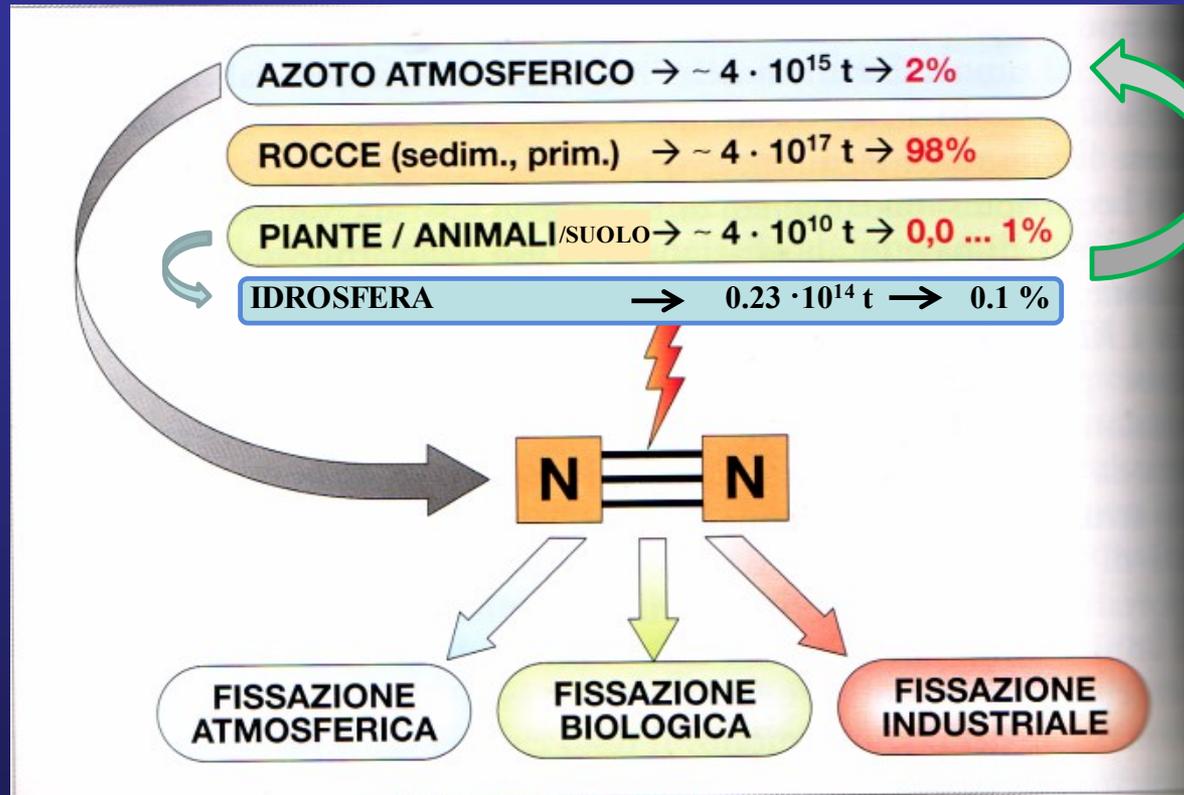


Rappresentazione semplificata del ciclo globale dell'azoto



L'azoto è presente nei diversi comparti dell'ecosistema terrestre in forme e composti diversi, ma viene trasferito come N inorganico

Il ciclo globale dell'azoto

L'azoto è un elemento molto diffuso in natura.

Caratterizzato da notevole mobilità si trova distribuito nelle litosfera, nell'atmosfera, nella idrosfera e nella biosfera.

Il contenuto maggiore di azoto, pari al 93.8% delle riserve totali presenti sul nostro pianeta, si trova nella crosta terrestre, nelle rocce e nei sedimenti in forme ancora non ben definite.

Solamente una frazione molto limitata è presente nel suolo.

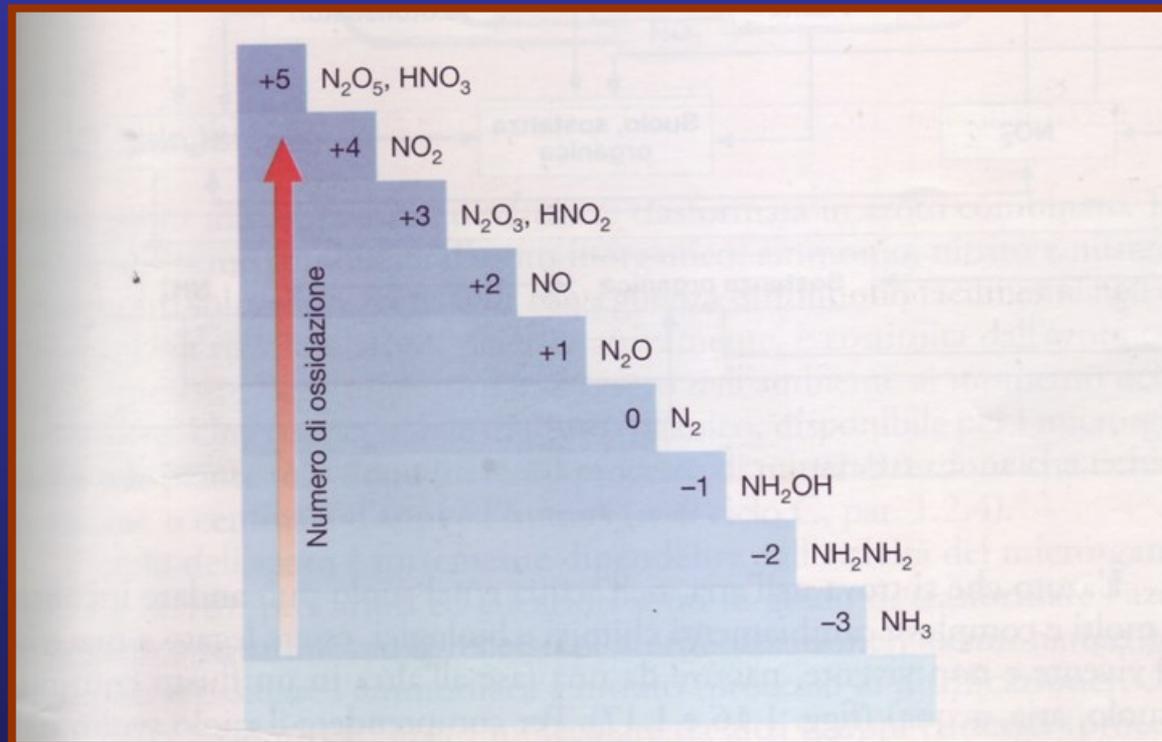
Di questa, una parte molto piccola (ioni NO_3^- e NH_4^+) è direttamente utilizzabile dalle piante.

Diversi composti azotati:

- l'azoto gassoso (N_2)
- l'ammoniaca (NH_3)
- gli ioni ammonio (NH_4^+) e nitrato NO_3^-)
- i composti organici azotati

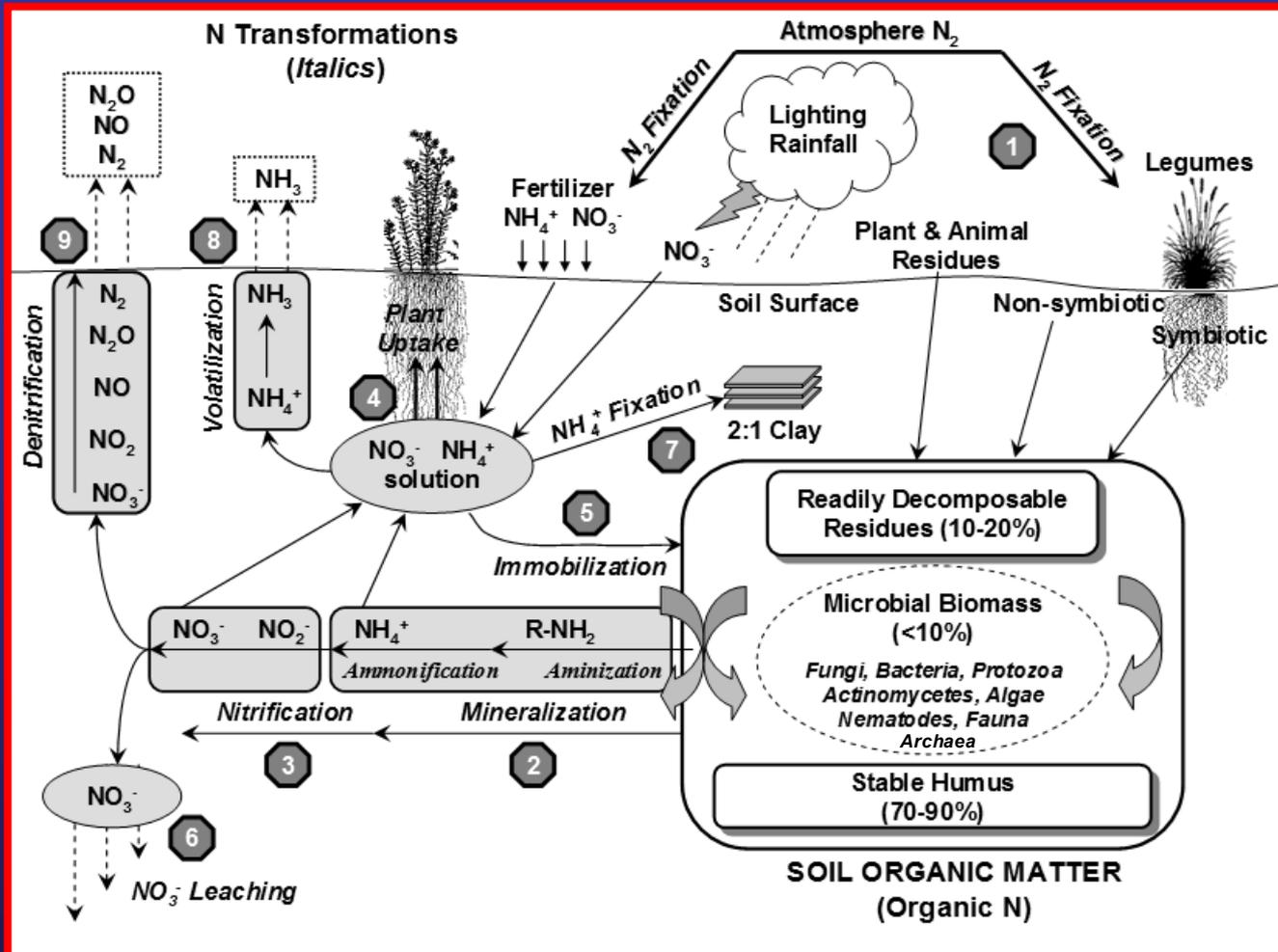
sono coinvolti in numerosi processi chimico-fisici e biologici che definiscono il ciclo dell'azoto.

Il ciclo globale dell'azoto



Nei trasferimenti tra i comparti dell'ecosistema l'azoto si presenta in forme chimiche a diversi stati di ossidazione e contenuto energetico.

Il ciclo globale dell'azoto



(da Havlin et al., 2014)

Apporti

- Precipitazioni atmosferiche
- Azotofissazione biologica
- Concimazione
- Alterazione dei minerali
- Mineralizzazione della SOM
- Acque irrigue e superficiali

Perdite

- Asportazioni colturali
- Lisciviazione
- Erosione
- Volatilizzazione (N₂O, N₂, NH₃)

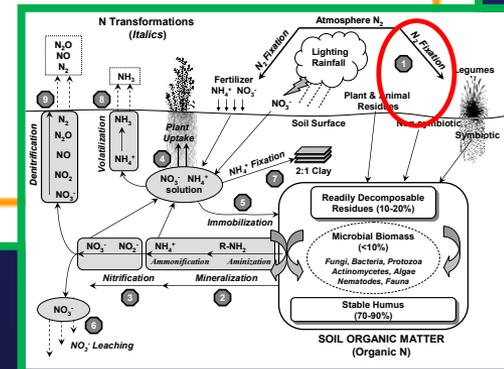
N ha un ciclo biogeochimico sedimentario-gassoso ed è presente in tutti i compartimenti dell'ecosistema terrestre in forme e composti diversi; N viene trasferito in forme inorganiche.

La fissazione biologica dell'azoto

Per **fissazione biologica dell'azoto** si intende il processo, operato da differenti generi di microrganismi del suolo, a mezzo del quale l'azoto presente in forma molecolare inorganica nell'atmosfera (N_2 -azoto libero) è trasformato in ammoniacca (NH_3 -azoto fissato) e convertito, successivamente, in forma organica.

L'attività di **azotofissazione** esplicata dai microrganismi e, quindi, la quantità di azoto fissato biologicamente dipendono strettamente da alcune caratteristiche del suolo:

- pH
- **quantità disponibili di fosforo e di potassio** (Inibizione da N-inorganico)
- **contenuto di nutrienti inorganici** (S, Fe, Mo, Mg, Ca)
- **presenza di metalli pesanti**
- **regime idrico**



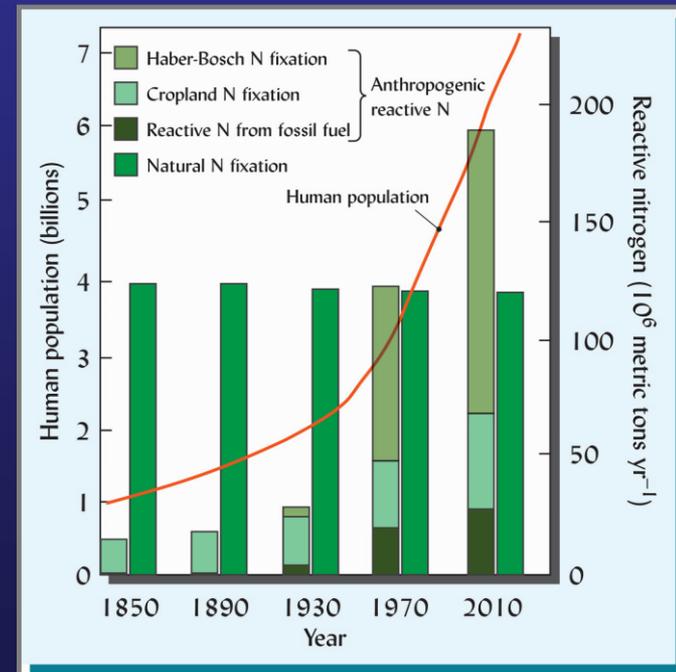
La fissazione biologica dell'azoto

Next to plant photosynthesis, biological nitrogen fixation is probably the most important biochemical reaction for life on Earth.

Apporti di azoto ridotto verso gli ecosistemi terrestri.

Industrial N fixation	$135 \cdot 10^6 \text{ ton N year}^{-1}$
Cropland N fixation	$46 \cdot 10^6 \text{ ton N year}^{-1}$
Reactive N from fossil fuel burning (Atmospheric N)	$25 \cdot 10^6 \text{ ton N year}^{-1}$
Natural N_2 fixation	$139 \cdot 10^6 \text{ ton N year}^{-1}$

Changes in the human population and its contribution to global reactive nitrogen. Note that by the early 1980s human-caused N fixation (industrial fertilizer production, agricultural crop legumes, and combustion of fossil fuels) had surpassed natural N fixation (by legumes, cyanobacteria, and actinomycetes in natural terrestrial ecosystems as well as by lightning).



(da Weil & Brady, 2017)

La fissazione biologica dell'azoto

Sono capaci di fissare l'azoto atmosferico microrganismi liberi e microrganismi che vivono in simbiosi con le piante superiori. La maggior parte dei microrganismi azotofissatori sono tipici di ambienti caratterizzati da condizioni di anaerobiosi.

Anche i batteri dei generi *Azotobacter* e *Beijerinckia*, comunemente aerobi, esplicano con maggiore efficacia attività di azotofissazione a più basse concentrazioni di O₂.

Sono azotofissatori simbiotici i batteri del genere *Rhizobium* ed alcuni *Actinomyces*.

Dal punto di vista agronomico hanno importanza la specie del genere *Rhizobium* che vivono in simbiosi con le leguminose.

