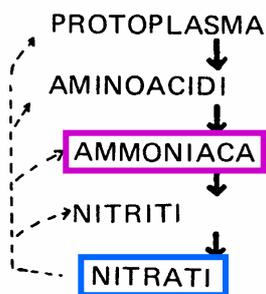
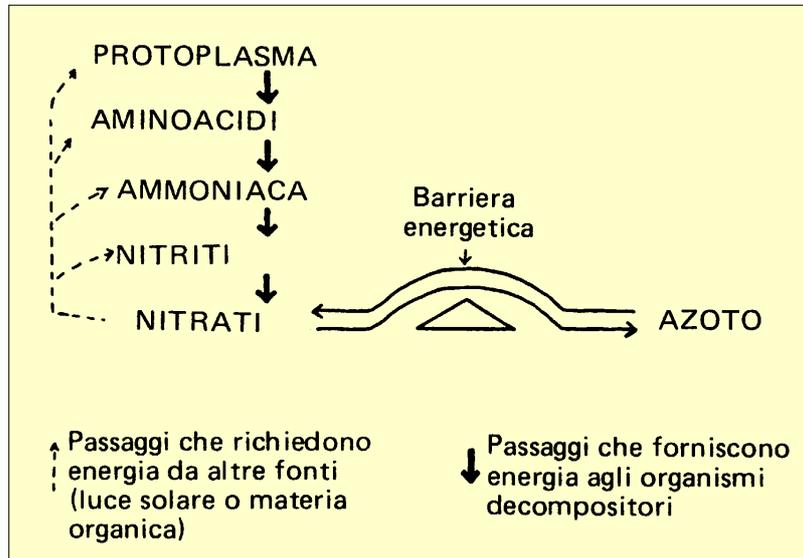
- L'efficienza dell'azotofissazione è molto variabile
- In ambiente terrestre, i batteri simbiotici del genere *Rhizobium* associate a varie specie di leguminose fissano da 50 a 200 kg N ha⁻¹ anno⁻¹
- Sempre in ambiente terrestre, i batteri non simbiotici (es. generi *Azotobacter* e *Clostridium*) fissano da 5 a 20 kg N ha⁻¹ anno⁻¹
- In ambiente acquatico, i Cianobatteri fissano da 10 a 50 kg N ha⁻¹ anno⁻¹

Ciclo dell'azoto



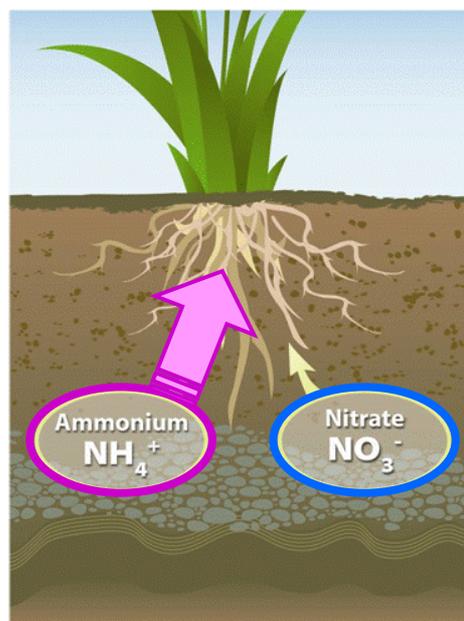
Le principali reazioni di interesse biologico

