

Il suolo come ambiente microbico

Prof.Rosa Anna Nastro – Prof.Stefano Dumontet

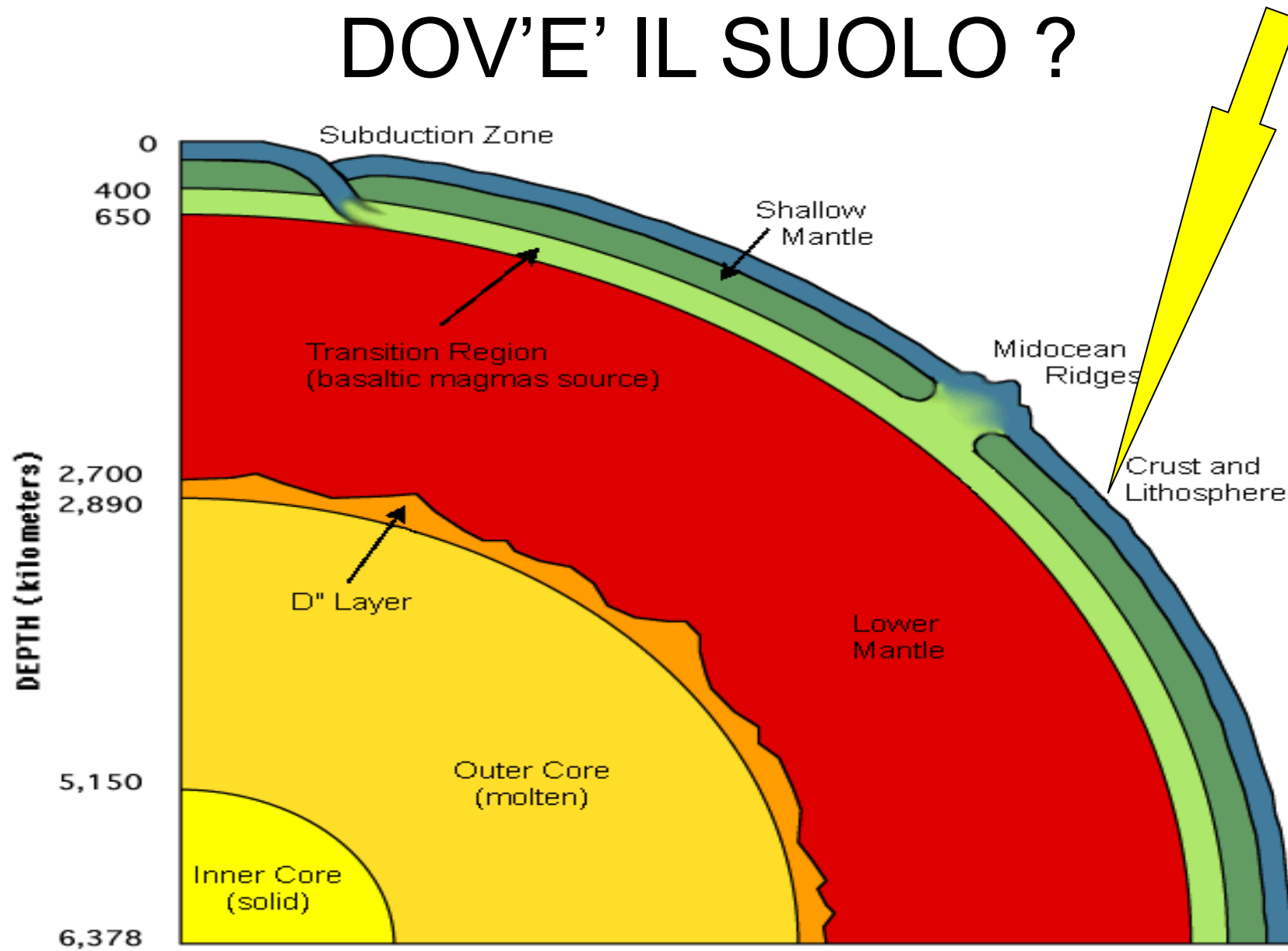
<https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/it/home/temi/ambiente-risorse/suolo-acqua-sostanze-nutritive/interazioni-piante-suolo/ecologia-suolo.html>

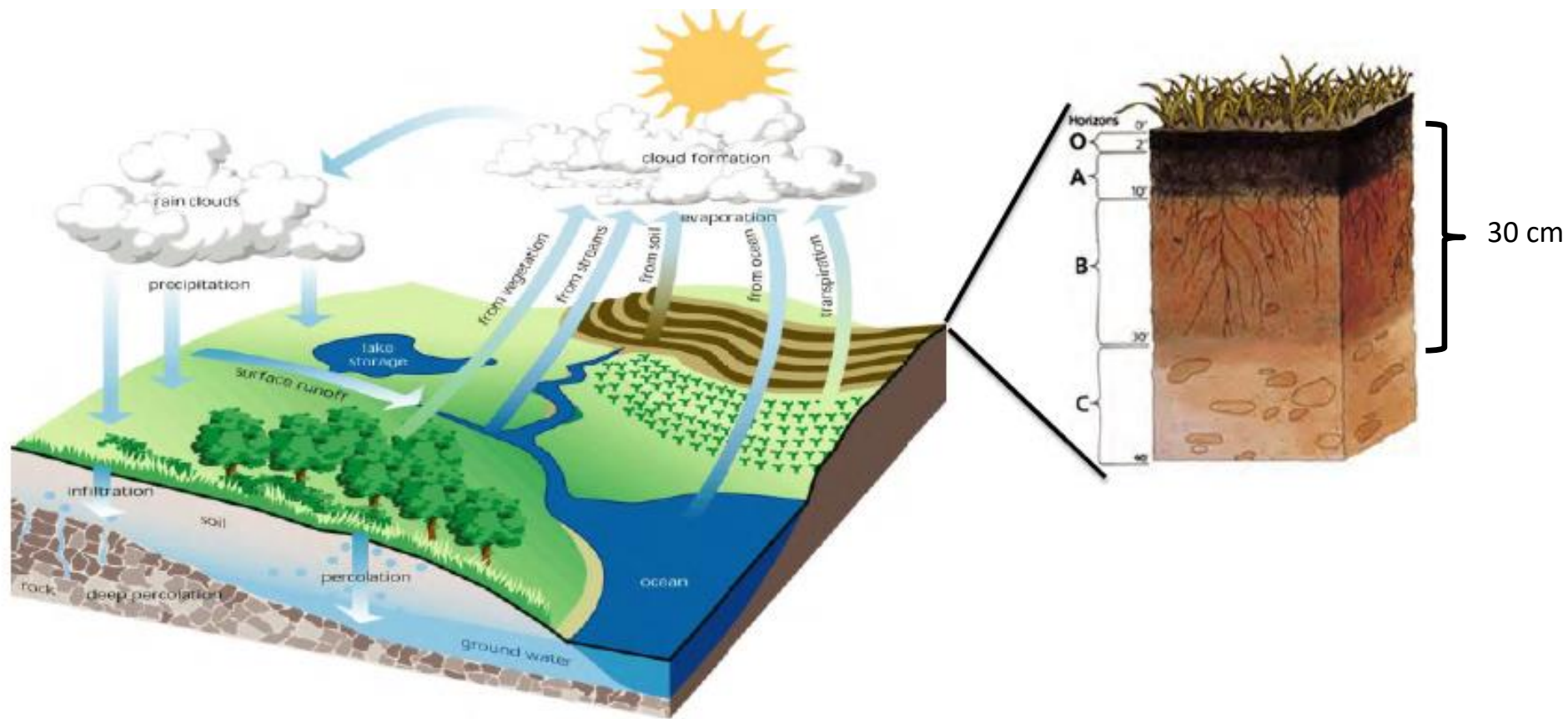
Avvertenza

I MATERIALI PRESENTI IN QUESTE DIAPOSITIVE SONO FRUTTO SIA DEL LAVORO DEL PROF. VINCENZO PASQUALE SIA DI LAVORO PERSONALE BASATO SU RICERCHE EFFETTUATE SUL WEB, SU LIBRI E SU ARTICOLI SCIENTIFICI E DIVULGATIVI.

OVE POSSIBILE, SONO STATE RIPORTATE LE FONTI DA CUI SI È DESUNTO IL MATERIALE.

DOV'E' IL SUOLO ?





Il suolo è la “pelle viva della terra” attraverso cui interagiscono la litosfera, l’idrosfera, l’atmosfera e la biosfera (RER).

Il suolo

Il suolo è un'entità vivente molto complessa, in grado di respirare, di assimilare elementi utili quali il carbonio e l'azoto, di degradare e mineralizzare i composti organici, di accumulare sostanze di riserva sotto forma di humus. Queste funzioni sono dovute all'innumerabile quantità di organismi micro e macroscopici che popolano il terreno e che intervengono attivamente con il loro metabolismo sulla composizione dello stesso, trasformandolo e rigenerandolo (Nappi, 2000).

L'energia entra in questo sistema principalmente tramite la degradazione della materia organica morta, ossia dei residui delle piante e degli animali. La fertilità di un suolo naturale dipende quindi in modo significativo dalla velocità di trasformazione della materia organica, mediata dalla flora batterica. Qualsiasi contaminazione del suolo, che inibisca o elimini i microrganismi in esso presenti o che modifichi la quantità e la qualità della materia organica, può portare un danneggiamento a breve o a lungo termine dell'intero ecosistema vegetazione-suolo (Pitea *et al.* 1998).

Ciononostante, al momento, i suoli sono tra gli habitat meno studiati. Il biota edafico è, tra le forme di vita del nostro pianeta, ancora una frontiera inesplorata, a dispetto della sua importanza critica. Infatti, migliaia di specie di microbi e di invertebrati popolano un singolo metro quadrato di suolo, organismi che ampiamente ignoriamo sia per identità sia per il loro contributo al sostentamento della biosfera. Benché gli studi sulla biodiversità a livello mondiale abbiano evidenziato la carenza di studi sugli organismi edafici, esistono pochi scienziati con esperienza sulla tassonomia o l'ecologia del suolo (Jacomini, 2000).

SUOLO (terreno)

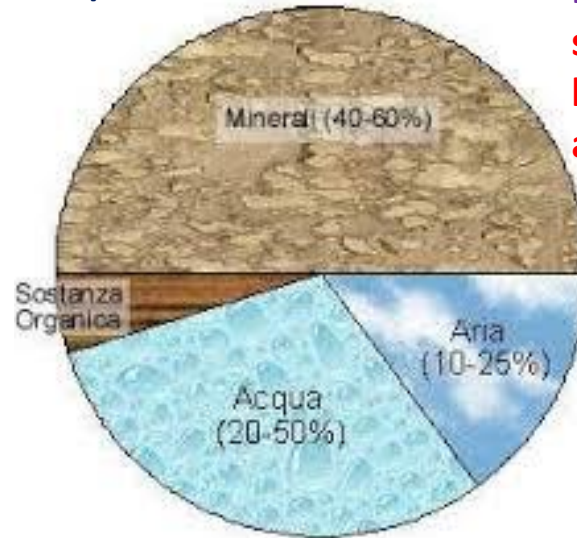
Strato incoerente più esterno della superficie terrestre
che poggia sullo strato roccioso (roccia madre).

Suoli minerali → disgregazione delle rocce e di altri materiali inorganici ad opera di eventi meteorici.

Suoli organici → sedimentazione di detriti di natura biologica.

Composizione suolo

- Materiale minerale inorganico (40-60%)
- Acqua (20-50%)
- Aria (10-25%)
- Materiale organico (~5%)



Frazione minerale

sabbia: particelle con diametro 0,1-2 mm;
limo: particelle con diametro 0,002-0,1 mm;
argilla: con diametro <0,002 mm.

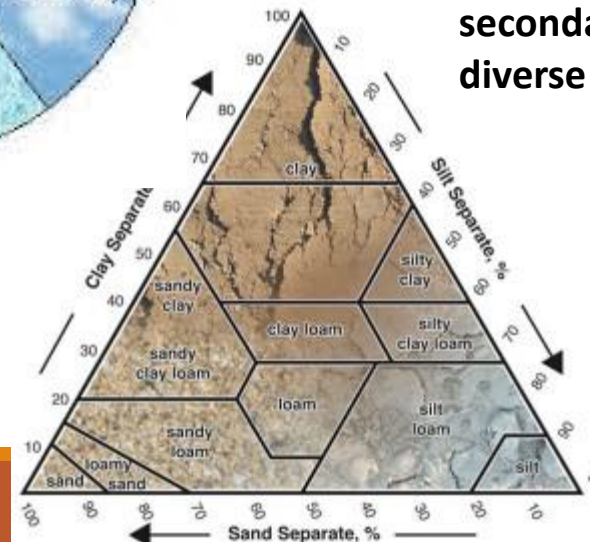
Classificazione suoli

I suoli possono essere classificati a seconda delle percentuali delle diverse componenti minerali.



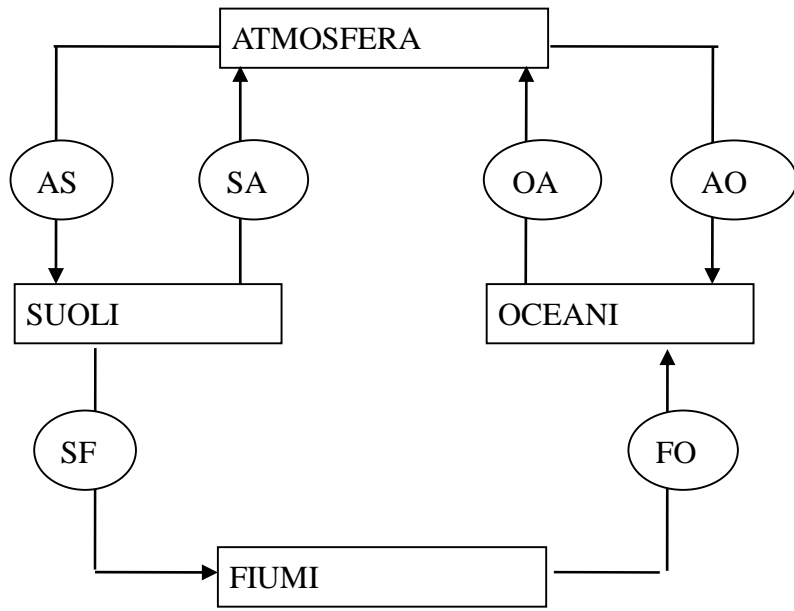
Lo **spessore** del suolo può variare da pochi centimetri a poco più di un metro.

Sabbia (S)	Franco Argillosa Sabbiosa (FAS)
Sabbia Franca (SF)	Franco Argillosa (FA)
Limo (L)	Franco Argilloso Limosa (FAN)
Franco Sabbiosa (FS)	Argilla Sabbiosa (AS)
Franca (F)	Argilla Limosa (AL)
Franco Limosa (FL)	Argilla (A)

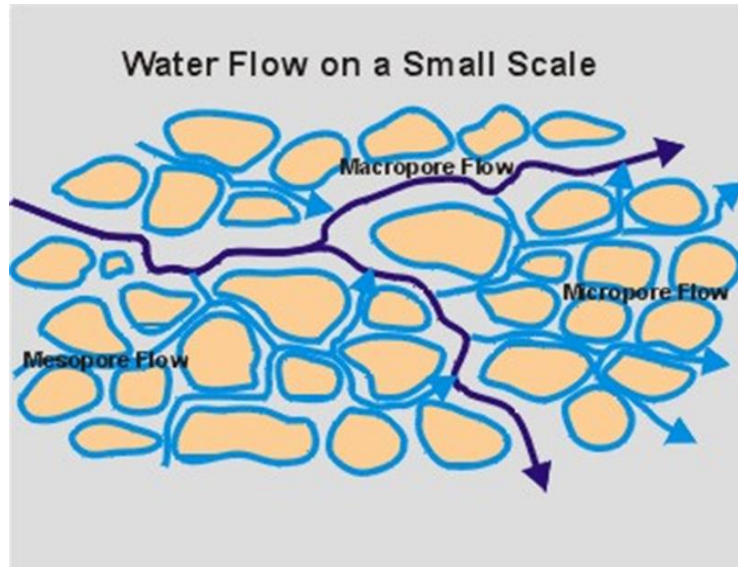


Definizioni di suolo

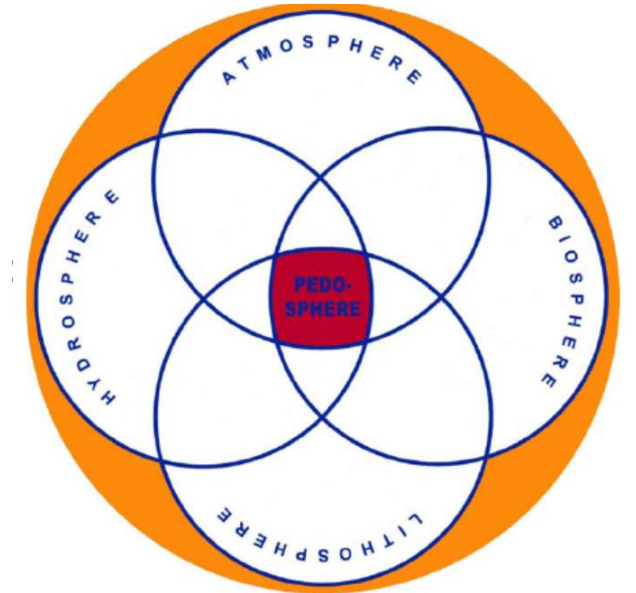
Il suolo è un sistema biogeochimico multicomponente ed aperto che contiene sia solidi che liquidi che gas



Il suolo è un sistema poroso formato alla superficie della terra attraverso processi di alterazione derivati da fenomeni biologici, geologici ed idrologici.



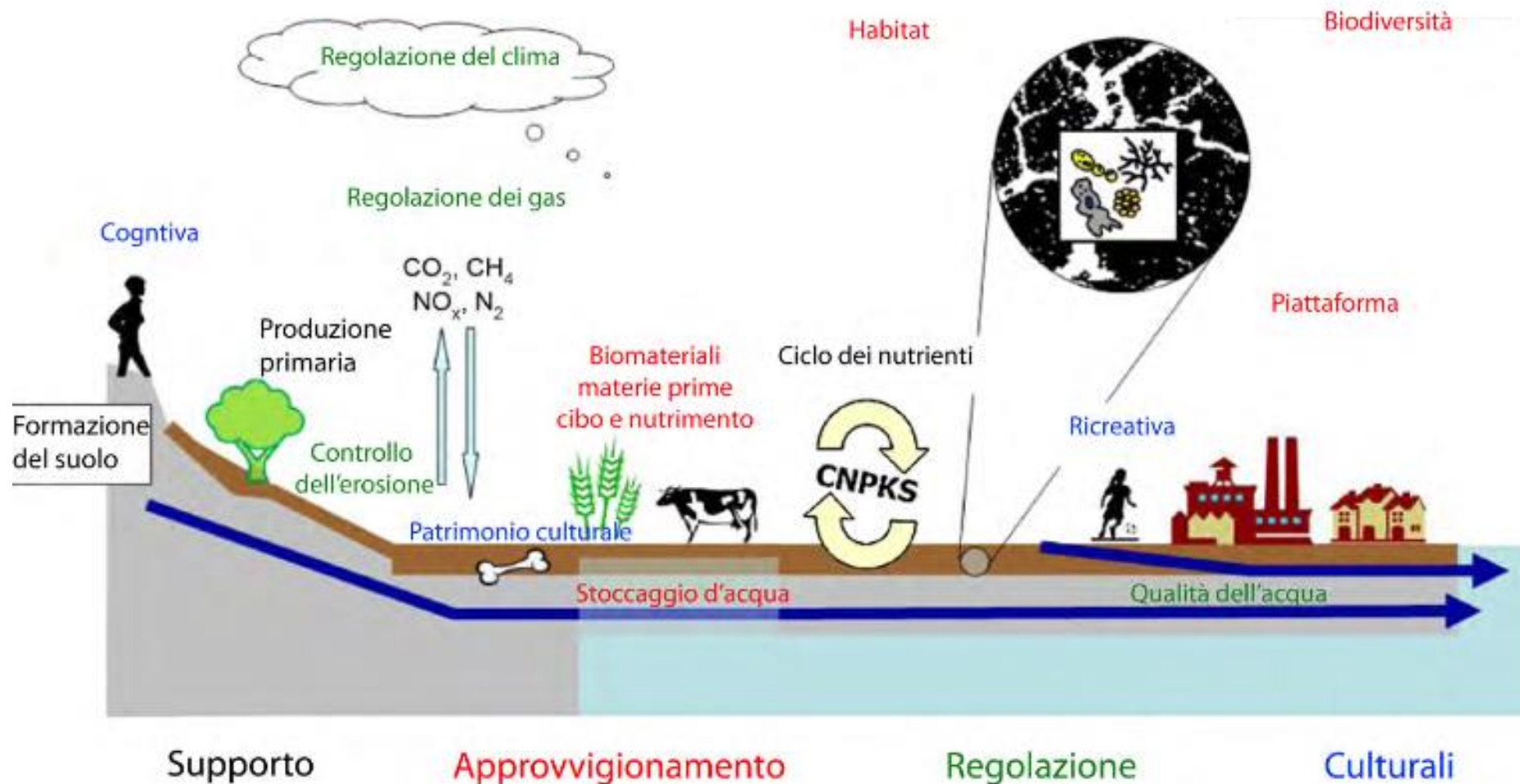
Il suolo è il risultato di un'interazione dinamica tra mezzo fisico e mezzo biologico. E' un sistema trifasico al crocevia tra idrosfera atmosfera, litosfera e biosfera



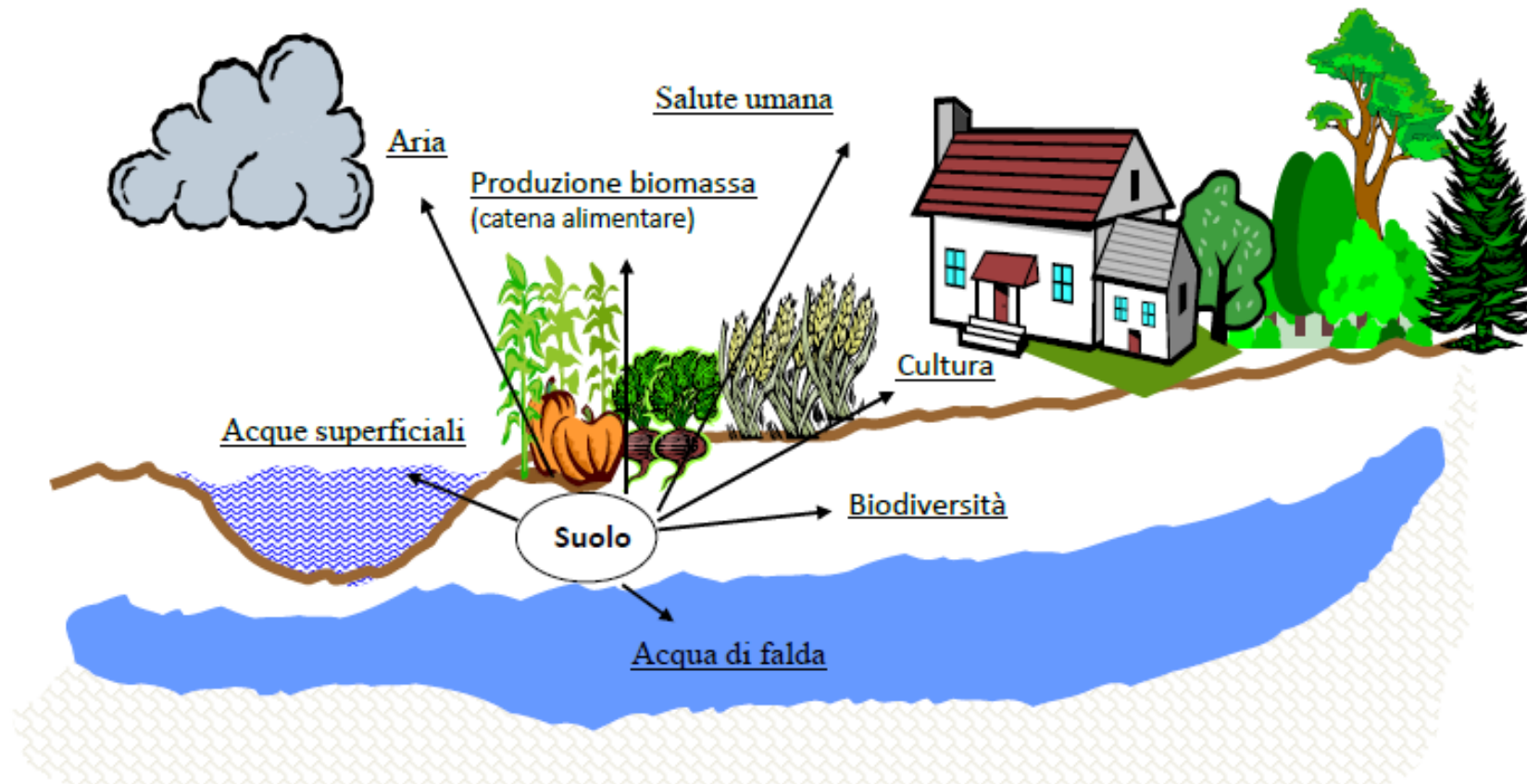
Definizione di suolo

Forse la nostra risorsa più preziosa e vitale, sia fisica che spirituale, è quella comunissima materia che abbiamo sotto i piedi, che poco notiamo e a volte chiamiamo terra, ma che è difatti la matrice della vita sul pianeta ed il mezzo di purificazione in cui i rifiuti sono decomposti e riciclati generando produttività”.

Daniel Hillel
Professor of Soil Physics and Hydrology,
University of Massachusetts



Il suolo fornisce beni e servizi non sostituibili !



Esso è risorsa fondamentale per la vita sulla Terra, è il supporto alla produzione agraria e forestale fornendo cibo, biomasse e materie prime, è riserva di patrimonio genetico, filtra e conserva l'acqua delle precipitazioni, è custode della memoria storica, nonché elemento essenziale del paesaggio.

È il principale deposito di carbonio delle terre emerse.

Le superfici delle rocce sono inizialmente colonizzate da organismi **fototrofi**

- **Muschi**
- **Licheni**
- **Alghe**
- **Batteri**

Produzione di sostanze organiche che consentono la colonizzazione da parte di organismi **chemiorganotrofi**

- **Funghi**
- **Batteri (*Bacteria, Archaea*)**

L'attività combinata dei diversi organismi crea le condizioni per la formazione di **comunità microbiche complesse formate da organismi eucarioti e procarioti**

L'**acqua** percolando attraverso il suolo grezzo trascina verso il basso i **minerali solubilizzati** e parte delle **sostanze chimiche** generate.



FORMAZIONE DEL SUOLO
Si forma dalle interazioni chimiche, fisiche e biologiche tra litosfera, idrosfera e atmosfera.



Produzione di CO_2 ($\rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$) ed acidi organici

Disgregazione e frammentazione delle rocce, soprattutto se costituite da CaCO_3

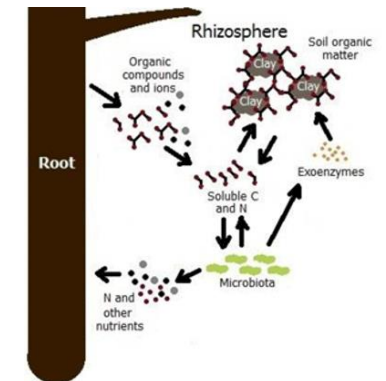
I frammenti di rocce, misti alla sostanza organica, danno origine al **suolo grezzo**.

Crescita di **piante pioniere** le cui radici, oltre a contribuire alla disgregazione delle rocce, producono **essudati radicali** utili alla **colonizzazione microbica** ed alla formazione della **rizosfera**.

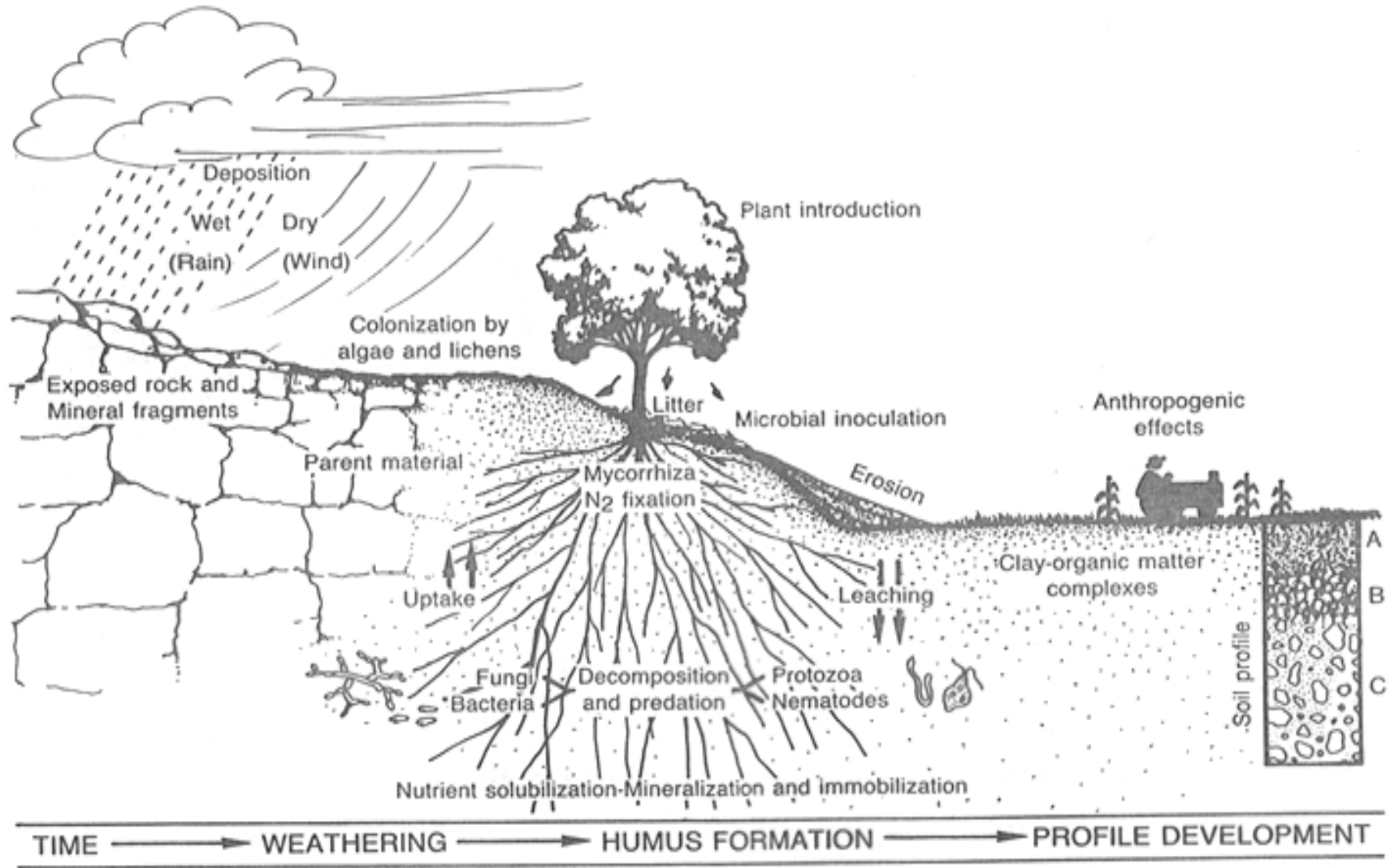
I **detriti vegetali** si aggiungono al suolo grezzo fornendo ulteriore substrato per l'**attività microbica**

Disgregazione meteorica

- **Vento**
- **Acqua**
- **Alternanza gelo-disgelo**



maturazione del suolo



Un **suolo maturo** presenta una **stratificazione verticale** → **ORIZZONTI**

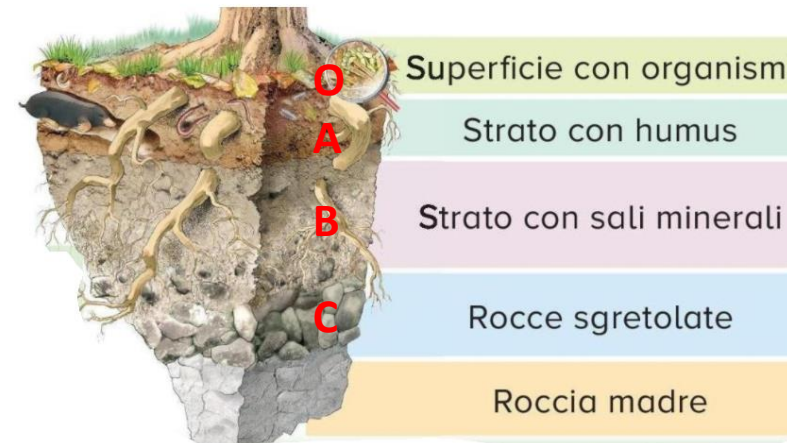
Orizzonte O (lettiera): costituito da resti organici in fase iniziale di decomposizione, ancora riconoscibili. La frazione minerale è quasi assente. È colonizzato da **microrganismi (batteri, funghi, protozoi)**, **insetti, vermi terricoli**, etc.

Orizzonte A (terreno superficiale): di colore scuro, per la presenza di **humus** misto a **minerali argillosi, quarzo** e altre **sostanze insolubili**. L'**humus** deriva dalla trasformazione dei materiali presenti nell'orizzonte O. L'orizzonte A è povero di composti chimici solubili, che vengono trasportati negli strati inferiori dall'acqua meteorica (**eluviazione**). È caratterizzato da **intensa attività microbica (batteri e funghi)** e dalla presenza delle **radici delle piante**.