La spiccata specificità esistente tra specie azotofissatrici e pianta ospite rende indispensabile che ciascuna specie di venga infettata da appropriata specie di *Rhizobium*.

Apporti di azoto azotofissazione biologica

Specie vegetale	Entità biotica associata	Quantità d'azoto fiss. (kg · ha ⁻¹ · anno)
Non simbiotiche		
	Batteri (<i>Azotobacter</i> , <i>Clostridium</i>)	5-20
	Cianobatteri	10-50
Simbiotiche		
Leguminose (con formazione di noduli)		
Mimosa bianca (<i>Leucaena leucocephala</i> Lam.)	Batteri (<i>Rhizobium</i>)	100-500
Robinia (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)		75-200
Erba medica (<i>Medicago sativa</i> L.)		150-250
Trifoglio (<i>Trifolium pratense</i> L.)		100-150
Melilotto bianco (<i>Melilotus albus</i> L.)		25-180
Lupino (<i>Lupinus</i> spp.)		50-100
Veccia vellutata (<i>Vicia villosa</i> Roth)		50-150
Fagiolo indiano (<i>Phaseolus mungo</i> L.)		90-150
Fagiolo (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)		30-50
Fava (<i>Vicia faba</i> L.)		55-225
Pisello (<i>Pisum sativum</i> Asch. et Gr.)		35-200
Fagiolo dall'occhio (<i>Vigna unguiculata</i> L. Walp.)	Batteri (<i>Bradyrhizobium</i>)	50-100
Arachide (<i>Arachis hypogaea</i> L.)		40-80
Soia (<i>Glycine max</i> L.)		50-150
Kudzu (<i>Pueraria lobata</i> Willd.)		100-140
Non Leguminose (con formazione di noduli)		
Ontano nero (<i>Alnus glutinosa</i> L. Gaertner)	Actinomiceti (<i>Frankia</i>)	50-150
Gunnera (<i>Gunnera</i> spp.)	Cianobatteri (<i>Nostoc</i>)	10-20
Non Leguminose (senza formazione di noduli)		
Erba Pangola (<i>Digitaria decumbens</i> Stent)	Batteri (<i>Azotospirillum</i>)	5-30
Erba Bahia (<i>Paspalum notatum</i> Flügge)	Batteri (<i>Azobacter</i>)	5-30
Azolla	Cianobatteri (<i>Anabena</i>)	150-300

Rappresenta quantitativamente il principale processo di trasferimento dell'azoto dall'atmosfera verso la biosfera.

La fissazione biologica dell'azoto



(da Weil & Brady, 2017)

Transplanting rice seedlings into paddies containing the floating water fern, *Azolla* (see insets), and its nitrogen-fixing cyanobacteria symbiont *Anabaena*.
(Photos courtesy of Ray R. Weil).

I noduli radicali azotofissatori

L'interazione simbiotica si realizza attraverso la formazione di strutture altamente specializzate: i *noduli azotofissatori* che nella maggior parte dei casi si sviluppano nella radice della pianta ospite.



Al loro interno i batteri, diventati *batteroidi* allo stadio di simbionti intracellulari, diventano capaci di fissare l' N_2 atmosferico riducendolo a NH_4^+ che, trasformato e ceduto in gran parte alla pianta ospite in cambio di fonti carboniose utilizzate come fonte energetica, viene da questa assimilato in un processo di *complementazione metabolica*.

L'interazione *Rhizobium*-leguminose è:

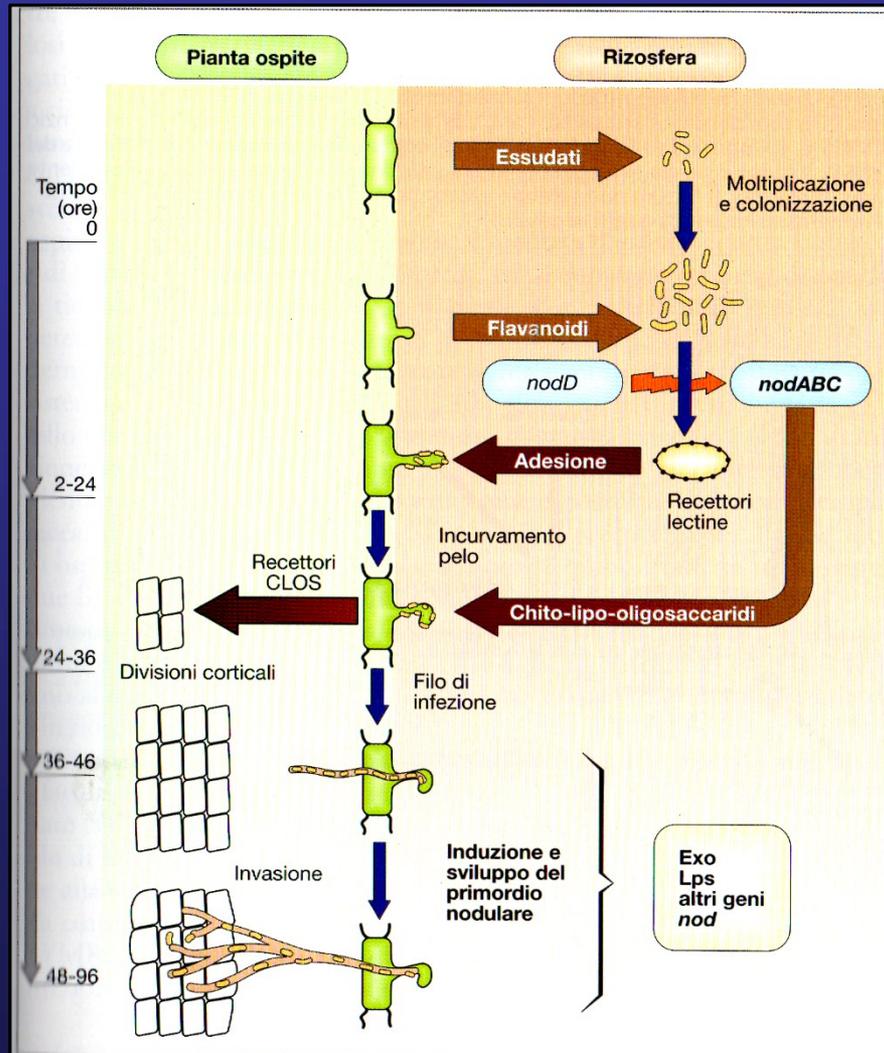
- ✓ altamente specifica
- ✓ un processo morfogenetico
- ✓ inducibile
- ✓ transiente
- ✓ finemente regolato in tutte le sue fasi



Specificità tra *Rhizobium* e pianta ospite

Specie di <i>Rhizobium</i>	Piante ospiti
<i>R. leguminosarum</i>	Pisello, Fava, Lenticchia, Cece
<i>R. trifolii</i>	Trifoglio
<i>R. phaseoli</i>	Fagiolo
<i>R. meliloti</i>	Erba medica, Fieno greco, Meliloto
<i>R. japonicum</i>	Soia
<i>R. lupini</i>	Lupino, Ginestrino

Organogenesi dei noduli radicali azotofissatori

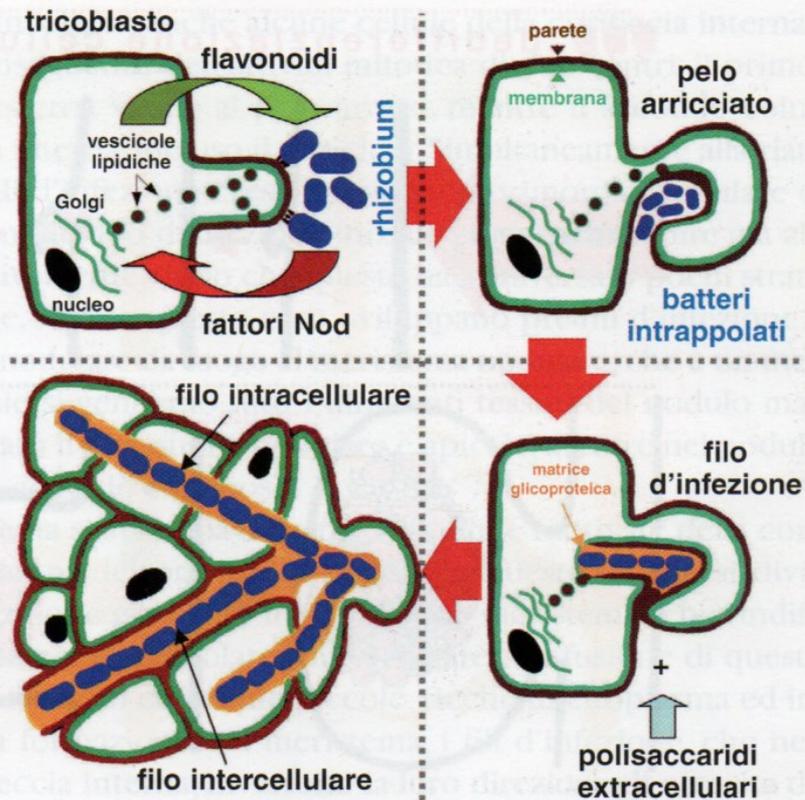


(da Biavati & Sorlini, 2008)

Tappe iniziali del dialogo molecolare tra rizobi e leguminose

Organogenesi dei noduli radicali azotofissatori

Figura 4.3. Sviluppo e crescita dei fili d'infezione. Rappresentazione schematica dei processi d'induzione, sviluppo e crescita dei fili d'infezione. Il processo d'induzione inizia con l'attacco dei batteri alla superficie del pelo, continua con la degradazione della parete vegetale e l'invaginazione della membrana plasmatica della cellula invasa. L'accrescimento dei fili dipende dalla fusione di vescicole derivate dal Golgi. I fili possono attraversare le cellule vegetali (fili intracellulari) o svilupparsi fra le cellule (fili intercellulari).



Fasi iniziali: induzione della nodulazione

Organogenesi dei noduli radicali azotofissatori

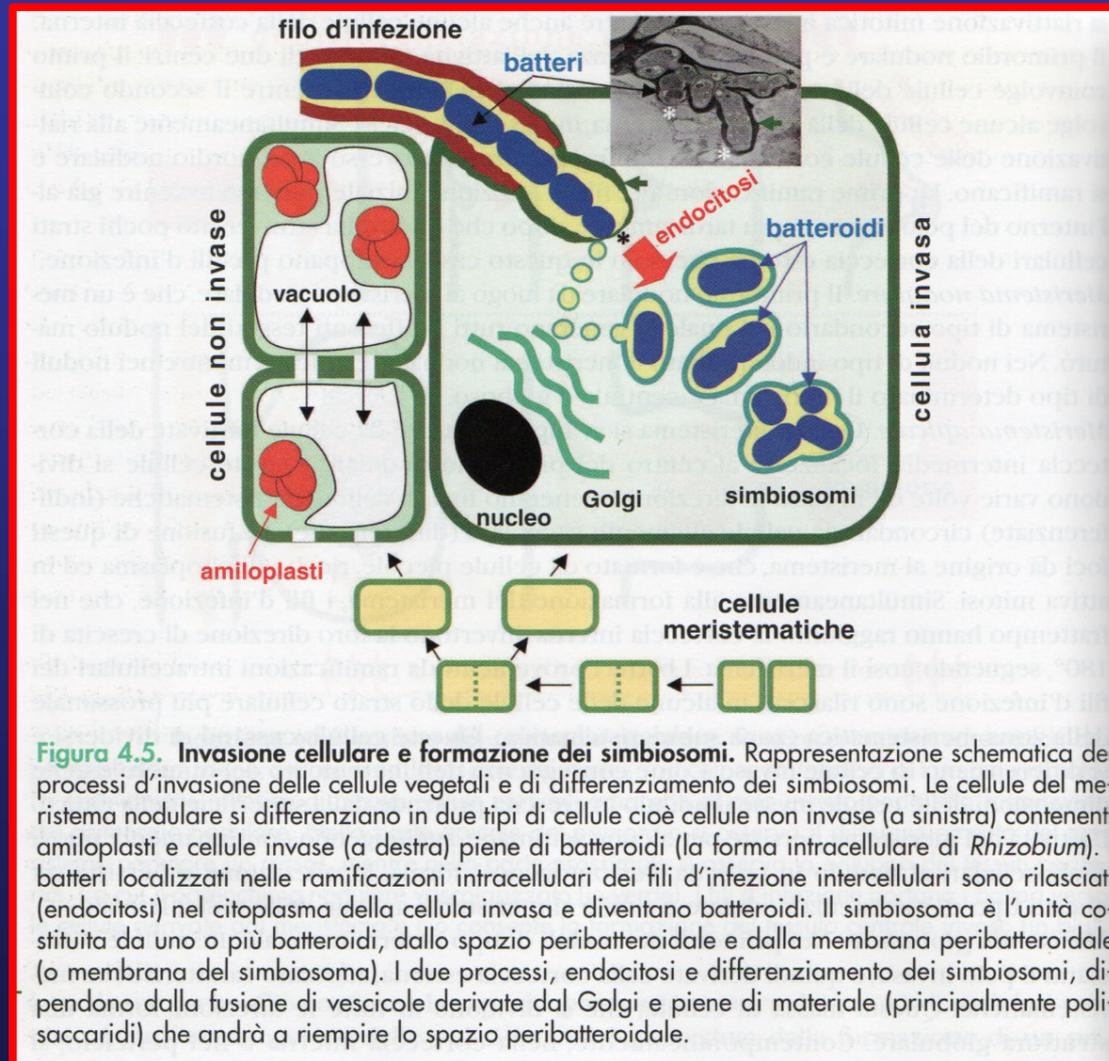
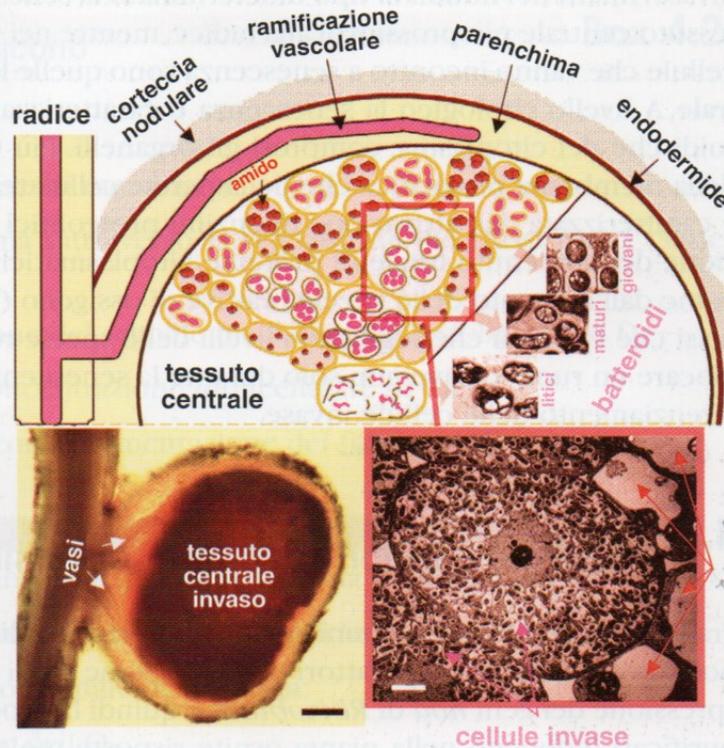


Figura 4.5. Invasione cellulare e formazione dei simbiosomi. Rappresentazione schematica dei processi d'invasione delle cellule vegetali e di differenziamento dei simbiosomi. Le cellule del meristema nodulare si differenziano in due tipi di cellule cioè cellule non invase (a sinistra) contenenti amiloplasti e cellule invase (a destra) piene di batteroidi (la forma intracellulare di *Rhizobium*). I batteri localizzati nelle ramificazioni intracellulari dei fili d'infezione intercellulari sono rilasciati (endocitosi) nel citoplasma della cellula invasa e diventano batteroidi. Il simbiosoma è l'unità costituita da uno o più batteroidi, dallo spazio peribatteroidale e dalla membrana peribatteroidale (o membrana del simbiosoma). I due processi, endocitosi e differenziamento dei simbiosomi, dipendono dalla fusione di vescicole derivate dal Golgi e piene di materiale (principalmente polisaccaridi) che andrà a riempire lo spazio peribatteroidale.