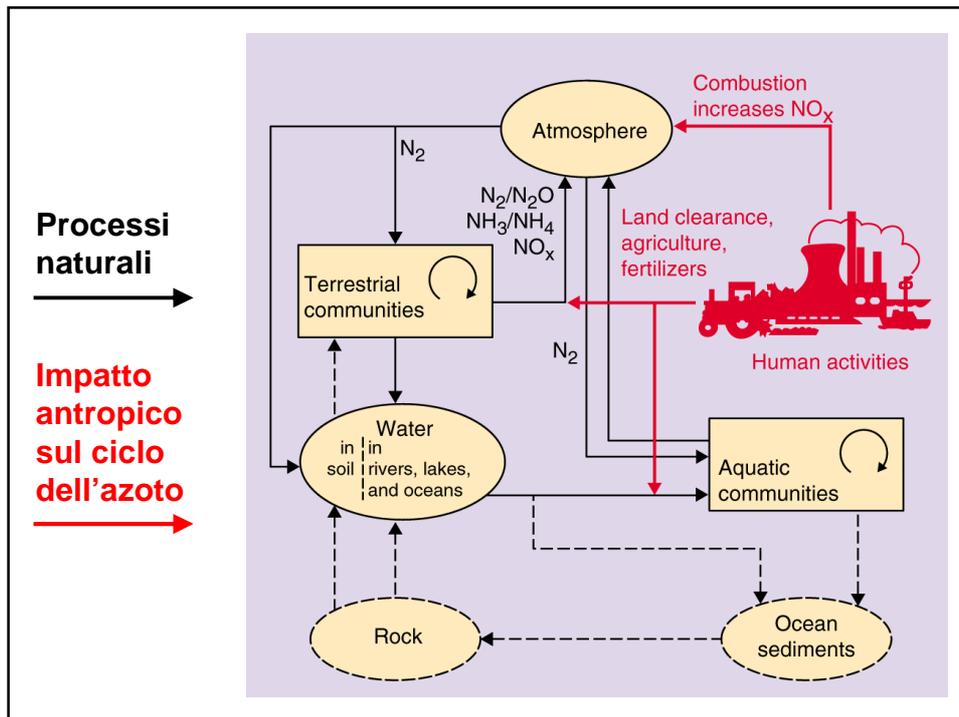
Ciclo dell'azoto



L'ammoniaca (NH_3) è tossica, lo ione ammonio (NH_4^+) lo è molto meno

L'equilibrio fra le due forme dipende dal pH (a pH 7.5 c'è quasi solo ione ammonio, a pH più alcalini aumenta l'ammoniaca)