Orizzonte B (sottosuolo): povero di sostanza organica mentre sono presenti **minerali solubili e alterati**, trasportati dall'acqua dallo strato sovrastante (**illuviazione**). Sono presenti **materiali argillosi ed ossidi (di Al e Fe)** che colorano il suolo. **L'attività microbica è meno intensa.**

L'orizzonte C (substrato pedogenetico alterato): formato prevalentemente da **argilla e materiali disgregati** non ancora completamente alterati e scarsamente cementati.

Roccia madre: roccia non disgregata su cui poggia il suolo.



Orizzonte O: orizzonte organico che può essere distinto in O₁ (lettiera integra) ed O₂ (materiali organici in decomposizione più o meno riconoscibili dai prodotti d'origine).

Orizzonte A: orizzonte organico-minerale, costituito dall'aggregazione di sostanza organica con i prodotti di alterazione della frazione minerale. Il colore dominante negli ambienti a clima temperato, è bruno scuro.

Orizzonte E: orizzonte minerale, grigio-cenere, in cui si è avuta la perdita di argilla, Fe ed Al o sostanza organica e l'accumulo residuale di minerali poco alterabili.

Orizzonte B: orizzonte minerale, che differisce dal sottostante C per un'alterazione più spinta e/o per un accumulo di argilla, sostanza organica, ossidi, provenienti dagli orizzonti più superficiali.

Orizzonte C: orizzonte di disgregazione in prevalenza fisica, della roccia o del *parent material*.

R: roccia in posto non alterata.

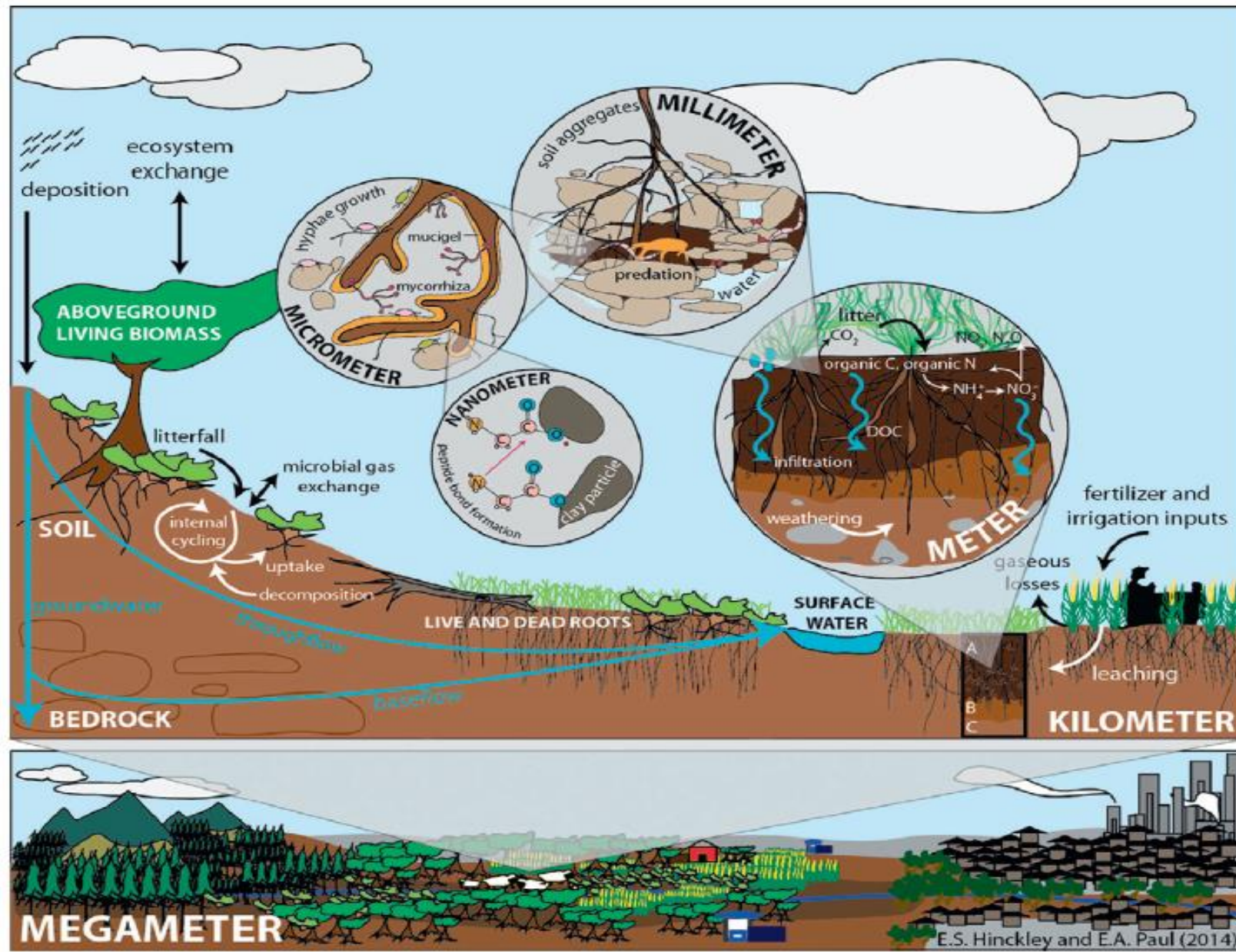


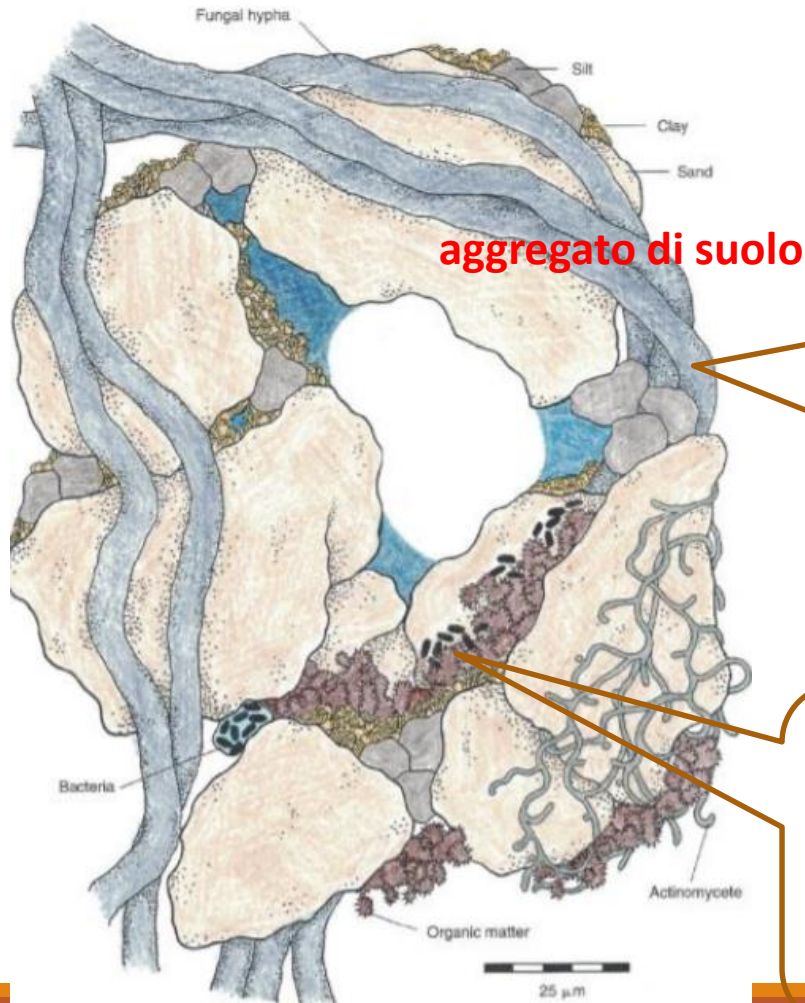
FIG 1.2 Spatial relationships from the nanometer to the kilometer and megameter must be understood to interpret soil microbiology, ecology, and biochemistry. *Drawn and copyrighted by E. Hinckley and E. Paul.*

FATTORI CHE INFLUISCONO SULLA FORMAZIONE DEL SUOLO

- Tipo di rocce che da origine al suolo
- Clima
- Topografia (caratteristiche del territorio)
- Attività organismi viventi
- Tempo

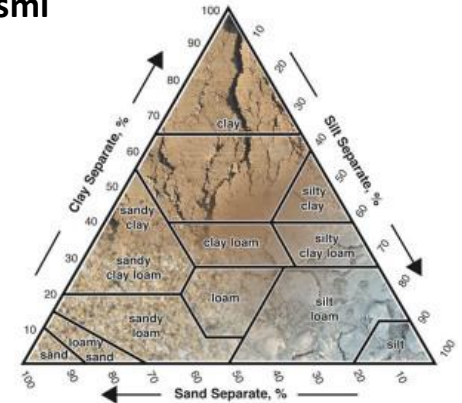
Degradazione dei minerali primari (quarzo, mica, ...) in
sabbie (>50 μm);
limo (2-50 μm);
argille (<2 μm).

La **tessitura del suolo** è un aspetto importante per la **colonizzazione microbica**: le particelle con un alto **rapporto superficie/volume** (argille) offrono una maggiore superficie disponibile per l'interazione con i microrganismi

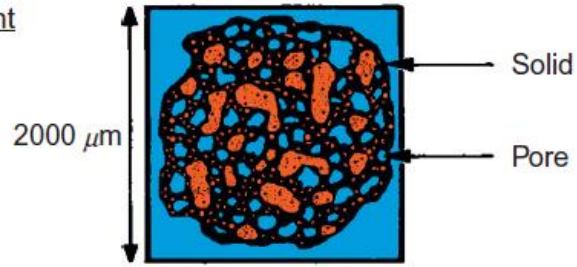


i **funghi filamentososi**, disponendosi in superficie, creano una fitta rete di **ife** che contribuisce alla **stabilizzazione degli aggregati** ed alla loro unione. Le ife, inoltre, favoriscono la **diffusione di sostanze nutritive**.

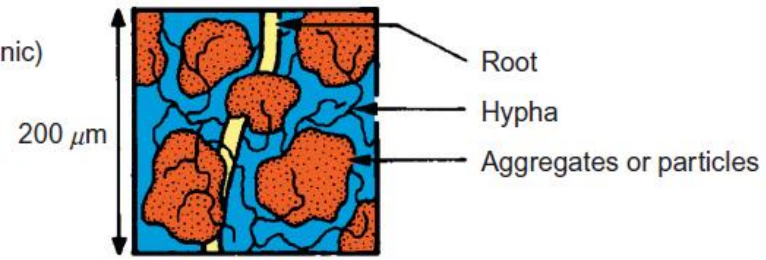
I **batteri** si spingono fin dentro i **pori più piccoli**, che rappresentano dei **microhabitat** in cui sono anche al riparo dai loro predatori (protozoi). All'interno dei pori, se la diffusione di O_2 è limitata si possono creare le condizioni per la crescita di **batteri anaerobi**.



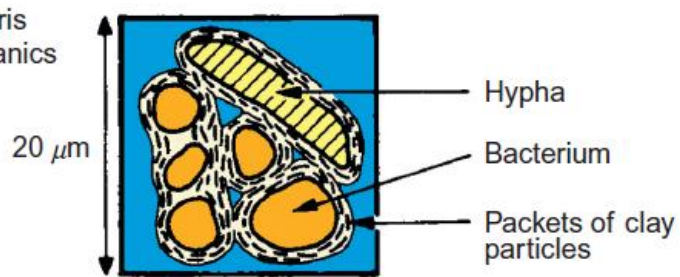
Major binding agent



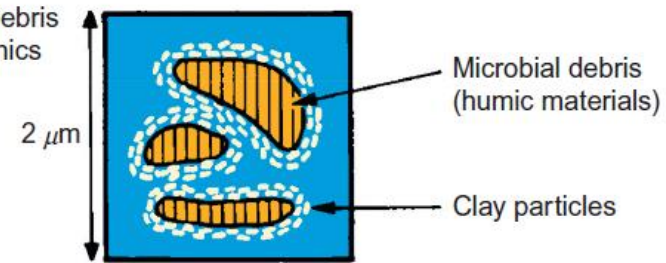
Roots and hyphae
(medium-term organic)



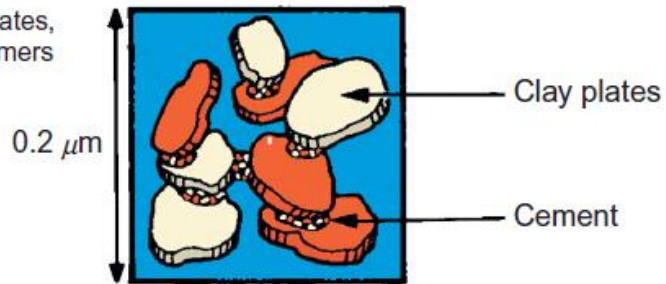
Plant and fungal debris
encrusted with inorganics
(persistent organic)



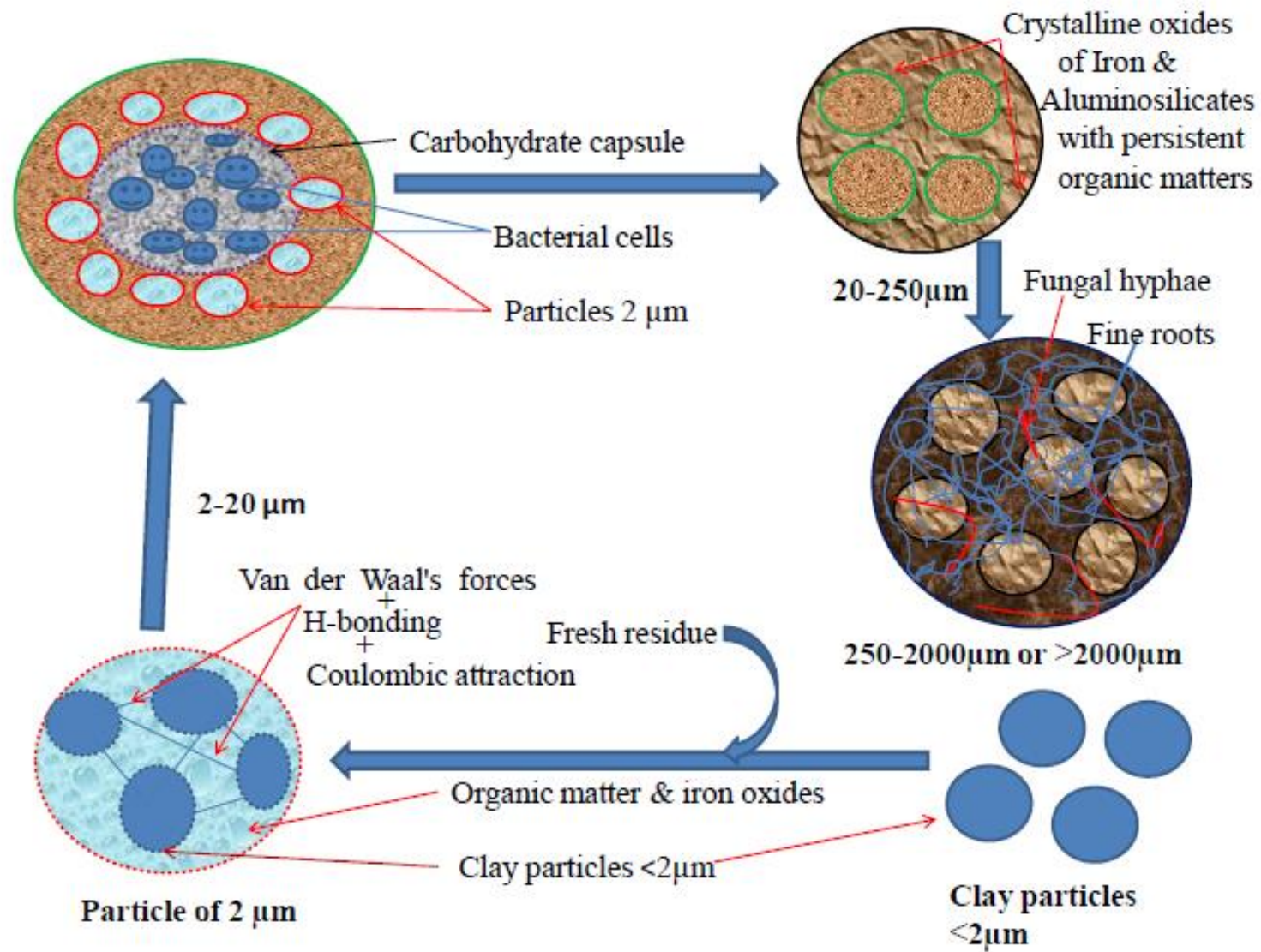
Microbial and fungal debris
encrusted with inorganics
(persistent organic)



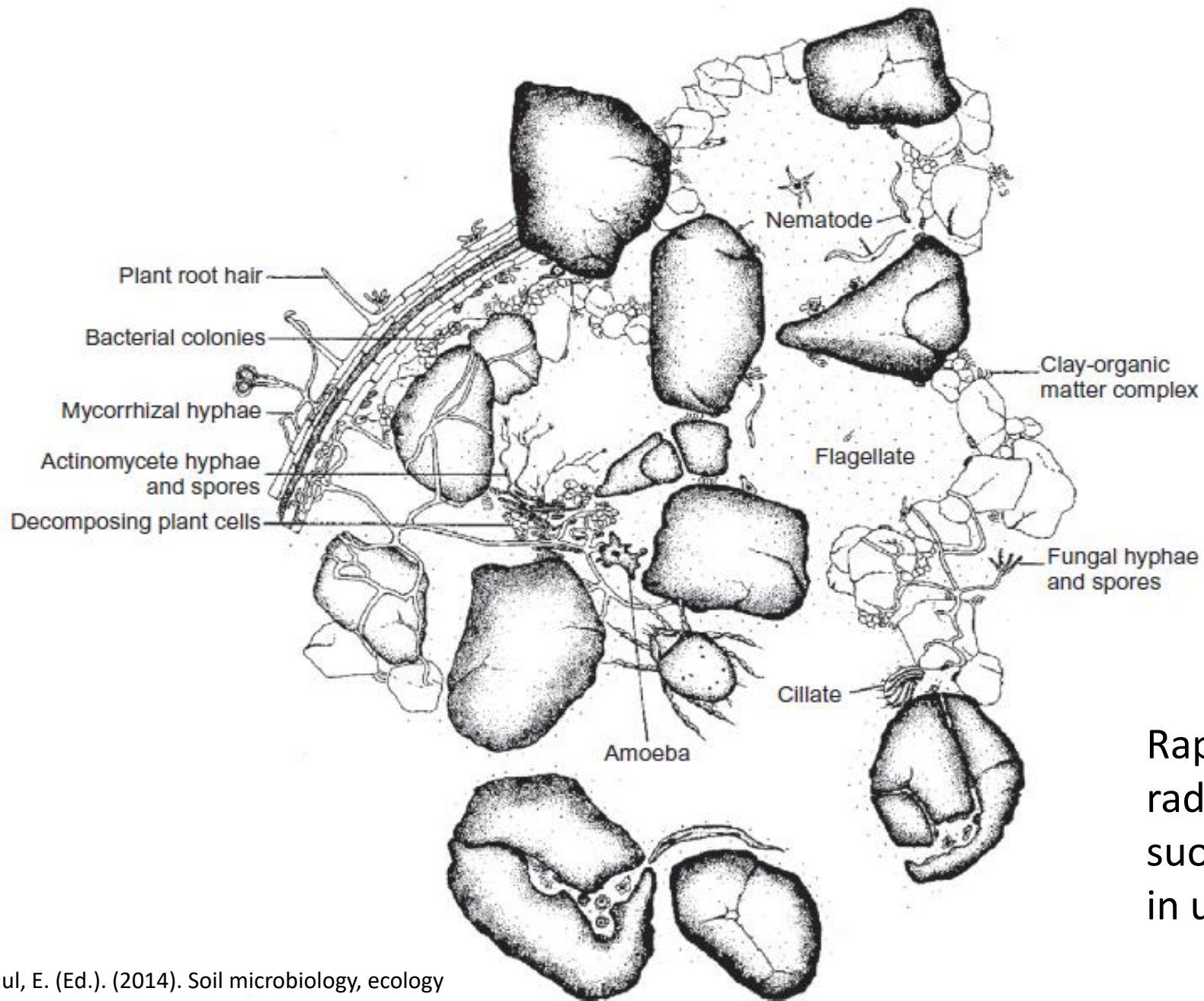
Amorphous aluminosilicates,
oxides and organic polymers
sorbed on clay surfaces
and electrostatic
bonding, flocculation
(permanent inorganic)



Gli elementi costitutivi del suolo sono percepibili a differenti livelli di scala



Rappresentazione schematica della formazioni degli aggregati del suolo.



Il suolo è un sistema di interazioni .

Rappresentazione schematica di una radice di una pianta, di aggregati di suolo e del biota a questi associato, in un'area di circa 1 cm².

FATTORI CHE INFLUENZANO L'ATTIVITÀ E LA DIVERSITÀ MICROBICA NEL SUOLO

- Aereazione (ossigeno)
- pH (concentrazione idrogenionica)
- Umidità (disponibilità di acqua)
- Potenziale ossido-riduzione
- Temperatura
- Sostanze inibenti
- Sostanze colloidali
- Salinità
- Disponibilità di nutrienti (N, P, S, ...)
- ...



Qualsiasi stress può essere dannoso per le specie sensibili e diminuire l'attività delle cellule sopravvissute, a causa del dispendio energetico richiesto dai meccanismi di tolleranza allo stress.

L'**attività microbica** è più intensa negli strati superficiali del suolo e a livello della **rizosfera**, dove maggiore è presenza di sostanza organica.



La **rizosfera** è la porzione di suolo che circonda le radici delle piante.

AREAZIONE

- I microrganismi del suolo (funghi, batteri, attinomiceti), soprattutto degli strati superiori, sono prevalentemente aerobi. Non mancano, tuttavia, micronicchie in cui l'assenza di O_2 consente la crescita di batteri aerobi-anaerobi facoltativi e fermentanti.
- In condizioni di grandi disponibilità di nutrienti, l'intensa attività microbica può rapidamente consumare l' O_2 , rendendo l'ambiente anossico.
- All'aumentare della profondità diminuisce la disponibilità di O_2 .

Atmosfera del suolo

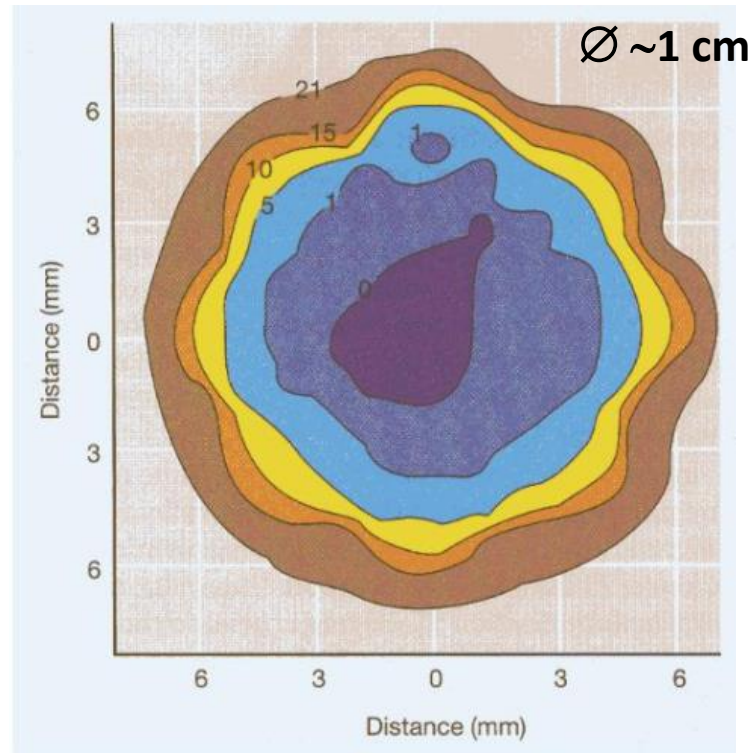
Gradiente di O₂ all'interno di un aggregato di suolo

Quando la **diffusione dell'O₂** dall'esterno verso l'interno di un di aggregato di suolo è limitata si generano micronicchie con diverse concentrazione del gas.

Al centro dell'aggregato si possono avere condizioni di anossia.



A seconda della disponibilità di **fonti di energia** e di **accettori di e⁻**, si svilupperanno batteri fermentanti, anaerobi ed aerobi-anaerobi facoltativi.



Le concentrazioni di O₂ e CO₂ variano in funzione della **velocità di diffusione dei gas** e dell'**attività microbica**.

Di solito, nel suolo, la concentrazione di **O₂** tende a diminuire e quella di **CO₂** ad aumentare.

In suoli caratterizzati da condizioni di anossia, oltre alla CO₂, si generano altri gas

N₂ ← batteri denitrificanti,

H₂S ← batteri solfato riduttori,

CH₄ ← metanogeni.

L'**acqua** limita la diffusione dei gas

O₂

CO₂

N₂

...

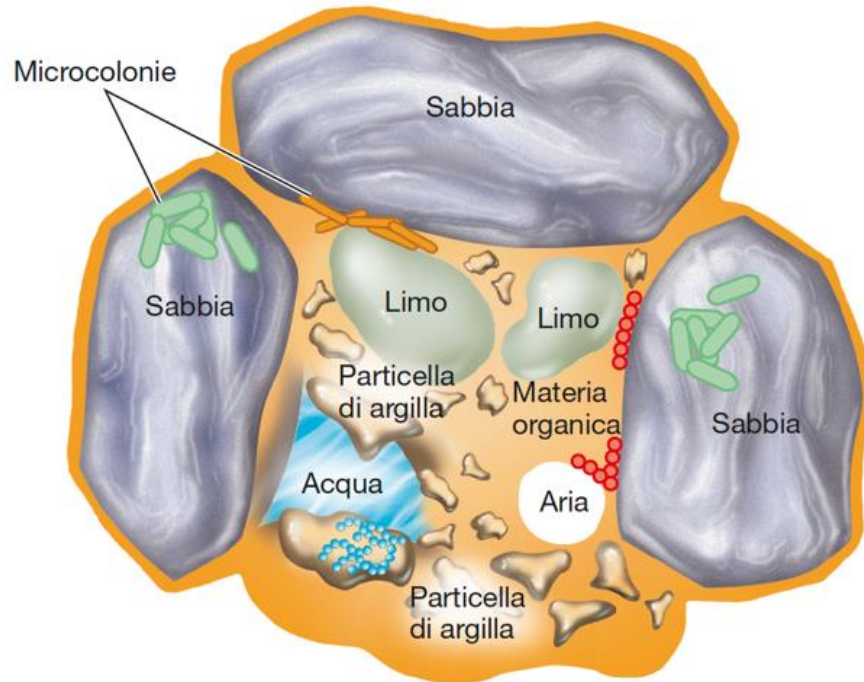
UMIDITÀ (DISPONIBILITÀ DI ACQUA)

Acqua

La disponibilità di acqua dipende da diversi fattori:

- Regime delle precipitazioni
- Composizione del suolo
- Struttura del suolo (drenaggio)
- Vegetazione

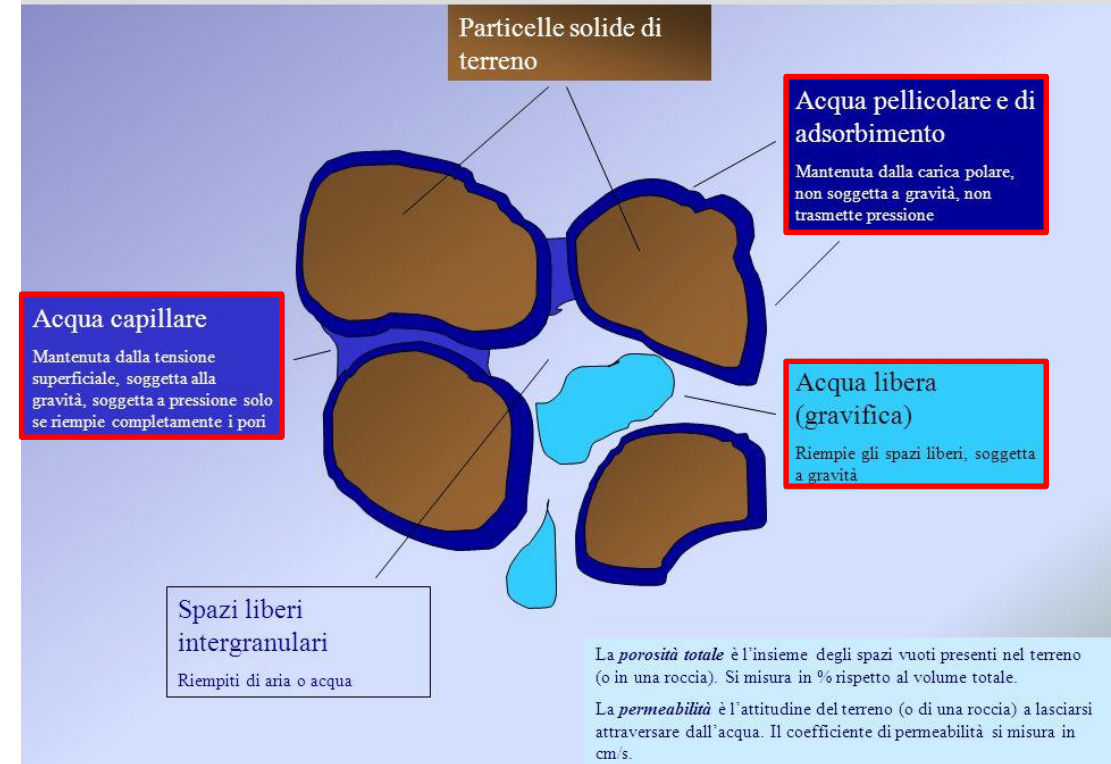
Aggregato di suolo



I **microrganismi** sono prevalentemente adesi alle componenti solide del suolo, mentre sono **scarsi nella soluzione circolante**.

L'acqua presente nel suolo è definita **soluzione circolante di suolo** (acqua arricchita dei materiali disciolti)

L'acqua nel terreno



Acqua e diponibilità di O₂

La diponibilità di O₂ è condizionata dal **tipo di suolo** e dal **contenuto di acqua**:

- Nei **suoli ben drenati** la concentrazione di O₂ nei pori è molto vicina a quella della superficie.
- Nei **suoli poco drenati** o **saturo di acqua** la concentrazione di O₂ è limitata e può essere rapidamente consumata dall'attività microbica. La diffusione dell'O₂ nell'acqua è 10000 volte inferiore che nell'aria.

L'**umidità** del suolo influisce **biologicamente** e **fisicamente** sul biota.

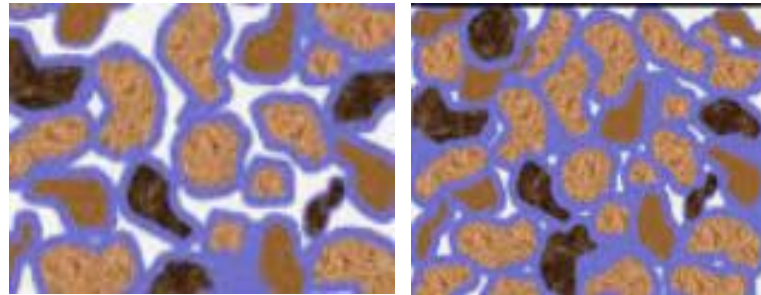
Fisicamente, l'umidità del suolo

- limita gli sbalzi di **temperatura** (l'acqua è un buon conduttore di calore)
- influisce sull'**areazione** del suolo (limita la diffusione dei gas).

Biologicamente, l'acqua è essenziale per la vita, per l'attività enzimatica e il metabolismo.

È il solvente per nutrienti biologici e altri prodotti chimici.

Favorisce il trasporto e la diffusione di fattori nutritivi solubili.



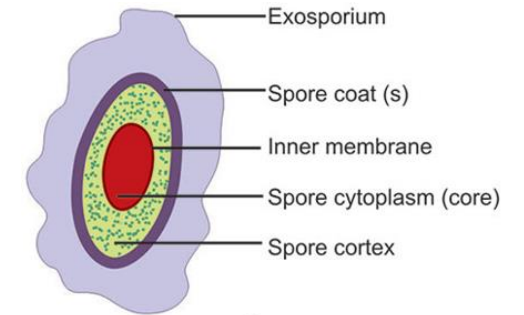
Il grado di **riempimento dei pori** del suolo influenza il **movimento dei microrganismi** e la **composizione della comunità microbica**. In particolare, influenza il rapporto **biomassa fungina/biomassa batterica**: la biomassa batterica aumenta con l'aumento del grado di saturazione del suolo.

I batteri **Gram positivi** risultano più numerosi nei terreni più umidi, mentre i funghi ed i batteri **Gram negativi** prevalgono in terreni più asciutti.

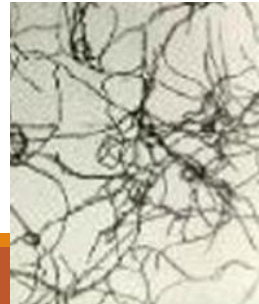
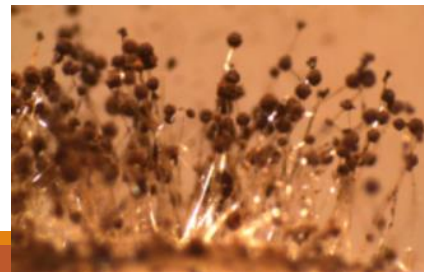
Stress idrico

In condizioni estreme, alcuni **batteri** possono formare **endospore** che consentono all'organismo di sopravvivere fino a quando non si verificano condizioni più adatte alla crescita.