Fasi intermedie: invasione dei primordi nodulari

Organogenesi dei noduli radicali azotofissatori

Figura 4.6. I tessuti del nodulo maturo. Struttura di un nodulo di tipo determinato. In alto è schematizzata una sezione di nodulo globoso maturo. Nei tessuti periferici l'endoderme separa il parenchima vascolarizzato dalla corteccia nodulare. Nel tessuto centrale è mostrato il gradiente di differenziamento dei due tipi cellulari (cellule invase e cellule non invase). Le cellule più periferiche sono più giovani mentre quelle centrali vanno incontro a lisi. In basso a sinistra la fotografia ottenuta al microscopio ottico mostra una sezione di nodulo globoso indotto da *Rhizobium etli* sulle radici di fagiolo (*Phaseolus vulgaris*). A destra la fotografia ottenuta al microscopio elettronico mostra cellule invase (con il nucleo centrale e piene di simbiosomi) e cellule non invase molto vacuolate. Barra bianca: 5 μ m. Barra nera: 1 mm.



Fasi tardive: invasione cellulare e formazione dei noduli

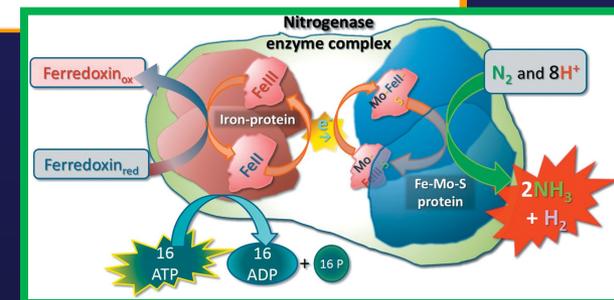
Nei batteroidi dei noduli metabolicamente attivi, il disaccoppiamento tra il processo di fissazione dell'azoto e il processo di assimilazione dell'ammonio è cruciale per l'efficienza dell'interazione simbiotica. In tal modo l'ammonio prodotto dal *Rhizobium* non viene utilizzato e può essere rilasciato alla pianta.

Il sistema enzimatico della nitrogenasi

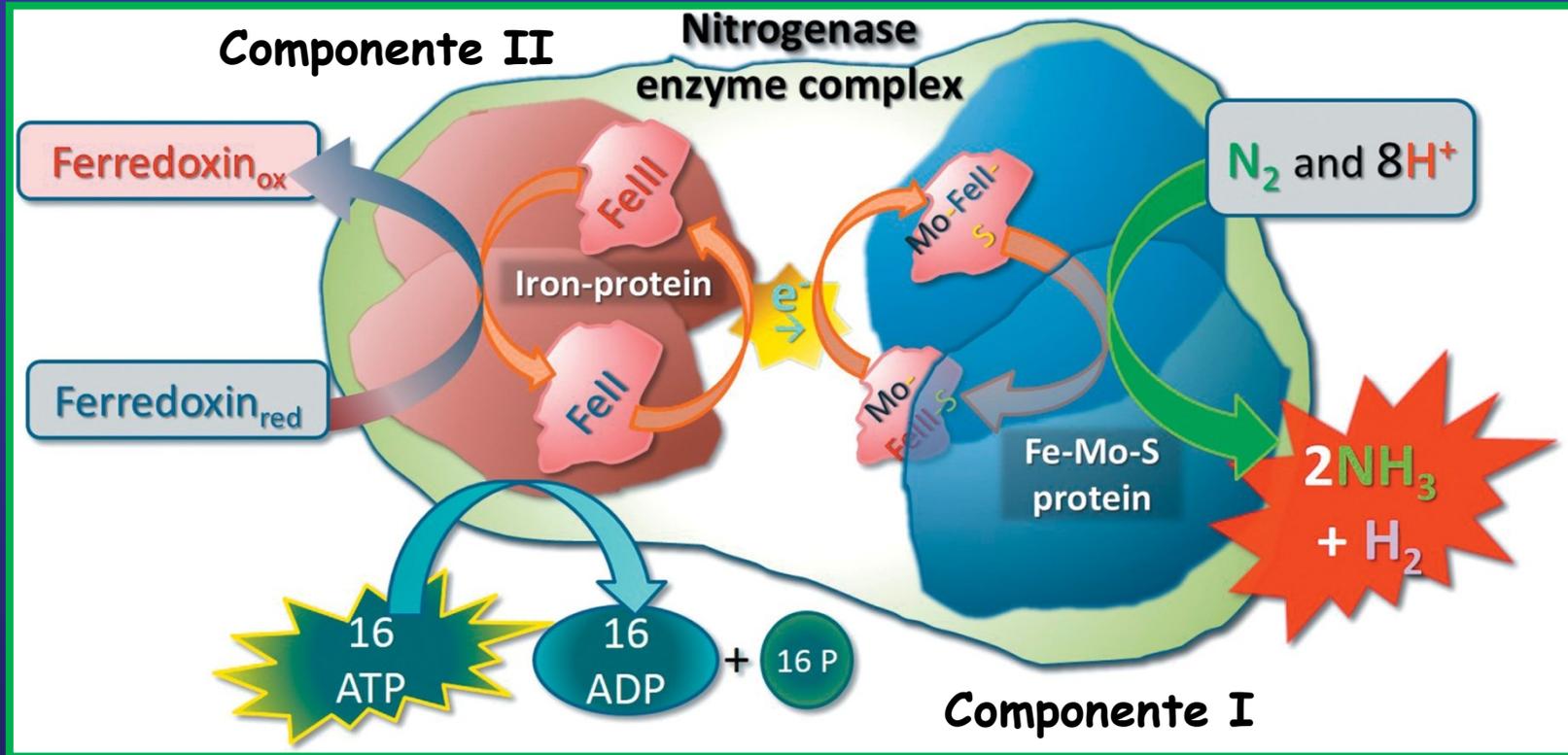
La **nitrogenasi** è l'enzima responsabile della fissazione dell'azoto. Risulta formato da due diverse proteine solubili in acqua che, interagendo reciprocamente, costituiscono il sistema **nitrogenasi attiva**.

Una delle due proteine, di peso molecolare compreso tra 55000 e 65000 Dalton, è caratterizzata dalla presenza di atomi di ferro non emnico e viene detta **ferro-proteina**, l'altra, di peso molecolare di 200000-220000 Dalton, possiede atomi di ferro e molibdeno ed è denominata **ferro molibdo-proteina**. Il meccanismo biochimico della fissazione dell'azoto è definito dal trasferimento di elettroni, provenienti dall'ossidazione di substrati organici, alla ferro-proteina che, conseguentemente, viene ridotta.

Il trasferimento di elettroni è operato dalla **ferridossina**. La ferro-proteina ridotta lega Mg-ATP, abbassa ulteriormente il proprio potenziale redox, e riesce a cedere gli elettroni alla ferro molibdo-proteina che, a sua volta viene ridotta.



Il sistema enzimatico della nitrogenasi



(da Weil & Brady, 2017)

Il sistema enzimatico della nitrogenasi è formato da due complessi proteici: la componente I (dinitrogenasi, o azotoligasi) e la componente II (dinitrogenasi riduttasi, o azotoligasi riduttasi). La componente I è anche definita Fe-Mo-proteina (peso molecolare ~220.000 Da) è un tetramero composto da 4 catene polipeptidiche contenenti ciascuna un gruppo Fe₄S₄, un gruppo FeS e 2 atomi di Mo. La componente II, chiamata Fe-proteina (peso molecolare 55.000 Da) è un dimerico formato da 2 subunità con l'unico gruppo Fe₄S₄, contenente 2 siti di legame per l'ATP che fornisce l'energia necessaria per il processo. Nel corso della reazione si produce anche H₂. Carenze di **S**, **Fe**, **Mo**, **Mg** e **P** inibisce il funzionamento della nitrogenasi.

Il sistema enzimatico della nitrogenasi

L'Mg-ATP viene rilasciato come Mg-ADP e P inorganico.

La ferro molibdo-proteina, che porta il sito al quale si lega l'azoto molecolare (N_2), cede gli elettroni a quest'ultimo che si riduce ad NH_3 .

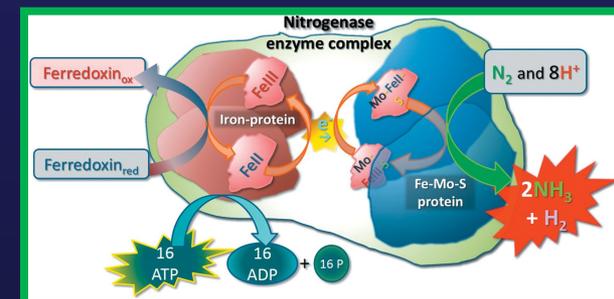
La riduzione dell' N_2 è processo estremamente rapido di cui non sono state ancora definite con certezza le tappe intermedie.

E' stato ritenuto possibile, tuttavia, che la reazione completa avvenga in tre fasi con consumo di due elettroni per fase.

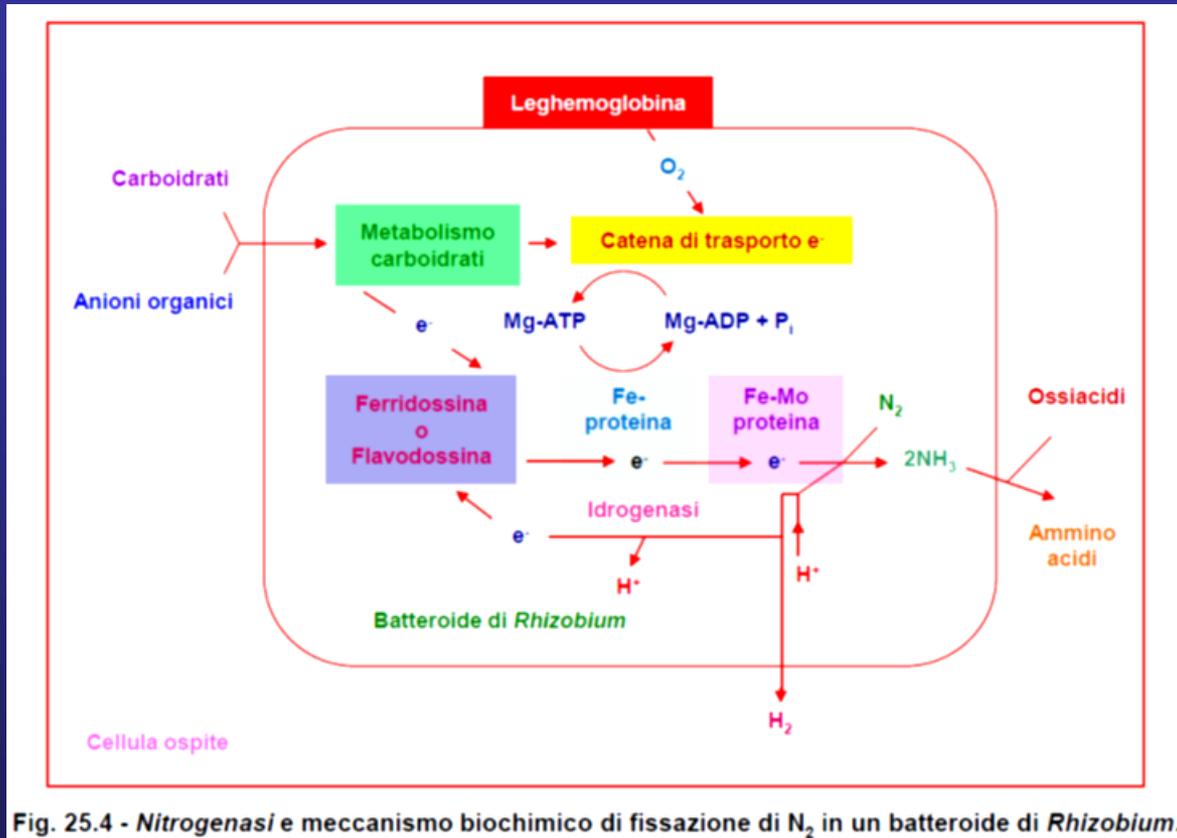
Di recente, è stato ipotizzato che la reazione stechiometrica del processo di fissazione dell' N_2 , quando l'enzima agisce al massimo dell'efficienza, possa essere:



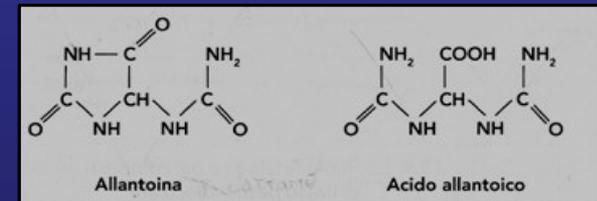
Entro pochi decimi di secondo, il primo prodotto a formarsi è una molecola di idrogeno (H_2), alla quale fanno seguito l'idrazina, come prodotto intermedio e, successivamente, l' NH_3 .



Il sistema enzimatico della nitrogenasi



Nei noduli l' $N-NH_4^+$ viene assimilato come acido glutammico e glutammina e poi trasferito nello xilema come acido allantoico ed allantoina



La legghemoglobina lega l' O_2 mantenendo, nel citoplasma del batteroide, una bassa pressione parziale di O_2 compatibile con l'attività della nitrogenasi.

Elementi essenziali per la sintesi e l'attività della nitrogenasi sono **S, Mo, Fe, Mg e P**. Il **Ca** favorisce l'adesione del *Rhizobium* alla radice, determina numero e dimensione dei noduli. I **metalli pesanti** interferiscono negativamente con il trasporto degli elettroni.

La fissazione biologica dell'azoto

La maggior parte delle specie di *Rhizobium* sono sensibili a bassi valori di pH.

La presenza degli ioni Ca^{2+} favorisce la nodulazione e agisce positivamente aumentando la dimensione e il numero dei noduli.

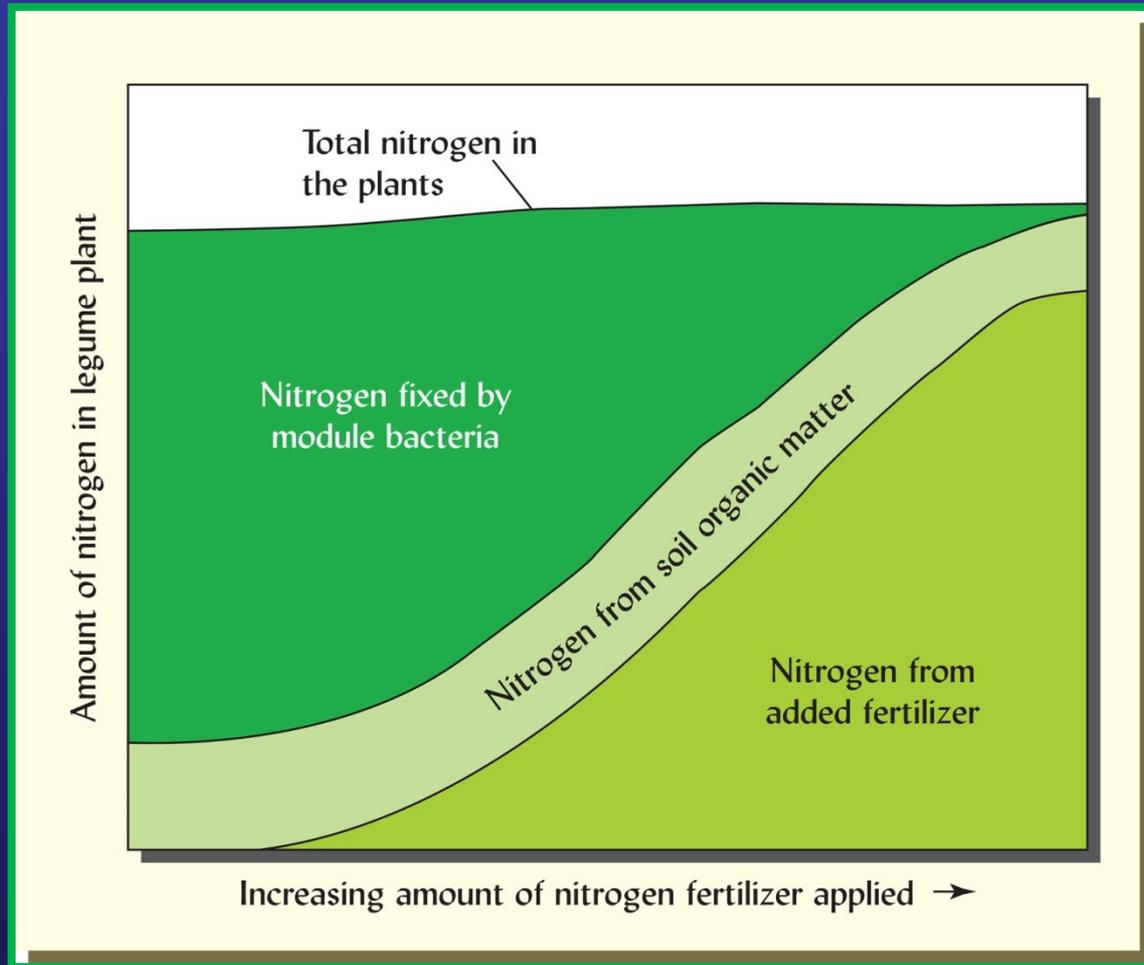
Elevate concentrazioni ($>1\text{mM}$) di nitrati, nitriti e urea hanno effetto negativo, molto probabilmente perché inducono nelle radici aumento degli ioni NH_4^+ , capaci di bloccare il gene responsabile della sintesi della nitrogenasi.