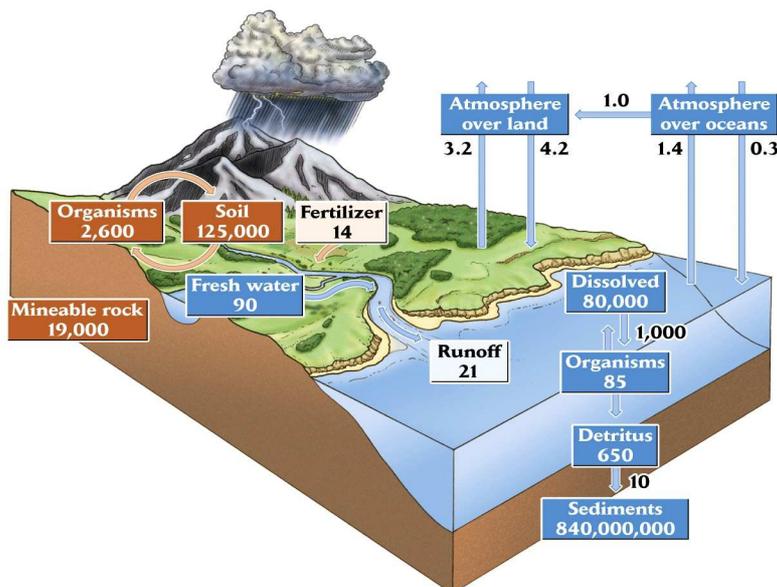
Ciclo del fosforo

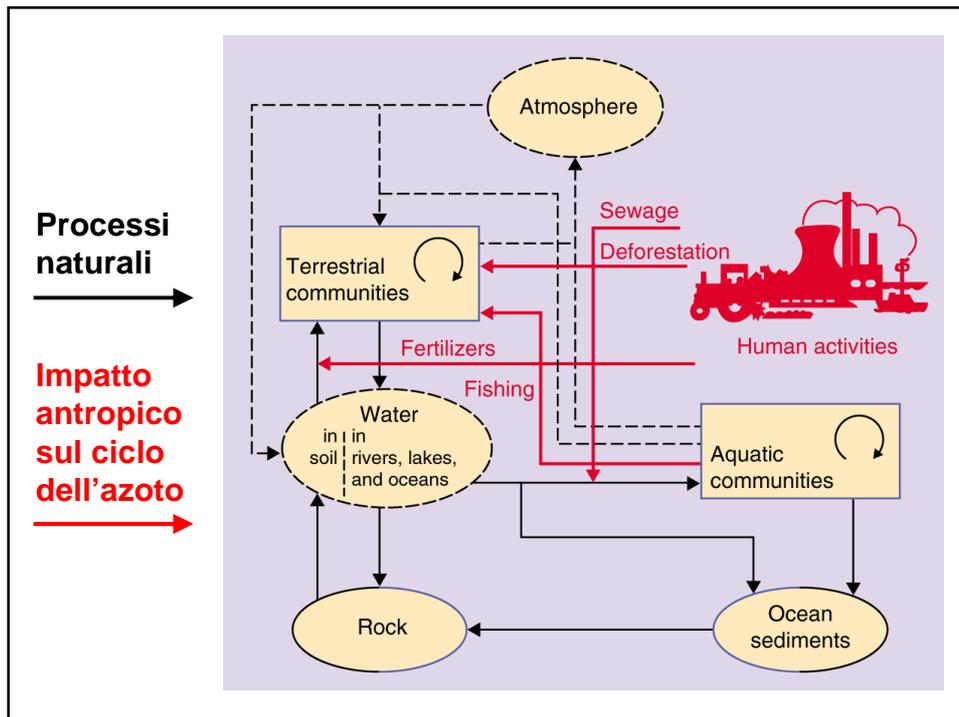
- Il fosforo è un elemento essenziale per la vita ed è presente negli acidi nucleici, nelle membrane cellulari, nei sistemi di trasferimento dell'energia, nelle ossa e nei denti
- Il ciclo del fosforo è di tipo sedimentario
- Il fosforo può limitare la produttività primaria:
 - negli ecosistemi acquatici, dove può essere intrappolato nei sedimenti per tempi molto lunghi
 - nei suoli, dove è prontamente disponibile solo per un pH leggermente acido (compreso fra 6 and 7)

Ciclo del fosforo

- Il principale serbatoio di fosforo sono le rocce, mentre i sedimenti marini agiscono come un “pozzo”
- Il ciclo del fosforo è governato da un numero relativamente piccolo di trasformazioni
- Le piante assimilano il fosforo come ortofosfato (PO_4^{3-}) e lo incorporano nei composti organici
- I consumatori (inclusi molti batteri) demoliscono la sostanza organica rilasciando il fosforo come ortofosfato
- Il fosforo non subisce reazioni di ossidazione e riduzione nella biosfera