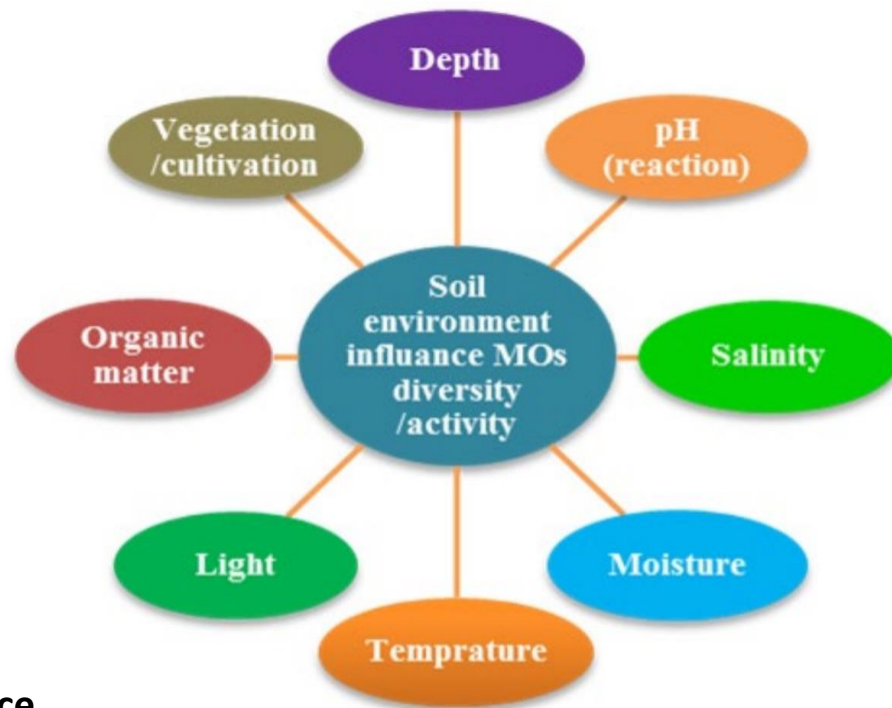
Le cellule possono entrare in uno **stato VBNC** o **sintetizzare sostanze chimiche** che possono consentire la sopravvivenza durante periodi di siccità.



I **funghi** tendono ad essere più resistenti allo stress idrico rispetto ai batteri.



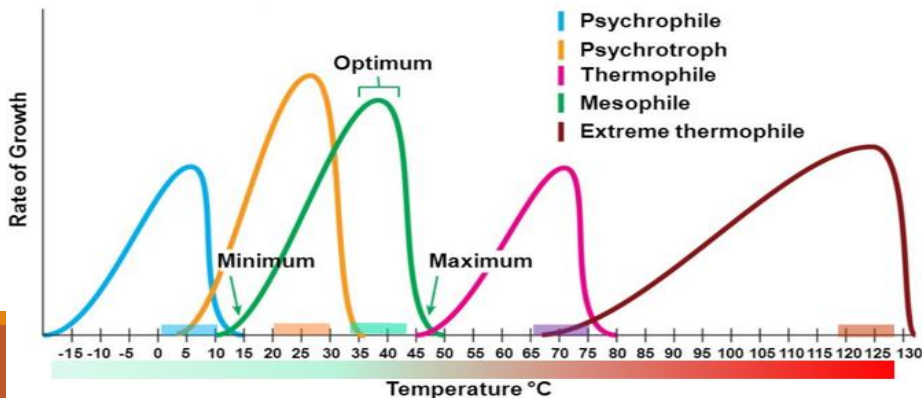
Gli **actinomiceti** possono tollerare condizioni più secche dei funghi: possono proteggersi dalla siccità sintetizzando l'aminoacido **prolina**.



TEMPERATURA

La temperatura influisce

- **Direttamente**, condizionando il tasso di attività metabolica (attività enzimatiche) dei microrganismi;
- **Indirettamente**, influenzando proprietà chimico-fisiche (diffusione e solubilità) dei nutrienti, *weathering* dei minerali, velocità di evaporazione, etc.



Entro certi limiti, l'**attività biologica aumenta con l'aumentare della temperatura**. Di solito, i microrganismi del suolo sono esposti a temperature che oscillano nell'intervallo **da circa 0 a 60 °C**, anche se è probabile che nessuna singola specie sia attiva nell'intero intervallo.

La temperatura ottimale per la crescita dei microrganismi del suolo oscilla nell'intervallo **20-50 °C**.

pH

Il pH influenza direttamente la **solubilità degli elementi**.

A pH acido, l'**Al** è più solubile e quindi più disponibile per gli organismi (aumento tossicità). I minerali essenziali possono diventare non disponibili a livelli estremi di pH: **P** e **Mn** diventano meno disponibili a valori di pH elevati.

- **Suoli acidi** favoriscono lo sviluppo dei **funghi**, limitando la crescita dei batteri che non tollerano gli ambienti troppo acidi (limitazione della competizione a favore dei funghi).
- **Suoli neutri** favoriscono lo sviluppo di batteri ed attinomiceti.

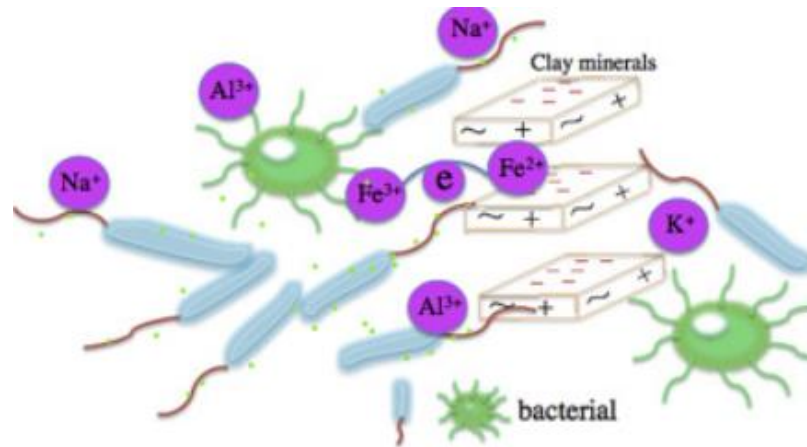
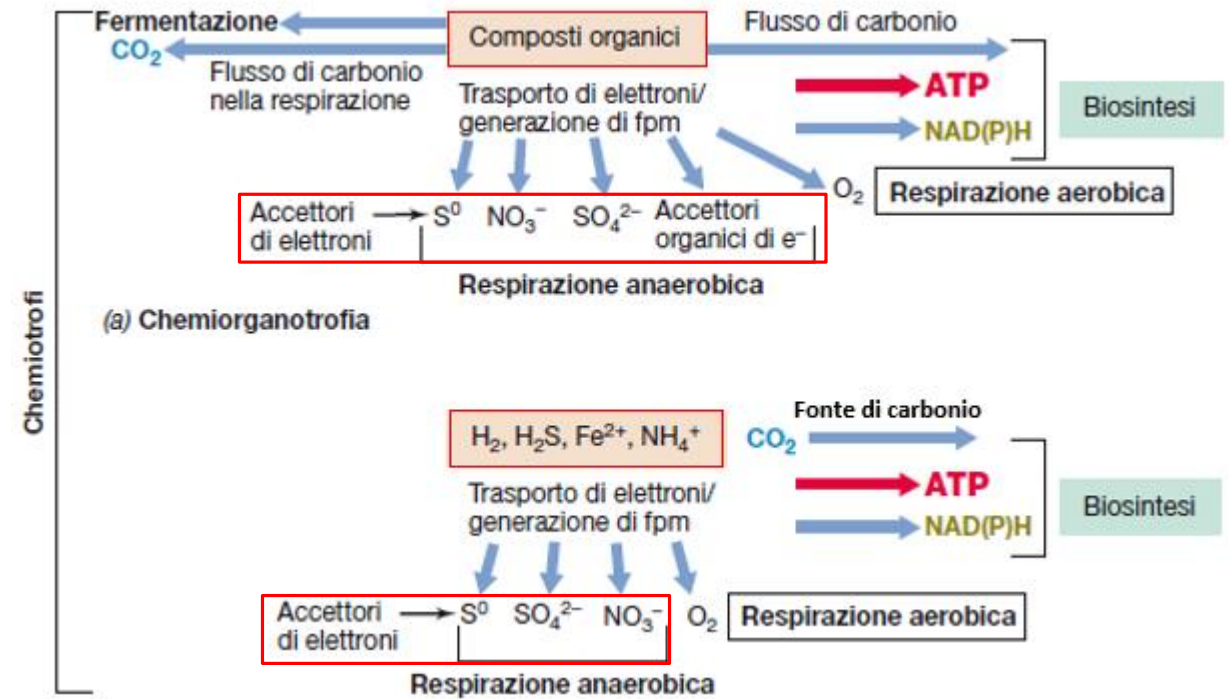
POTENZIALE OSSIDO-RIDUZIONE

I cambiamenti nello stato redox del suolo influenzano il pool di accettori di elettroni disponibili per i microrganismi.

- La presenza ossigeno (**potenziale positivo**) rende i suoli un ambiente ossidante, favorendo i metabolismi aerobici. Un'intensa attività aerobica può, tuttavia, rendere riducente l'ambiente.
- Gli ambienti riducenti (**potenziale negativo**), grazie alla disponibilità di accettori di e^- diversi dall' O_2 , favoriscono i microrganismi con metabolismi di tipo anaerobico.

SOSTANZE INIBENTI E COLLOIDALI

- Sostanze inorganiche attive ad elevate concentrazioni ($NaCl$, ...);
- Sostanze inorganiche attive a basse concentrazioni (arsenico, H_2S , metalli pesanti, etc.)
- Sostanze prodotte dalle radici delle piante;
- Argille, legando sostanze nutritive ed enzimi extracellulari, possono limitare lo sviluppo microbico; le argille possono legare anche sostanze tossiche, favorendo la crescita microbica.



SALINITÀ

La **salinizzazione** consiste in un accumulo di sali idrosolubili nel suolo (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^-).

Un elevato contenuto di Na^+ provoca la distruzione della struttura del suolo che, inducendo una carenza di O_2 , inibisce la crescita delle piante e la vita animale.



Gli organismi vanno incontro ad un **notevole dispendio energetico** per mantenere l'**equilibrio osmotico** tra il citoplasma ed il mezzo circostante



estrusione degli ioni Na^+ dal citoplasma, derivanti dalle elevate concentrazioni saline dell'ambiente.

La salinità può influire sulla **composizione delle comunità microbiche**.
Nei suoli salinizzati, a diverse concentrazioni di NaCl , si osserva una significativa **riduzione della concentrazione fungina**.
Allo stesso modo, con un aumento del livello di salinità (>5%), il numero totale di **batteri** ed **attinomiceti** è drasticamente ridotto.

VEGETAZIONE

La vegetazione che ricopre il suolo contribuisce alla composizione ed alla biomassa delle comunità microbiche.

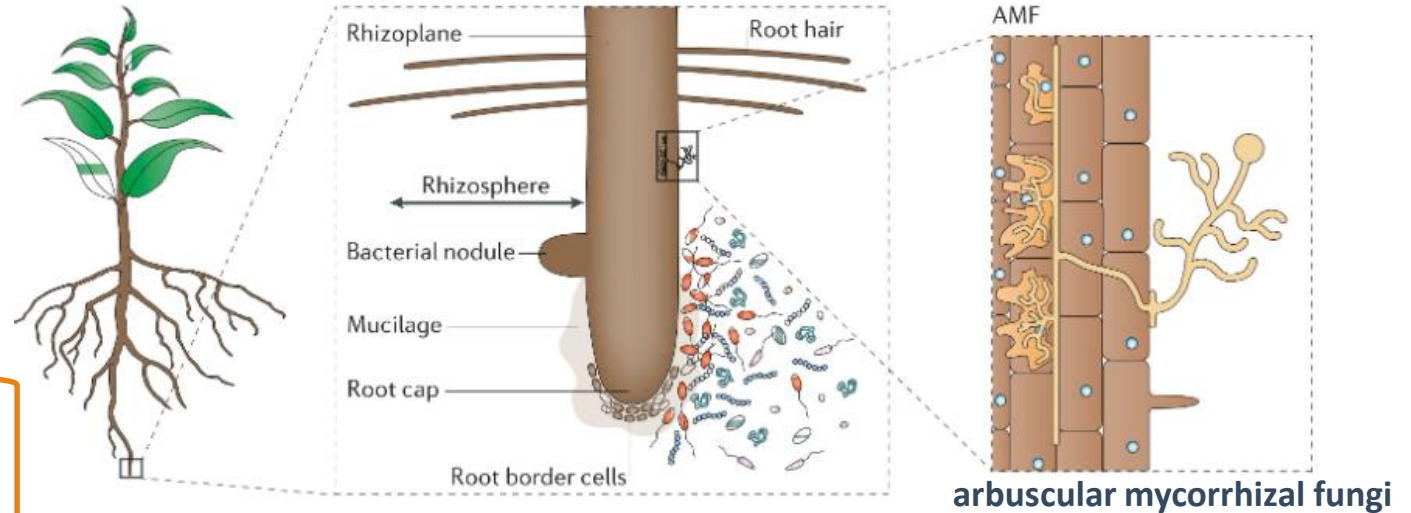
Essudati radicali e residui vegetali costituiscono una fonte di nutrienti preziosa per i microrganismi.

La **rizosfera** (dal greco *rhizo*=radice; *sphaira*=sfera) è la porzione di suolo **che circonda le radici** delle piante. Nella rizosfera oltre alle radici, sono presenti **microrganismi simbiotici**, **batteri saprofiti** e **patogeni**, **funghi**, etc.

Il **rizopiano** rappresenta la superficie della radice.

L'**ambiente rizosferico** è ricco di sostanze organiche di diversa natura:

- **Essudati**, costituiti da **composti a basso peso molecolare** rilasciati dalle radici (senza partecipazione attiva da parte della pianta);
- **Secrezioni**, rilasciate attivamente dalla pianta;
- **Lisati cellulari** di origine vegetale e microbica;
- Mucillagini e polisaccaridi;
- Sostanze ad attività antimicrobica;
- Sostanze esopolimeriche (EPS)
- ...



La **biomassa** e l'**attività microbica** sono maggiori nella rizosfera rispetto al suolo circostante (*bulk soil*) ed influenza direttamente lo sviluppo delle radici.

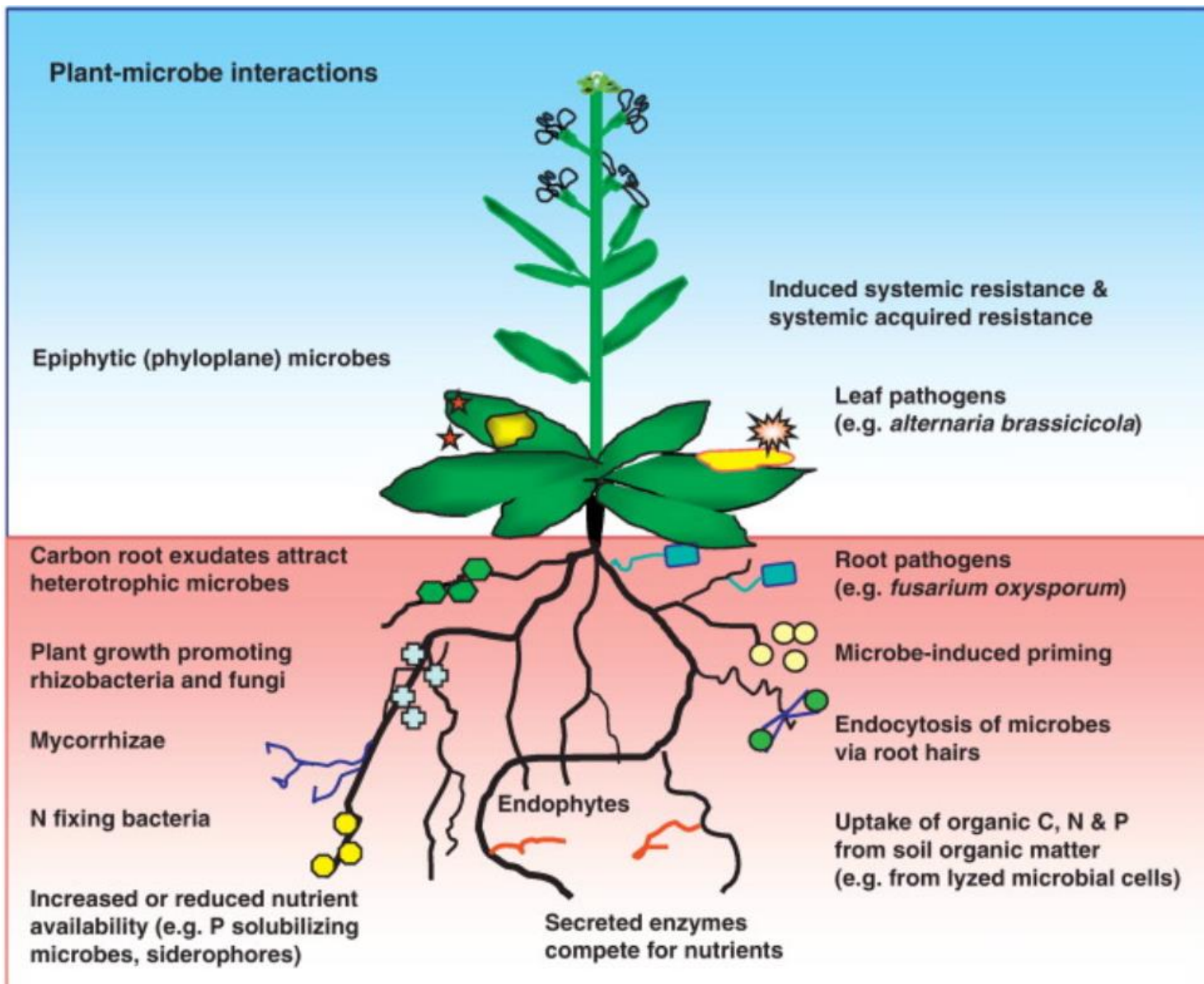
Molti microrganismi instaurano stretti rapporti con le piante (**rizobi**, **funghi micorrizici**).

Le sostanze rilasciate nell'ambiente rizosferico

- **influenzano il pH**
- **rendono biodisponibili sostanze nutrienti**
- ...

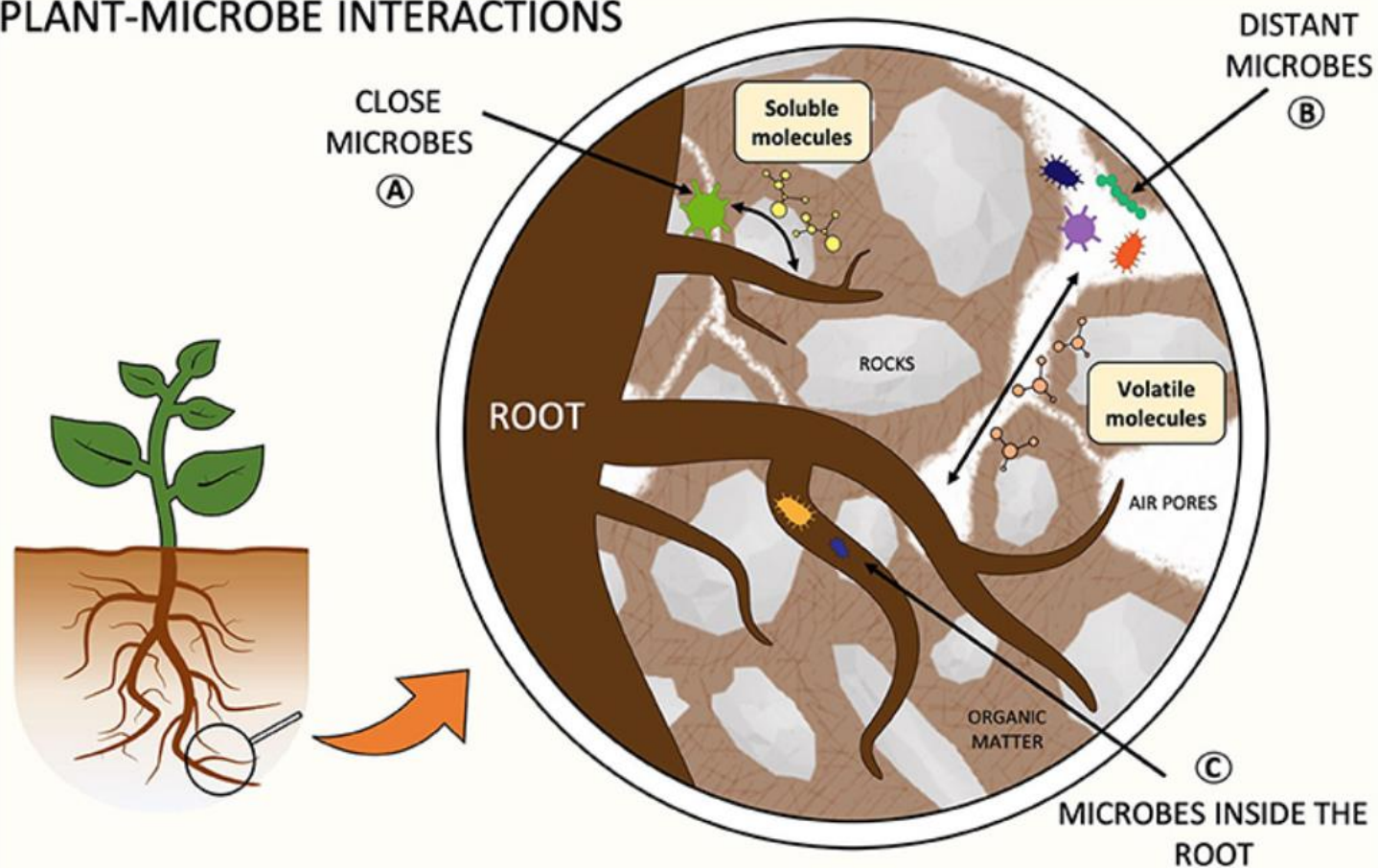
Alcune sostanze rilasciate possono avere

- **effetto tossico sulle piante**
- **effetto tossico sui microrganismi**



Interazioni tra la pianta e il suo microbioma

PLANT-MICROBE INTERACTIONS



Interazioni tra pianta e microrganismi nella rizosfera.

L'immagine mostra tre tipi di interazioni: (A) interazioni tra piante e microrganismi che vivono sulla superficie della radice o vicino alle radici, con l'aiuto di molecole solubili; (B) interazioni tra piante e microrganismi che vivono lontano dalle radici, con l'aiuto di molecole volatili; (C) interazioni con i microrganismi che vivono all'interno delle radici, direttamente a contatto con le cellule della radice.

I batteri del suolo



I batteri del suolo sono organismi molto resistenti e possono sopravvivere in condizioni ambientali difficili o mutevoli. I batteri sono efficienti solo dal 20 al 30% nel riciclaggio del carbonio, hanno un alto contenuto di N (dal 10 al 30% di N, C:N = 3-10), e una breve vita. Esistono fondamentalmente quattro gruppi funzionali di batteri del suolo

decompositori, mutualisti, agenti patogeni e litotrofi.

I batteri decompositori consumano zuccheri e composti di carbonio semplici, mentre i batteri mutualistici formano partnership con piante tra cui i batteri che fissano l'azoto (Rhizobia). I batteri possono anche diventare patogeni per le piante e i batteri litotrofici convertono l'azoto, lo zolfo o altri nutrienti in energia e sono importanti nel ciclo dell'azoto e nella degradazione dell'inquinamento. Gli actinomiceti sono classificati come batteri, ma sono molto simili ai funghi (benché siano procarioti) e decompongono composti organici recalcitranti (difficili da decomporre). I batteri hanno la capacità di adattarsi a molti diversi microambienti del suolo (umido o secco, ben ossigenato o povero di ossigeno). Hanno anche la capacità di alterare l'ambiente del suolo a beneficio di alcune comunità vegetali man mano che le condizioni del suolo cambiano.

Decompositori

I batteri svolgono un ruolo importante nella decomposizione di materiali organici, soprattutto nelle prime fasi di quando i livelli di umidità sono alti. Nelle fasi successive i funghi tendono a dominare. *Bacillus subtilis* e *Pseudomonas fluorescens* sono esempi di batteri decompositori.

La parola "decompositore" è un termine generico che viene spesso utilizzato per descrivere due diversi tipi di organismi: **decompositori (saprofagi)** e **detritivori (detritofagi)**. La **differenza tra decompositori e detritivori**, riguarda il modo in cui si utilizza il detrito. I detritivori devono digerire il materiale organico all'interno dei loro corpi per scomporlo. I decompositori, che sono troppo piccoli per ingerire pezzi di detrito e hanno una parete cellulare rigida, idrolizzano la sostanza organica esternamente con l'ausilio di esoenzimi.

Batteri **mutualisti** fissatori di azoto.

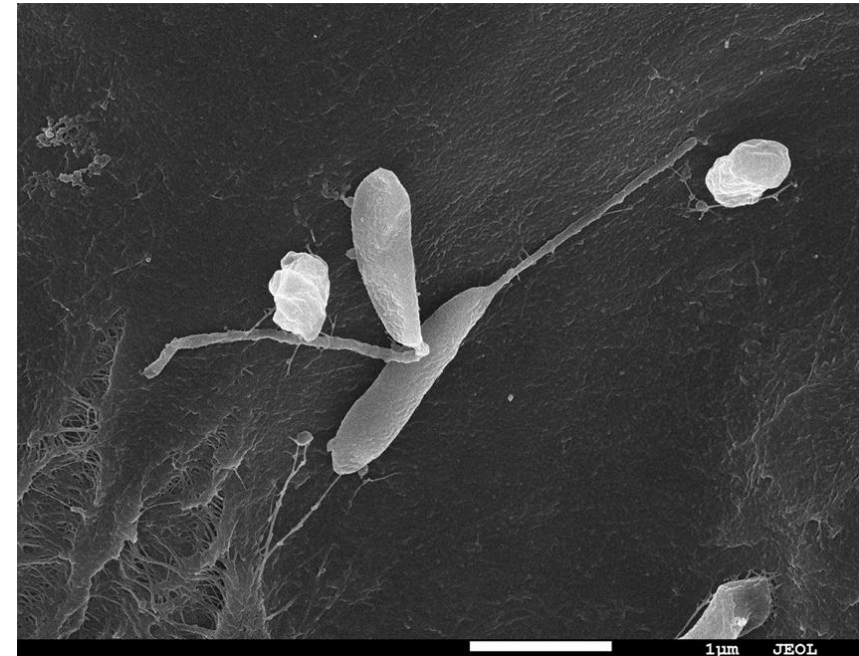
I batteri del genere *Rhizobium* entrano in relazione simbiotica con le radici delle leguminose e fissano l'azoto atmosferico. Questi batteri vivono in speciali noduli radicali sui legumi come trifoglio, fagioli, erba medica, ecc. Fissano l'azoto atmosferico e lo convertono in forme utilizzabili dalle piante. Questa forma di fissazione dell'azoto può aggiungere l'equivalente di oltre 100 kg di azoto per ettaro all'anno.

Micrografia elettronica a scansione (20.000 x) che mostra *Azotobacter vinelandii*, fissatore di azoto a vita libera, che vive su una radice

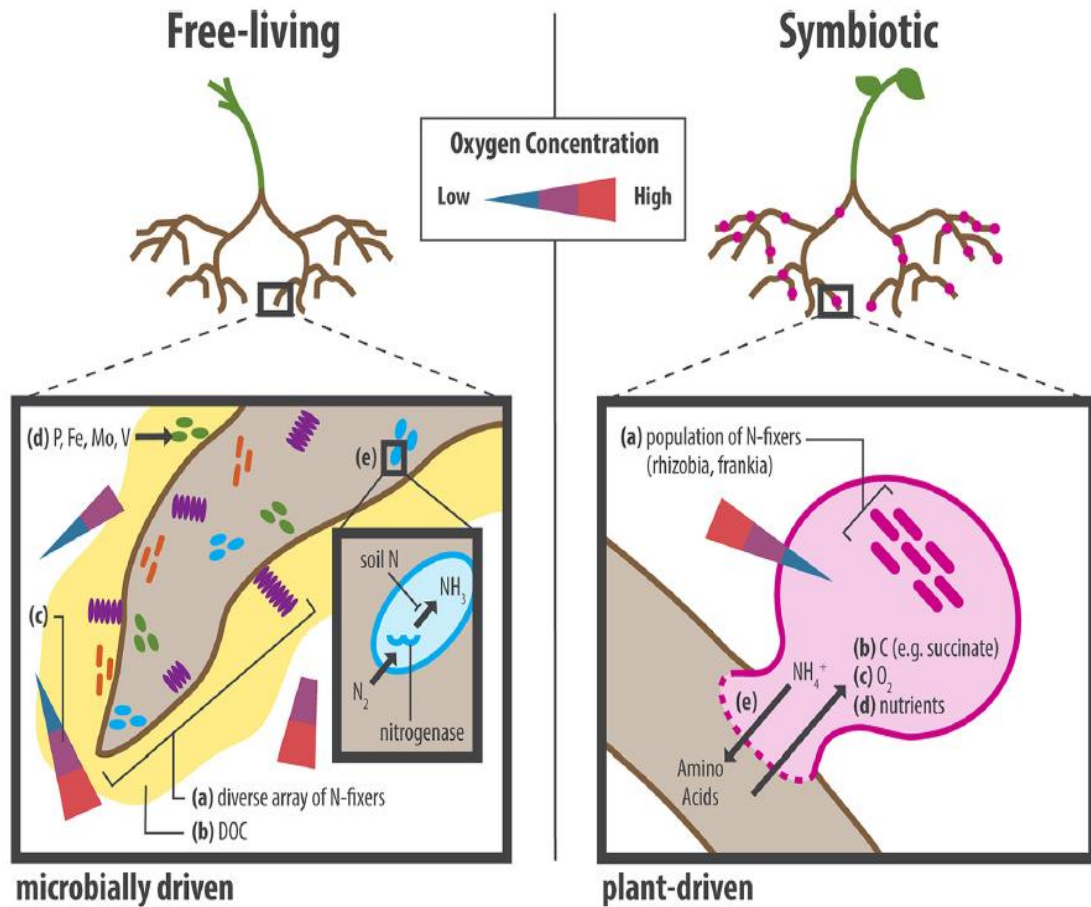


Batteri liberi fissatori di azoto.

Azotobacter, *Azospirillum*, *Agrobacterium*, *Gluconobacter*, *Flavobacterium* e *Herbaspirillum* sono tutti esempi di batteri a vita libera che fissano l'azoto, spesso associati, in forma non simbiotica, a piante non leguminose.



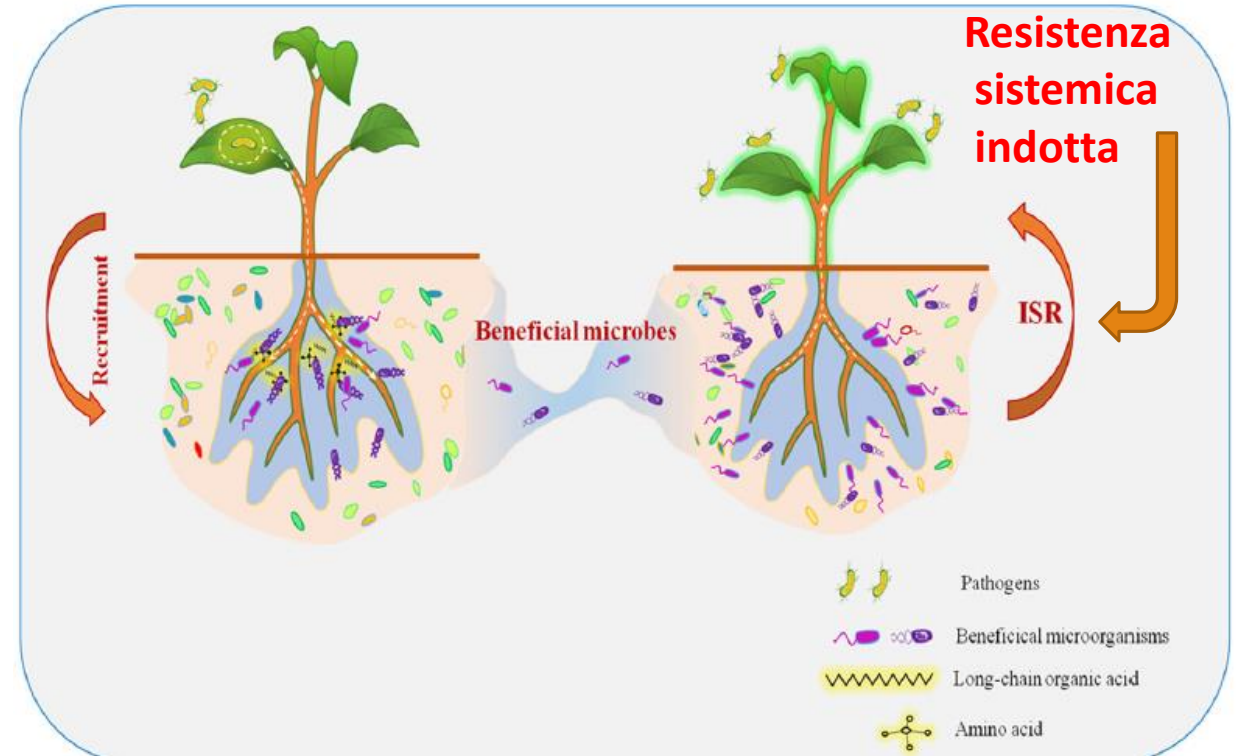
Habitat di batteri azotofissatori liberi e simbiotici



(a) La fissazione dell'N è patrimonio di molti batteri non simbiotici (liberi), mentre la fissazione simbiotica dell'N è di pertinenza solo di pochi batteri (ad esempio, *Rizobium* e *Frankia*). (b) la fissazione libera è sostenuta dal carbonio organico disciolto (DOC) nel suolo, una fonte di C variabile, mentre i fissatori simbiotici ricevono una fornitura costante di composti C semplici direttamente dalla pianta ospite. (c) La concentrazione di ossigeno nella rizosfera è altamente variabile e dipende dalla struttura e dalla tessitura del suolo e dalla respirazione di microrganismi e radici. I fissatori simbiotici di N ricevono ossigeno a basse concentrazioni dalla loro pianta ospite. (d) Nutrienti necessari per sostenere la fissazione libera di N (ad esempio P, Fe, Mo e V) vengono forniti ai fissatori simbiotici di N dalla pianta ospite.