Il processo di nodulazione e l'azotofissazione sono generalmente stimolati da contemporanea infezione delle radici da parte di funghi micorrizici arbuscolari che incrementano la disponibilità di fosforo per le piante.

Perturbazioni ambientali come siccità, buio, defoliazione ed aggiunta di fonti esterne di azoto inducono una senescenza precoce del nodulo.

L' NH_4^+ è allo stesso tempo sia il prodotto primario che il principale regolatore della simbiosi.

La fissazione biologica dell'azoto



(da Weil & Brady, 2017)

La disponibilità di N da concime minerale di sintesi industriale diminuisce nella leguminosa il ricorso alla fissazione biologica di N_2 .

N₂ biologicamente fissato da leguminose

Specie di leguminosa	Azoto fissato (kg · ha ⁻¹ · stagione ⁻¹)
Erba medica (<i>Medicago sativa</i>)	78-222
Arachide (<i>Arachis hypogea</i>)	87-222
Fagiolo dall'occhio (<i>Vigna sinensis</i>)	65-130
Cece (<i>Cicer arietinum</i>)	24-84
Pisello (<i>Pisum sativum</i>)	174-195
Soia (<i>Glycine max.</i>)	170-217
Fagiolo (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	70-124
Fava (<i>Vicia faba</i>)	177-250
Veccia vellutata (<i>Vicia villosa</i>)	111-153
Trifoglio ladino (<i>Trifolium repens</i>)	164-187
Lenticchia (<i>Lens culinaris</i>)	167-188
Trifoglio pratense (<i>Trifolium pratense</i>)	68-113
Lupino bianco (<i>Lupinus albus</i>)	193-247
Sesbania (<i>Sesbania macrocarpa</i>)	267-275

Valori elevati ma variabili con le caratteristiche del suolo, del clima e della pianta

Amminizzazione e ammonificazione

L'azoto fissazione non è il solo processo biologico ad esercitare influenza sul ciclo dell'azoto e sulla disponibilità di questo nutriente nel suolo.

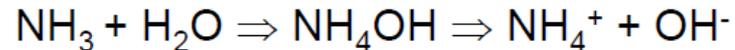
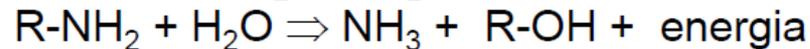
La **proteolisi** e l'**ammonificazione**, la **nitrificazione** e la **denitrificazione** sono altri processi controllati dall'attività microbica.

Nella sostanza organica del suolo l'azoto è presente soprattutto sotto forma amminica (proteine) e, in quantità minore, sotto forma eterociclica (basi azotate degli acidi nucleici).

La proteolisi induce il rilascio dell'azoto amminico della sostanza organica, mentre l'**ammonificazione** porta alla riduzione dei gruppi $-NH_2$ a NH_3 (Figura 25.6).

I due processi possono essere rappresentati in modo schematico dalle reazioni:

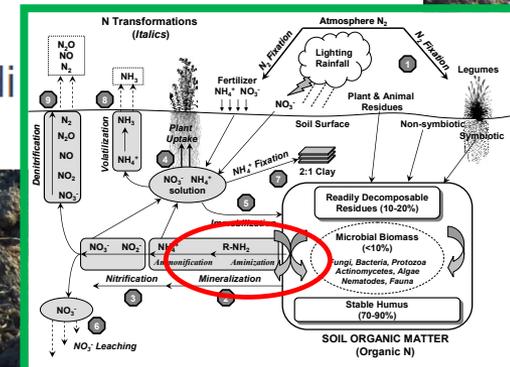
Sostanze organiche azotate $\Rightarrow R-NH_2 + CO_2 +$ componenti accessori + energia



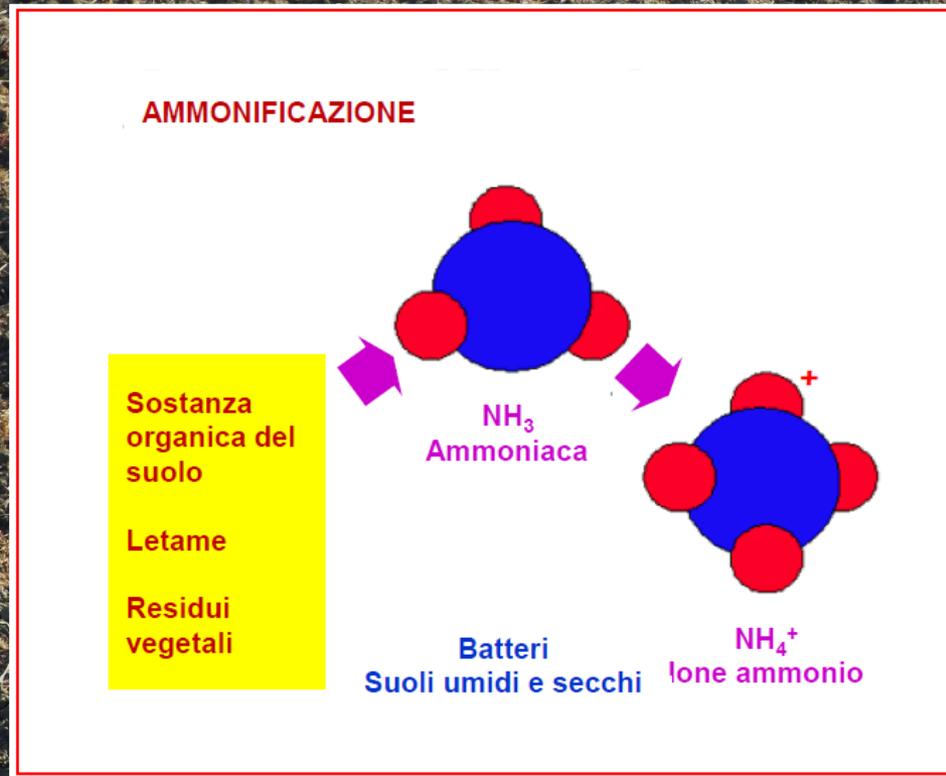
Quasi tutti i microrganismi del suolo sono in grado di svolgere questi processi.

La mineralizzazione dell'azoto organico può essere limitata nella pedosfera non tanto dall'assenza di microrganismi specifici quanto dai fattori che, in genere, influenzano l'attività delle entità biotiche quali basse temperature e/o carenza di acqua.

Con la presenza dello ione ammonio inizia nel suolo una serie di peculiari reazioni.



Amminizzazione e ammonificazione

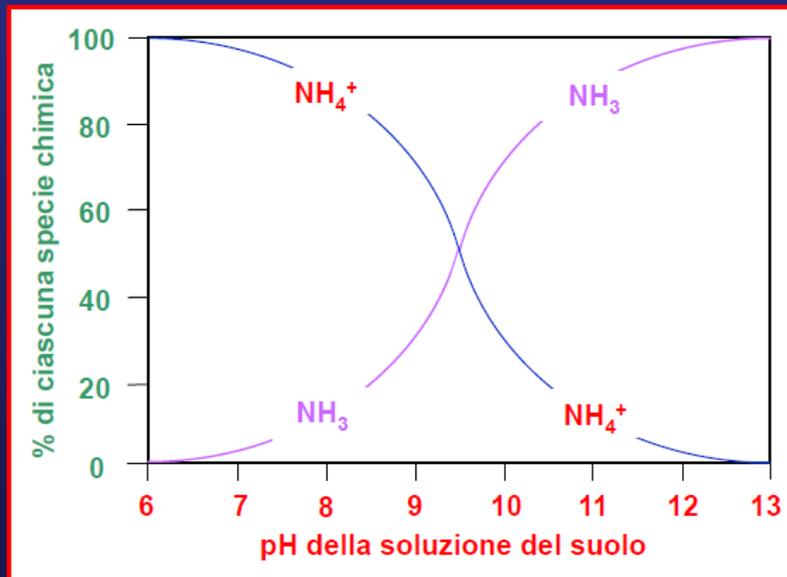


L'azoto ammoniacale prodotto può successivamente essere:

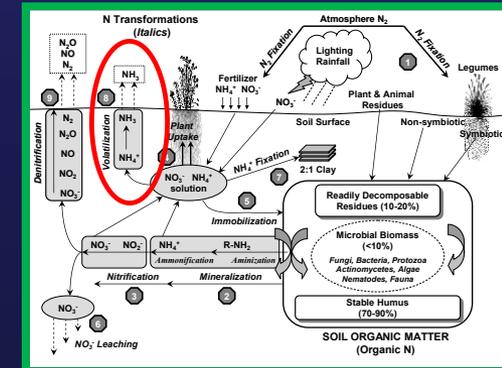
- volatilizzato come NH_3 (volatilizzazione)
- fissato nello spazio interstrato dei minerali argillosi espandibili (fissazione)
- ossidato biologicamente a NO_2^- e poi a NO_3^- (nitrificazione)
- assorbito dalle piante (assorbimento nutrizionale)
- utilizzato dai batteri autotrofi (immobilizzazione microbica)

Volatilizzazione dell'ammoniaca

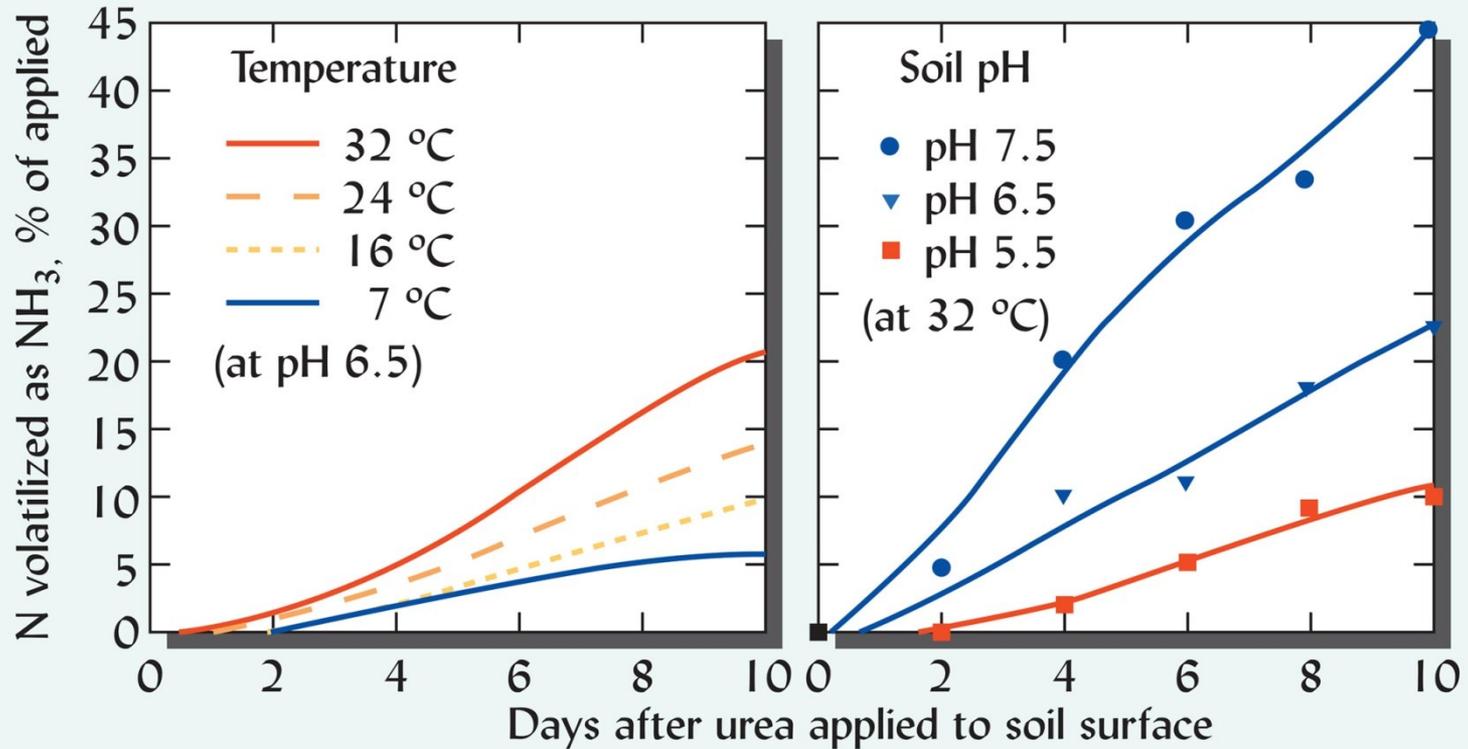
L' NH_3 generata dalla mineralizzazione dell'N organico, o per incorporazione nel suolo di concimi ammoniacali o ammendanti, può disperdersi nell'atmosfera per volatilizzazione. Il processo è controllato dal chimismo della specie azotata in relazione al pH della fase liquida del suolo.



Le perdite di N- NH_3 diventano apprezzabili quando il pH della fase liquida è > 7.5 , in suoli caldi, in condizioni di aridità, dopo applicazioni superficiali e in relazione al tipo di concime usato.