Ciclo del fosforo

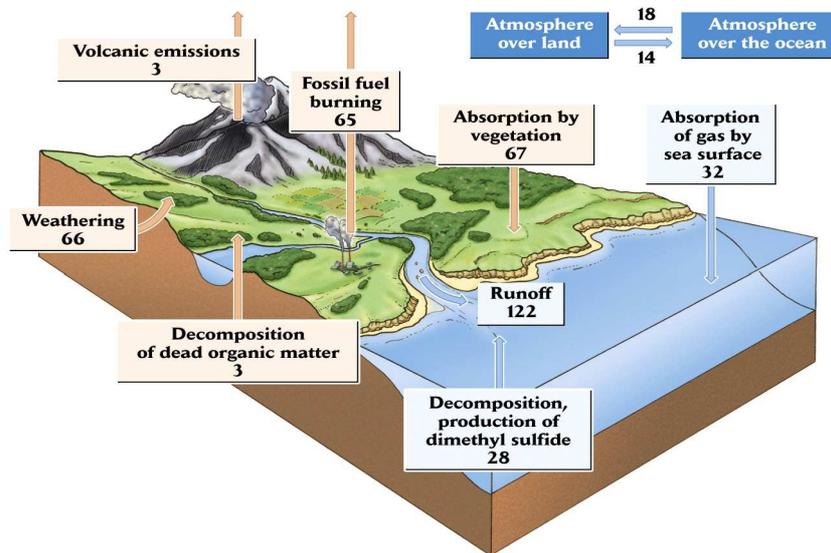




Ciclo dello zolfo

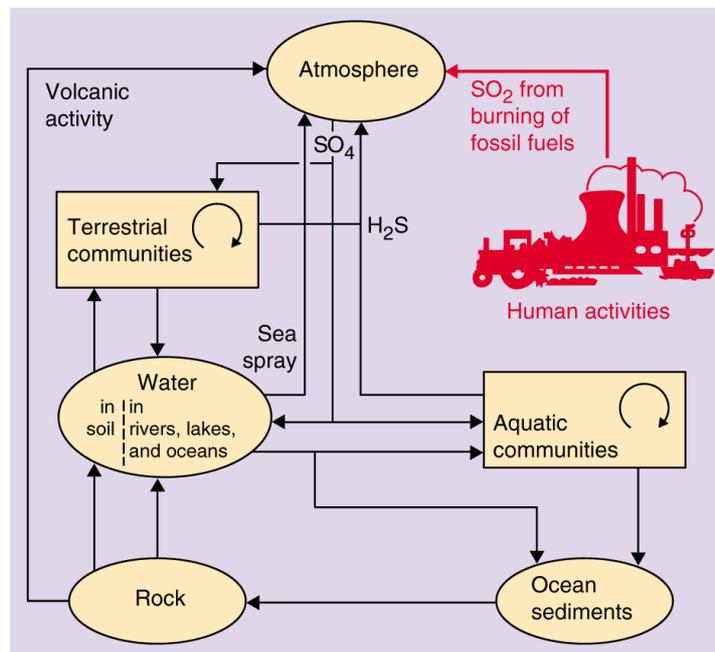
- Lo zolfo è un elemento essenziale e come l'azoto ha molti stati di ossidazione
- Di conseguenza, il suo ciclo comprende processi chimici complessi
- Le reazioni di **riduzione** dello zolfo comprendono:
 - assimilazione per riduzione del solfato a forme organiche e disassimilazione per ossidazione a solfato da parte di svariati organismi
 - riduzione del solfato usato come ossidante per la respirazione da batteri eterotrofi in ambienti anaerobici

Ciclo dello zolfo

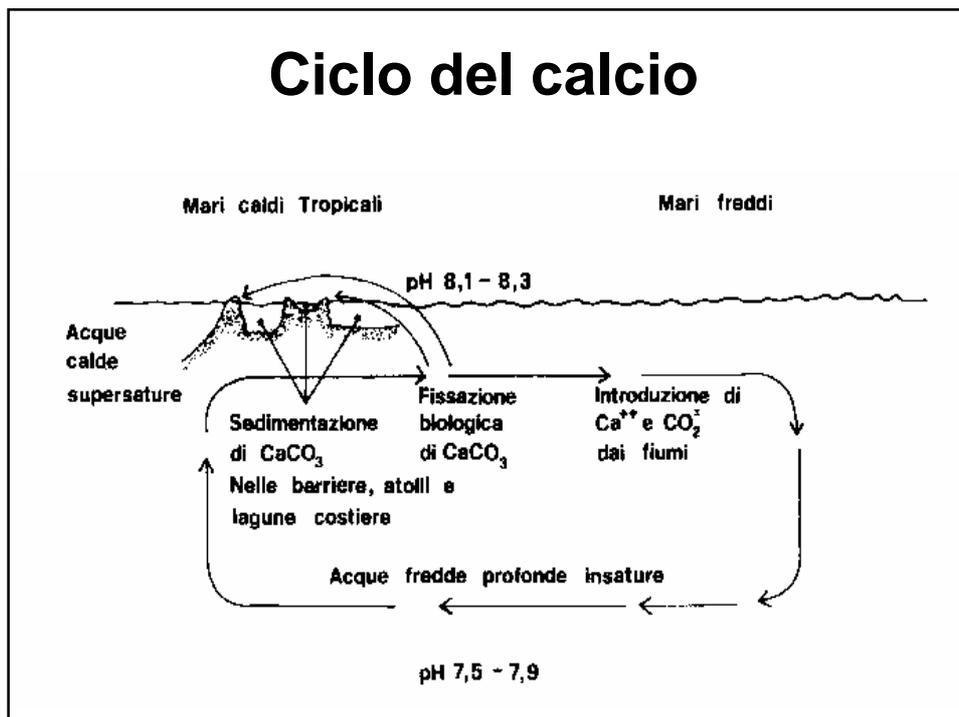


Processi naturali

Impatto antropico sul ciclo dell'azoto



Ciclo del calcio



Clima e rigenerazione dei nutrienti

- I cicli dei nutrienti negli ecosistemi terrestri sono influenzati dal clima
- Gli ecosistemi temperati e quelli tropicali differiscono per gli effetti del clima su:
 - degradazione meteorica
 - caratteristiche dei suoli
 - decomposizione del detrito
- Nei suoli temperati la decomposizione della sostanza organica morta fornisce un lento ma costante flusso di nutrienti