Un altro esempio di batteri che svolgono azioni benefiche verso le piante, senza essere strettamente mutualisti, è quello dei batteri «soppressori». Il *Bacillus megaterium* è un esempio di un batterio che è stato utilizzato su alcune colture per sopprimere il fungo patogeno *Rhizoctonia solani*. Anche *Pseudomonas fluorescens* può essere utile contro questa malattia. Il *Bacillus subtilis* è stato utilizzato per sopprimere la ruggine delle piantine dei girasoli, causata da *Alternaria helianthi*. Numerosi batteri sono stati commercializzati in tutto il mondo per la soppressione delle malattie. Tuttavia, la soppressione è spesso specifica per particolari malattie di particolari colture e può essere efficace solo in determinate circostanze.

Yuan, J., Zhao, J., Wen, T., Zhao, M., Li, R., Goossens, P., ... & Shen, Q. (2018). Root exudates drive the soil-borne legacy of aboveground pathogen infection. *Microbiome*, 6(1), 1-12.



Modello meccanicistico degli essudati radicali indotti da patogeni fogliari. Le piante colpite da patogeni fogliari rilasciano essudati radicali nel terreno per manipolare le dinamiche della comunità microbica del suolo e reclutare microrganismi benefici. I cambiamenti risultanti provocano modifiche fenotipiche (come l'incremento della produzione di fitormoni) nelle nuove piante perché queste si adattino all'attacco dei patogeni.

Le piante sono continuamente attaccate da una varietà di patogeni microbici che causano malattie. Tuttavia, alcuni suoli hanno la capacità di sopprimere le malattie delle piante anche in presenza di un patogeno virulento e in condizioni climatiche favorevoli allo sviluppo della malattia. In alcuni terreni soppressori di malattie, questa capacità è correlata all'abbondanza di microrganismi specifici nel suolo. I microrganismi benefici possono inibire direttamente i patogeni producendo composti antimicrobici. Tuttavia, questi possono anche inibire indirettamente i patogeni stimolando il sistema immunitario della pianta, un fenomeno chiamato resistenza sistemica indotta (ISR). Al momento dell'attacco del patogeno, le piante richiamano e sostengono microrganismi benefici specifici che vengono in loro aiuto. L'attivazione della difesa deriva dai cambiamenti mediati dalle piante nelle comunità microbiche della rizosfera.

Tipi di agenti patogeni presenti nel suolo

I tipi più comuni di agenti patogeni presenti nel suolo sono:

Funghi. Sono i più comuni agenti patogeni (circa 8.000 specie). Gli agenti patogeni possono infettare le radici della pianta e bloccare l'assorbimento e il flusso di acqua e sostanze nutritive attraverso la pianta. I sintomi possono includere avvizzimento, ingiallimento, arresto della crescita, deperimento e eventuale morte e possono essere confusi con altri problemi come la siccità e le carenze nutrizionali. Alcuni comuni funghi dei marciumi radicali includono *Cylindrocladium*, *Pythium*, *Phytophthora* e *Rhizoctonia*. I marciumi del gambo, del colletto e della corona influenzano la pianta dal livello del suolo in su e i sintomi sono simili ai marciumi delle radici ma più facile da rilevare precocemente. Gli agenti patogeni comuni includono: *Phytophthora*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia* e *Sclerotium*. Malattie da appassimento, causate da *Fusarium oxysporum* e *Verticillium* spp. si verificano anche in presenza di un'adeguata irrigazione. *Pythium*, *Phytophthora*, *Rhizoctonia* e *Sclerotium rolfsii* sono patogeni di giovani piante, infettate al momento della germinazione o subito dopo, e ne causano la morte improvvisa.

Batteri: agenti patogeni meno comuni. Alcuni esempi: *Erwinia* (marciume molle), *Rhizomonas* (radice di lattuga), *Streptomyces* (marciume molle di patate dolci).

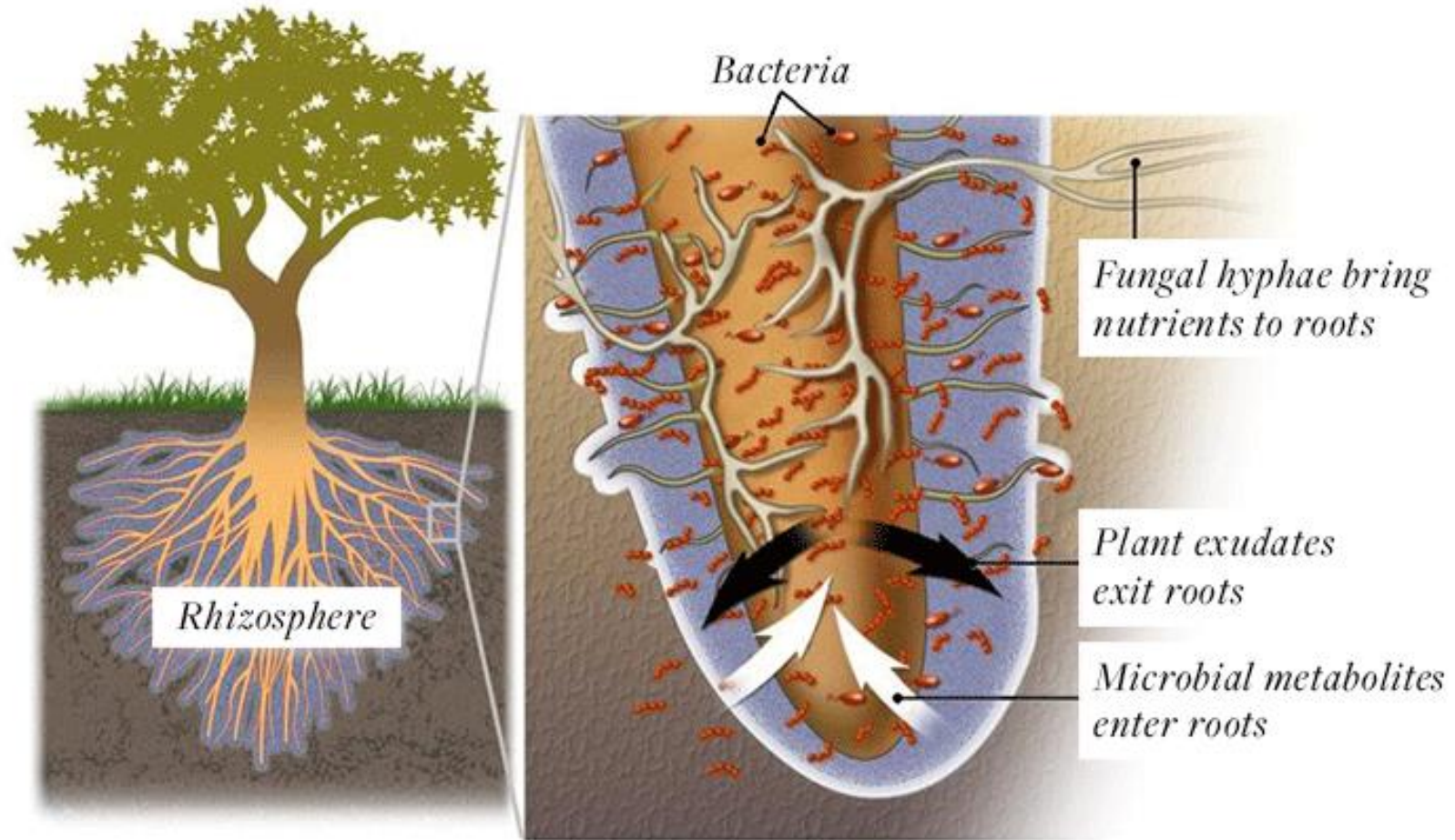
I batteri chemolitotrofi utilizzano composti inorganici come donatori di elettroni per la crescita.

I litotrofi obbligatori includono batteri ossidanti solfuro, zolfo, metalli, ammonio e nitrito.

I litotrofi facoltativi includono batteri aerobici che ossidano idrogeno e CO.

Sebbene i batteri chemiolitotrofi presentino un'ampia gamma di tratti fisiologici ed ecologici, la maggior parte utilizza il percorso di Calvin-Benson-Bassham per incorporare la CO₂. La ribulosio-1,5-bisfosfato carbossilasi (rubisCO) svolge un ruolo cruciale in questo percorso.

La rizosfera



La rizosfera è la ristretta regione del suolo attorno alla radice della pianta. La rizosfera è considerata la regione più metabolicamente attiva del suolo, in quanto più ricca di nutrienti e di microrganismi rispetto al resto del suolo. È un ambiente dinamico che si modifica costantemente in funzione delle fasi di crescita delle radici e della loro senescenza.

Nella rizosfera si definiscono vari processi metabolici, come il ciclo dei nutrienti e l'assorbimento del carbonio.

Le radici delle piante creano un'interfaccia tra la pianta, l'ambiente del suolo e la microflora. L'area della rizosfera di solito si estende a pochi millimetri dalla superficie della radice dove le radici rilasciano vari composti come essudati radicali, mucillagini e cellule radicali che si sfaldano dai tessuti radicali e sostengono popolazioni e attività microbiche più elevate rispetto al suolo.

Effetto rizosfera

L'effetto rizosfera è definito come l'influenza delle radici delle piante sullo sviluppo dei microrganismi del suolo a seguito dell'alterazione fisica e chimica del suolo e del rilascio di secrezioni radicali ed essudati all'interno della rizosfera.

L'effetto della rizosfera sulla popolazione microbica del suolo può essere misurato confrontando la densità di popolazione tra il suolo rizosferico (R) e il suolo non rizosferico (S), attraverso il “rapporto R/S”.

L'effetto rizosfera è maggiore per i batteri > funghi > actinomiceti > protozoi.

La diversità dei microrganismi è maggiore vicino al rizopiano, poi diminuisce con l'aumentare della distanza da questo.

L'effetto rizosfera è il risultato dell'interazione tra la radice della pianta e la comunità microbica in modo che l'attività microbica influenza la radice della pianta e le secrezioni della radice della pianta influenzano la biomassa microbica.

Microbioma della rizosfera

La popolazione microbica nella rizosfera è costituita da diversi tipi di microrganismi (batteri, funghi, protozoi, nematodi, virus). La popolazione microbica nella rizosfera è nota come microbioma della rizosfera e ed è quantitativamente molto superiore rispetto al suolo non rizosferico.

La popolazione microbica della rizosfera ha caratteristiche morfologiche e funzionali particolari. Le popolazioni di batteri nella rizosfera sono più grandi e sono rappresentate principalmente da Gram-negativi e denitrificanti.

Le popolazioni fungine della rizosfera, abbondanti sia nelle specie patogene che in quelle micorriziche, possono essere da 10 a 20 volte superiori a quelle della non rizosfera. Anche i protozoi e altre microfaune prosperano nella rizosfera perché è lì che il cibo è più abbondante.

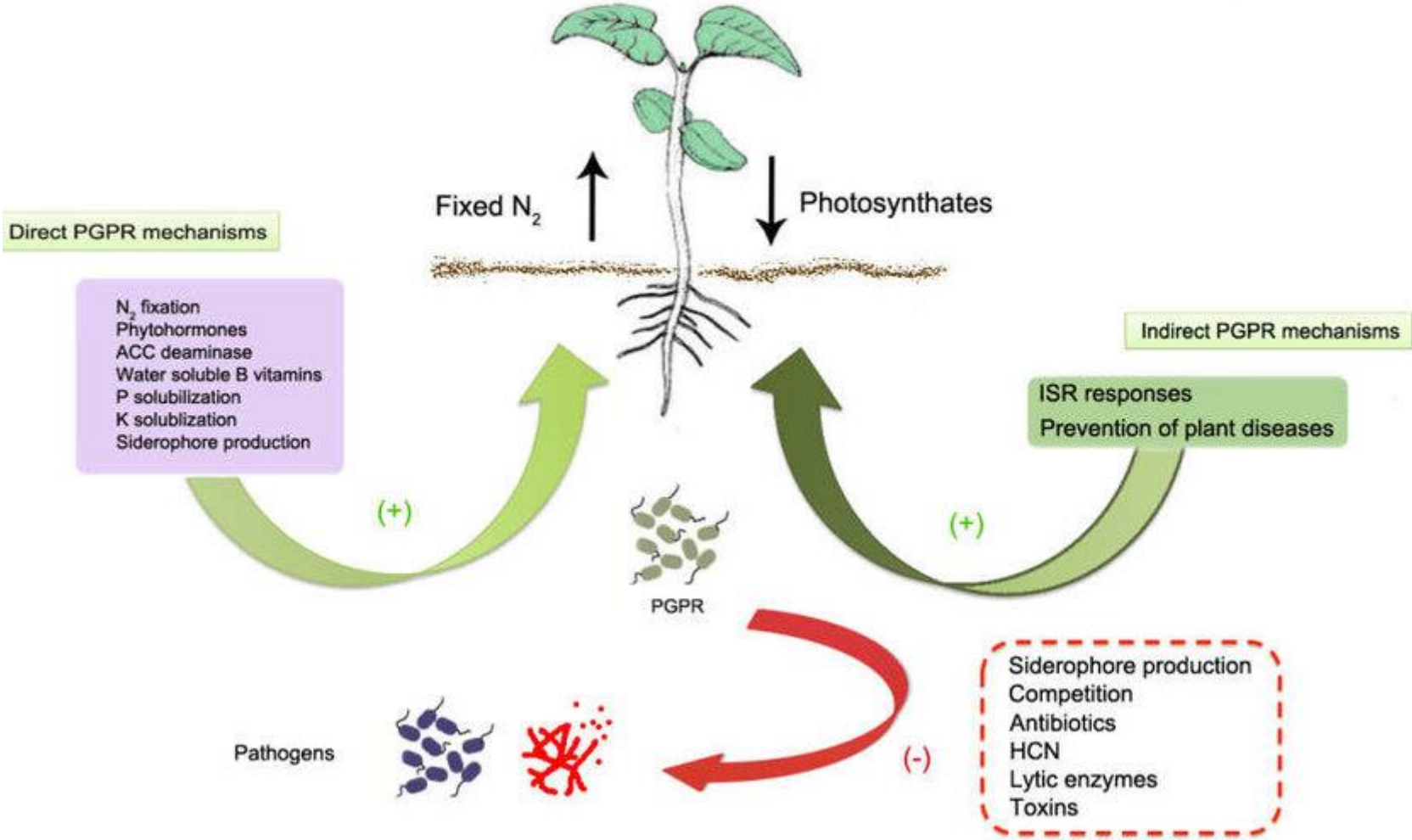
Il tipo e la popolazione di microrganismi nella rizosfera sono fortemente influenzati dal tipo di pianta coltivata.

I microrganismi del suolo non rizosferico spesso subiscono lunghi periodi di privazione di nutrienti ed hanno strategie di sopravvivenza diverse per affrontare la carenza di nutrienti e stress.

La comunità batterica della rizosfera viene reclutata dal suolo non rizosferico grazie alla tipologia e abbondanza degli essudati radicali. Le radici delle piante influenzano anche le funzioni specifiche del microbioma.

Alcuni degli esempi di microrganismi presenti nella regione della rizosfera includono *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Clostridium*, *Flavobacterium*, *Corynebacterium*, *Micrococcus*, *Xanthomonas*, *Amanita*, *Tricholoma*, *Torrentia*, *Descomytophora*, *Verthelospora*, *Micrococcus*, ecc.

Growth promoting rhizobacteria



I rizobatteri che promuovono la crescita delle piante (PGPR) sono in grado di agire da biofertilizzanti, agenti di controllo biologico e da fungicidi biologici. I PGPR sono utilizzati per promuovere un'agricoltura sostenibile e sono molto promettenti nel miglioramento dei raccolti. Il suolo rizosferico contiene diversi tipi di comunità PGPR, che mostrano effetti benefici sulla produttività delle colture, come i generi *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Erwinia*, *Mycobacterium*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Rhizobium*, *Mesorhizobium*, *Flavobacterium*, ecc.

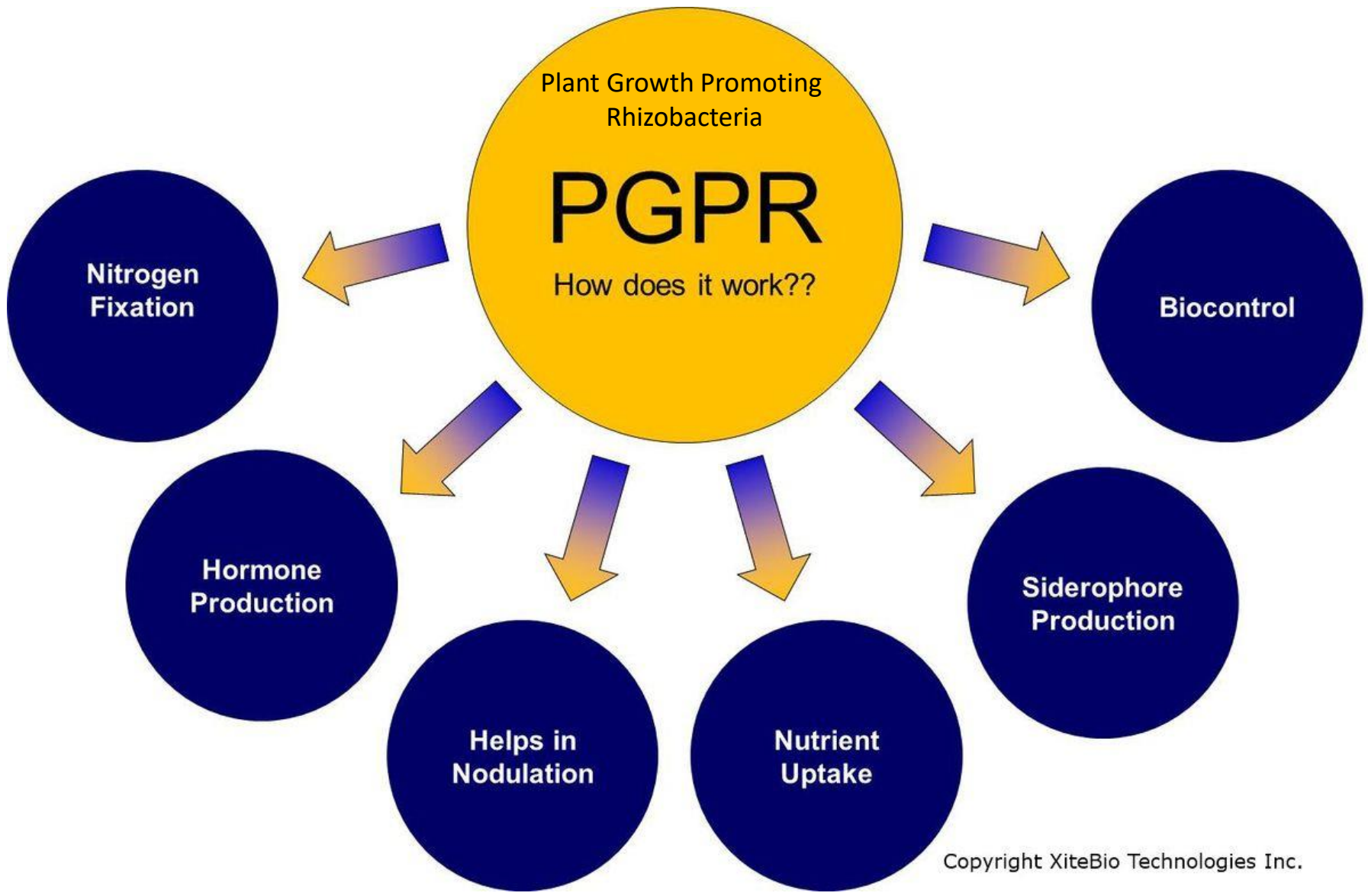
I PGPR hanno ruoli diversi nella promozione della salute del suolo e delle colture, come la produzione di fitormoni stimolanti la crescita (acido indolo-3-acetico (IAA), l'acido gibberellico (GA3), la zeatina, l'etilene e l'acido abscissico). Questi batteri promuovono anche la nutrizione delle piante poiché generi come il *Rhizobium* sono in grado di fissare l'azoto atmosferico in simbiosi con le radici delle piante, di solubilizzare i fosfati da fonti insolubili minerali e aumentare la disponibilità di ferro e zinco per le piante.

I PGPR proteggono anche le piante dai patogeni mediante interazioni antagonistiche dirette tra l'agente di biocontrollo e l'agente patogeno, nonché mediante l'induzione della resistenza dell'ospite.

I batteri che solubilizzano il fosfato rilasciano fosfato solubile da forme insolubili minerali. Diversi batteri e funghi hanno la capacità di solubilizzare il fosforo insolubile nel suolo. I batteri sono più efficaci dei funghi.

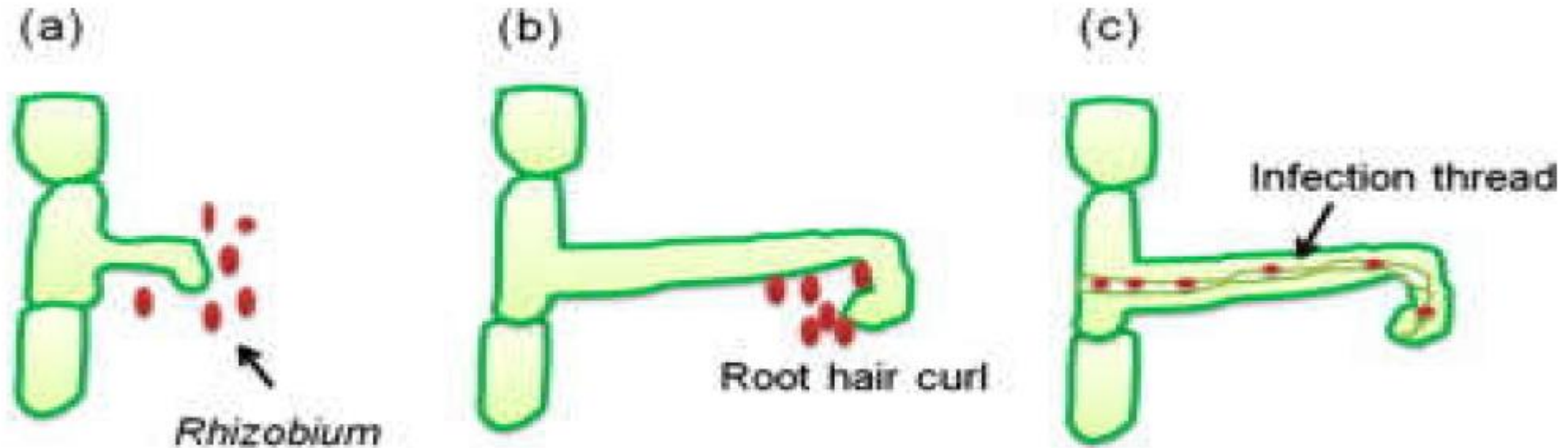
I batteri che solubilizzano il fosfato non includono solo le forme libere, ma anche i batteri simbiotici come *Rhizobium*, *Mesorhizobium*, *Bradyrhizobium*.

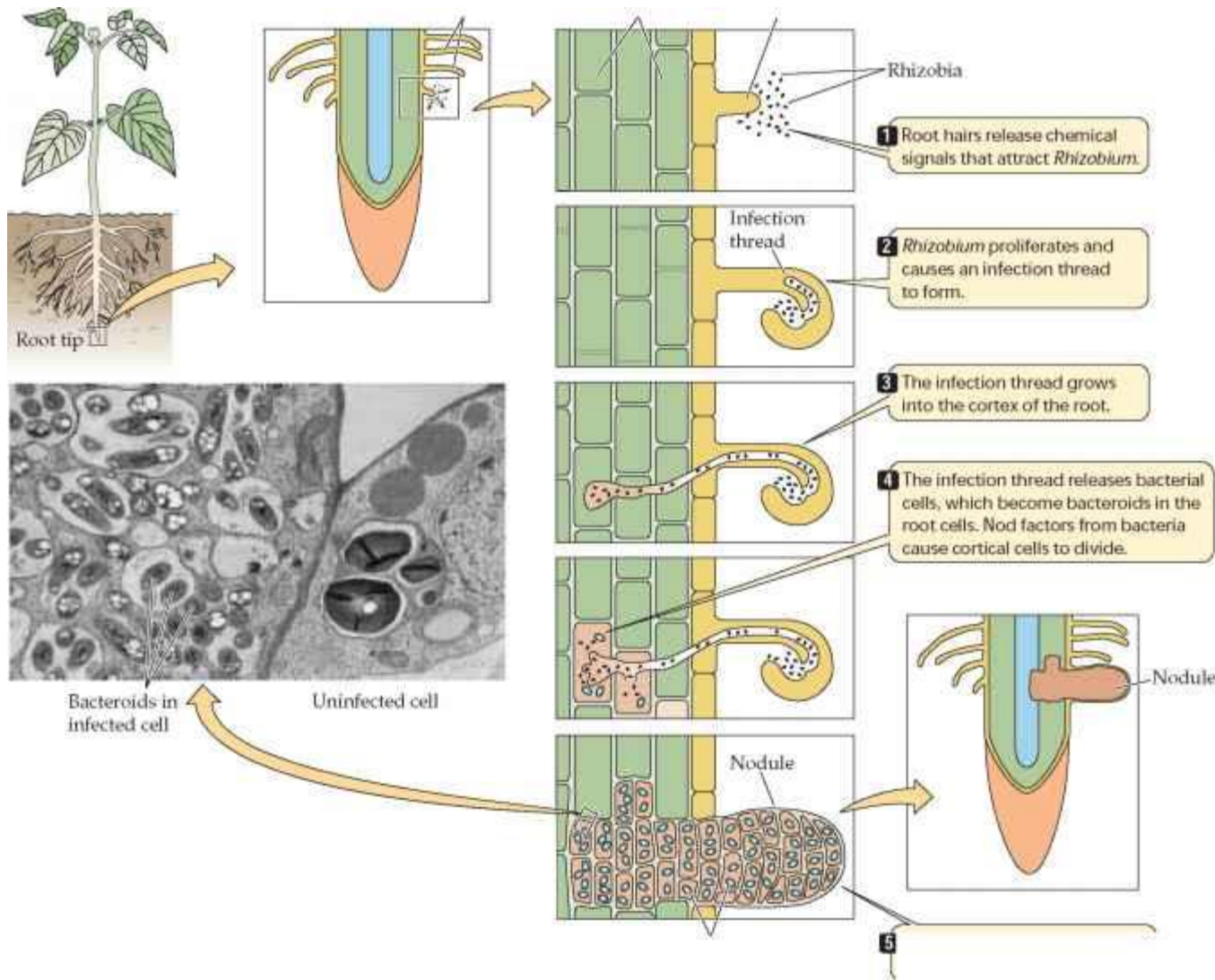
I batteri simbiotici che fissano l'azoto sono particolarmente importanti rispetto ai batteri non simbiotici poiché sono protetti all'interno del nodulo e hanno una ridotta competizione con la microflora indigena della rizosfera.



Copyright XiteBio Technologies Inc.

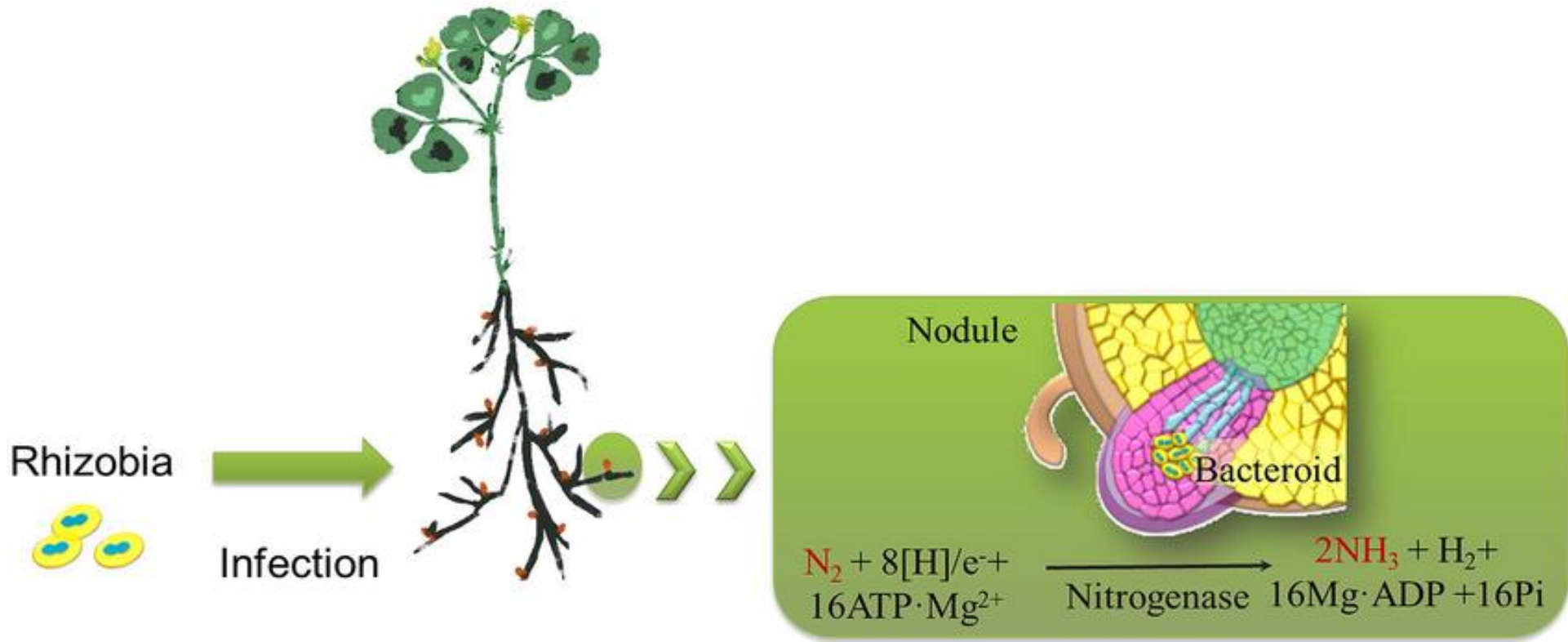
Processo di nodulazione (a) interazione delle ricadesine del *Rhizobium* con le lectine dell'ospite e adesione alle cellule della radice. (b) escrezione dei fattori del nodulo da parte del *Rhizobium* che provoca la curvatura dei peli radicali. (c) *Rhizobium* penetra nella radice dei peli radicali e forma un canale di infezione attraverso il quale penetra nelle cellule corticali e forma i noduli.





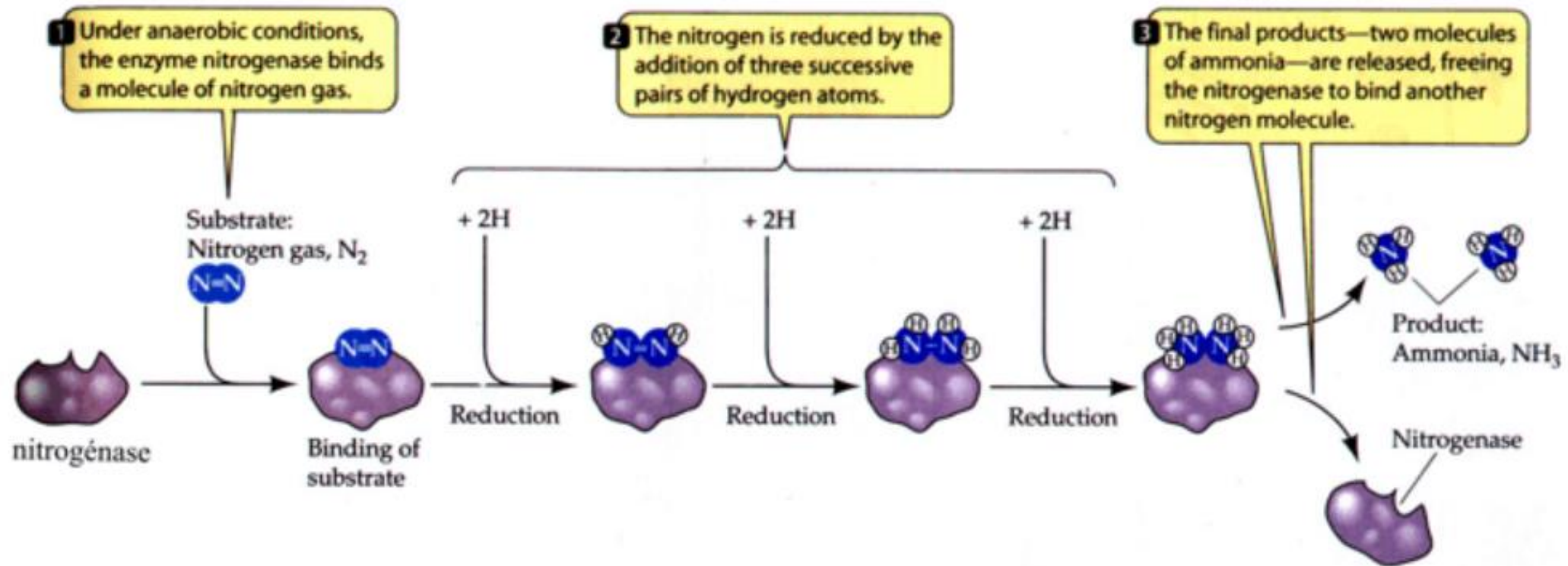
Formazione di un nodulo radicale.

Rhizobium sviluppa la capacità di fissare l'azoto solo dopo essere entrato in una radice di leguminosa. I diagrammi mostrano la sequenza degli eventi nella formazione del nodulo. La fotografia al microscopio mostra i batterioidi di *Rhizobium japonicum* in vescicole all'interno di una cellula radice di soia. A destra è visibile una porzione di una cellula radice non infetta.