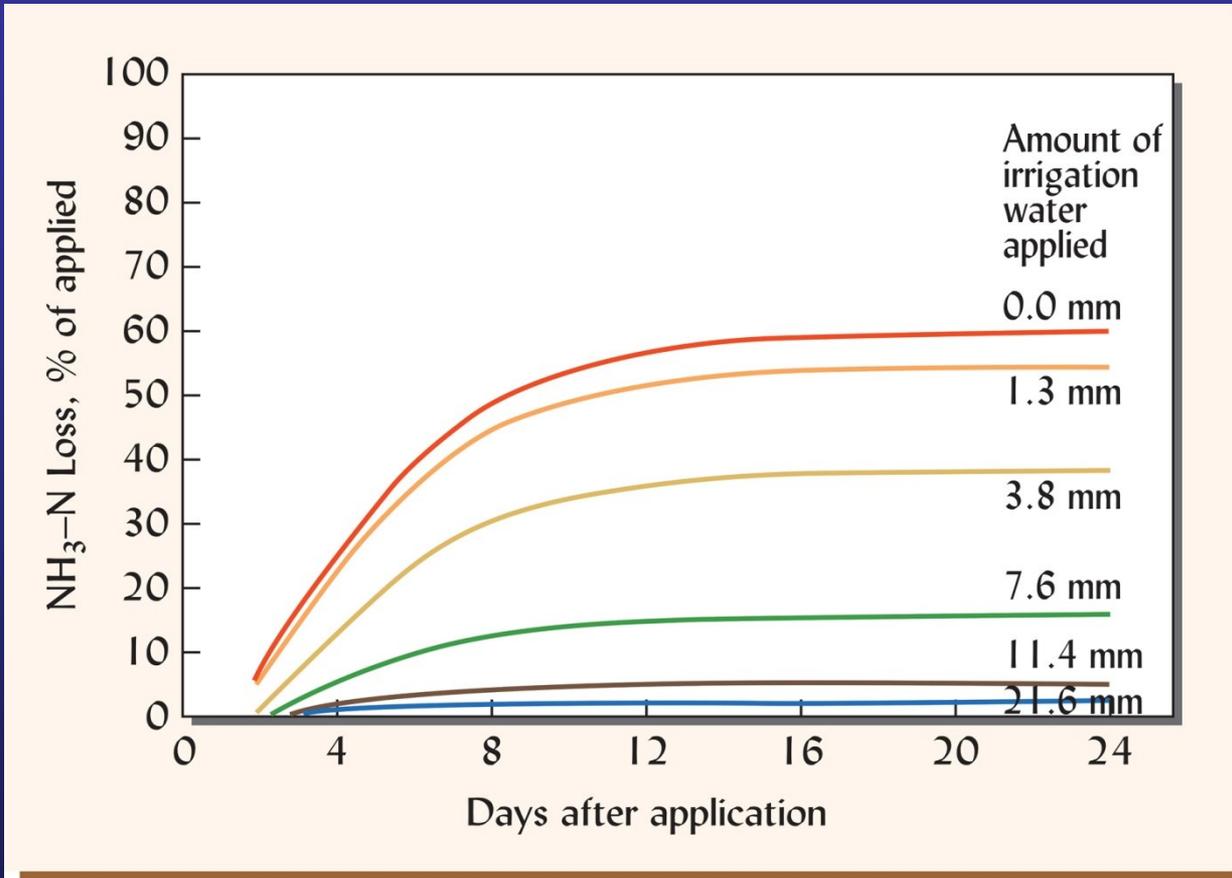


Volatilizzazione dell'ammoniaca



Le perdite di N-NH₃ sono influenzate dalla temperatura e dal pH del suolo. Esempio di un suolo franco limoso concimato in superficie con urea. Perdite significative per T >16°C e pH >7.

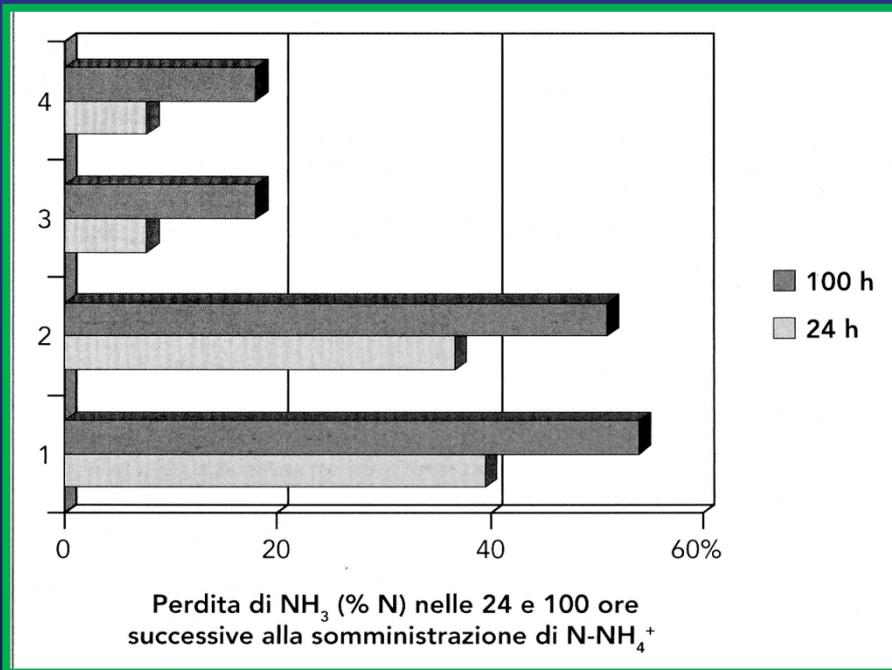
Volatilizzazione dell'ammoniaca



La distribuzione di acqua in un suolo franco sabbioso (pH 6.5) diminuisce le perdite di N-NH_3 per volatilizzazione.

Volatilizzazione dell'ammoniaca

L'impiego di concimi azotati ammoniacali nei suoli calcarei genera perdite di $N-NH_3$, variabili con il pH del suolo ed il tipo del concime ammoniacale distribuito.



Il chimismo nel suolo della componente anionica influenza la perdita di $N-NH_3$.

E' anche importante la modalità di distribuzione sia per i concimi minerali (azotati ammoniacali) sia per gli effluenti zootecnici (inclusi i digestati) ricchi in azoto ammoniacale.

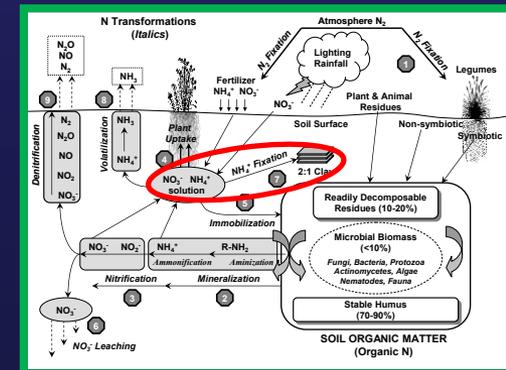
Fissazione degli ioni ammonio

Nei suoli coltivati, dal 5 al 10% dell'azoto totale si accerta come ammonio fissato. Lo ione NH_4^+ , in analogia e in competizione con lo ione K^+ , d'analogia dimensione ionica (raggio ionico di $\text{K}^+ = 0.133 \text{ nm}$) può essere fortemente adsorbito dai minerali argillosi trimorfici (di tipo 2:1) e ceduto solo lentamente a piante e microrganismi. A questo processo, denominato **fissazione dell'ammonio**, sono anche riconducibili le minori quantità di ioni NH_4^+ presenti nelle acque di drenaggio rispetto al contenuto di nitrati.

La natura della matrice litologica, la tessitura, il contenuto d'argilla, il tipo di minerali argillosi, la saturazione in potassio dell'interstrato di illiti e vermiculiti definiscono la capacità di suoli diversi di fissare ioni ammonio (Tabella 25.9).

Tab. 25.9 - Contenuto di NH_4^+ fissato in suoli di diversa tessitura e originatisi da differente matrice litologica (modificata da Benbi e Richter, 2003)

Tessitura Matrice litologica	Contenuto d'argilla (%)	NH_4^+ fissato ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Suoli di tessitura grossolana Sabbie, Arenarie, Granito	<5-19	10-80
Suoli di tessitura media Loess, Alluvioni, Basalto	10-40	60-270
Suoli di tessitura fine Calcere, Rocce argillose	30-46	90-460



Fissazione degli ioni ammonio

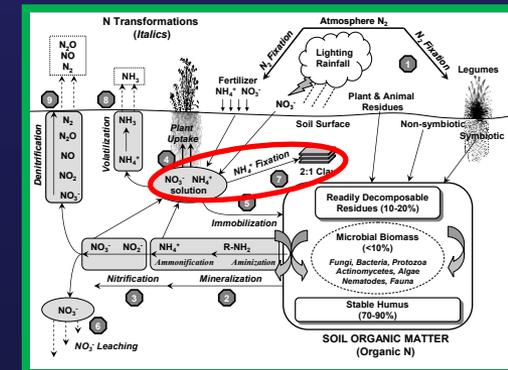
Altri fattori possono definire la capacità di suoli diversi di fissare ioni ammonio. Fra questi:

- il **tempo di contatto fra N-NH_4^+ e suolo** (il risultato d'indagini di laboratorio condotte con ammonio solfato [$^{15}\text{NH}_4\text{SO}_4$]), ha consentito di affermare che **in poche ore si raggiunge il 60-90% della quantità totale dell'ammonio bloccato, in 48 ore circa il 100%**
- la **quantità di ioni ammonio apportata al suolo** (Tabella 25.10)
- i **cicli alternati di inumidimento ed essiccamento del suolo, che possono influenzare l'espansione e la contrazione dei minerali argillosi**
- i **cicli di condizioni di gelo e disgelo**
- la **presenza nelle spaziature basali di cationi diversi caratterizzati da bassa energia d'idratazione** (Tabella 25.11)
- il **pH e il grado di saturazione in "basi"**
- gli **anioni associati**
- la **presenza di sostanza organica, che, favorendo l'attività microbica, può sia incrementare il rilascio dell'ammonio fissato sia, disponendosi sulle superfici degli scambiatori inorganici, limitare l'accesso degli ioni agli spazi interstrato o impedire la contrazione di questi.**

Tab. 25.10 - Relazione tra quantità di NH_4^+ aggiunta e quantità di NH_4^+ fissata negli strati superficiali di un suolo della Svezia centrale caratterizzato dalla presenza di vermiculite (modificata da Nommik, 1957).

Quantità di ioni NH_4^+ aggiunta (cmol · kg ⁻¹ di suolo) (*)	Quantità di ioni NH_4^+ fissata (cmol · kg ⁻¹ di suolo)	Quantità di ioni NH_4^+ fissata % della quantità di ioni NH_4^+ aggiunta
1	0,83	83
2	1,39	70
5	2,17	43
10	3,18	32
20	3,85	19
40	4,48	11

(*) Rapporto suolo:soluzione ammoniacale 1:1



Nitrificazione

L'ossidazione biologica degli ioni ammonio ad ioni nitrato viene definita **nitrificazione**. Lo ione ammonio è ossidato prima a NO_2^- e successivamente a NO_3^- .

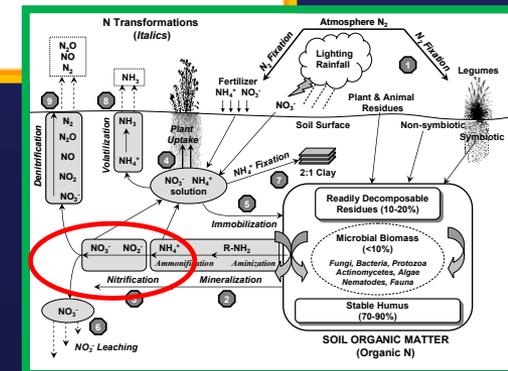
La conversione di NH_4^+ a NO_2^- è svolta da batteri del genere *Nitrosomonas*, mentre l'ossidazione di NO_2^- a NO_3^- è operata da batteri del genere *Nitrobacter*.

L'ossidazione di NH_4^+ a NO_3^- è definita dalle reazioni:

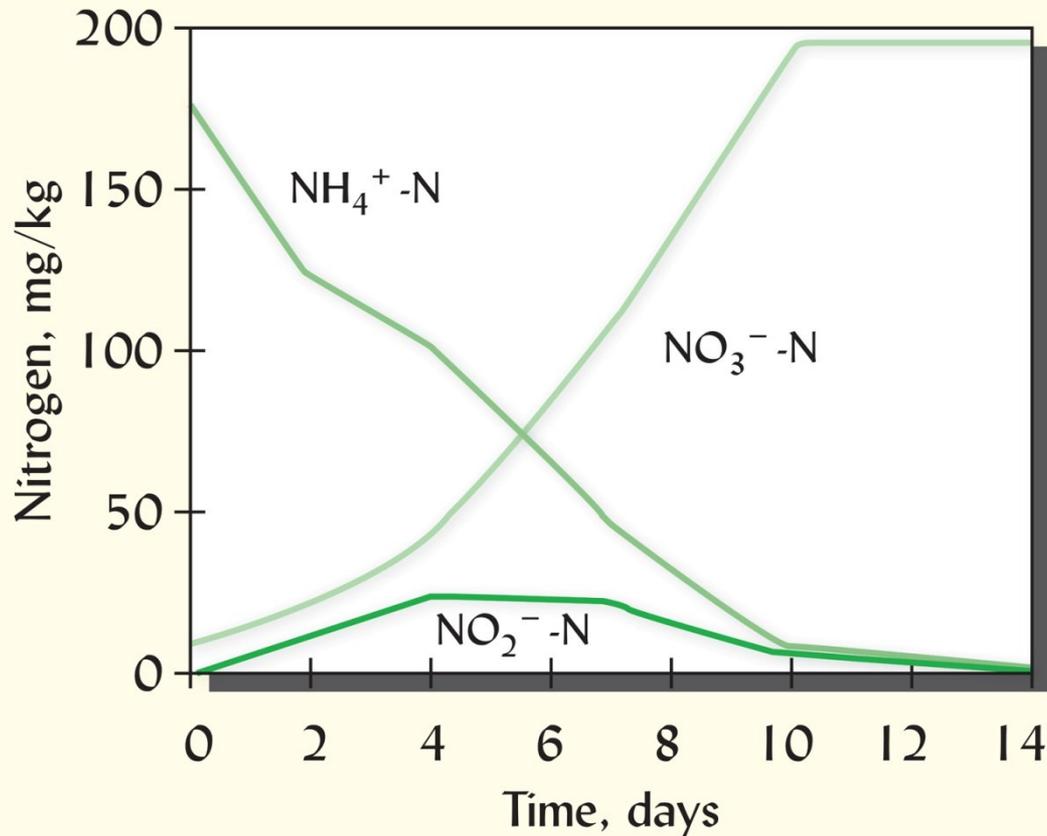


L'equazione finale mostra che alla nitrificazione si accompagna rilascio di H^+ e quindi acidificazione del suolo.

La nitrificazione coinvolge sia gli ioni NH_4^+ derivati dal processo di ammonificazione che quelli somministrati con i concimi.



Nitrificazione



(da Weil & Brady, 2017)

Dinamica del processo di nitrificazione osservato in un sistema microcosmo in assenza di pianta, in un suolo ben aerato e in condizioni termiche di mesofilia.

Nitrificazione

I batteri nitrificanti utilizzano la CO_2 e gli ioni bicarbonato [HCO_3^-] come fonte di carbonio.

L'elevato valore del rapporto C/N dei residui vegetali, che limita la formazione di ioni ammonio, o la presenza nel suolo di notevoli quantità di composti ammoniacali possono inibire il processo di nitrificazione.