Il paradosso delle foreste tropicali

- Le foreste tropicali sono ecosistemi altamente produttivi, malgrado i loro suoli non siano fertili
- I suoli di queste foreste, infatti, sono:
 - fortemente meteorizzati
 - hanno un basso contenuto in argille
 - non trattengono i nutrienti
- L'elevata produttività è però sostenuta da:
 - una rapida regenerazione dei nutrienti attraverso la decomposizione della sostanza organica
 - un'assimilazione veloce dei nutrienti disponibili
 - una efficiente ritenzione dei nutrienti da parte degli apparati radicali delle piante e delle micorrize (associazioni di funghi e piante superiori: es. porcini e castagni!)

La pratica del taglia-e-brucia (slash-and-burn)

- I terreni agricoli vengono sottratti alla foresta tropicale tagliando e bruciando la vegetazione
- I nutrienti vengono rilasciati dai resti e dalle ceneri della vegetazione
- È possibile ottenere un raccolto per 2-3 anni
- La fertilità declina rapidamente man mano che i nutrienti vengono rimossi per lisciviazione
- Il suolo diventa incoltivabile e di tipo lateritico

Taglia-e-brucia



Nutrienti nel suolo e nella biomassa

- Il detrito organico della lettiera non costituisce una riserva abbondante di nutrienti nelle foreste tropicali
- La lettiera rappresenta una frazione modesta della biomassa totale nelle foreste tropicali, dove pesa per l'1-2%, contro il 5-20% delle foreste temperate (di latifoglie e di conifere rispettivamente)
- Il rapporto fra fosforo nel suolo e nella biomassa è di oltre 20 in una foresta temperata, mentre può essere 200 volte più basso in una foresta tropicale

Distribution of mineral nutrients in the soil and living biomass of a temperate and a tropical forest ecosystem

Forest (Locality)	Biomass (T per ha)*	Nutrients (kg per ha)		
		Potassium	Phosphorus	Nitrogen
Ash and oak (Belgium)	380			
Living vegetation		624	95	1,260
Soil		767	2,200	14,000
Ratio of soil to biomass		1.2	23.1	11.1
Tropical deciduous (Ghana)	333			
Living vegetation		808	124	1,794
Soil		649	13	4,587
Ratio of soil to biomass		0.8	0.1	2.0

*T = metric tons.

Source: P. Duvingnaud and S. Denayer-de-Smet, in D. E. Reichle (ed.), *Analysis of Tropical Forest Ecosystems*, Springer-Verlag, New York (1970), pp. 199–225; D. J. Greenland and J. M. Kowal, *Plant Soil* 12:154–174 (1960); J. D. Ovington, *Biol. Rev.* 40:295–336 (1965).