Disegno schematico del processo di fissazione dell'azoto associato al *Rhizobium*. *Rhizobium* invade le radici delle leguminose e forma dei noduli radicali. Durante il processo di fissazione biologica dell'azoto nei noduli, l'azoto molecolare (N₂) viene ridotto a due molecole di ammoniaca (NH₃) dalla nitrogenasi del batterio. L'idrogeno (H₂) è un sottoprodotto del processo di fissazione simbiotica dell'azoto.

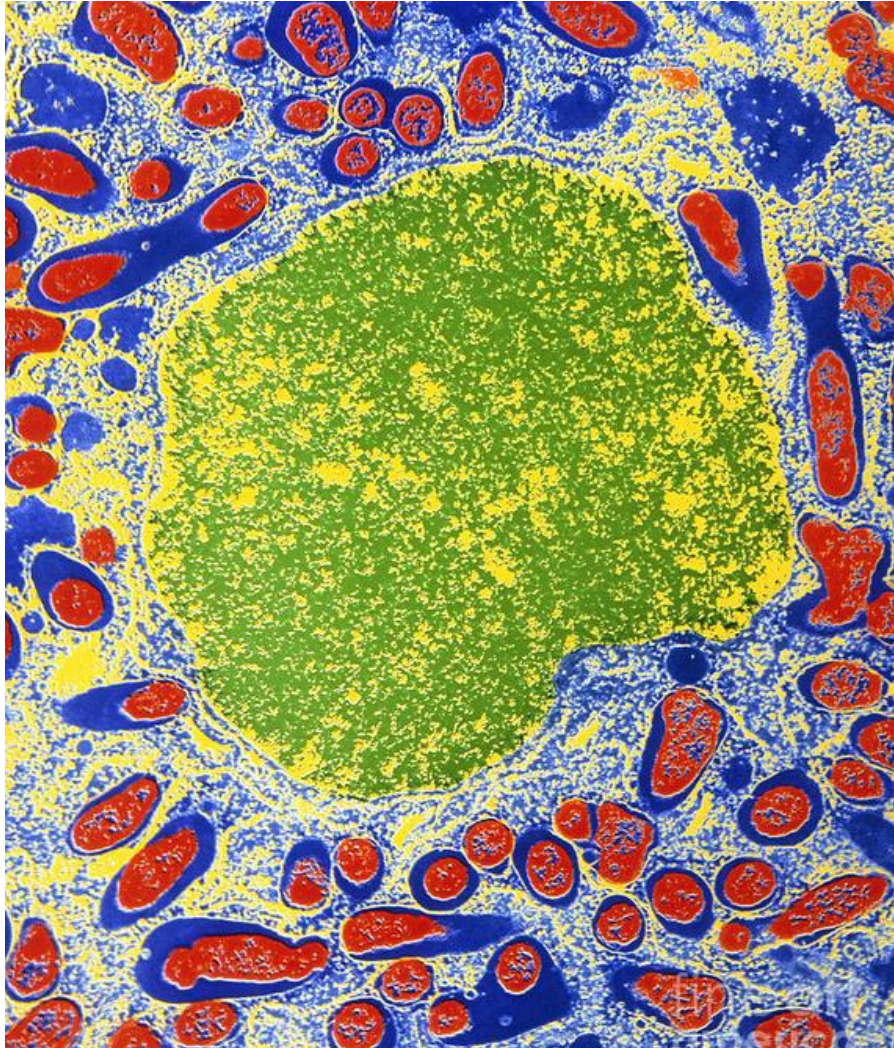
NITROGENASI



La reazione è costosa in termini di energia. Richiede 16 ATP per ogni NH_3 prodotto (è la pianta che fornisce energia ai batteri sotto forma di fotosintati).



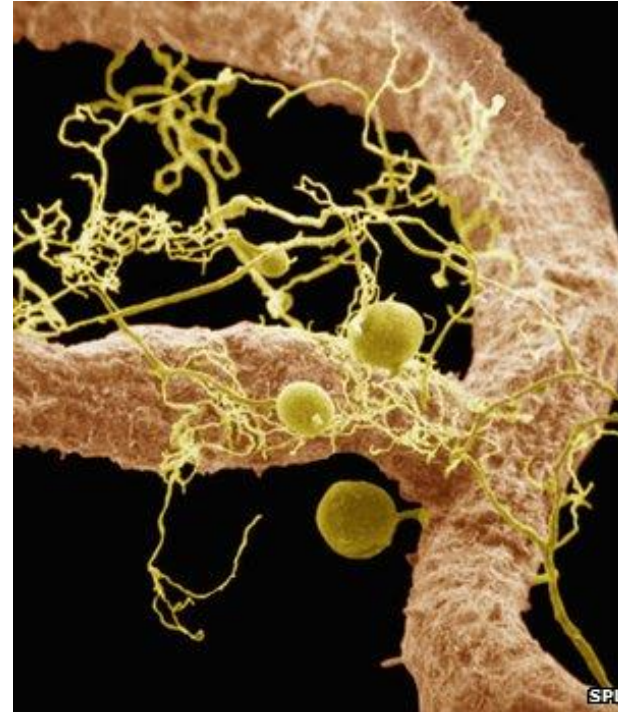
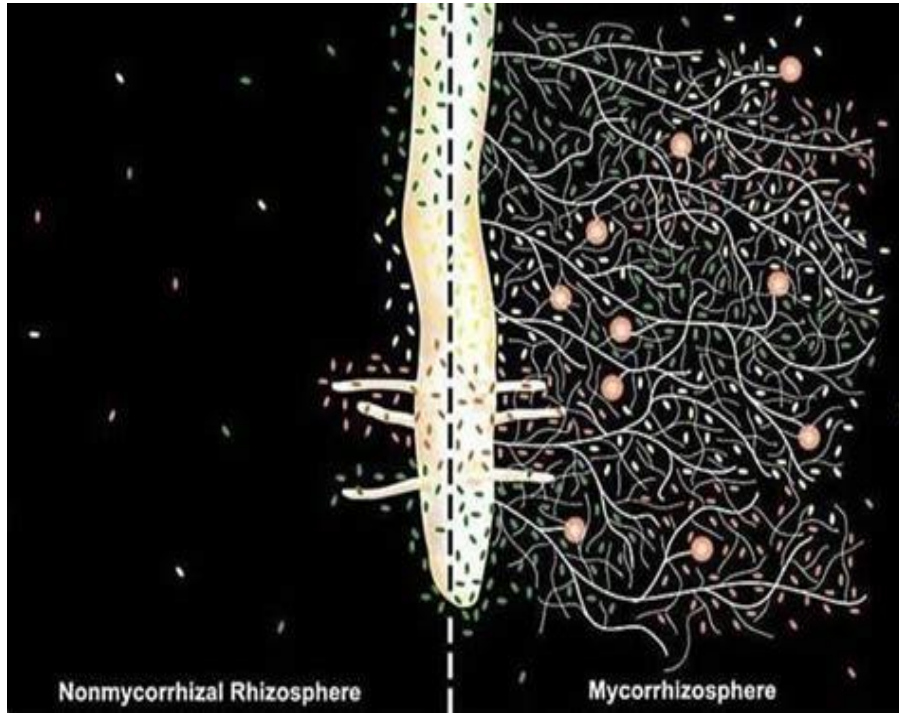
Macrofotografia di noduli del batterio fissatore di azoto *Rhizobium leguminosarum* sulle radici di una pianta di pisello (*Pisum sativum*). I noduli sono i siti in cui i batteri fissano l'azoto atmosferico e lo convertono in NH_4^+ . I batteri vivono liberamente nel terreno e si accumulano attorno ai sottili peli radicali, probabilmente in risposta a qualche essudato radicale. Il nodulo è rosa a causa della presenza di emoglobina, la cui funzione è incerta ma è nota per essere necessaria alla fissazione dell'azoto.



<https://pixels.com/featured/pink-nodules-of-rhizobium-leguminosarum-drjeremy-burgess.html>

Micrografia elettronica a trasmissione, con colori elaborati al computer, di batteri fissatori dell'azoto (in rosso) *Rhizobium leguminosarum*, nella cellula di un nodulo radicale della pianta del pisello (*Pisum sativum*). La grande struttura in giallo e verde è il nucleo cellulare, circondato da batterioidi di *Rhizobium* (forme ingrandite dei batteri che si formano una volta entrati nella radice della pianta). I batterioidi producono un enzima, la nitrogenasi, che converte l'azoto atmosferico in NH_4^+ , di cui ne cede una parte alla pianta. Attorno a ciascun batterioide c'è un involucro trasparente (blu) fornito dal tessuto vegetale. Ingrandimento x2400

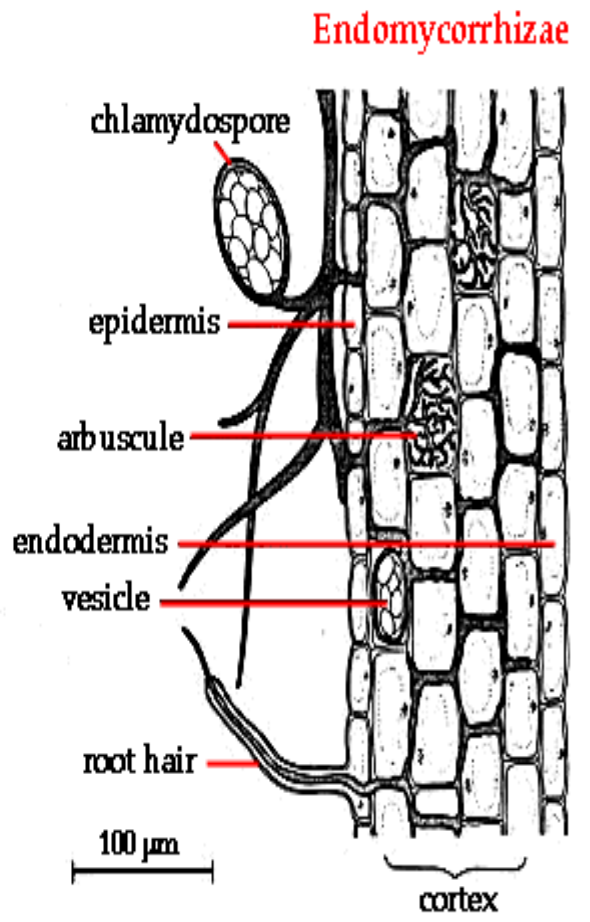
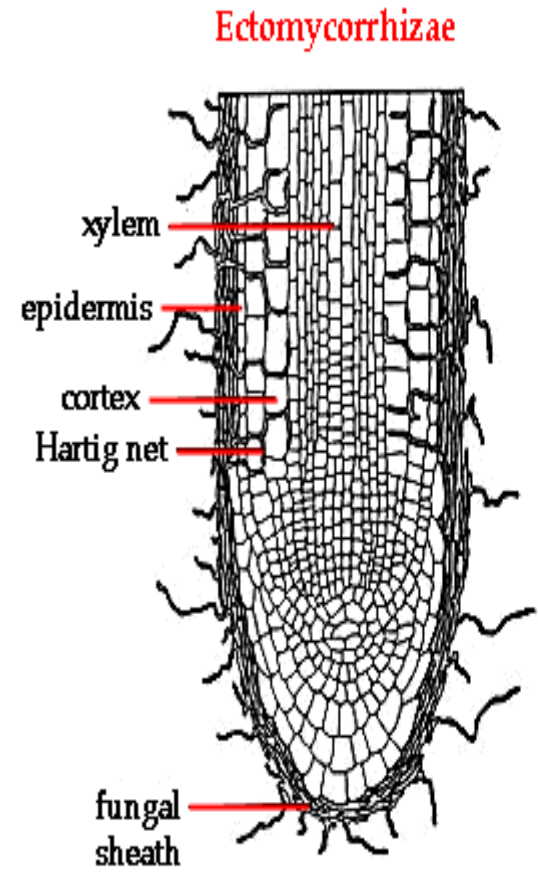
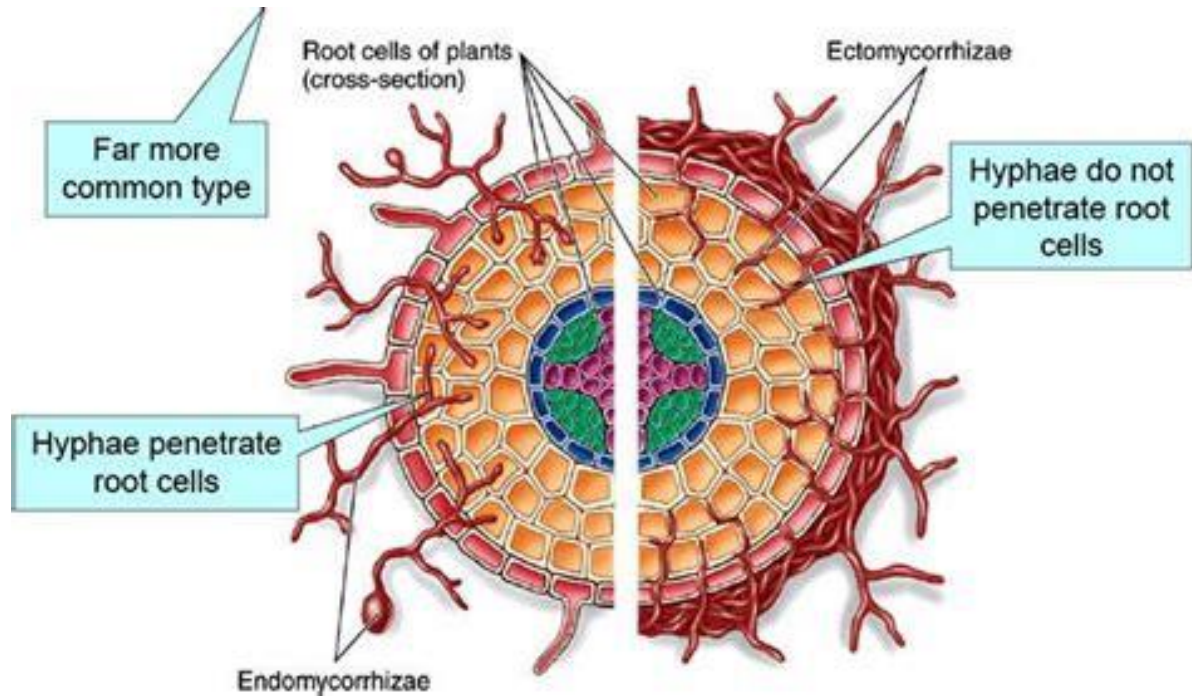
Le micorrize

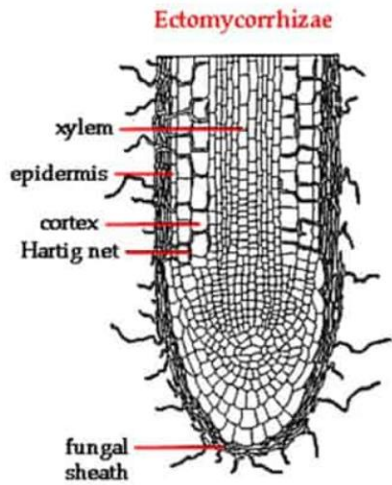


<https://external-content.duckduckgo.com/iu/?u=https%3A%2F%2Ftse3.mm.bing.net%2Fth%3Fid%3DOIP.wq89IF57Gt7MN7yV8hkJsAHaFD%26pid%3DApi&f=1>

<https://www.bbc.com/news/science-environment-22462855>

<https://3.bp.blogspot.com/-zWPysW68x14/Vya9bqSI7ul/AAAAAAAAAkc/PypzUFiBZYsfA0gtgB7xvQSB-nssqJSCgCLcB/s1600/fc7b5bbf-96f2-47a8-9c13-4064f8e80496.jpg>



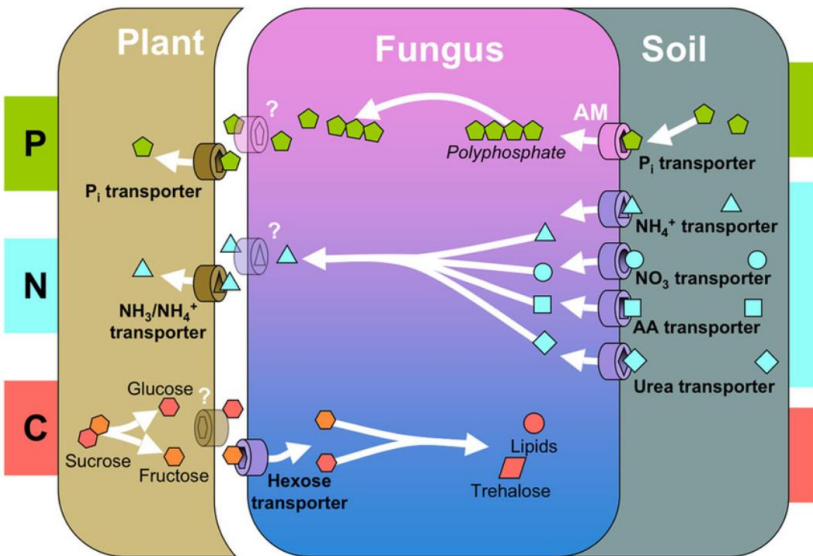
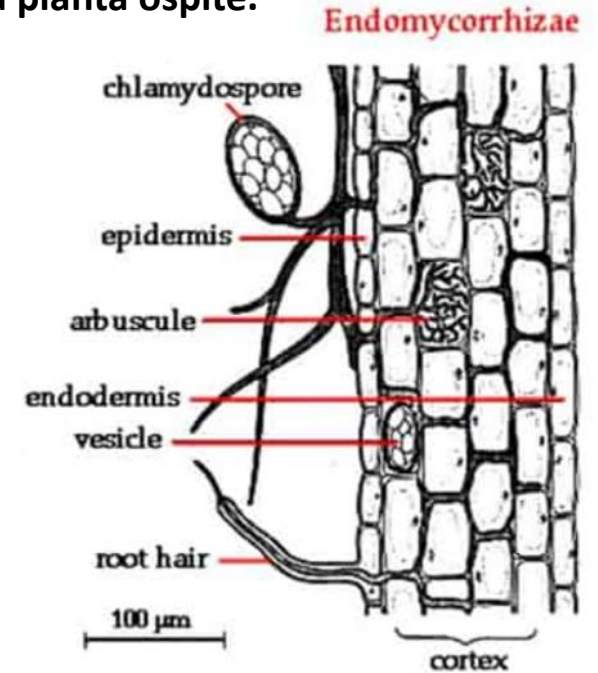


I **funghi ectomicorrizici** non invadono i tessuti radicali e, tra i vari nutrienti, forniscono alla pianta ospite anche **fitormoni** e **vitamine B** che regolano la crescita.

Nella formazione delle micorrize vescicolo-arbuscolari, il **fungo** penetra nelle **cellule radicali**, dove forma **strutture ramificate (arbuscoli)**. È negli arbuscoli che avvengono gli scambi nutrizionali.

MICORRIZE ARBUSCOLARI NEL SUOLO

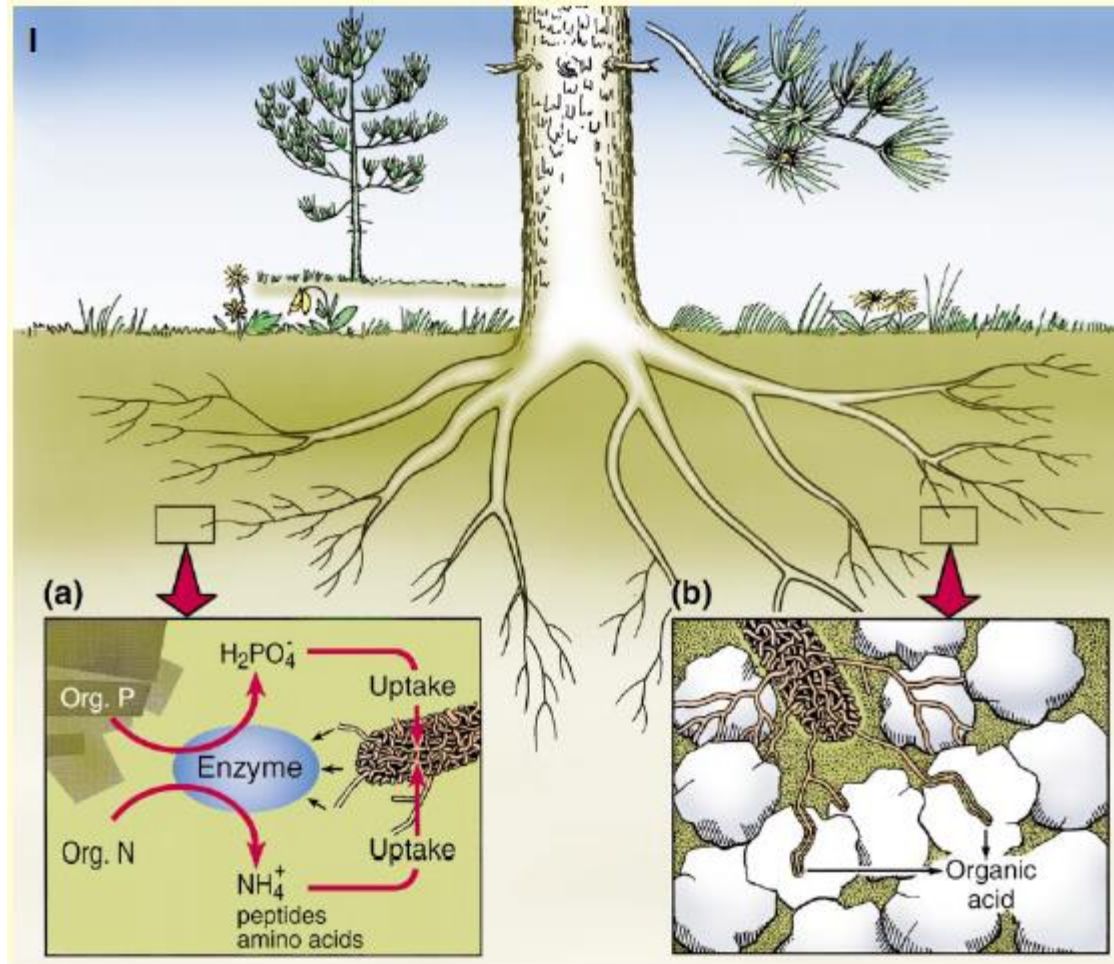
Le **micorrize arbuscolari** sono **associazioni simbiotiche** che si instaurano tra le **radici** della maggior parte delle piante (~80%) e molte specie (~150) di **funghi** del suolo. I funghi interessati sono **biotrofi obbligati**, non sono in grado di vivere separatamente dalla pianta ospite.



Questa associazione mutualistica offre **reciproco vantaggio** per gli organismi coinvolti: la **pianta** fornisce ai funghi simbiotici i **carboidrati sintetizzati con la fotosintesi** che essi non sono in grado di sintetizzare; i **funghi micorrizici**, invece, mobilizzano gli **elementi minerali** presenti nel suolo e li rendono disponibili per le radici della pianta.

Linking plants to rocks: ectomycorrhizal fungi mobilize nutrients from minerals

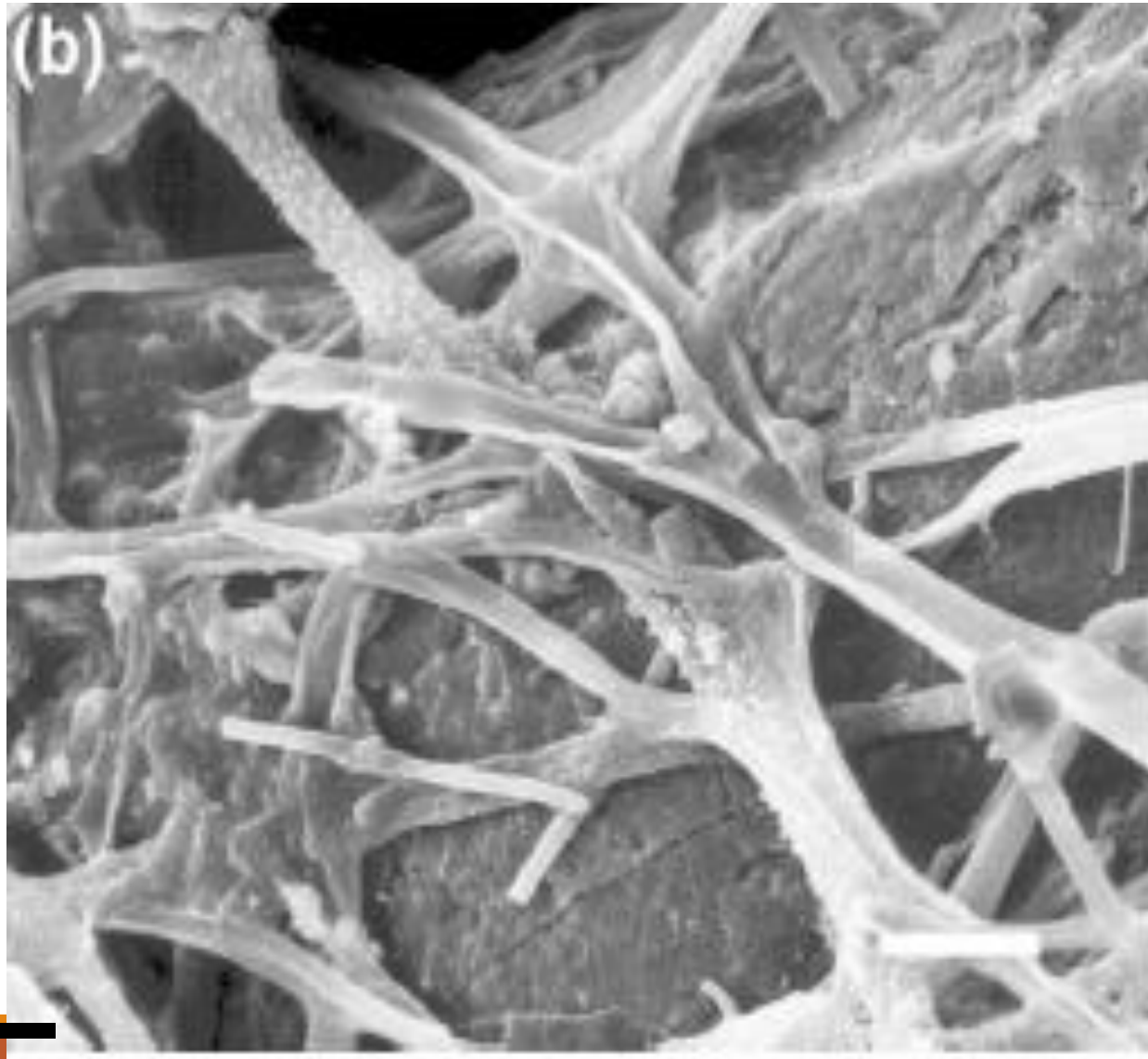
Renske Landeweert, Ellis Hoffland, Roger D. Finlay, Thom W. Kuyper and Nico van Breemen



Il fungo ectomicorrizico può mobilizzare P, K, Ca e Mg da substrati minerali attraverso l'escrezione di acidi organici. Inoltre, incrinature nei minerali consentono alle ife ectomicorriziche di raggiungerne l'interno e di accedere al P dalle inclusioni di apatite. I nutrienti essenziali diventano disponibili per la pianta ospite tramite il micelio ectomicorrizico.

Linking plants to rocks: ectomycorrhizal fungi mobilize nutrients from minerals

Renske Landeweert, Ellis Hoffland, Roger D. Finlay, Thom W. Kuyper and Nico van Breemen

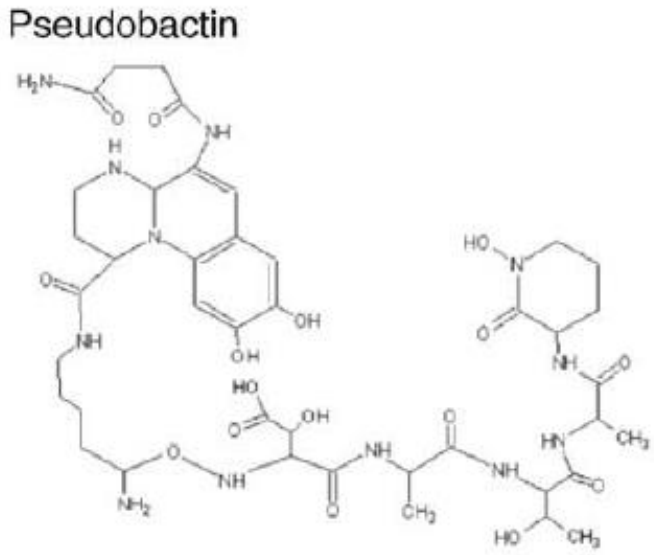
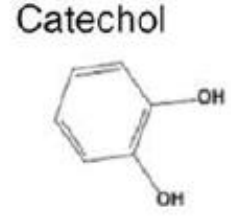
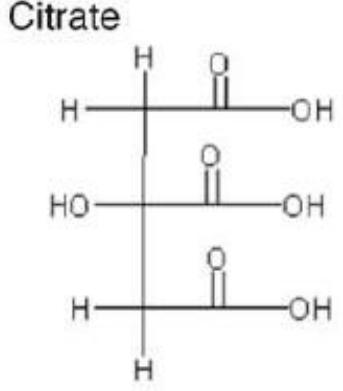
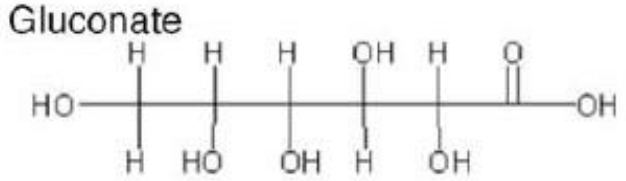
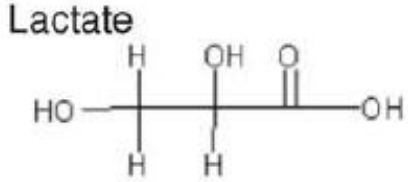
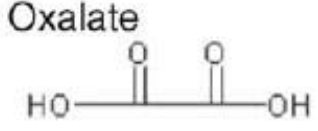


Ife micorriziche ramificate che coprono e penetrano una particella minerale.

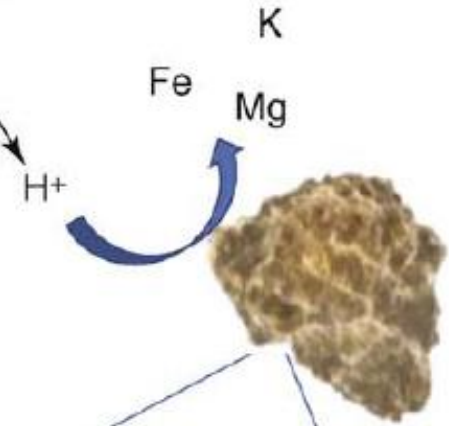
10 μm 

Proton-promoted (organic acids)

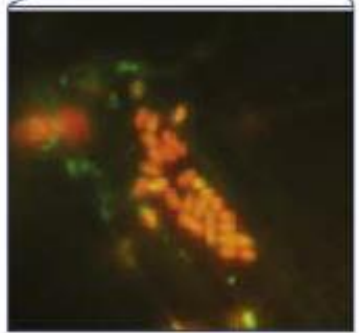
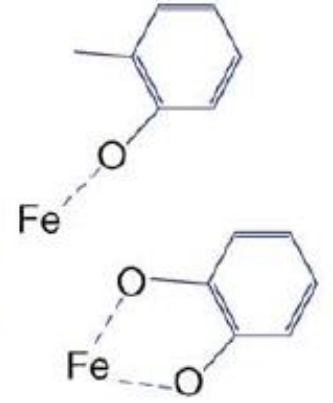
(a)



(b) (i) Acidolysis



(ii) Chelation



(iii) Oxido-reduction

Ligand-promoted (siderophores)

Molecole microbiche e meccanismi coinvolti nell'alterazione dei minerali.