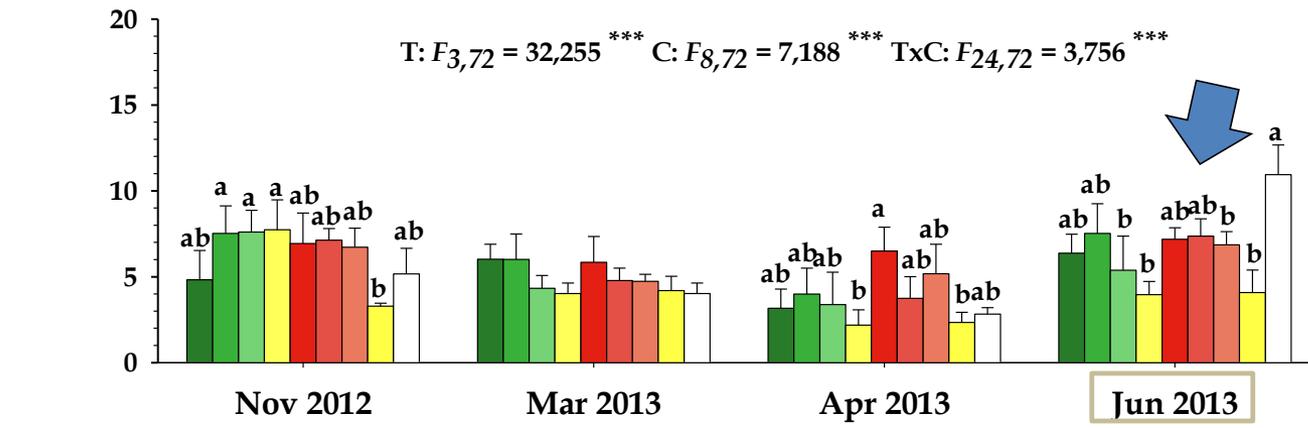
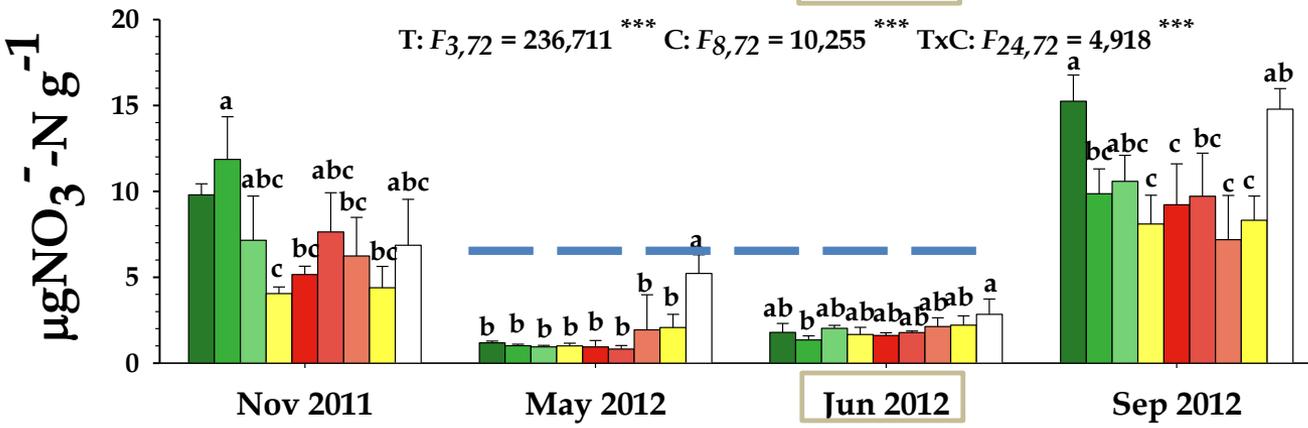
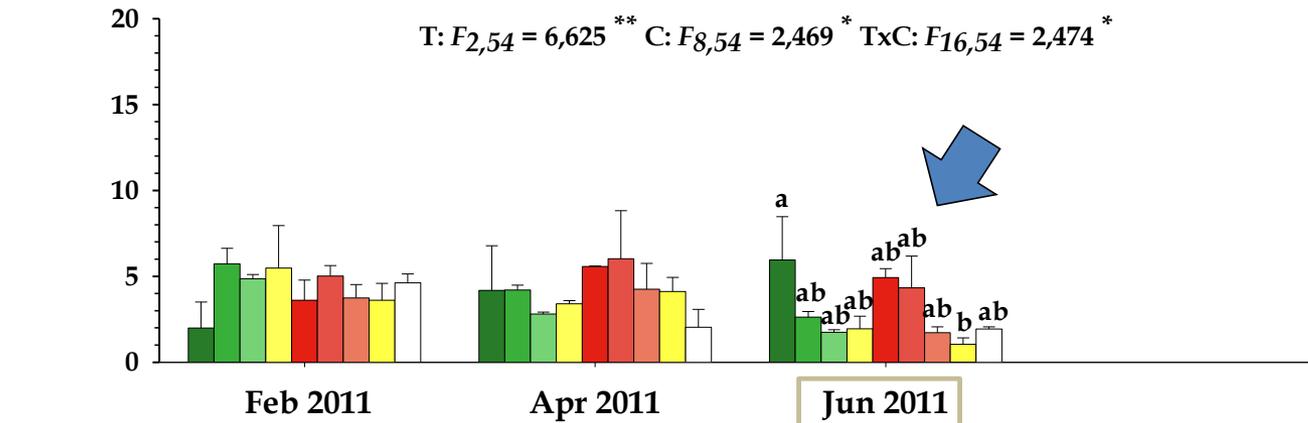
Nei suoli caratterizzati da pH alcalino, somministrazione localizzata di ammoniaca anidra o di urea, che danno origine per idrolisi a ioni NH_4^+ , risulta tossica per i *Nitrobacter* con conseguente accumulo di pericolosa concentrazione di ioni NO_2^- .

I microrganismi nitrificanti sono sensibili a dosi di pesticidi superiori a quelli generalmente consigliate.

Nel caso di colture che assorbono azoto sotto forma di ioni ammonio e per contenere le perdite di NO_3^- per lisciviazione, è possibile utilizzare prodotti chimici capaci di inibire o di ritardare la nitrificazione.

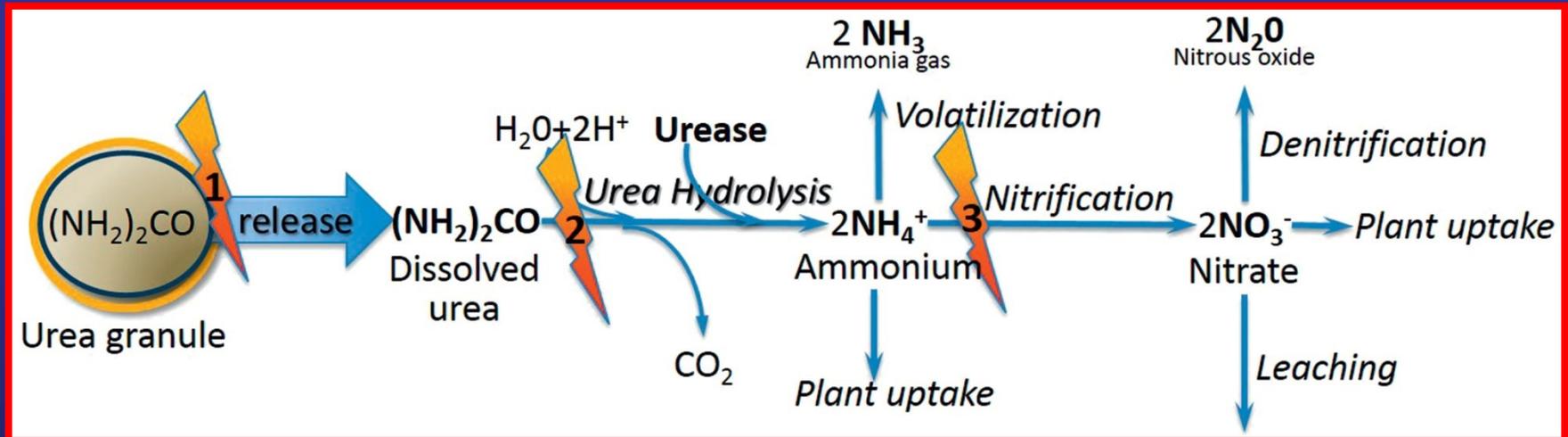
Il processo è specifico. I batteri nitrificanti sono sensibili alle condizioni ambientali; in particolare a temperatura, umidità, aerazione e pH. Condizioni ottimali sono:

- temperatura compresa tra 25 e 35°C
- umidità compresa tra 50 e 67% della capacità di campo
- pH compreso tra 6.6 e 7.6



Il nitrato è una specie chimica estremamente dinamica nel suolo, le cui variazioni sono controllate da fattori biotici ed abiotici

Concimi minerali azotati a rilascio differito, con controllo dei processi biotici di idrolisi dell'urea e di nitrificazione nel suolo



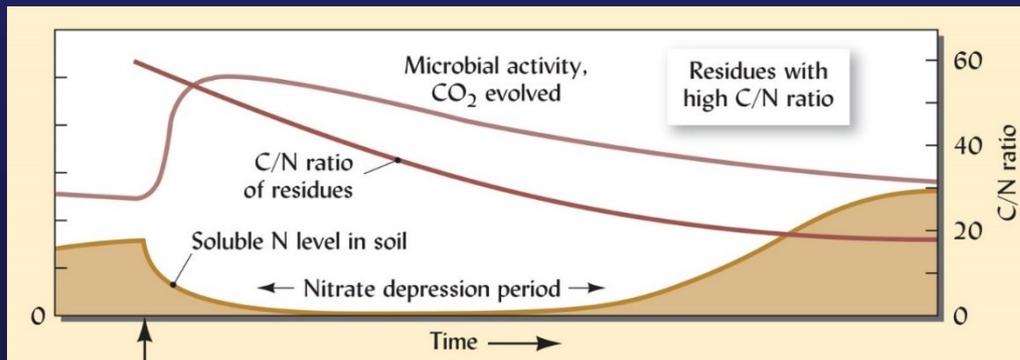
1: Rivestimento del granulo; 2: Idrochinone, NBPT+NPPT; 3: 3,4-DMPP, DCD, nitrapirina

Gli eventi biologici di rilascio di azoto ammoniacale e nitrico per la nutrizione minerale della pianta suggeriscono molteplici applicazioni industriali per controllare il processo di idrolisi dell'urea e di nitrificazione nel suolo, aumentare l'efficienza d'uso del concime e diminuire le perdite di N per volatilizzazione e lisciviazione.

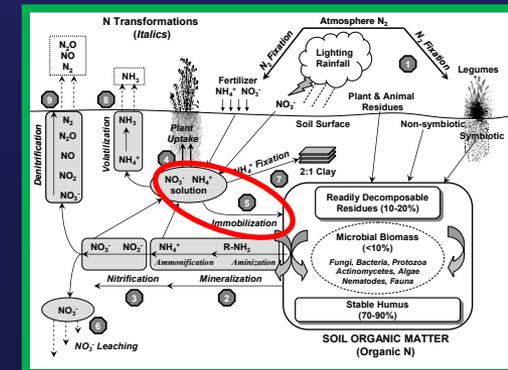
Immobilizzazione microbica

Il processo di immobilizzazione definisce la conversione dell'azoto dalla forma inorganica (NO_3^- ; NH_4^+) a quella organica. Si verifica quando residui vegetali e animali, in particolare quelli caratterizzati da elevato valore del rapporto C/N, arrivano al suolo. In carenza di azoto, per soddisfare le proprie necessità metaboliche, i microrganismi utilizzano le specie azotate inorganiche disponibili nel sistema immobilizzandole in composti azotati organici.

A conclusione del ciclo vitale delle entità biotiche, i composti azotati presenti nei tessuti cellulari vengono trasformati in materiali umificati e rilasciati come ioni NO_3^- e NH_4^+ (mineralizzazione).



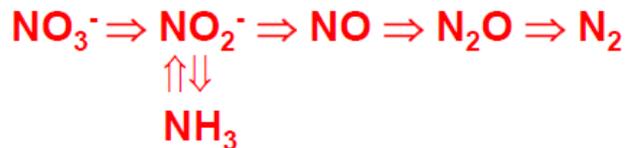
(da Weil & Brady, 2017)



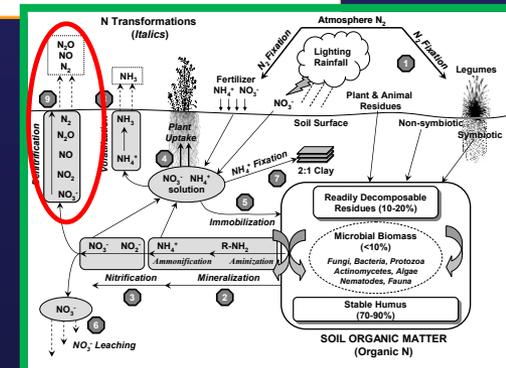
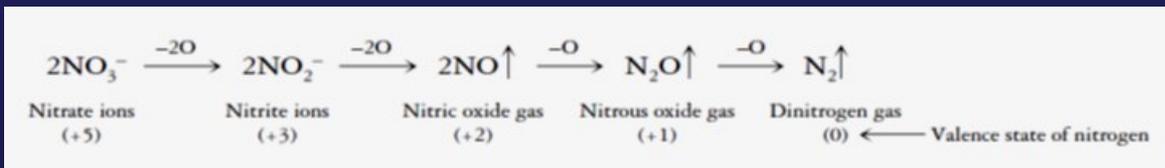
Denitrificazione

Numerosi organismi anaerobi (*Bacillus denitrificans*, *Vibrio denitrificans*, *Micrococcus denitrificans*) e chemio-autotrofi (*Thiobacillus denitrificans*, *Sporovibrio denitrificans*) sono capaci di utilizzare gli ioni NO_3^- e NO_2^- come fonte di ossigeno, in particolare nei suoli saturi d'acqua e in quelli in cui si instaurano processi di decomposizione anaerobica della sostanza organica.

Reazioni successive riducono gli ioni nitrato a protossido d'azoto (N_2O) o ad azoto molecolare (N_2):



Non tutti i microrganismi sono capaci di consentire il completamento dell'intero processo. Alcuni arrestano la propria attività alla formazione dei nitriti, altri dell'ammoniaca.



Denitrificazione

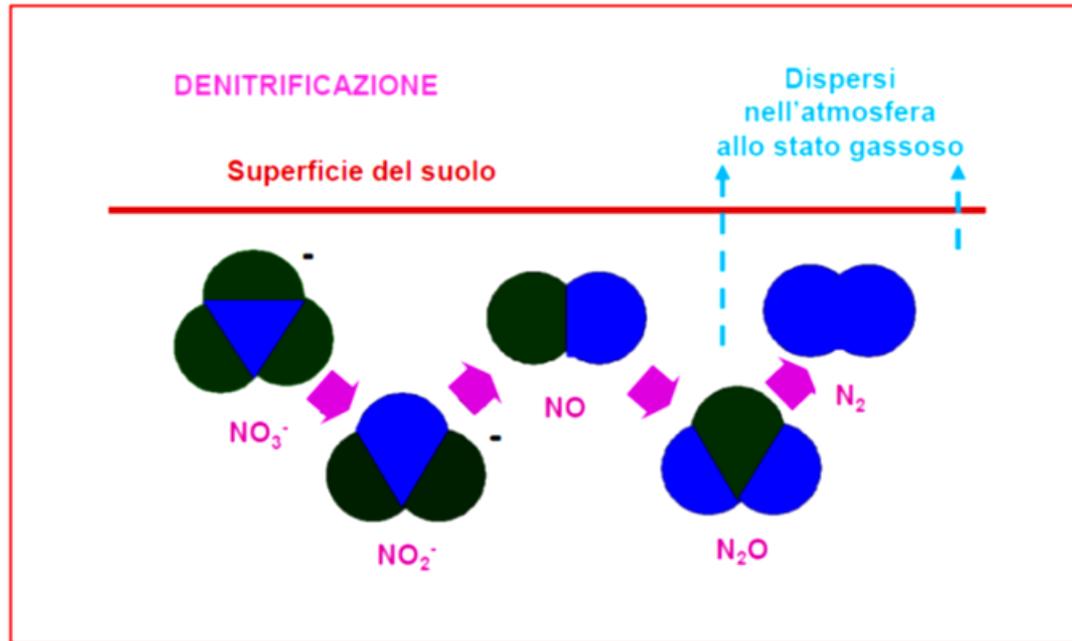


Fig. 25.11 - La denitrificazione è il processo, mediato da numerosi microrganismi, di riduzione di ioni NO_3^- . In assenza di ossigeno, questi ioni agiscono da accettori terminali di elettroni operando la formazione di azoto molecolare [N_2] attraverso una serie di ossidi azotati gassosi intermedi che sono rilasciati nell'atmosfera causando perdita di azoto dal suolo (modificata da J. Strock - Università del Minnesota).

Il processo di denitrificazione causa una perdita netta di N dal suolo

Denitrificazione

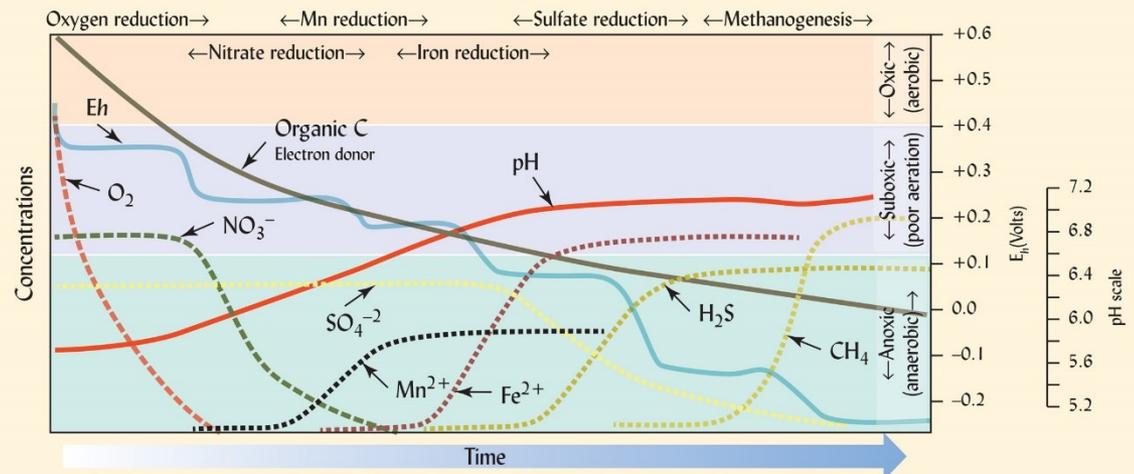
Table 7.1
OXIDIZED TO REDUCED FORMS AND CHARGE FOR SEVERAL ELEMENTS AND REDOX POTENTIALS E_h AT WHICH THE REDOX REACTIONS OCCUR IN A SOIL AT PH 6.5

The relative order of elements reduced is the same as in Figure 7.6, but E_h values measured were generally lower than the theoretical values indicated in the figure. At E_h levels lower than about 0.38–0.32 V, microorganisms utilize elements other than oxygen as their electron acceptor.