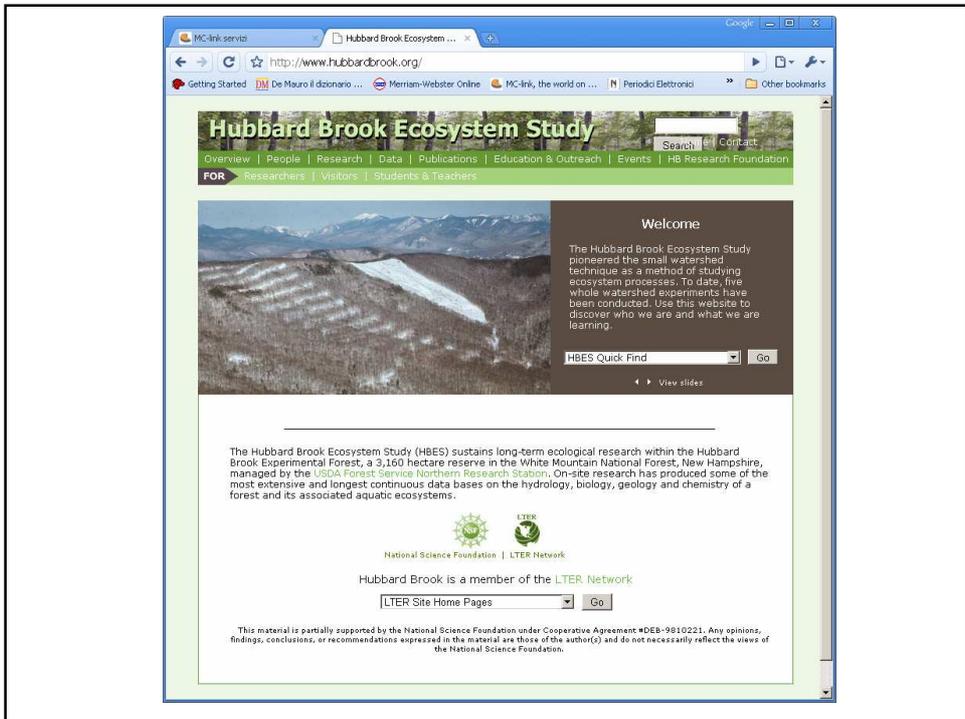
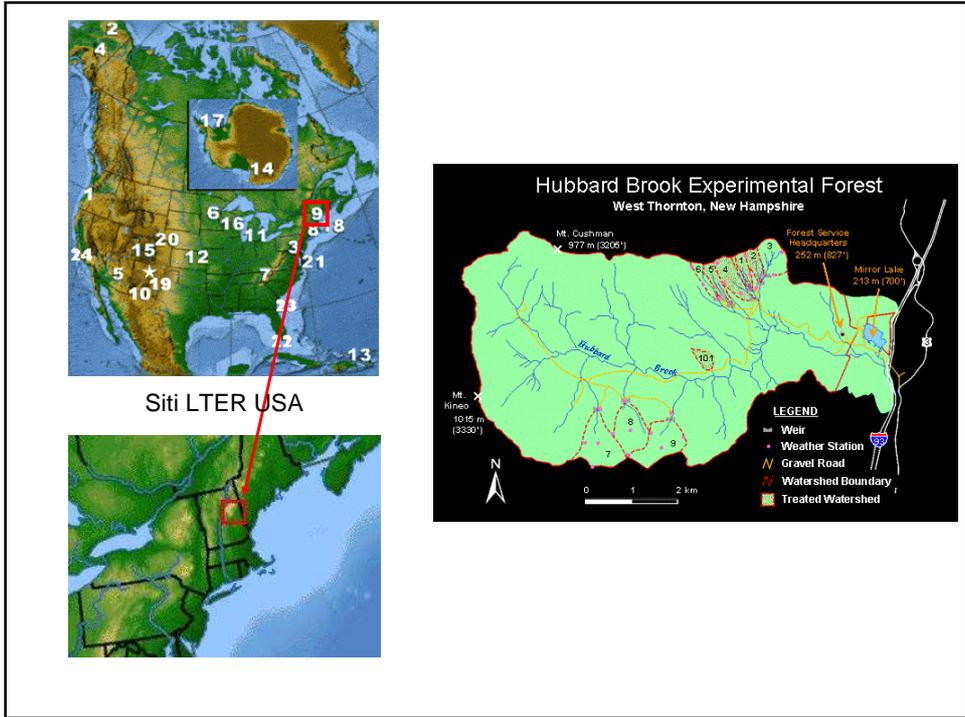
Ritenzione dei nutrienti

- Nella vegetazione delle foreste tropicali la ritenzione dei nutrienti gioca un ruolo cruciale nel sostenere la produttività
- Le piante conservano nutrienti attraverso vari meccanismi, come:
 - Limitare la perdita di foglie
 - Recuperare I nutrienti dalle foglie che comunque vengono perse
 - Sviluppare fitti intrecci di radici superficiali