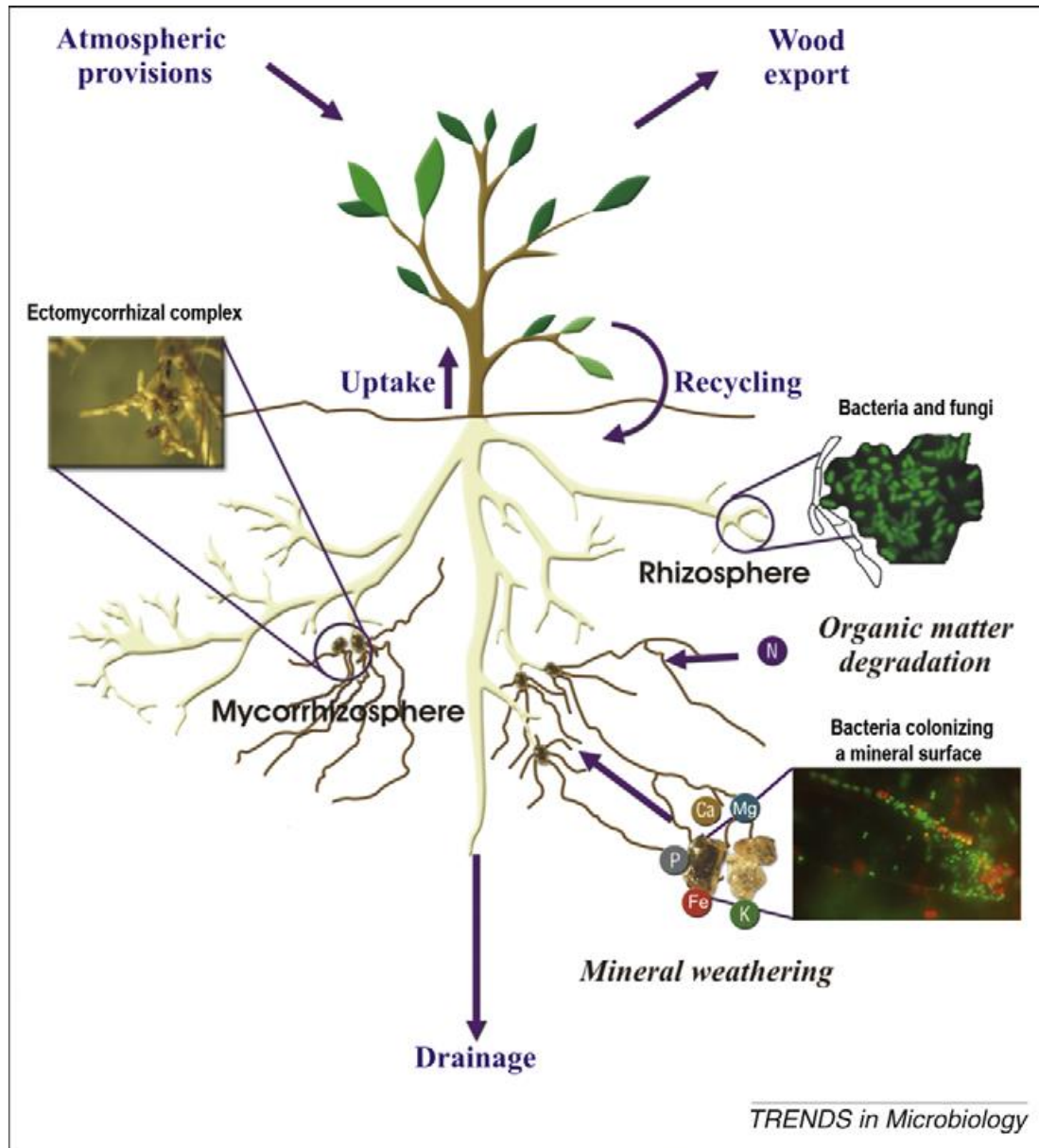
- (a) Alcune molecole organiche comuni, prodotte da microrganismi, possono alterare i minerali.
- (b) Meccanismi di azione di queste molecole sulla biotite: (i) acidolisi, (ii) chelazione, (iii) ossidoriduzione. (i) I protoni associati a molecole di acido organico diminuiscono il pH della soluzione e inducono il rilascio di cationi come ferro, potassio e magnesio. (ii) le molecole chelanti aumentano i tassi di dissoluzione dei cationi formando forti legami con essi o con le superfici minerali. (iii) Reazioni di ossidoriduzione che si verificano alla superficie di minerali complessi, come i silicati, richiede il contatto diretto della membrana batterica e della superficie minerale.. L'ossidazione aerobica dello zolfo elementare contenuto in vari solfuri minerali come la pirite (FeS_2) trasformandolo nel corrispondente solfato metallico è un esempio in cui l'ossidoriduzione porta alla dissoluzione dei minerali. Un processo simile potrebbe anche essere coinvolto nell'alterazione della biotite.

Table 1. Some bacteria characterized for their ability to solubilize minerals

Microorganism	Solubilized material (mechanism)	Origin of microorganism	Refs
α-Proteobacteria			
<i>Agrobacterium</i>	Phosphate	Rhizosphere of pine	[44]
<i>Aminobacter</i>	Biotite	Spruce- <i>Scleroderma citrinum</i> mycorrhizosphere	(S.U. <i>et al.</i> , unpublished)
<i>Azospirillum</i>	Phosphate (production of gluconic acid)	Rhizosphere of sugarcane	[66]
<i>Labrys</i>	Biotite	Spruce- <i>Scleroderma citrinum</i> mycorrhizosphere	(S.U. <i>et al.</i> , unpublished)
<i>Rhanelia</i>	Hydroxyapatite (production of gluconic acid)	Rhizosphere of soybean	[65]
<i>Rhizobium</i>	Phosphate	Agricultural soil	[65]
<i>Sphingomonas</i>	Biotite Phosphate, iron*	Oak- <i>Scleroderma citrinum</i> mycorrhizosphere	[19,20]
β-Proteobacteria			
<i>Achromobacter</i>	Phosphate	Not available	[68]
	Phosphate	Rhizosphere of beech	[44]
<i>Burkholderia</i>	Biotite Phosphate, iron* Phosphate (production of gluconic acid) Phosphate Granite	Oak- <i>Scleroderma citrinum</i> mycorrhizosphere Rhizosphere of mung bean Not available Isolated from the white-rot fungus <i>Phanerochate chrysosporium</i>	[19,20] [54] [68] [57]
<i>Collimonas</i>	Biotite Phosphate, iron*	Oak- <i>Scleroderma citrinum</i> mycorrhizosphere	[19,20]
<i>Janthinobacterium</i>	Biotite	Rotting <i>Agaricus bisporus</i>	(S.U. <i>et al.</i> , unpublished)
δ-Proteobacteria			
<i>Acinetobacter</i>	Phosphate	Rhizosphere of soybean	[68]
<i>Azotobacter</i>	Pyrite, glauconite, olivine, goethite, limonite, hematite (production of dihydroxybenzoic acid and siderophore)	Alberta soil	[51,69]
<i>Geobacter</i>	Iron [reduction of Fe(III)]	Sediment	[70]
γ-Proteobacteria			
<i>Acidithiobacillus</i>	Pyrite Cristal	Acid mine drainage	[71]
<i>Citrobacter</i>	Phosphate Rock	Rhizoplane of cactus	[32]
<i>Dyella</i>	Biotite	Spruce- <i>Scleroderma citrinum</i> mycorrhizosphere	(S.U. <i>et al.</i> , unpublished)
<i>Enterobacter</i>	Phosphate (production of gluconic acid) Phosphate	Compost Not available	[56] [68]
<i>Frateuria</i>	Biotite	Spruce- <i>Scleroderma citrinum</i> Mycorrhizosphere	(S.U. <i>et al.</i> , unpublished)
<i>Pseudomonas</i>	Biotite Phosphate, iron* Phosphate (production of gluconic acid) Phosphate, rock	Forest soil Douglas Fir- <i>Laccaria bicolor</i> S238N mycorrhizosphere Compost Rhizoplane of cactus	[20] [35] [56] [32]
<i>Serratia</i>	Phosphate (production of gluconic acid)	Compost Rhizosphere of <i>Dendrocalamus strictus</i>	[56] [72]
<i>Shewanella</i>	Smectite Iron [reduction of Fe(III)] Calcite, dolomite	Anoxic sediment	[73–76]
Gram positive			
<i>Arthrobacter</i>	Hornblende (production of organic acids and siderophore)	Adirondacks soil	[53]
<i>Bacillus</i>	Phosphate, rock Granite	Rhizoplane of cactus Not available	[56] [77]
<i>Mycobacterium</i>	Biotite	Oak- <i>Scleroderma citrinum</i> mycorrhizosphere	(S.U. <i>et al.</i> , unpublished)
<i>Paenebacillus</i>	Biotite Bauxite	Forest soil	(S.U. <i>et al.</i> , unpublished) [78]
<i>Staphylococcus</i>	Biotite	Oak- <i>Scleroderma citrinum</i> mycorrhizosphere	(S.U. <i>et al.</i> , unpublished)
<i>Streptomyces</i>	Hornblende (production of siderophore)	Adirondacks soil	[52]

*The ability to mobilize iron was tested using the Chromazurol S *in vitro* assay. This assay is used to highlight the production of siderophores.

Alcuni batteri
noti per la loro
capacità di
solubilizzare i
minerali



Coinvolgimento dei microrganismi del suolo nel ciclo dei nutrienti e nella nutrizione degli alberi in ecosistemi forestali. Il ciclo dei nutrienti negli ecosistemi forestali è composto da cinque principali componenti: assorbimento, riciclo, approvvigionamento atmosferico, esportazione del legno e drenaggio. Assorbimento e riciclo sono fortemente influenzati dai microrganismi del suolo che vivono in diverse nicchie: la rizosfera (terreno che circonda radici non micorriziche), la micorrizosfera (terreno che circonda le radici micorriziche) e le superfici minerali (mineralosfera). Le radici degli alberi, i batteri e i funghi influenzano la stabilità delle particelle minerali, che portano al rilascio di nutrienti inorganici. Questa dissoluzione a livello locale modifica le proprietà fisico-chimiche del suolo e influenza la nutrizione e le attività fisiologiche di batteri, funghi e piante.

Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M.-P., & Frey-Klett, P. (2009). Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. *Trends in Microbiology*, 17(8), 378–387.

<https://www.youtube.com/watch?v=V4m9SefyRjg>



<https://www.youtube.com/watch?v=yWQqeyPIVRo>



https://www.youtube.com/watch?v=7kHZ0a_6Txy

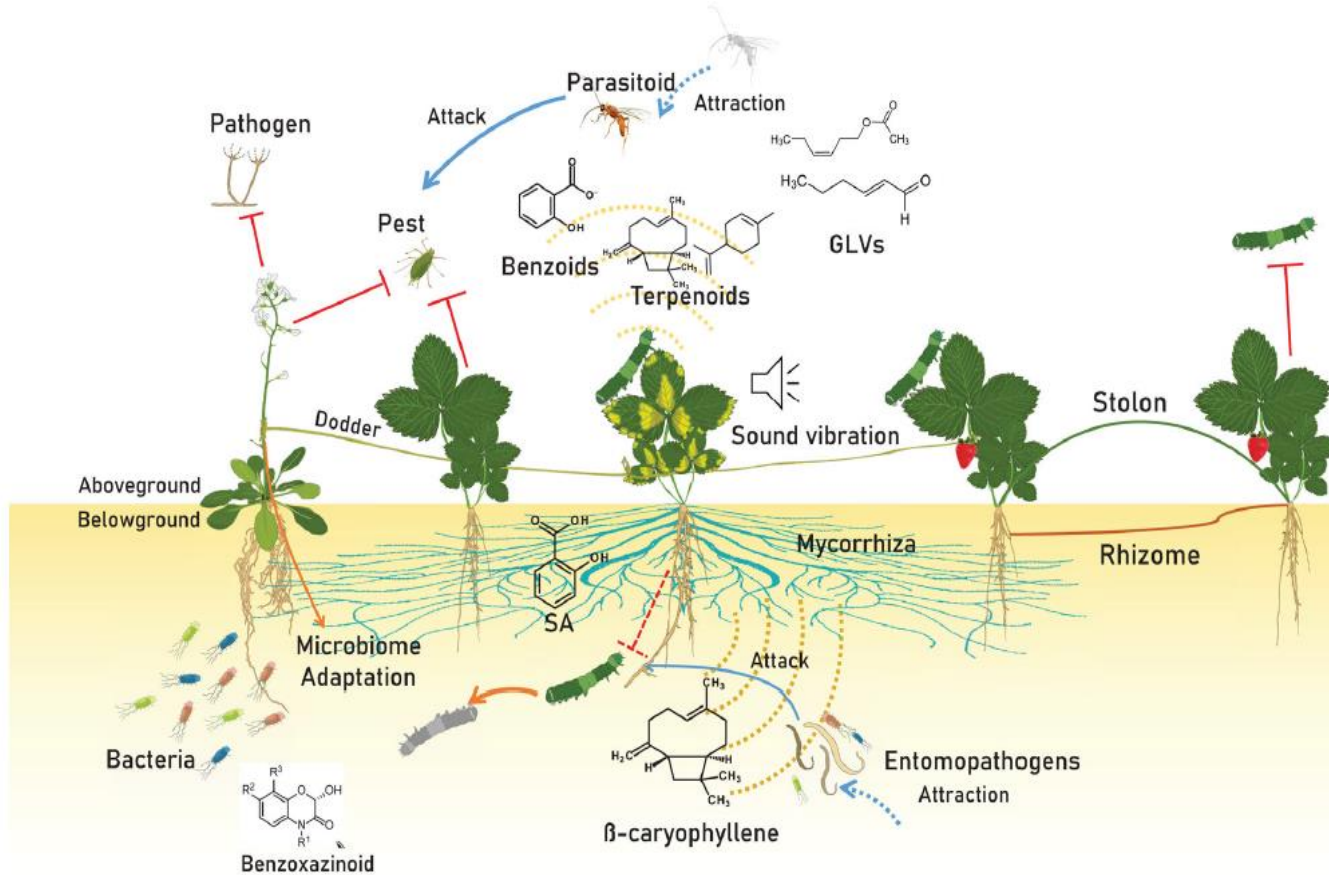


Social networking nelle piante: comunicazioni cablate e wireless mediate dal microbioma

Il fitobioma

Il fitobioma è un'entità ecologica collettiva che percepisce gli stimoli esterni e interni tramite l'apparato di rilevamento dei suoi membri (**senoma**). Il senoma attivato genera segnali intercellulari e intra- e interorganismici che inducono modificazioni geneticamente ed epigeneticamente dipendenti dei membri del fitobioma. In definitiva, queste modificazioni possono alterare i fenotipi dei membri del fitobioma collettivo. Le micorrize e i funghi epifiti possono trasferire fisicamente i segnali tra piante diverse. I membri del fitobioma possono rilasciare da soli agenti infochimici o modificare le emissioni di composti organici volatili delle piante e gli essudati delle radici in modo che agiscano come segnali per le interazioni pianta-pianta. Questi segnali possono cambiare la fisiologia delle piante e indurre l'olobionte a lanciare adeguati segnali alle piante riceventi. Le piante riceventi recepiscono i segnali del fitobioma per preparare le risposte ai cambiamenti in corso.

La comunicazione nel fitobioma

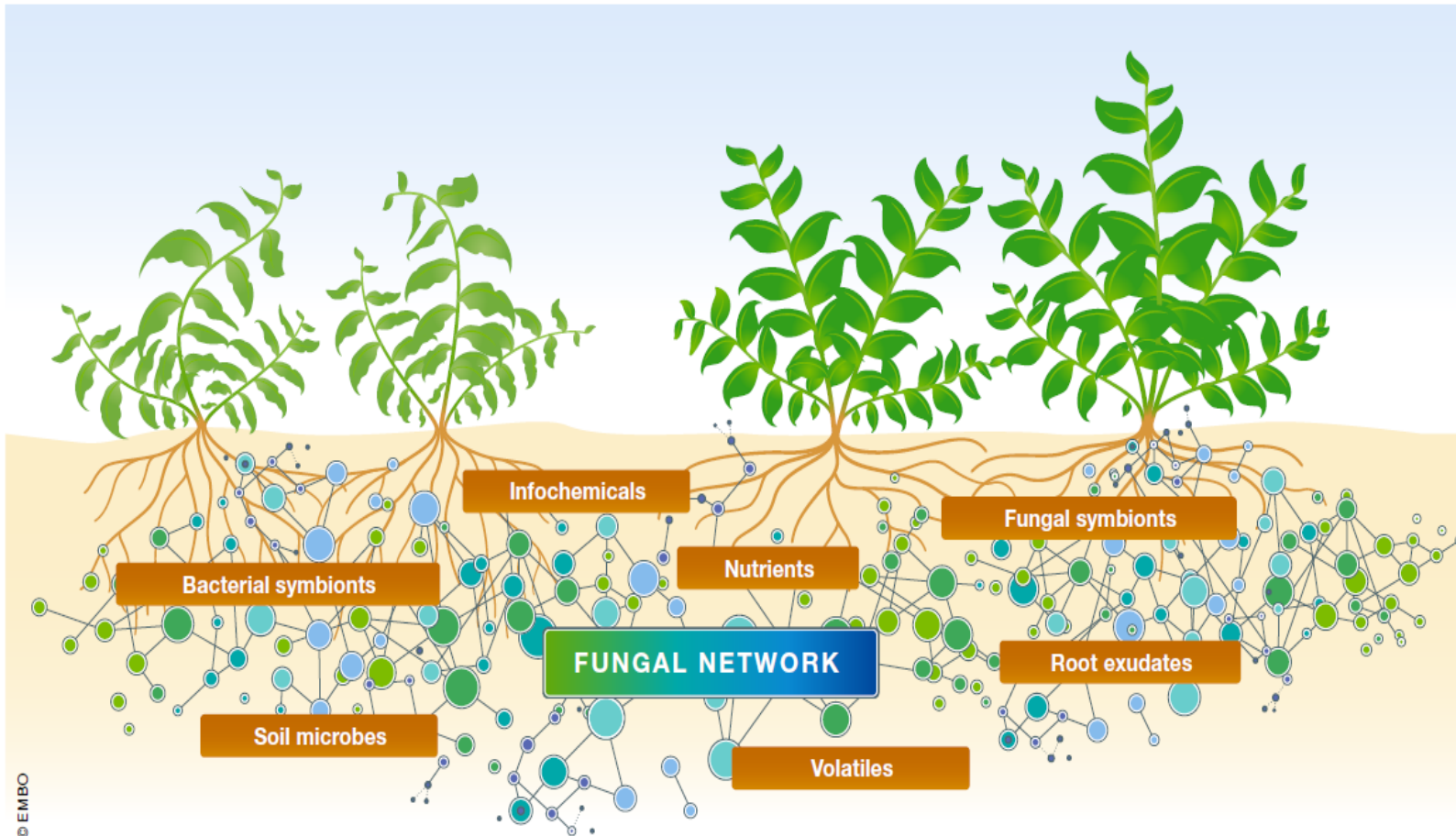


Sharifi, R., & Ryu, C. M. (2020). Social networking in crop plants: Wired and wireless cross-plant communications. *Plant, Cell & Environment*.

Le piante comunicano tramite connessioni fisiche (es. stoloni e rizomi) o COV (composti organici volatili). Le piante comunicano anche tramite micorrize. Le piante riceventi possono agire come nodi da cui trasferire i segnali di difesa contro parassiti e agenti patogeni per le piante della stessa specie e di specie diverse vicine. Le sostanze volatili e gli essudati delle radici ricevuti dalle piante vicine modulano i sistemi di difesa, attraggono parassitoidi e entomopatogeni (ad es. funghi parassiti di insetti) e inducono il rimodellamento del microbioma vegetale per proteggere le piante da condizioni di stress biotico o abiotico.

Il microbioma

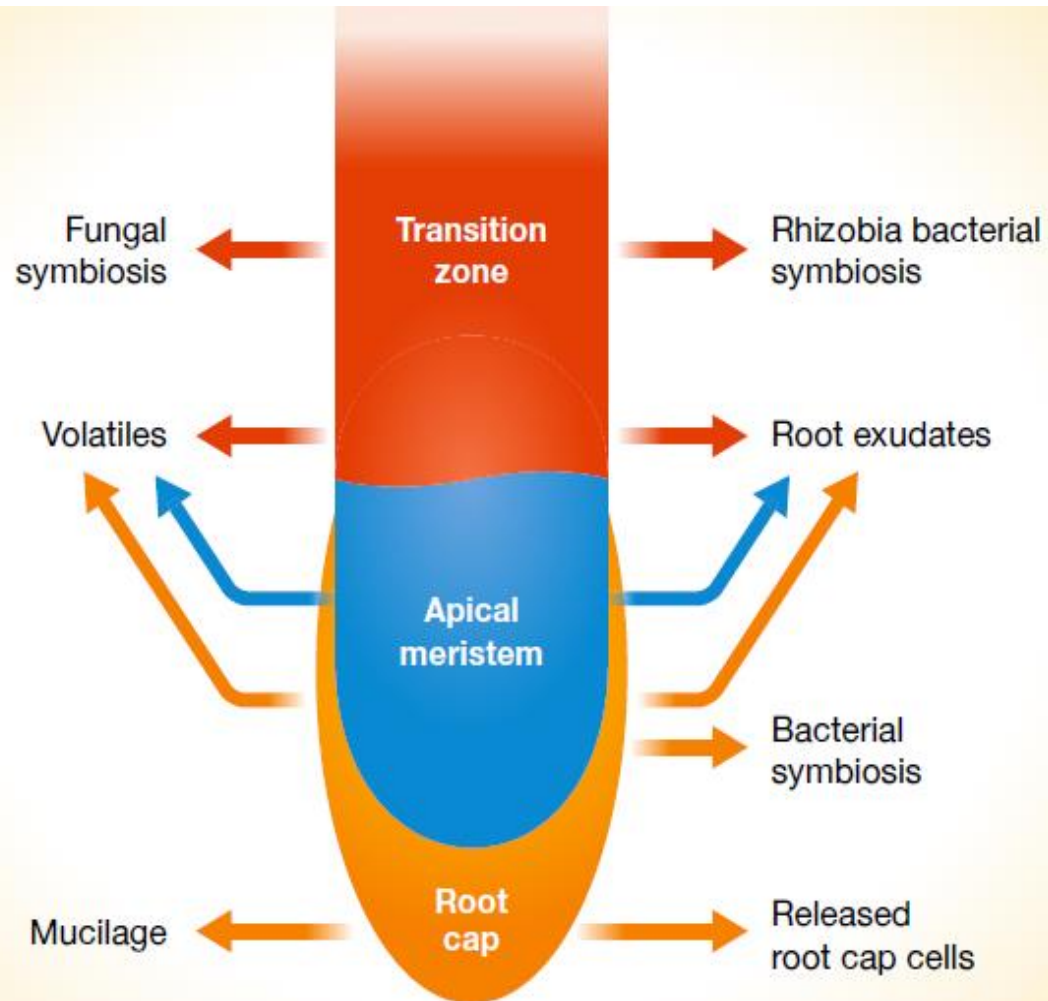
La comunità microbica associata alla pianta (**microbioma**) ha un ruolo importante nelle comunicazioni tra piante. Le piante decifrano le complesse situazioni del loro habitat, gli stimoli ambientali e modelli molecolari e associati a microrganismi e vari pericoli. La percezione di questi segnali genera segnali inter e intracellulari che inducono modificazioni del metabolismo e della fisiologia della pianta. Questi segnali possono essere trasferiti tra piante tramite diversi meccanismi, che classifichiamo come comunicazioni cablate e wireless. Le comunicazioni cablate implicano un il trasferimento del segnale tra piante mediato da ife micorriziche. Le comunicazioni wireless comportano emissioni di composti organici volatili delle piante e la produzione di essudati radicali da microrganismi e pedofauna che consentono la segnalazione senza contatto fisico. Questi segnali inducono l'adattamento del microbioma delle piante riceventi tramite meccanismi agevolativi o competitivi. Le piante riceventi ricevono i segnali per anticipare risposte atte a migliorare la risposta allo stress. Le comunicazioni tra piante potrebbe essere sfruttata per migliorare la gestione integrata delle colture in condizioni di campo.



Reti integrate radice-funghi-batteri.

Le piante vicine comunicano attraverso le loro radici tramite essudati e informazioni chimiche mediate da composti organici volatili. Gli apici delle radici comunicano anche con i funghi micorrizici e si organizzano reti fungine radicali integrate. Più del 90% di tutte le piante, dalle epatiche alle angiosperme, forma queste reti simbiotiche, che migliorano la nutrizione delle piante attraverso la fornitura di acqua e nutrienti essenziali alle piante. I funghi simbiotici migliorano anche le prestazioni delle piante sotto stress e consentono alle piante di condividere messaggi e segnali con piante vicine.

Baluška, F., & Mancuso, S. (2020). Plants, climate and humans: Plant intelligence changes everything. *EMBO reports*, 21(3), e50109



Organizzazione funzionale dell'apice delle radici delle piante.

L'apice della radice rilascia attivamente C organico nel suolo. Le cellule del cappuccio radicale secernono mucillagini che facilitano la crescita delle radici nel suolo. Le cellule periferiche del cappuccio radicale vengono rilasciate in grandi quantità; spesso queste cellule continuano a vivere e manipolare attivamente la rizosfera. Apici delle radici di *Gossypium hirsutum* possono perdere 10.000 cellule in 24 ore. Gli apici delle radici possono modulare l'ambiente biotico e abiotico della rizosfera, rilasciano sostanze volatili e informazioni chimiche a base di carbonio organico. Gli apici delle radici forniscono grandi quantità di saccarosio e lipidi per nutrire i loro partner fungini simbiotici. La grande abbondanza di apici radicali nella biosfera del suolo rende l'apice delle radici della pianta uno degli organi più importanti della pianta.

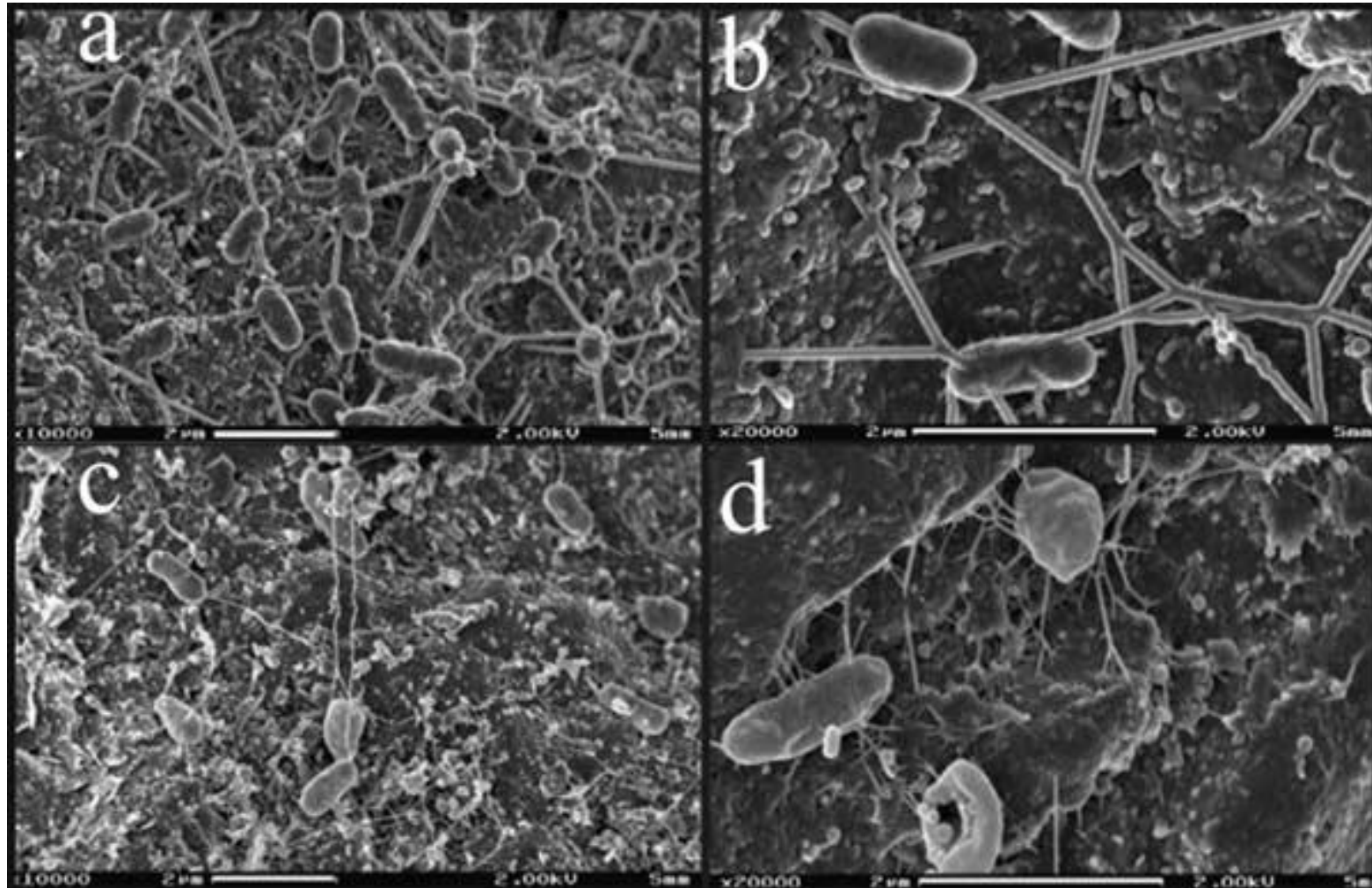
Definizioni: olobionte, olobioma, microbioma

Gli organismi multicellulari (ad esempio animali e piante) e i loro organismi unicellulari associati (ad esempio i microrganismi) potrebbero essere considerati super-organismi, o olobionti (in greco antico holos significa intero e bionte significa unità di vita). Tuttavia, la definizione e il concetto di olobionte sono ancora dibattuti. Si può considerare un olobionte come un'unità ecologica (assemblaggio) di un gruppo di organismi che si riuniscono in base alla loro capacità evolutiva di raggiungere un comune scopo, che è la sopravvivenza dell'olobionte nel suo complesso.

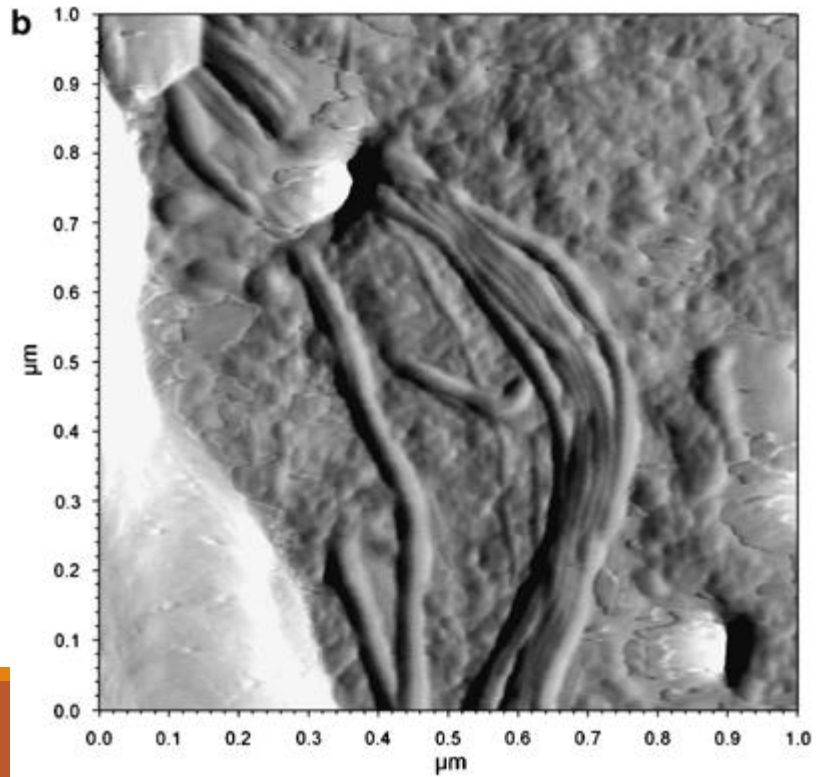
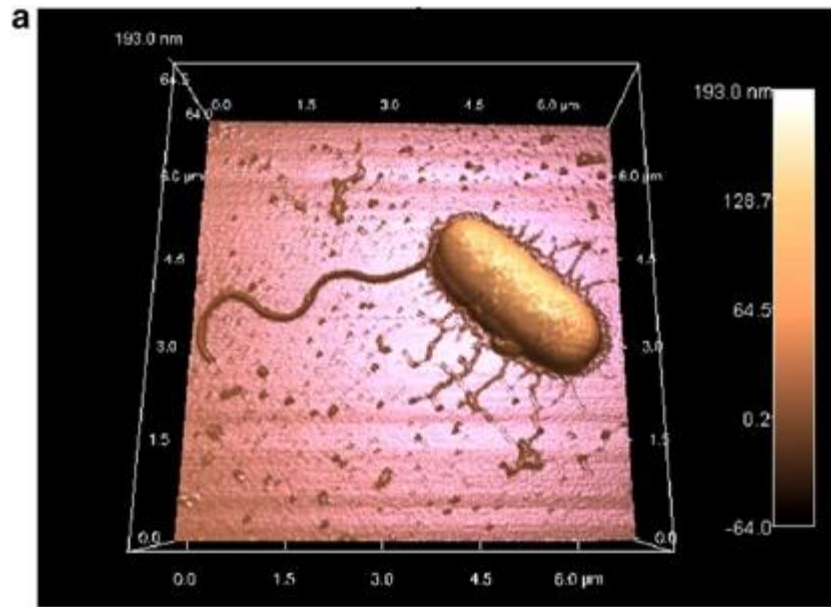
L'olobioma include tutti gli organismi viventi, i loro materiali genetici e loro metaboliti primari e secondari, così come le molecole prodotte all'interno di un particolare habitat. Il microbioma include la vita della comunità microbica in un particolare habitat, i loro metaboliti e i loro elementi genetici. Il microbioma aiuta l'olobionte a sopravvivere se sottoposto a stress biotici e abiotici. La presenza e l'abbondanza di specifiche specie microbiche nel microbioma cambiano durante le successive fasi dell'ontogenesi vegetale e durante gli stress biotici e abiotici.

Interazioni tra batteri del suolo





Immagini di cellule di *Schewanella oneidensis* al microscopio elettronico a scansione. (a) Appendici simili a pili prodotte da *S. oneidensis* MR-1. Le appendici sono lunghe e spesse. (b) Primo piano che mostra una rete di connessioni da cellula a cellula e da cellula a minerale. (c, d) ceppo mutante di *S. oneidensis* che mostrano appendici sottili e fragili e le cellule sono visibilmente deteriorate



Immagini di *S. oneidensis* MR-1. (a) Restituzione tridimensionale di *S. oneidensis* MR-1 lavato in sospensione con acqua, quindi trasferito su di una superficie di mica. Un pattern di proteine essiccate e/o polisaccaridi circonda il batterio e si vedono possibili pili estendersi dalla cellula. L'analisi in sezione delle strutture perpendicolari che si estendono dal bordo dei batteri rivela una dimensione di 1,0-1,5 nm e una dimensione flagellare di 8,4 nm. (b) Immagine al microscopio a forza atomica di una scansione di 1 μm del bordo di una comunità di *S. oneidensis* MR-1 che cresce su una membrana filtrante in policarbonato. Si vedono singoli filamenti distinti che si raggruppano e poi si dirigono in un poro della membrana. Questi fasci sono altamente conduttivi. La larghezza del fascio è di 87 nm nel punto più stretto, la dimensione del fascio è di 5,5 nm e quella del singolo filamento è di 2,5–3,5 nm.