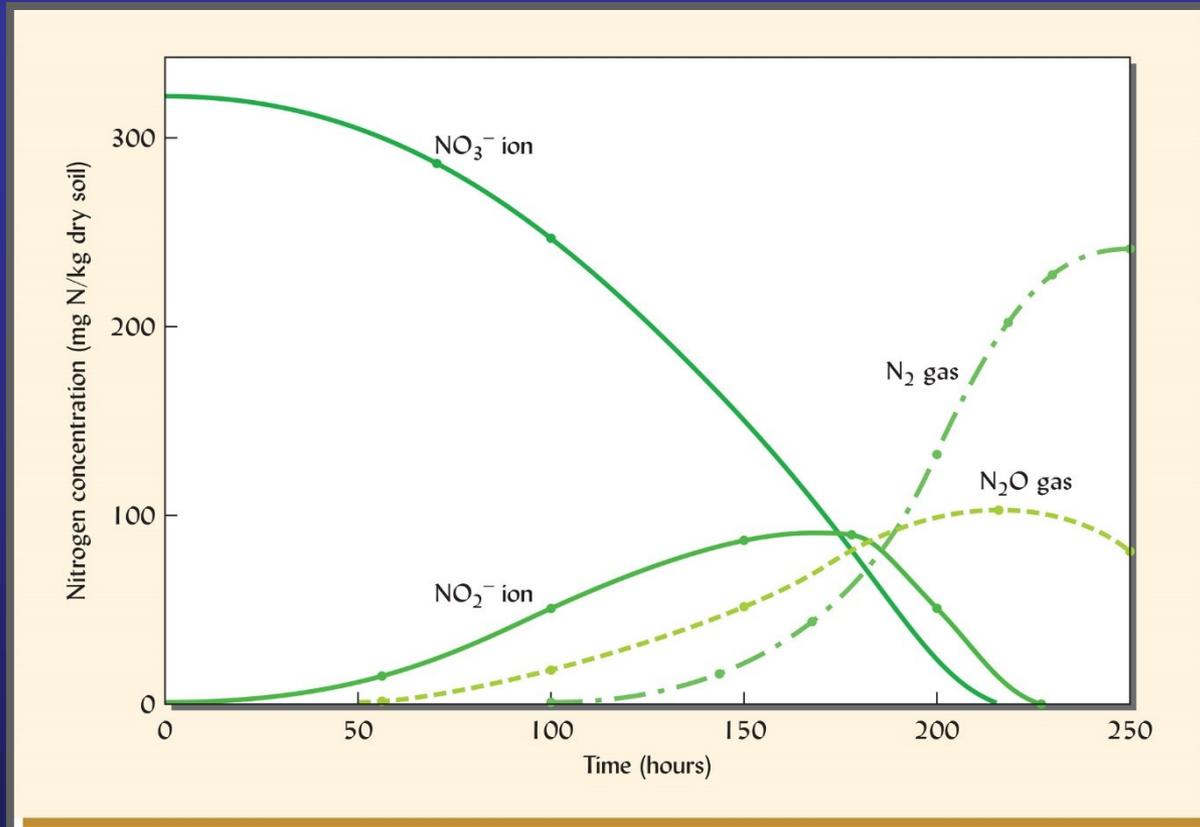
Element	Oxidized form	Charge on oxidized element	Reduced form	Charge on reduced element	E_h at which change of form occurs, V
Oxygen	O ₂	0	H ₂ O	-2	0.38 to 0.32
Nitrogen	NO ₃ ⁻	+5	N ₂	0	0.28 to 0.22
Manganese	Mn ⁴⁺	+4	Mn ²⁺	+2	0.22 to 0.18
Iron	Fe ³⁺	+3	Fe ²⁺	+2	0.11 to 0.08
Sulfur	SO ₄ ²⁻	+6	H ₂ S	-2	-0.14 to -0.17
Carbon	CO ₂	+4	CH ₄	-4	-0.20 to -0.28

E_h values from Patrick and Jugsujinda (1992).

In condizioni di scarsa disponibilità di O₂ si cominciano ad accumulare specie chimiche ridotte dovute a reazioni redox a carico di componenti sia organiche sia inorganiche della fase solida del suolo.



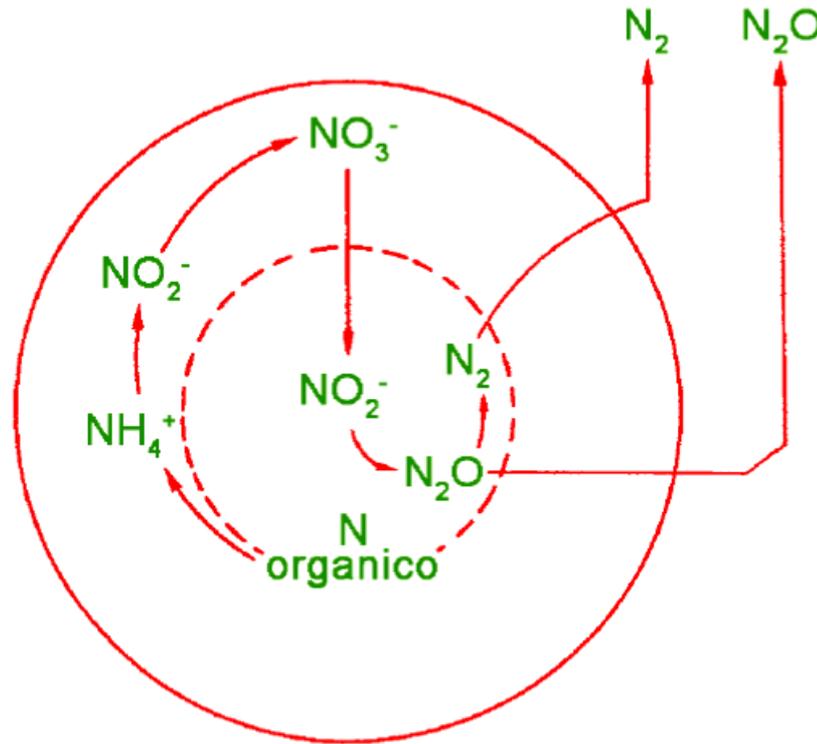
Denitrificazione



Dinamica del processo di denitrificazione osservato in un suolo umido incubato in assenza di ossigeno molecolare.

Denitrificazione

I prodotti finali
nell'atmosfera.
Deve essere
denitrificazione
effetti positivi.
Tuttavia, val
organica ins
microbico im
la riduzione d
del suolo.
I processi di
strettamente



o rilasciati
sso di
lo può avere
o di nitrati.
di sostanza
cimento
invernale,
meno aerati
collegati
dalla

concentrazione dell'ossigeno. Così, nella parte più esterna di un microaggregato, il prevalere di condizioni aerobiche porta alla formazione di nitrato che, nella parte più interna, in condizioni di anaerobiosi, viene ridotto a N_2O e N_2 .

Denitrificazione



Foliar symptoms indicate severe N deficiency in the corn growing on these well-fertilized, high organic matter Udolls in central Illinois. Heavy rains during warm weather ponded water on the low-lying parts of the field resulting in perfect conditions for denitrification to cause large losses of nitrogen. Some leaching of nitrate and dissolved organic N undoubtedly also occurred (*Photo courtesy of Ray R. Weil*).

Denitrificazione

Fonti di N ₂ O	Valori medi (Tg N · anno ⁻¹)	Valori percentuali
Emissione diretta dal suolo		
Fertilizzanti di sintesi	0,87	14,15
Rifiuti animali	0,65	10,60
Fissazione biologica di N ₂	0,12	1,95
Residui di colture	0,36	5,85
Histosuoli coltivati	0,10	1,60
Produzione animale		
Sistemi di gestione dei rifiuti animali	2,10	34,15
Emissioni indirette		
Deposizioni atmosferiche	0,35	5,70
Lisciviazione e altre perdite d'azoto	1,40	22,75
Rifiuti umani	0,20	3,25
Totale delle fonti	6,15	100,00

Tg = teragrammi = 10¹² grammi

Tra le fonti antropogeniche, i sistemi agricoli contribuiscono significativamente alle emissioni di N₂O grazie al contributo dell'attività microbica legata ai processi di nitrificazione e denitrificazione. La mitigazione dell'emissione di questo GHG può essere conseguita adottando opportune modalità di gestione del suolo e dell'acqua, dal contenuto di sostanza organica, oltre che di modalità, epoche, formulazioni e dosi di somministrazione dei concimi minerali azotati.

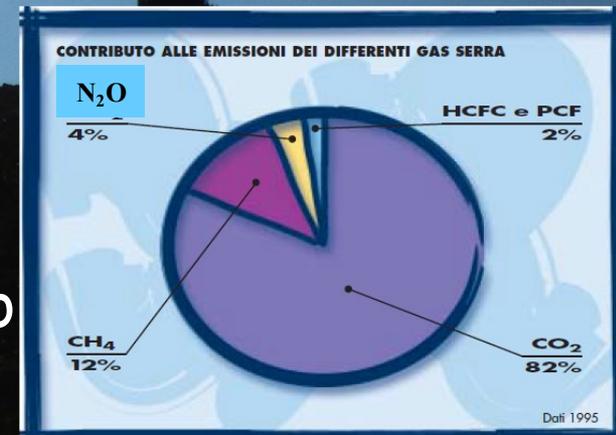
Denitrificazione

LIVELLI DI CONCENTRAZIONE E PERSISTENZA IN ATMOSFERA PER ALCUNI DEI PIÙ IMPORTANTI GAS SERRA

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC-11	HFC-23	CF ₄ (PFC)
Pre rivoluzione industriale	~280 ppmv	~700 ppbv	~280 ppbv	-	-	40 pptv
1998	365 ppmv	1.745 ppbv	314 ppbv	268 pptv	14 pptv	80 pptv
Tasso di crescita annuo attuale	0,5	0,6	0,25			
Persistenza media (anni)	50/200	12	114	45	257	50.000
GWP (Potenziale di Riscaldamento Globale)	1	21	310	4.000	11.700	6.300

ppmv=parti per milione in volume, ppbv=parti per miliardo in volume, pptv=parti per migliaia di miliardi in volume.

N₂O: è un pericoloso gas climalterante
assottiglia lo strato di ozono stratosferico

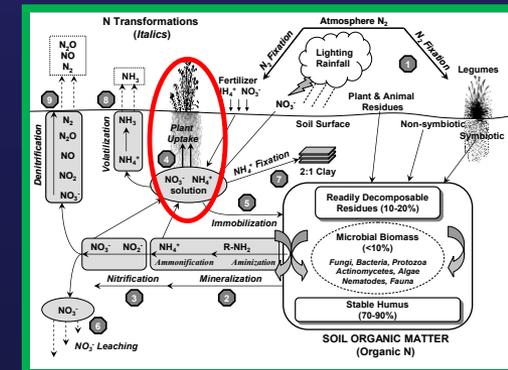
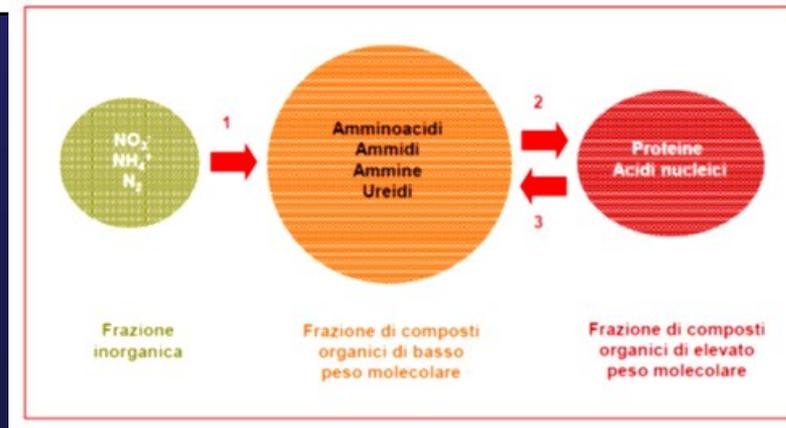


Assorbimento nutrizionale

Il contenuto d'azoto nei tessuti vegetali secchi oscilla dal 2 al 4%, molto più basso, quindi, rispetto a quello del carbonio che varia, generalmente, intorno al 40%. Le piante assorbono azoto sia sotto forma di ione NO_3^- che di ione NH_4^+ . L'assorbimento preferenziale dell'una o dell'altra forma dipende dalla specie vegetale e dalle condizioni ambientali.

La rapida ossidazione nel suolo degli ioni NH_4^+ determina una maggiore utilizzazione degli ioni NO_3^- anche quando l'azoto è somministrato come sale d'ammonio. L'assorbimento degli ioni NH_4^+ è favorito in condizioni di neutralità, depresso, invece, in ambiente acido. L'opposto avviene nel caso degli ioni NO_3^- . Il metabolismo dell'azoto nei vegetali è caratterizzato da tre tappe fondamentali:

- **conversione dell'azoto inorganico in composti azotati di basso peso molecolare**
- **sintesi di composti organici azotati di elevato peso molecolare**
- **degradazione delle macromolecole contenenti azoto operata da enzimi idrolitici**

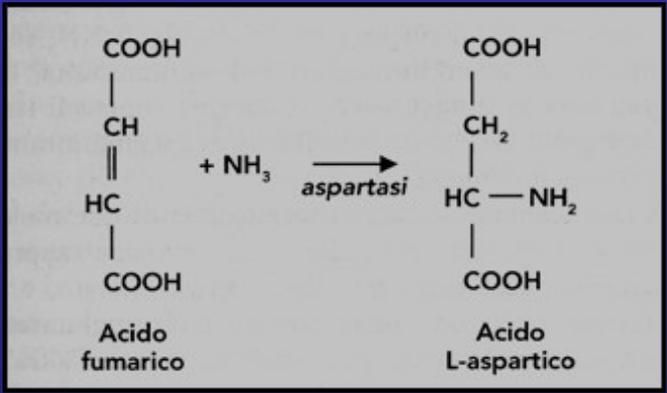


Conversione dell'N inorganico in composti azotati a basso PM

Per la biosintesi dei composti organici azotati è necessario che nelle cellule vegetali si formino inizialmente GLU, ASP, GLN, ASN (amminoacidi primari), attraverso tre vie:

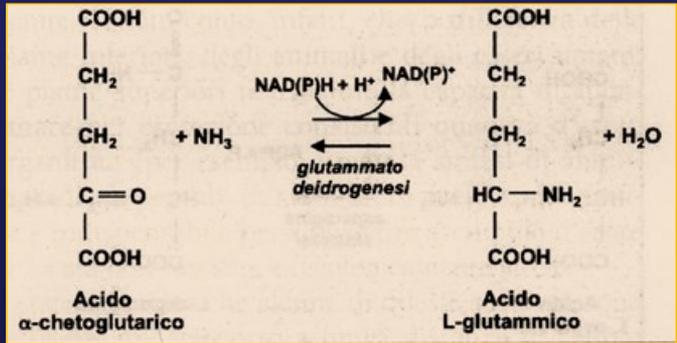
1) Addizione diretta di ammoniaca

Meccanismo diffuso nelle piante superiori e nei microrganismi



2) Amminazione riduttiva (GDH)