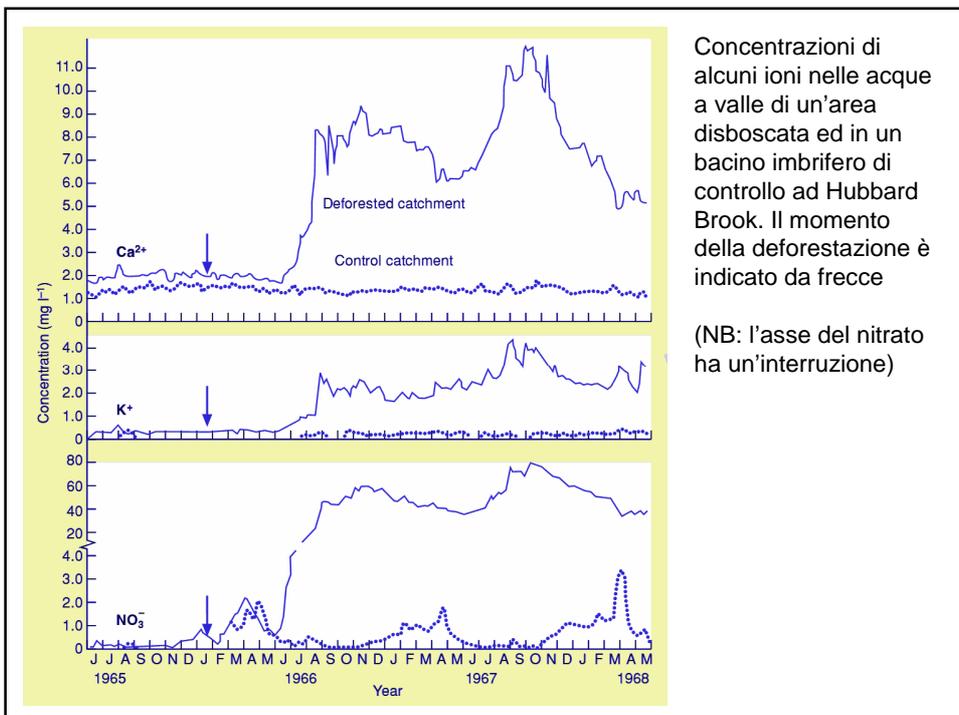
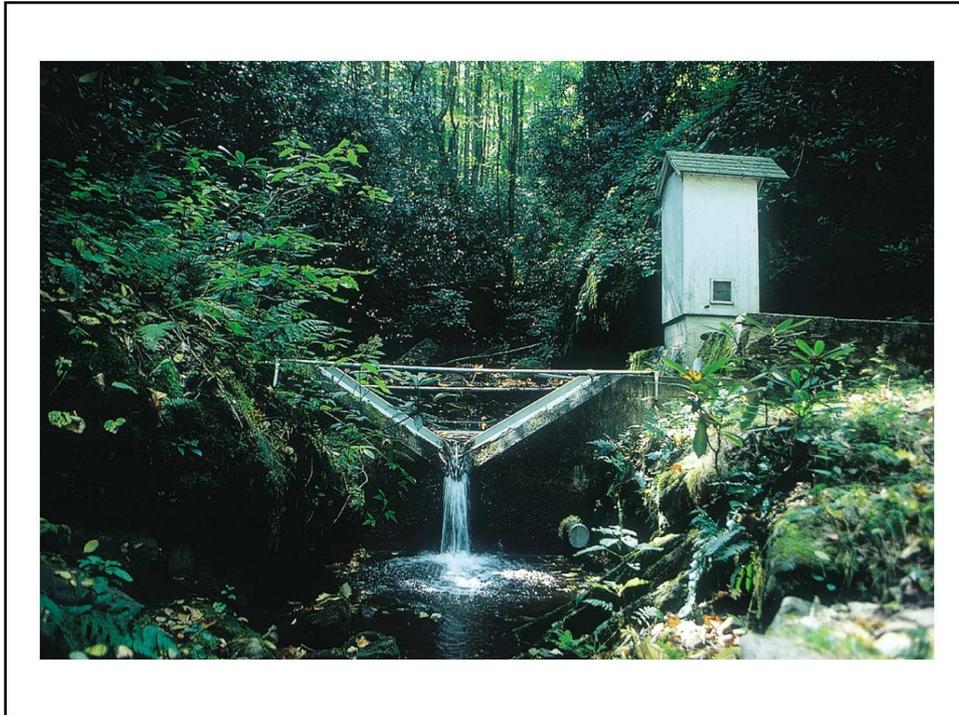