Batteri e struttura del suolo

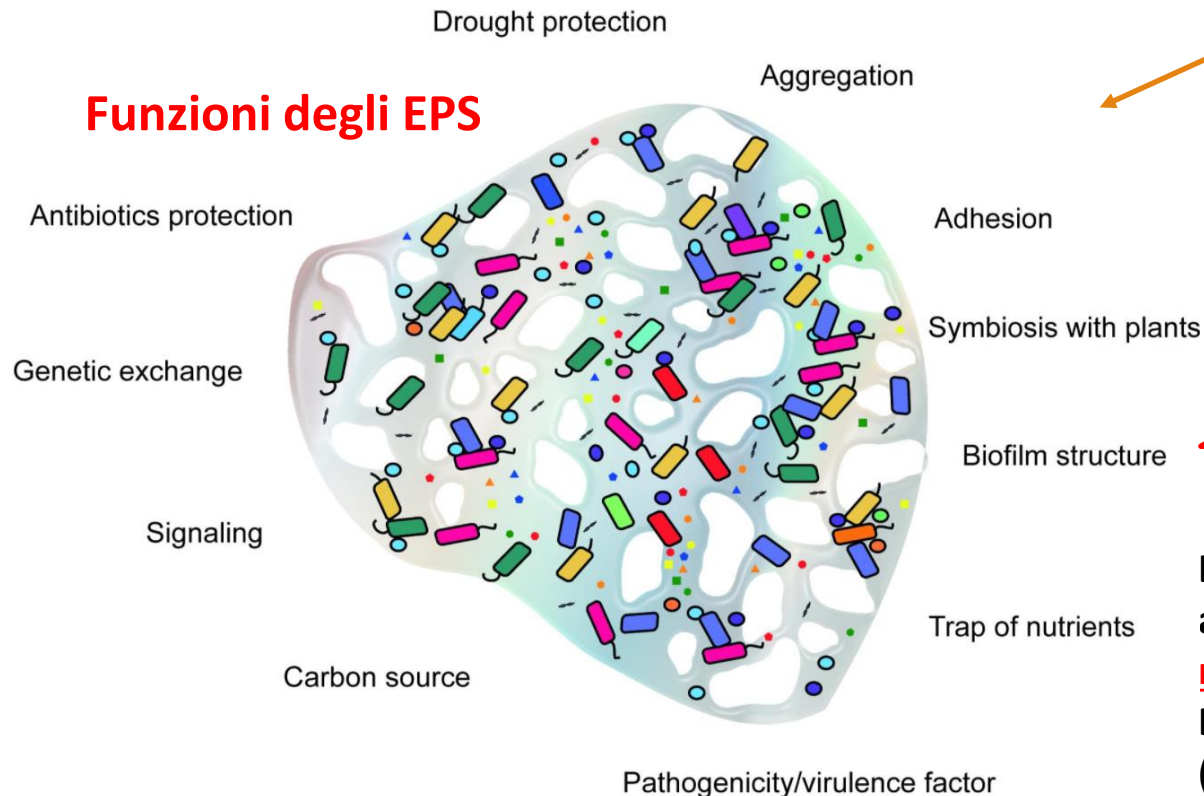
Funzioni ecologiche degli EPS microbici

Gli EPS possono essere prodotti da batteri, microalghe, funghi e protisti. Gli EPS sono **polimeri biosintetici** composti principalmente da **polisaccaridi**, **proteine**, **enzimi**, **acidi nucleici**, **lipidi** e altri composti come gli **acidi umici**.

EPS

utilizzato come abbreviazione di "polisaccaridi extracellulari", "esopolimeri" o "esopolisaccaridi".

Funzioni degli EPS



Essendo la biosintesi di EPS un **processo che richiede energia**, la sua produzione deve offrire vantaggi selettivi nell'ambiente al microorganismo produttore.

Negli ambienti naturali, la maggior parte dei microrganismi vive sotto forma di **aggregati (flocculi e biofilm)** per i quali l'EPS è **strutturalmente e funzionalmente essenziale**

La maggior parte delle **funzioni** attribuite all'EPS sono legate alla **protezione del microrganismo produttore**.

Diverse variazioni delle condizioni abiotiche (**siccità, temperatura, pH, salinità, etc.**) possono indurre la produzione di EPS come **risposta agli stress ambientali**.

Costa et al., (2018). Microbial Extracellular Polymeric Substances: Ecological Function and Impact on Soil Aggregation. *Frontiers in microbiology*, 9, 1636.

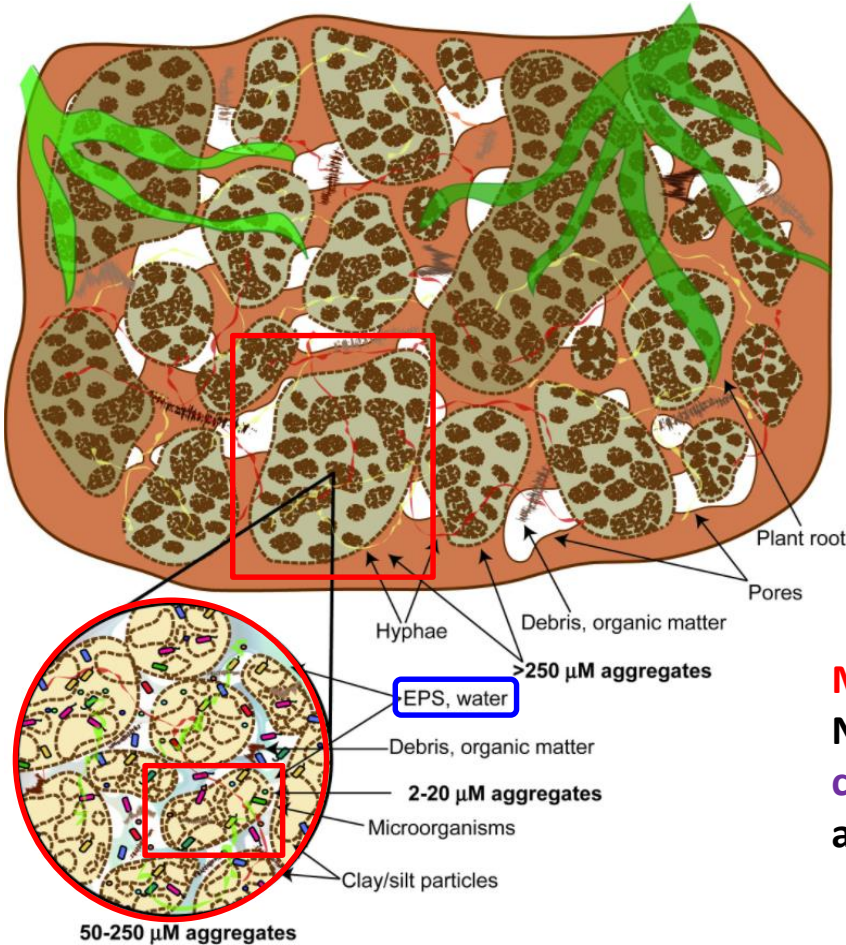
EPS → **stabilizzazione aggregati del suolo**

Le diverse componenti del suolo sono organizzate sotto forma di **aggregati** di diverse dimensioni, alla cui formazione contribuiscono gli **EPS**.

Lo stato di **aggregazione** è influenzato dalla **comunità microbica del suolo**, dai **composti minerali ed organici**, dalla **comunità vegetale** e dalle **lavorazioni a cui è stato sottoposto il suolo**.

L'**EPS** è direttamente coinvolto nella formazione di **associazioni organo-minerali** nel suolo.

L'EPS aggrega le particelle minerali adsorbendosi alle loro superfici, creando connessioni tra diversi tipi di minerali e migliorando anche la loro capacità di trattenere l'acqua.



Microaggregati persistenti → **2–20 μm** ∅

Nei **microaggregati persistenti**, le particelle di **argilla** sono legate da **agenti chelanti inorganici amorfi**, **alluminosilicati**, **ossidi**, **sostanze umiche** ed **EPS** associati a ioni metallici.

Microaggregati → **20-250 μm** ∅

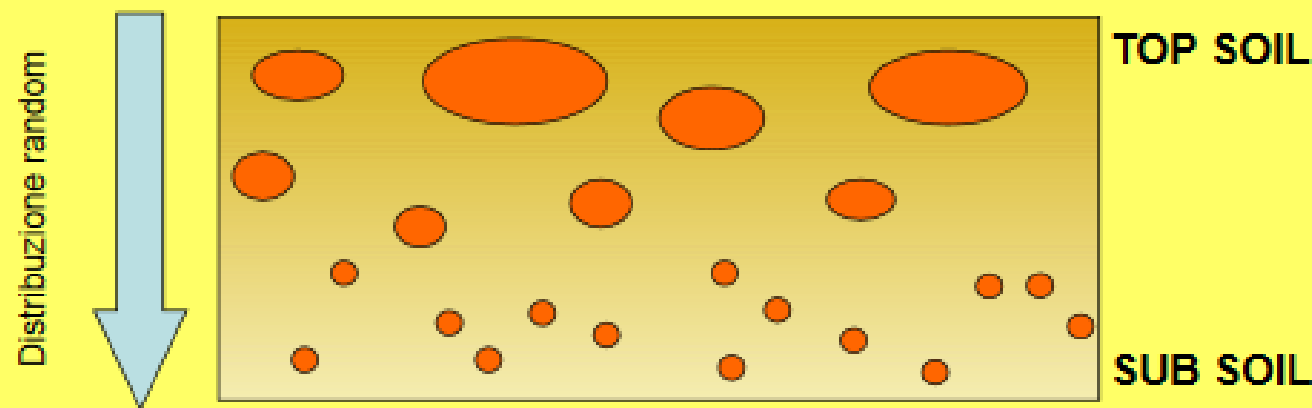
I microaggregati persistenti sono legati insieme in **microaggregati più grandi (20-250 μm ∅)** dalle radici delle piante, dai **pel radicali** e dalle **ife fungine**.

Macroaggregati → **∅ > 250 μm**

Sono formati da microaggregati legati tra loro da **agenti leganti transitori** (polisaccaridi e poliuronidi).

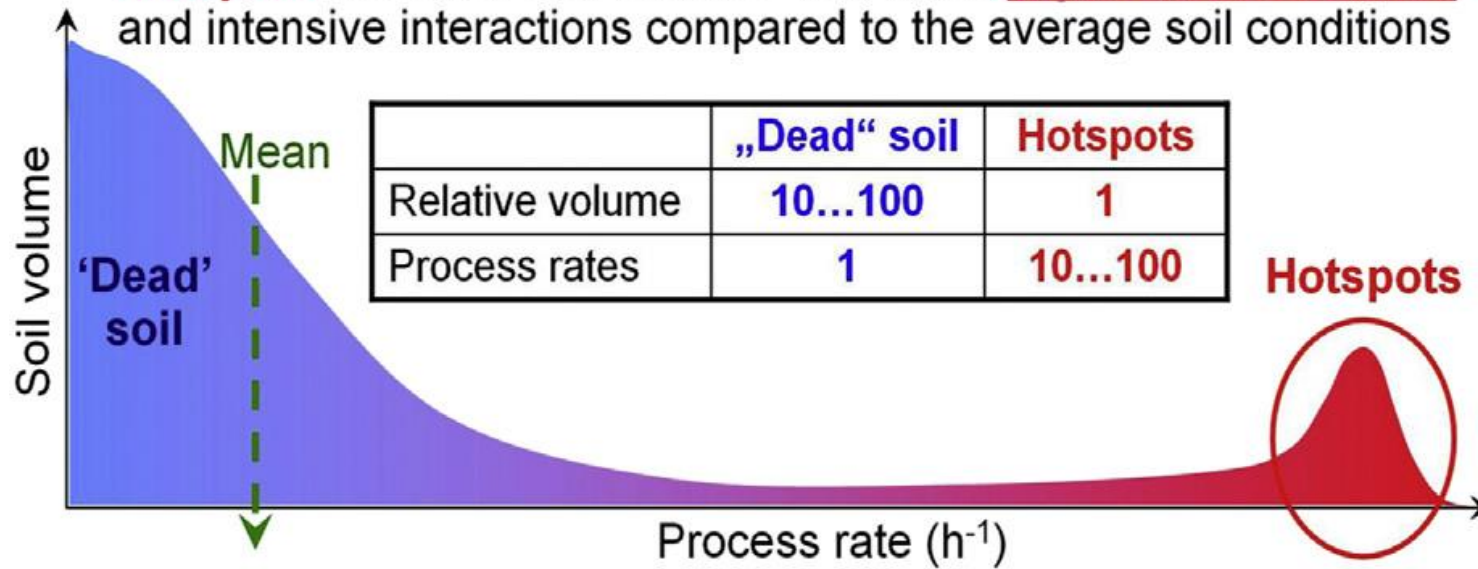
Distribuzione dei batteri nel suolo

- L'**80%** dei batteri del suolo vive nei micropori degli aggregati di suolo che, evidentemente, garantiscono condizioni più favorevoli alla crescita microbica (*Ranjard and Richaume, 2001*)
- Tendono a vivere in "**hot spots**" che si distribuiscono in modo random crescente via via che si procede in profondità nel bulk soil (*Nunan et al., 2002*)



- Tendono a vivere attaccati alle superfici: più piccole esse sono e maggiore è la diversità microbica e viceversa. Inoltre le dimensioni delle particelle hanno un impatto sulla diversità e la struttura delle comunità microbiche più evidente di quanto non facciano pH e sostanza organica (*Sessitsch et al., 2001*)

Hotspots are small soil volumes with much higher process rates and intensive interactions compared to the average soil conditions



Concetto di punti caldi microbici nel suolo: i punti caldi sono piccoli volumi di terreno caratterizzati da velocità di processo molto più elevate e interazioni intense rispetto al resto del suolo. La tabella nel riquadro rappresenta il volume relativo e le velocità di processo nei punti caldi e nel resto del suolo.

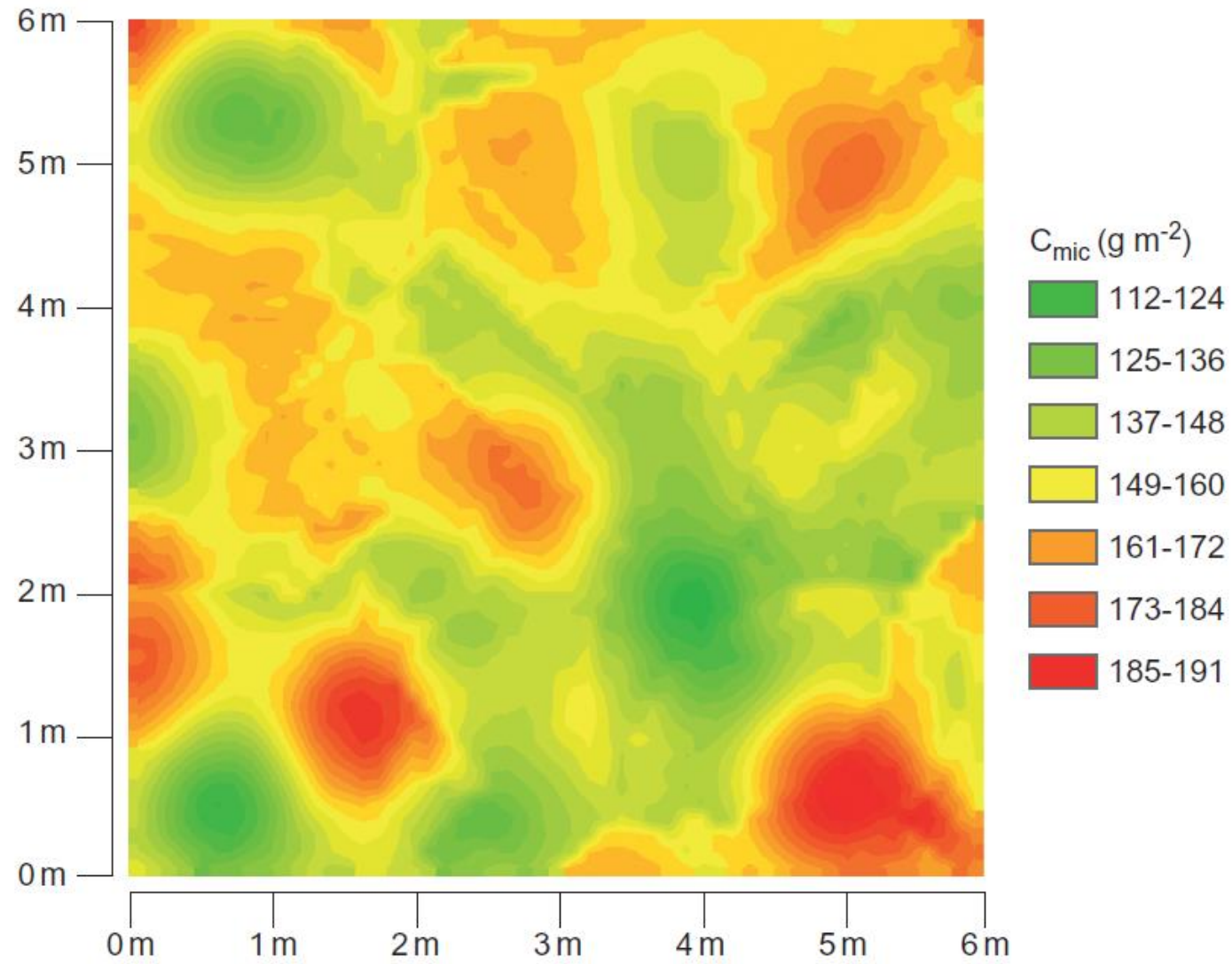


FIG. 7.1 Spatial distribution of microbial carbon ($g\ C_{mic}\ m^{-2}$) in a Vertic Stagnosol under grassland. The kriged map illustrates the heterogeneity of C_{mic} at the scale of $6 \times 6\ m^{-2}$.

Hotspot microbici nel suolo

Disponibilità di sostanza organica

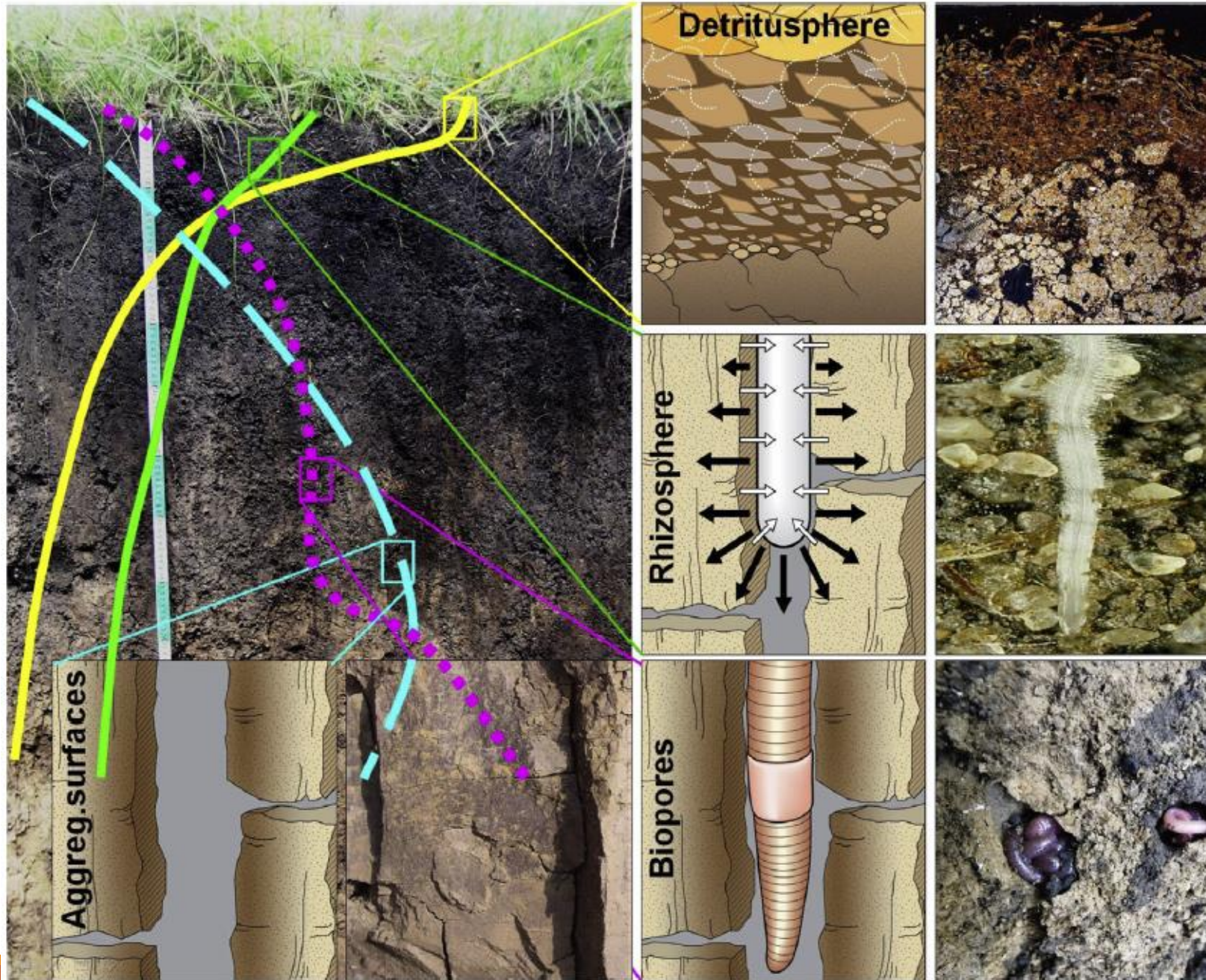
Rizosfera: input di essudati radicali labili e altre rizodeposizioni meno decomponibili a varie profondità.

Detritosfera: input di sostanze recalcitranti altamente polimeriche, ma anche di alcune sostanze labili, a basso peso molecolare). Lettieria, principalmente sulla superficie del suolo e in profondità alla morte delle radici.

Biopori: a) input di sostanza organica sia labile che recalcitrante elaborata all'interno dell'intestino dei lombrichi e restituita al suolo sotto forma di escrementi (drilosfera). Anche le deiezioni della fauna del suolo apportano sostanze organiche labili e recalcitranti che possono essere associate ai biopori.

Superfici inerti: input di sostanze organiche liscivate dalla detritosfera (orizzonte O), dall'orizzonte C in parte dalla rizosfera.

La disponibilità disomogenea, nel tempo e nello spazio, delle risorse determina un'analogia distribuzione disomogenea della microflora.



Schemi ed esempi di quattro gruppi di hotspot microbici nel suolo: Detritosfera (in alto a destra), Rizosfera (in mezzo a destra), Biopori (in basso a destra) e superfici aggregate (in basso a sinistra) e la loro importanza relativa fino a 1 m di profondità lungo un profilo di suolo. L'importanza relativa degli hotspot lungo la profondità può differire notevolmente tra i suoli sotto prati, foreste o colture e dipende fortemente dal materiale parentale del suolo e dalle condizioni climatiche.

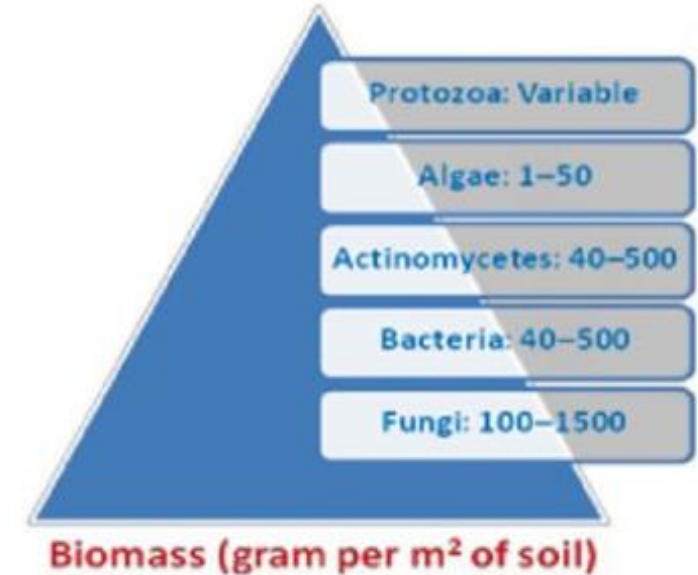
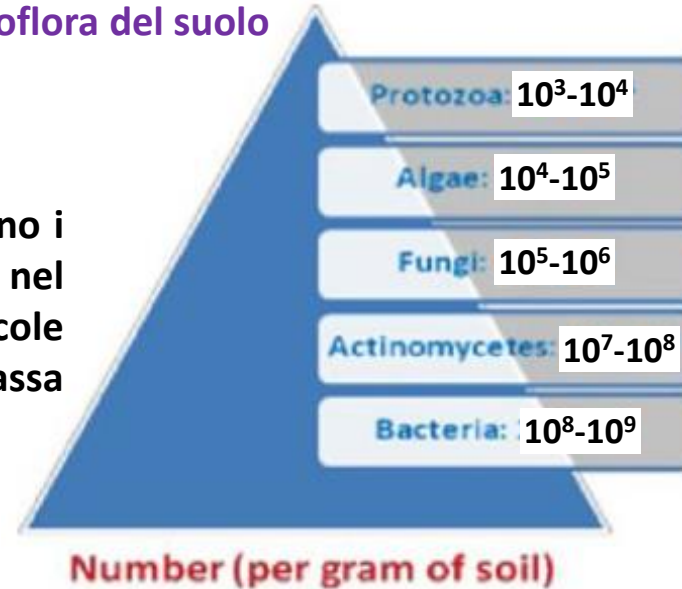
I microrganismi del suolo e le loro attività

MICROORGANISMI PRESENTI NEL SUOLO

Batteri
Funghi
Alge
Protozoi

Composizione della microflora del suolo (0-15 cm di profondità)

In termini numerici, i **batteri** sono i microrganismi più numerosi nel suolo, ma a causa delle loro piccole dimensioni, hanno una biomassa più piccola dei funghi.



I **funghi**, per le loro grandi dimensioni e la loro struttura miceliale (ife), costituiscono la quota maggiore della biomassa microbica totale nel suolo.

Gli **actinomiceti**, rispetto ai batteri, sono numericamente inferiori di un fattore 10; ma essendo di dimensioni maggiori, hanno una biomassa simile a quella dei batteri.

Questi valori, tuttavia, sono influenzati dalle caratteristiche del suolo (pratiche di gestione, contenuto di nutrienti, condizioni fisiche, ...).

La **popolazione fungina** domina la biomassa del suolo quando non disturbato (incolto).

I **batteri**, gli **actinomiceti** ed i **protozoi** possono tollerare meglio i disturbi del suolo rispetto alle popolazioni fungine; quindi, essi predominano nei terreni lavorati.

Ci sono più microrganismi in un cucchiaino di terreno che persone sulla terra!

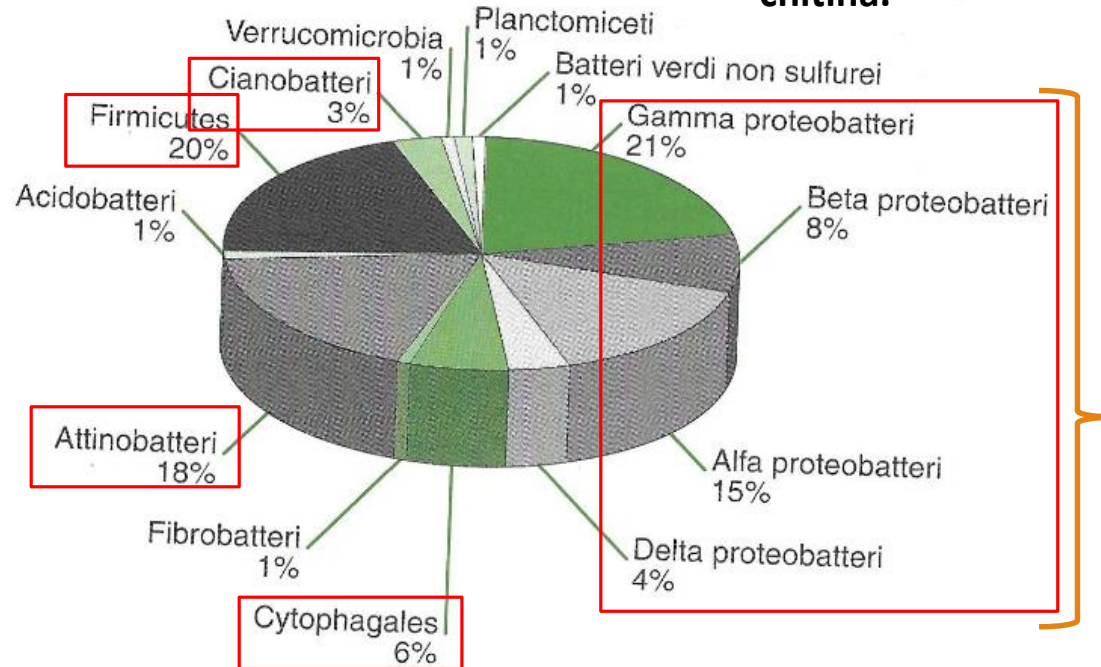
RAPPORTI TRA I DIVERSI GRUPPI BATTERICI NEL SUOLO

I **Firmicutes** (~20%) batteri Gram positivi:

Bacillus (sporigeno)

Arthrobacter (non sporigeno)

...



Le **citofaghe** (6%) sono batteri Gram negativi, aerobi, particolarmente attivi nella degradazione della cellulosa e della chitina.

I **cianobatteri** (3%) sono tra i fototrofi più rappresentati nel suolo.

Alcuni sono in grado di fissare l'azoto, importanti dal punto di vista agronomico e della formazione del suolo. In associazione con i funghi formano i **licheni** (organismi pionieri).

I **proteobatteri** risultano i batteri più abbondanti nel suolo (~48%).

Rhizobium, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Agrobacterium*, *Caulobacter*, metilotrofi, nitrificanti, ...

Gli **attinomiceti (attinobatteri)** risultano i ben rappresentati nel suolo (~18%).

Streptomyces, *Nocardia*, *Micromonospora*, *Actinomyces*,

Gli attinomiceti sono organismi **unicellulari**, **generalmente aerobi** ed **eterotrofi**.

Degradano la sostanza organica liberando i nutrienti in essa contenuti.

Producono **antibiotici** e **geosmine**, sostanze che danno il caratteristico odore di terra.

Fungono da **agenti di biocontrollo** contro diversi patogeni fungini delle radici.

Sono presenti anche specie microbiche appartenenti al dominio degli **Archaea**.



Funghi

Costituiscono la biomassa più abbondante del suolo (1.000-15.000 kg/Ha) e prediligono ambienti acidi.

Si concentrano prevalentemente nei primi 15 cm di suolo.

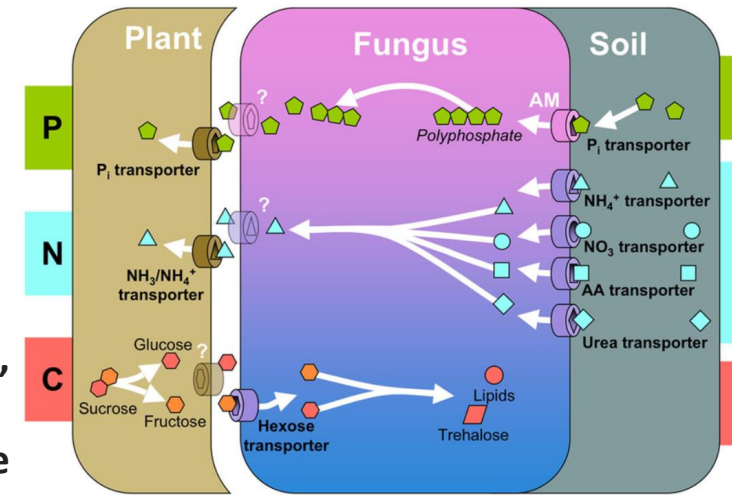
In 1 g di suolo possono essere presenti centinaia di metri di **ife** (formazione aggregati di suolo).

Generi più diffusi: *Aspergillus*, *Geotrichum*, *Penicillium*, *Fusarium*, *trichoderma*,

Sono capaci di degradare sostanze complesse come le **cellulose** e le **emicellulose** e altre molto complesse, come la **lignina**.

Hanno un ruolo fondamentale nella **formazione dell'humus**.

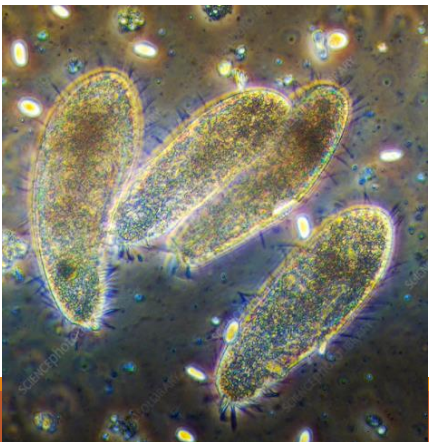
Molte specie di funghi possono formare delle **micorrize** entrando in simbiosi con le radici delle piante.



Alghe

Sono organismi **autotrofi** che sfruttano l'energia luminosa per **sintetizzare composti organici**. Arricchiscono il suolo di carbonio. Sono concentrate negli strati superficiali del suolo e dentro ai pori occupati dall'acqua.

In associazione con i funghi possono formare i **licheni** (contribuiscono alla disgregazione di formazioni rocciose).

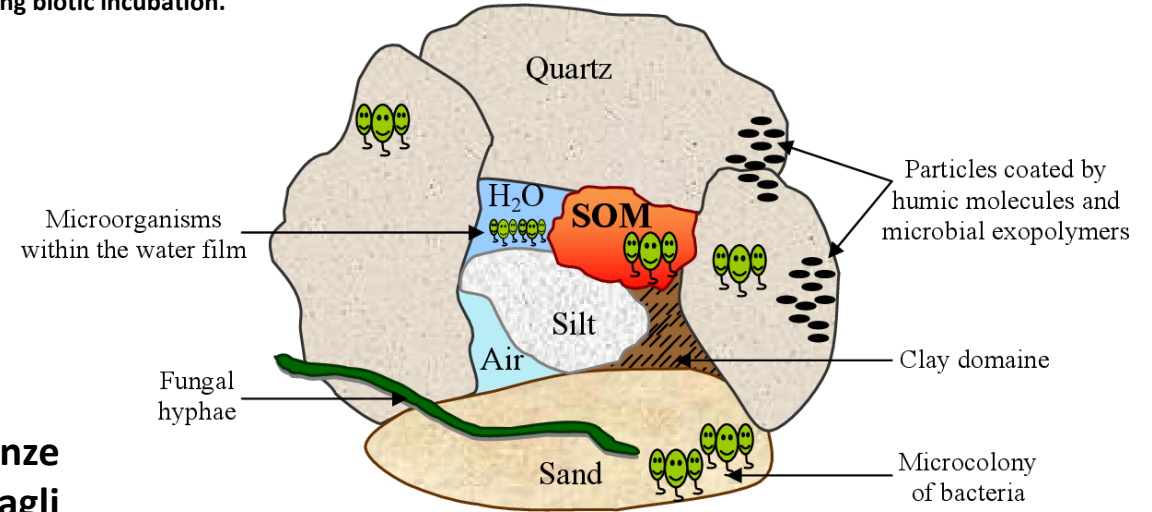


Protozoi

Sono le forme più semplici di vita animale e la loro biomassa è pari a 20-200 kg/ha. Vivono predando alghe, batteri, attinomiceti e nematodi. Alla morte rilasciano una gran quantità di **elementi minerali** utili per la nutrizione delle piante.

Le varie **specie procariotiche** non sono presenti nel suolo come cellule isolate e disperse in modo omogeneo, ma sotto forma di **microcolonie** distribuite in modo **disomogeneo** ed associate alle componenti organiche e minerali del suolo.

L'“**effetto rizosfera**” è causa di disomogeneità: la microflora è più abbondante e più attiva nelle immediate vicinanze (millimetri) delle radici, per l'**effetto stimolante** esercitato dagli **essudati radicali** del suolo rizosferico. Il suolo non rizosferico è indicato come “*bulk soil*”.



MICRORGANISMI → INDICATORI DI QUALITÀ E SOSTENIBILITÀ DEL SUOLO

I microrganismi possono essere impiegati come indicatori della qualità del suolo per

- il ruolo chiave nella degradazione e nel riciclo della sostanza organica (e dei nutrienti);
- la pronta risposta a tutti i cambiamenti dell'ambiente suolo.

Per l'esecuzione di **analisi microbiologiche e biochimiche**, di solito, è consigliato il prelievo di suolo alla profondità di **0-15 cm** poiché, di solito, è questo lo strato di suolo maggiormente colonizzato dai microrganismi.

Decreto ministeriale 8 luglio 2002 - "Approvazione dei metodi ufficiali di analisi microbiologica del suolo"

VALUTAZIONE DELLE CARICHE MICROBICHE E GRUPPI GENERICI

- 1 - Procedimento generale per le conte per via colturale
- 2 - Gruppi generici di microrganismi (batteri eterotrofi aerobi/anaerobi, muffe e lieviti)

GRUPPI FISIOLGICI DI MICROGANISMI

- 1 - Microrganismi del ciclo dell'azoto, batteri azotofissatori liberi, aerobi ed anaerobi
- 2 - Batteri in associazioni diazotrofe (*Azospirillum*)
- 3 - Batteri in associazione simbiotica diazotrofa (*Rizobi*)
- 4 - Attinomiceti azotofissatori del genere *Frankia*
- 5 - Batteri proteolitici e ammonificanti
- 6 - Batteri nitrificanti
- 7 - Batteri denitrificanti
- 8 - Gruppi fisiologici del ciclo del carbonio
- 9 - Ciclo dello zolfo

DETERMINAZIONE MICORRIZE ARBUSCOLARI, METANOBATTERI, MICROFLORA FOTOSINTETICA OSSIGENICA

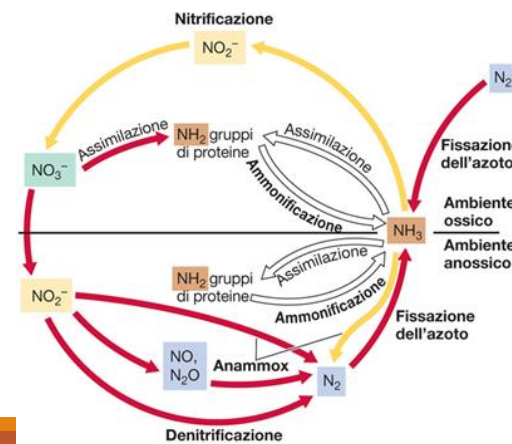
- 1 - Microflora fotosintetica ossigenata
- 2 - Metanobatteri
- 3 - Metodi di studio delle micorrize arbuscolari nel suolo

Il **MICROBIOTA** del suolo costituisce una quota importante della biomassa presente sulla terra e svolge ruoli fondamentali per il **funzionamento della biosfera**:

- Mantiene la struttura dei suoli;
- Controlla processi fondamentali per lo sviluppo di ecosistemi;
- Ha un impatto diretto sui cambiamenti climatici;
- Influenza i cicli biogeochimici;
- **Influenza la fertilità dei suoli (nutrizione delle piante);**
- ...

Gruppi fisiologici del suolo

Indipendentemente dalla loro collocazione sistematica i microrganismi vengono distinti in gruppi fisiologici, specie diverse che svolgono una funzione ben definita (fissazione dell'azoto, degradazione della cellulosa, nitrificazione, etc.



MICROORGANISMI DEL CICLO DELL'AZOTO

Nel suolo, la flora microbica implicata nel **ciclo dell'azoto** è abbondante e complessa; essa comprende specie saprofitiche ed ubiquitarie dotate di **elevata specificità**: **azotofissatori**, chemiolitotrofi aerobi **nitrificanti** (**nitrosanti** e **nitricanti**) e **denitrificanti**.

BATTERI AZOTOFISSATORI LIBERI (non simbiotici), AEROBI ED ANAEROBI

Per ricercare la **capacità N-fissatrice** viene indicato il "**test di riduzione dell'acetilene**" ad etilene, una tecnica specifica ed abbastanza semplice.

La **nitrogenasi** è un enzima non strettamente specifico per N_2 , può ridurre anche altri composti, tra cui acetilene ad etilene.

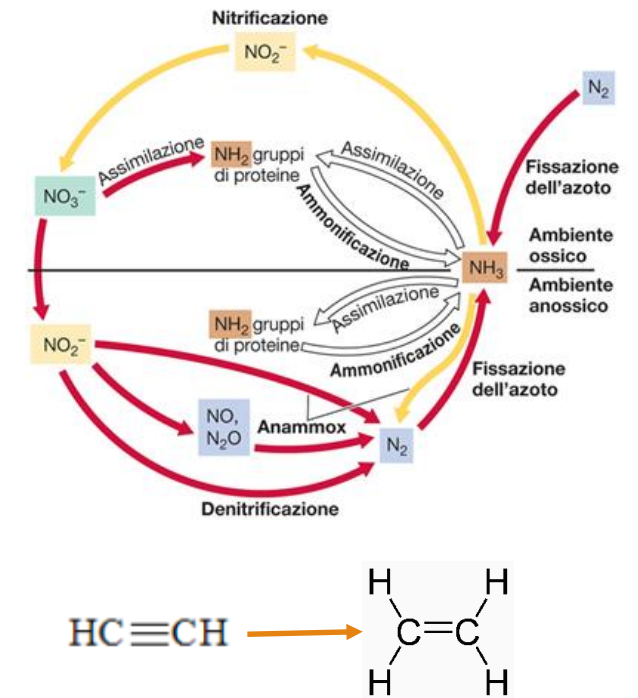
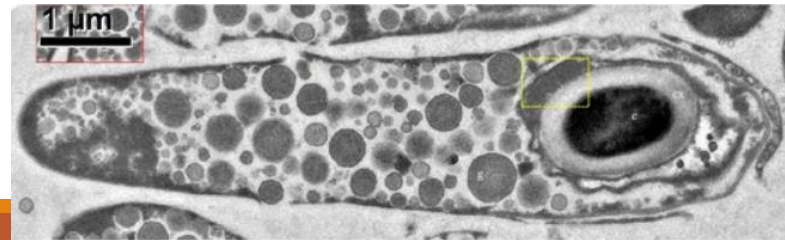
N-fissatori aerobi → *Azotobacter*

Azotobacter presenta cellule dalla forma sferica o ovoidale (Gram negative) con granulazioni interne ed uno spesso strato mucoso polisaccaridico esterno (*slime*).



N-fissatori anaerobi → *Clostridium*

Il genere *Clostridium* comprende batteri Gram positivi a forma di bastoncino, sporigeni, anaerobi obbligati. Le specie più note che fissano l'azoto sono *C. acetobutylicum*, *C. beijerinckii*, *C. butyricum* e *C. pasteurianum*.



BATTERI IN ASSOCIAZIONI DIAZOTROFE (*Azospirillum*)

I batteri appartenenti al genere *Azospirillum* colonizzano la rizosfera (senza formare noduli radicali) di numerose leguminose e graminacee di climi tropicali, subtropicali e temperati.

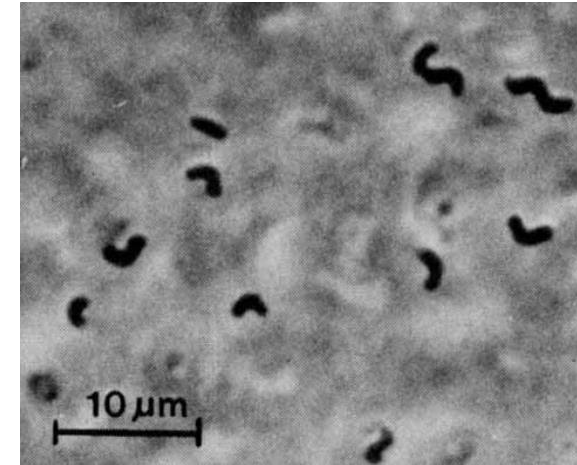
Batteri **Gram negativi** (2-4 μm x 1 μm), presentano forma a vibrione, ma possono assumere in certe condizioni una forma a spirale.

Sono **mobili** per la presenza di un singolo flagello polare; tuttavia, le specie *A. brasilense*, *A. lipoferum* ed *A. irakense*, quando coltivate in terreni agarizzati, possono presentare numerosi flagelli laterali.

Formano **granuli di poli- β -idrossibutirrato** (PBH); le specie *A. brasilense* ed *A. lipoferum* sono capaci di produrre **carotenoidi** che conferiscono colorazione rosa alle colture vecchie.

Si sviluppano a temperature di 32-35°C e ad un pH vicino alla neutralità.

I **diazotrofi** sono microrganismi che fissano l'azoto gassoso atmosferico (N_2) in una forma biologicamente disponibile (NH_3). Possono crescere senza fonti esterne di azoto già fissato. *Rhizobia*, *Frankia* (in simbiosi), e *Azospirillum*.



BATTERI IN ASSOCIAZIONE SIMBIOTICA DIAZOTROFA (RIZOBI)

I batteri dei generi *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium* e *Sinorhizobium*, sono costituiti da bastoncini **Gram negativi**, comprendono numerose specie e biovar. La loro classificazione, in continua evoluzione, si è basata per lungo tempo sulle capacità di instaurare rapporti di associazione simbiotica con specifici generi di piante leguminose, nelle quali provocano la formazione di **noduli radicali o tubercoli**. Oggi, i parametri utilizzati per classificare i rizobi si basano su caratteristiche fisiologiche, biochimiche e genetiche.



ATTINOMICETI AZOTOFISSATORI DEL GENERE *FRANKIA*

Gli **attinomiceti** del genere *Frankia* (*Actinomycetales*) sono batteri **Gram positivi** filamentosi.

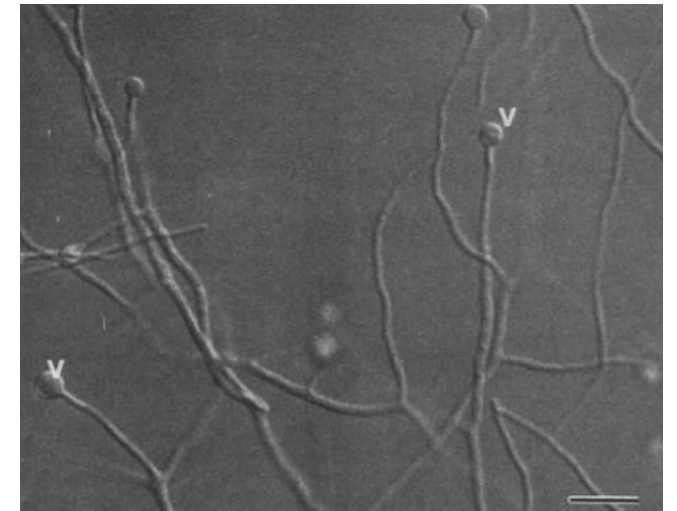
Identificabili, a livello di genere, in base alla morfologia: microife ramificate e settate (0,5-2 μm), sporangi multiloculari (10-100 μm), **diazovescicole** (3-5 μm).

Presentano **tempi di duplicazione fino a 5 giorni**, possono infettare le piante ospiti e fissano l' N_2 sia in coltura pura che in simbiosi. Formano **noduli** sulle radici delle piante ospiti (**piante non leguminose in gran parte arboree**)

Poiché la distribuzione dei ceppi di *Frankia* nei suoli non sembra strettamente legata alla presenza di piante attinorriziche, la presenza di *Frankia spp.* in un dato suolo non assumerebbe alcun particolare significato ecologico in sé.

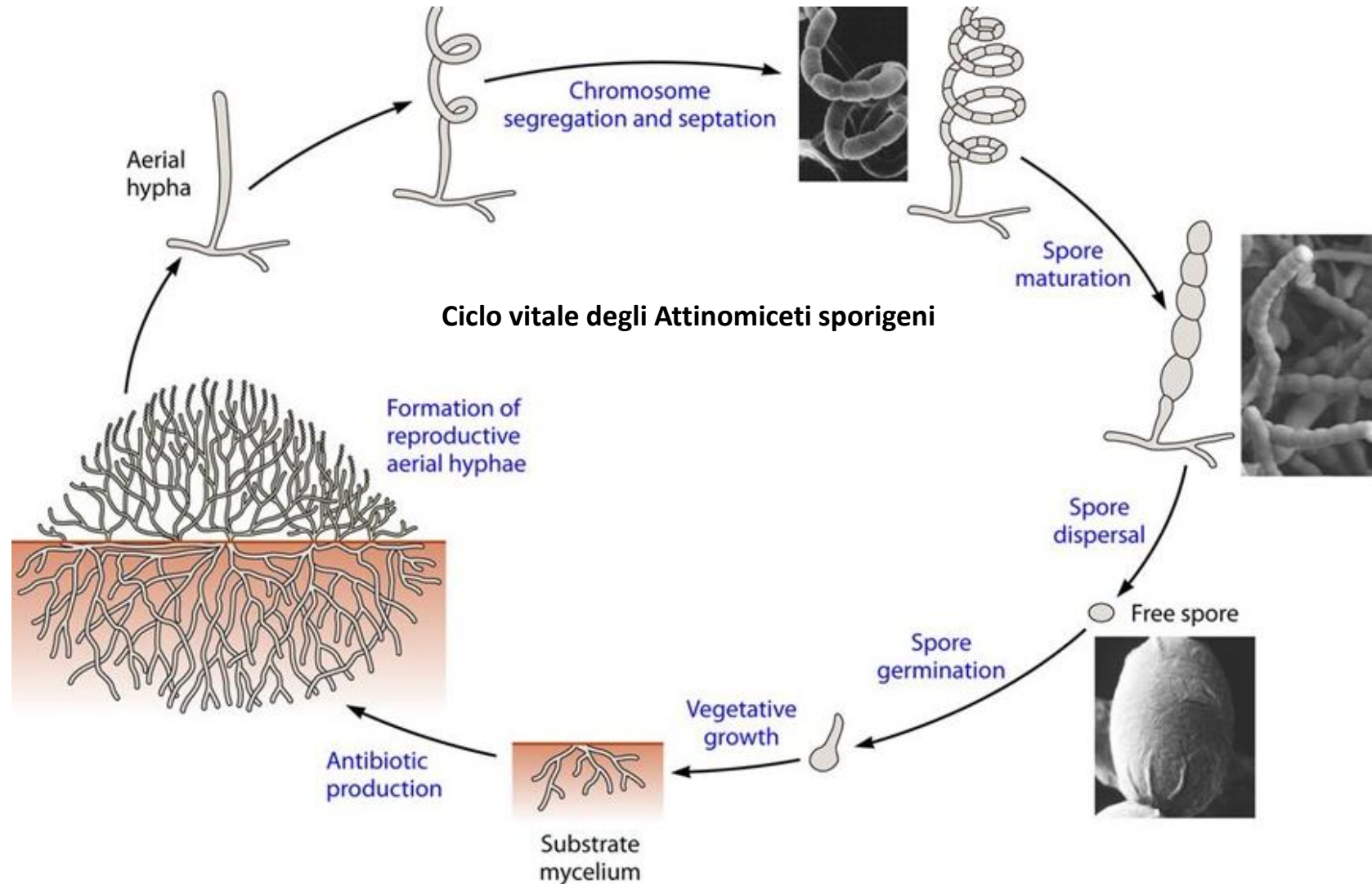
Al contrario, l'**assenza di questi attinomiceti in un suolo potrebbe indicare che esso è molto giovane** oppure che è stato **disturbato da attività antropiche** o da **catastrofi naturali**.

La ricerca e la conta di *Frankia spp.* nel suolo acquistano notevole importanza, quindi, nelle **applicazioni selvicolturali** e nel recupero ambientale, paesaggistico e produttivo di suoli degradati.



Frankia

Vescicole sferoidali (diazovescicole) (\varnothing 2-6 μm), incapsulate in lipidi, ed attaccate all'estremità o lateralmente alle ife da un breve gambo, anch'esso incapsulato; sono comunemente **prodotte in risposta alla carenza di azoto**.

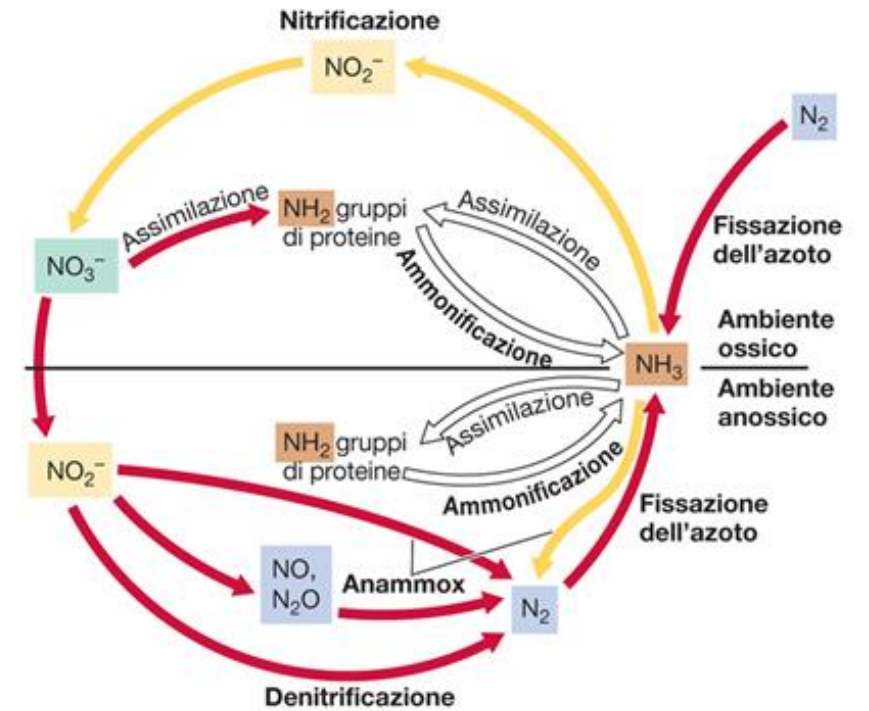


BATTERI PROTEOLITICI E AMMONIFICANTI

L'azoto organico di varia origine presente nel suolo è prevalentemente sotto forma di **proteine**.
La capacità di degradare le proteine è ampiamente diffusa nella microflora.

I **batteri proteolitici** (idrolizzanti) dalla molecola proteica, mediante idrolisi enzimatica, liberano **peptoni**, **peptidi** ed, infine, **aminoacidi** singoli;

Successivamente, gli **ammonificanti** (mineralizzatori ad ammonio) attraverso la **deaminazione** liberano il gruppo aminico $-NH_2$ sotto forma di NH_3 .
Moltissimi **batteri** (aerobi ed anaerobi), **attinomiceti** e **funghi**, sono in grado di mineralizzare l'azoto organico proteico.



GRUPPI FISIOLGICI DEL CICLO DEL CARBONIO

Nell'ambiente terrestre una parte considerevole del ciclo del carbonio comprende la **degradazione dei polimeri vegetali**.

Le **piante** rappresentano la fonte principale di carbonio organico nel suolo ed i **microrganismi** sono i maggiori responsabili della trasformazione dei polimeri vegetali.

La **cellulosa**, l'**amido**, la **pectina** e la **lignina** sono i principali polimeri di origine vegetale presenti nel suolo.

Come conseguenza dell'**attività microbica**, mentre la **CO₂** viene reintrodotta nell'atmosfera, vengono prodotti **materiale umico** e **composti più semplici** disponibili per altre popolazioni microbiche.

CELLULOSOLITICI aerobi/anaerobi

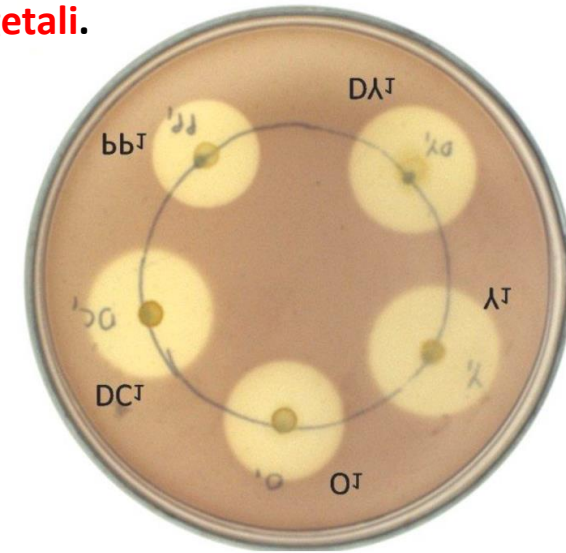
I degradatori della cellulosa possono essere **funghi**, **attinomiceti** e **batteri**, sia aerobi che anaerobi.

La degradazione della cellulosa può avvenire in diverse condizioni chimico-fisiche.

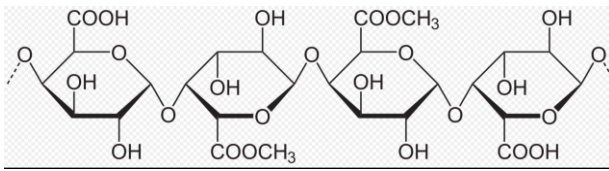
In **anaerobiosi**, possono essere individuati due gruppi batteri che riescono a degradare la cellulosa: i **mesofili** (28-35°C) ed i **termofili** (55-70°C).

Funghi ed attinomiceti cellulolitici sono rari in ambienti anossici. **L'idrolisi della cellulosa in ambiente anaerobico è trascurabile.**

In **aerobiosi**, l'attività cellulolitica svolta dai batteri è molto lenta, mentre è più accentuata in **funghi** ed **attinomiceti**; pertanto, in suoli ben drenati o in ambienti ossici, l'idrolisi della cellulosa avviene soprattutto attraverso i funghi e gli attinomiceti.



L'attività cellulolitica è dimostrata dall'**idrolisi della cellulosa**, aggiunta come unica fonte di carbonio, ad un terreno agarizzato distribuito in piastre Petri. Dopo incubazione, le colonie che idrolizzano la cellulosa sono circondate da un alone chiaro.



PECTINOLITICI

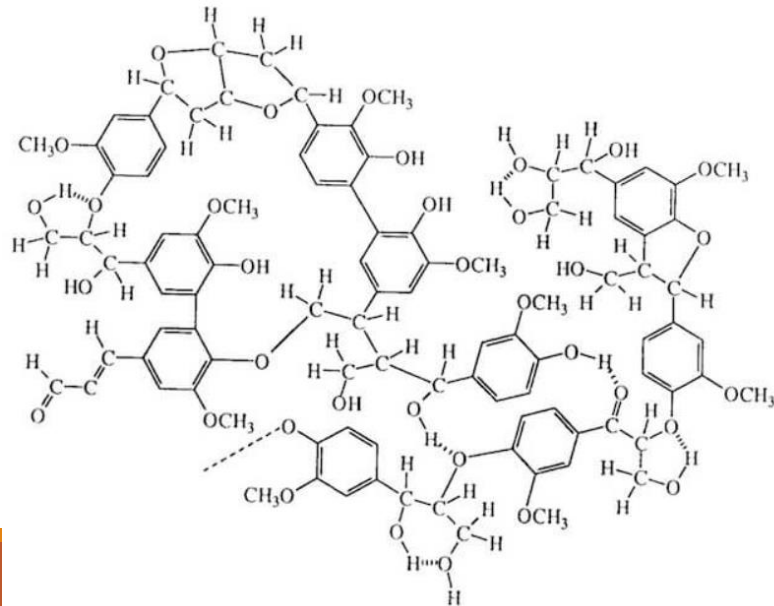
Le pectine consistono di catene non ramificate di **acido D-galatturonico** con legami β -(1,4) glucosidici. I gruppi carbossilici sono esterificati parzialmente o totalmente con **metanolo**.

La degradazione microbica delle pectine avviene ad opera degli **enzimi pectinolitici** (**esterasi**, **glucosidasi** e **liasi**) prodotti da **funghi**, **batteri** ed **attinomiceti**.

Per la conta su piastra dei microrganismi pectinolitici, il metodo si basa su una semina di sospensioni-diluizioni di suolo su agar contenente pectina. L'alone di idrolisi viene messo in evidenza da una sostanza che, precipitando la pectina integra, opacizza lo strato di agar circostante rendendo visibile una zona trasparente intorno alle colonie che hanno idrolizzato la pectina.



BIBI, et al. (2018). Isolation and identification of novel indigenous bacterial strain as a low cost pectinase source. *Braz. arch. biol. technol.*, 61:e18160653.



LIGNINOLITICI

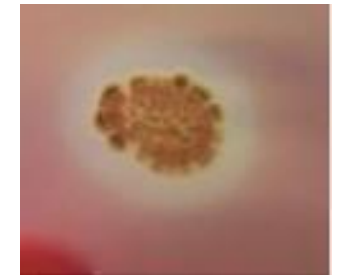
Le lignine sono **polimeri fenolici condensati** che presentano **legami irregolari carbonio-carbonio** molto stabili e **legami etere** tra le unità fenilpropanoidi.

Esistono diversi microrganismi capaci di degradare, parzialmente o completamente, le lignine mediante gli enzimi **laccasi** e **perossidasi**.

Funghi

Batteri

Attinomiceti



MICROFLORA FOTOSINTETICA OSSIGENICA

I **cianobatteri** e le **microalghe eucariote** sono microrganismi **autotrofi** provvisti di **clorofilla** ed in grado di effettuare la fotosintesi ossigenica.

Sono componenti ubiquitari delle comunità microbiche che si sviluppano sulla superficie del suolo.

La microflora fotosintetica ossigenica del suolo comprende più frequentemente **cianobatteri** (alghe verdi-azzurre), **Cloroficee** (alghe verdi), **Xantoficee** (alghe gialle) e **Bacillarioficee** (diatomee), ma possono essere presenti anche **Euglenoficee** (euglenoidi) e **Rodoficee** (alghe rosse).

Le microalghe ed i cianobatteri del suolo possono rappresentare dei validi **indicatori microbiologici dell'inquinamento del suolo da fitofarmaci** (diserbanti).

Come le piante infestanti, microalghe e cianobatteri per la loro localizzazione superficiale sono infatti particolarmente esposti all'azione di tali prodotti, i quali possono determinare profonde modificazioni nella composizione della popolazione.





Aerobic Anoxygenic Phototrophic Bacteria Promote the Development of Biological Soil Crusts

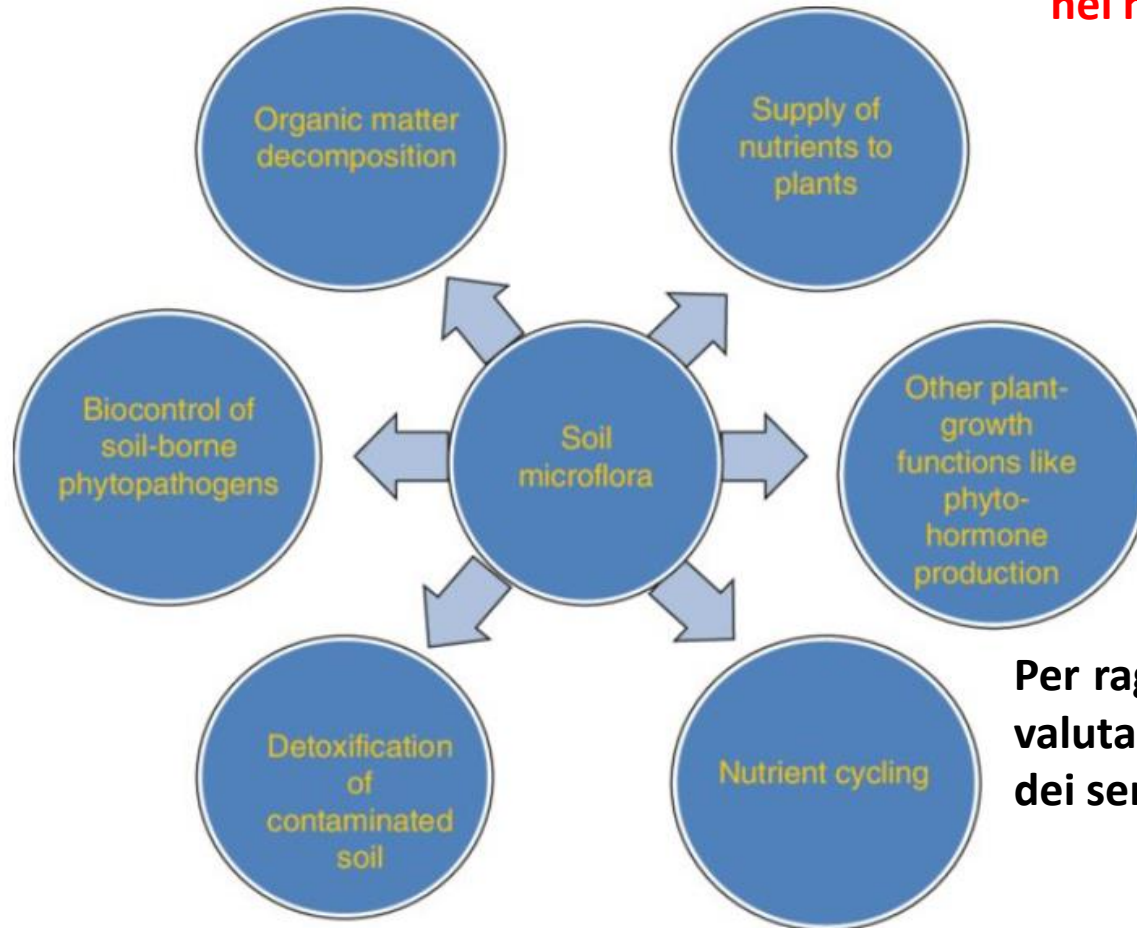
Kai Tang¹, Lijuan Jia¹, Bo Yuan^{1,2}, Shanshan Yang¹, Heng Li¹, Jianyu Meng¹, Yonghui Zeng^{3,4} and Fuying Feng^{1*}*

¹ Institute for Applied and Environmental Microbiology, College of Life Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, China, ² College of Life Science, Inner Mongolia Normal University, Huhhot, China, ³ Aarhus Institute of Advanced Studies, Aarhus, Denmark, ⁴ Department of Environmental Science, Aarhus University, Roskilde, Denmark

Biological Soil Crusts

Sono comunità di organismi viventi sulla superficie del suolo in ecosistemi aridi e semi-aridi. Si trovano in tutto il mondo con composizione e copertura delle specie variabili a seconda della topografia, delle caratteristiche del suolo, del clima, della comunità vegetale, dei microhabitat e dei regimi di disturbo del suolo. Le «biological soil crusts» svolgono importanti ruoli ecologici tra cui la fissazione del carbonio, la fissazione dell'azoto e la stabilizzazione del suolo; alterano l'albedo del suolo e le relazioni con l'acqua e influenzano la germinazione e i livelli di nutrienti nelle piante vascolari. Possono essere danneggiati da incendi, attività umane, pascolo e altri disturbi e possono richiedere lunghi periodi di tempo per recuperare composizione e funzione. Le croste biologiche del suolo sono anche conosciute come biocroste o come suoli crittogamici, microbiotici, microfitici o criptobiotici.

Centralità dei microrganismi del suolo nel mantenimento degli ecosistemi



- Sono coinvolti nella degradazione della sostanza organica
- Rendono disponibili nutrienti e promotori della crescita (fitormoni) per le piante
- Controllano il ciclo dei nutrienti (cicli biogeochimici)
- Intervengono nella detossificazione di suoli contaminati
- Controllano i microrganismi fitopatogeni
- ...

Per raggiungere una protezione adeguata del suolo, nel corso della valutazione del rischio ambientale, si dovrebbe tenere conto anche dei servizi ecosistemici forniti dalle comunità microbiche.