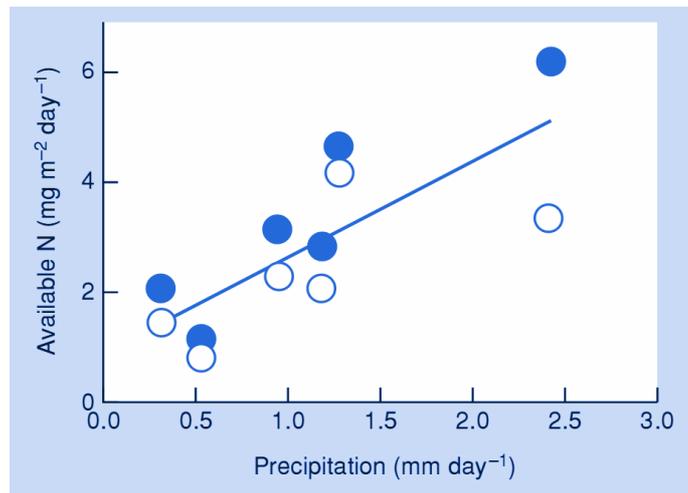
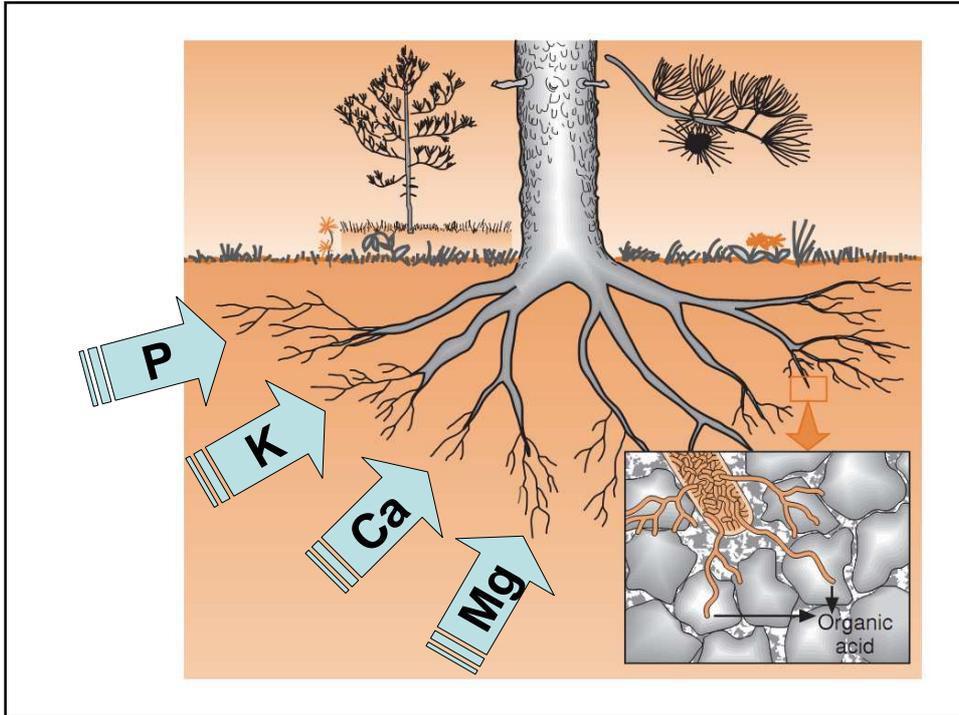
Vegetazione e fertilità del suolo

- La vegetazione gioca un ruolo critico nello sviluppo e nel mantenimento delle proprietà del suolo e della sua fertilità
- Esperimenti di taglio completo della vegetazione sono stato condotto per molti anni in piccoli bacino imbriferi nella località di Hubbard Brook, (NH, USA), producendo:
 - un forte aumento delle portate dei corsi d'acqua
 - una riduzione da 3 a 20 volte della concentrazione di nutrienti (come ioni di varia natura)
 - una netta transizione dalla ritenzione alla deplezione dell'azoto: da un accumulo di $1-3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ in presenza di vegetazione alla perdita di $54 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ dopo il taglio









Azoto disponibile per gli apparati radicali di *Bouteloua gracilis* in rapporto alle precipitazioni. I dati sono mediati su alcuni siti campionati nella steppa in sei diversi momenti. I cerchi blu sono relativi a siti a valle, quelli bianchi a siti leggermente a monte (fino a 11 m di dislivello).