Meccanismo diffuso nelle cellule vegetali, batteri e funghi

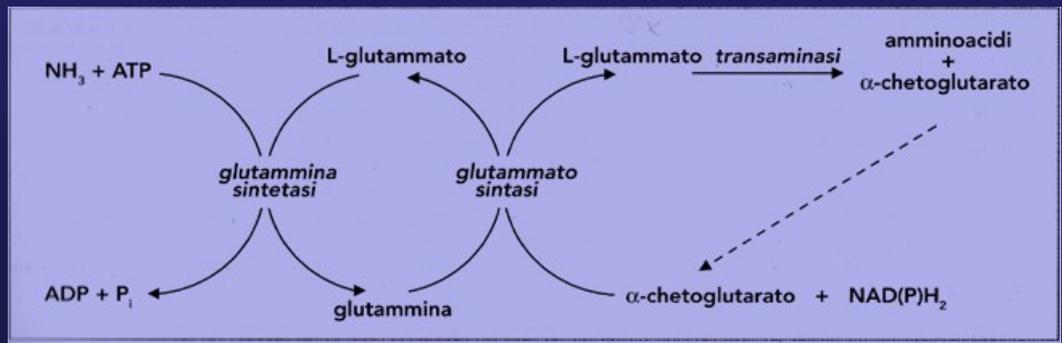
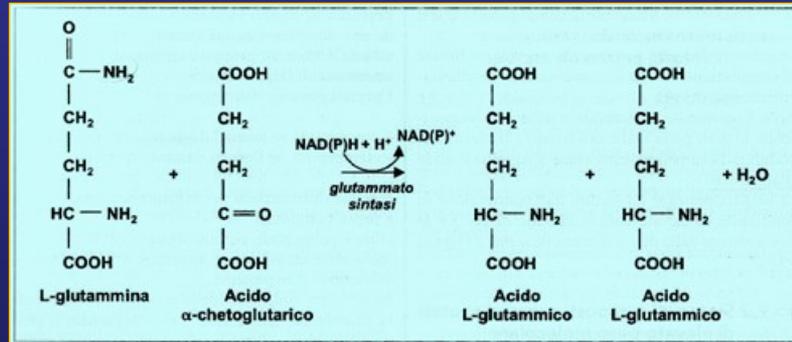
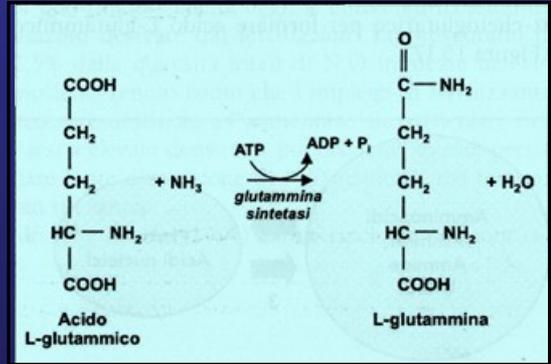


Conversione dell'N inorganico in composti azotati a basso PM

Per la biosintesi dei composti organici azotati è necessario che nelle cellule vegetali si formino inizialmente GLU, ASP, GLN, ASN, attraverso tre vie:

3) Formazione di ammidi (GS/GOGAT)

Il principale meccanismo diffuso nelle piante superiori (sia nelle foglie, sia nelle radici), in batteri, alghe, funghi



E' un processo ciclico che richiede ATP e NADPH₂.

Fig. 15.21 - Schematizzazione del processo di organizzazione dell'azoto tramite il sistema enzimatico glutammina sintetasi/glutammina sintasi.

Conversione dell'N inorganico in composti azotati ad alto PM

Per trasferimento del gruppo amminico (transaminazione) si formano tutti gli altri amminoacidi.

Acido glutammico, acido aspartico e asparagina si accumulano nei tessuti delle piante in conseguenza di lauta somministrazione alle colture di azoto inorganico, di ioni ammonio in particolare.

Nel materiale vegetale fresco l'azoto proteico costituisce la frazione di gran lunga più rappresentata (80-85% dell'azoto totale), mentre l'azoto degli acidi nucleici e quello amminico solubile rappresentano, rispettivamente, il 10 e il 5% del totale.

L'azoto proteico concorre alla formazione delle:

- **proteine enzimatiche**
- **proteine di deposito**
- **proteine strutturali.**

Le proteine enzimatiche sono presenti prevalentemente nei tessuti vegetali in accrescimento, quelle di deposito si accertano nei semi e nei frutti, mentre quelle strutturali si rinvengono a livello di membrane biologiche.

Assorbimento nutrizionale

L'azoto assorbito dal sistema radicale viene traslocato nelle parti epigee delle piante.

Le forme azotate coinvolte nel processo di traslocazione dipendono dalle fonti disponibili e dal metabolismo radicale. L'azoto assorbito come ione ammonio viene prima assimilato nei tessuti delle radici e poi ridistribuito in forma amminoacidica.

L'azoto nitrico, invece, può essere trasferito in forma inalterata verso i germogli e le foglie.

La traslocazione dell'azoto è processo di notevole importanza per la vita delle piante. Le foglie giovani sono rifornite di amminoacidi fino al raggiungimento della maturità.

Quando la nutrizione azotata risulta insufficiente, si accerta idrolisi delle proteine presenti nelle fogli più vecchie e mobilitazione di amminoacidi verso gli organi vegetali più giovani per azione di proteasi e nucleasi.

Assorbimento nutrizionale

25.12 - Assorbimento e accumulo d'azoto nei tessuti vegetali

La quantità d'azoto assorbita dalle piante coltivate, in quantità e proporzione adeguate, è di estrema importanza per realizzare produzioni ottimali.

Allo stesso modo, l'incremento della resa produttiva è funzione della distribuzione e dell'accumulo del nutriente nei diversi tessuti vegetali e nei semi.

L'analisi dei tessuti vegetali consente di accertare l'assorbimento dell'azoto nelle piante coltivate, che è generalmente espresso in termini di concentrazione o d'accumulo.

Assorbimento nutrizionale

25.12.1 - La concentrazione d'azoto nei tessuti vegetali

L'assorbimento dell'azoto è definito dalla sua concentrazione per unità di sostanza secca (espressa in percentuale o in $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ o $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) misurata per mezzo d'indagine analitica portata su diversi organi della pianta.

La concentrazione dell'azoto varia con:

- il **tipo di tessuto vegetale analizzato (foglie, germogli, pianta intera)**
- l'**età della pianta**
- la **quantità di sostanza secca e di semi prodotta**
- le **specie coltivate e i diversi genotipi**
- le **pratiche colturali impiegate**
- le **molteplici condizioni ambientali**

Anche se influenzata da tanti fattori, la concentrazione del nutriente nei tessuti delle piante coltivate costituisce un parametro molto più indicativo e rilevante per l'accertamento dello stato nutrizionale delle colture di quanto non lo siano i risultati ottenuti dall'analisi del suolo.

Tenuto conto, infatti, che le piante hanno un'elevata capacità di regolare l'assorbimento degli elementi della nutrizione in funzione delle loro esigenze, notevoli variazioni delle quantità d'azoto nel mezzo di coltura provoca solamente limitata modificazione della sua concentrazione nei tessuti vegetali.

La valutazione analitica della concentrazione dei nutrienti ha notevole importanza per la diagnosi di possibili disordini nutrizionali.

Il contenuto d'azoto accertato nelle diverse strutture vegetali può essere utilizzato per identificare condizioni di carenza, di sufficienza o di tossicità .

Assorbimento nutrizionale

Tab. 25.12 - Concentrazione sufficiente d'azoto (g · kg⁻¹ ss), accertata in diverse fasi fenologiche, negli organi vegetali di alcuni cereali e legumi (modificata da Fageria, 2009).

Piante coltivate	Fase fenologica	Organi vegetali	Concentrazione sufficiente di N
Frumento (<i>Triticum</i> spp.)	Accestimento	Lamine fogliari	43 - 52
Frumento (<i>Triticum</i> spp.)	Germogliazione	Lamine fogliari	36 - 44
Frumento (<i>Triticum</i> spp.)	Levata	Parti epigee	21 - 30
Frumento (<i>Triticum</i> spp.)	Fioritura	Lamine fogliari	27 - 30
Orzo (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Accestimento	Foglie	47 - 51
Orzo (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Germogliazione	Foglie	45 - 47
Orzo (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Levata	Parti epigee	20 - 30
Orzo (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Fioritura	Foglie	29 - 35
Riso (+) (<i>Oryza sativa</i> L.)	Inizio dell'accestimento	Parti epigee	44 - 46
Riso (+) (<i>Oryza sativa</i> L.)	Accestimento	Parti epigee	31 - 35
Riso (+) (<i>Oryza sativa</i> L.)	Formazione del panicolo	Parti epigee	12 - 15
Riso (+) (<i>Oryza sativa</i> L.)	Botticella	Parti epigee	10 - 13
Riso (+) (<i>Oryza sativa</i> L.)	Fioritura	Parti epigee - Semi	9 - 11
Riso (+) (<i>Oryza sativa</i> L.)	Maturità fisiologica	Parti epigee - Semi	6 - 7
Mais (<i>Zea mays</i> L.)	35-45 DAE (*)	Parti epigee	35 - 50
Mais (<i>Zea mays</i> L.)	Emissione dell'infiorescenza maschile	Foglie	30 - 35
Mais (<i>Zea mays</i> L.)	Emissione dell'infiorescenza femminile	Brattee	> 32
Sorgo (<i>Sorghum vulgare</i> Pers.)	Inizio della fase vegetativa	Parti epigee	35 - 51
Sorgo (<i>Sorghum vulgare</i> Pers.)	Fase vegetativa	Lamine fogliari giovani	32 - 42
Sorgo (<i>Sorghum vulgare</i> Pers.)	Antesi	3BBP (**)	33 - 40
Sorgo (<i>Sorghum vulgare</i> Pers.)	Formazione della pianticella	Parti epigee	35 - 51
Soia (<i>Glycine max</i> L.)	Prima dell'interramento dell'ovario	Foglie trifoliolate	45 - 55
Fagiolo (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Inizio della fioritura	Lamine fogliari più elevate	52 - 54
Fagiolo dall'occhio (<i>Vigna unguiculata</i> L.)	39 DAS (***)	Parti epigee	28 - 35
Fagiolo dall'occhio (<i>Vigna unguiculata</i> L.)	Inizio della fioritura	Lamine fogliari più elevate	11 - 17
Arachide (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	Inizio dell'interramento dell'ovario	Steli e foglie	35 - 45
Patata (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	43 DAE	Lamine fogliari più elevate	40 - 50
Patata (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	Inizio della fioritura	Lamine fogliari più elevate	55 - 65
Patata (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	Fase di sviluppo dei tuberi	Lamine fogliari più elevate	30 - 50
Cotone (<i>Gossypium</i> spp.)	Inizio della fioritura	Lamine fogliari giovani	38 - 45
Manioca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz)	Fase vegetativa	Lamine fogliari più elevate	50 - 60

(+) coltivato in suolo sommerso

(*) DAE = Days After Emergence = giorni dopo l'emergenza

(**) 3BBP = Third Blade Below Panicle = terza foglia sotto il panicolo

(***) DAS = Days After Sowing = giorni dopo la semina

Le piante hanno la capacità di regolare l'assorbimento dei nutrienti e di ridistribuirli tra i tessuti nel corso del loro ciclo vegetativo.

Effetti della carenza e dell'eccesso d'azoto

Piante N-carenti manifestano:

- ✓ clorosi
- ✓ crescita stentata
- ✓ filloptosi
- ✓ maturazione e senescenza precoci
- ✓ necrosi
- ✓ morte

Piante con N-surplus presentano:

- ✓ eccessivo rigoglio
- ✓ ritardo riproduttivo
- ✓ fragilità meccanica
- ✓ suscettibilità fitopatologica
- ✓ elevate richieste idriche
- ✓ sbilanciamento nutrizionale
- ✓ minore qualità organolettica
- ✓ accumulo di nitrati nelle foglie
- ✓ problematiche ambientali

- ✓ Il ciclo dell'N è connesso a quello di C, con un rapporto C:N diversificato tra cellule vegetali, e cellule microbiche e animali
- ✓ Dinamiche di N nel terreno legate a processi biotici e abiotici
- ✓ Componente della SOM, ne segue il destino con rilascio microbico di forme inorganiche solubili nel suolo (N-NH_4^+ e N-NO_3^- , circa 1-5% del pool azotato) a diversa mobilità
- ✓ Pedoclima e gestione modulano il rilascio di N solubile
- ✓ Perdite di N inorganico per lisciviazione in climi umidi, per volatilizzazione in condizioni anaerobiche o di pH alcalino, con significativo impatto ambientale
- ✓ Interazioni nutrizionali: positive per K, Ca, Mg, S, Fe, B, Mo; modulate dal pH della rizosfera per P e micronutrienti
- ✓ Molto mobile all'interno della pianta, facilmente traslocato
- ✓ Carezza di N causa riduzione della fotosintesi, crescita stentata, riduzione della produzione, precocità
- ✓ Eccesso di N causa prolungato ed elevato sviluppo vegetativo, sbilanciamento nutrizionale, aumentati consumi idrici, suscettibilità a fitopatie e avversità climatiche, accumulo di nitrati, decremento qualitativo dei prodotti

Soil N balance

$$Q_N = F_N - (N_P + N_m + N_{co}) + (N_L + N_v + N_D) \pm N_{CP}$$

Q_N : quantità di N efficiente da distribuire

F_N : fabbisogno totale di N della coltura

N_p : N apportato con precipitazioni e irrigazione

N_m : N apportato per mineralizzazione della SOM

N_{CO} : N da mineralizzazione di concimi organici della coltura precedente

N_L : N perduto per lisciviazione

N_v : N perduto per volatilizzazione

N_D : N perduto per denitrificazione

N_{CP} : N derivante (o sottratto) dalla decomposizione dei residui della coltura precedente

F_N: fabbisogno totale di N della coltura

TABELLA 9.1 Quantità di biomassa secca della produzione utile e dei residui aerei, harvest index e concentrazione di N, P₂O₅ e K₂O della produzione utile e dei residui aerei delle principali colture erbacee e ortive

Coltura	Produzione utile				Harvest index	Residui aerei			
	t ha ⁻¹ di s.s.	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)		t ha ⁻¹ di s.s.	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Aglio	2,0-4,0	2,6	1,0	1,6	0,75	0,7-1,3	3,3	0,8	5,4
Anguria	5,0-7,0	1,0	0,8	1,7	0,85	0,9-1,2	3,3	1,3	4,2
Asparago	0,5-1,0	5,5	1,8	3,4	0,25	1,5-3,0	3,1	0,9	2,4
Avena da granella	3,0-5,0	2,1	0,9	1,3	0,40	4,5-7,5	0,5	0,3	1,2
Barbabietola	8,8-11,0	1,2	0,5	2,0	0,80	2,2-2,8	2,4	1,0	3,0
Carciofo rifiorante	2,4-3,6	2,6	1,2	2,3	0,42	3,3-5,0	3,6	0,5	3,6
Carota	2,4-3,6	1,8	0,9	3,0	0,85	0,40-0,6	3,6	1,0	4,5
Cavolfiore	6,0-8,0	4,0	1,2	4,4	0,98	0,1-0,2	4,4	2,1	4,4
Cavolo Broccolo	4,0-6,0	4,0	1,2	4,4	0,98	0,1	4,4	2,1	4,4
Cavolo verza	2,0-3,0	3,3	0,8	3,7	0,98	0,0-0,1	4,7	2,2	4,7
Cece	2,0-3,0	3,5	0,9	1,2	0,33	4,1-6,1	1,2	0,3	1,7
Cetriolo	3,0-5,0	2,2	1,2	3,7	0,80	0,8-1,3	4,4	1,6	4,9
Cipolla	3,6-4,8	2,8	1,6	2,2	0,80	0,9-1,2	4,7	0,8	4,7
Colza granella	2,0-4,0	4,2	2,0	2,4	0,33	4,1-8,1	2,0	1,3	2,5
Erba medica (fieno)	10,0-15,0	2,8	0,6	2,0	1,00				
Erbai graminacee (fieno)	5,0-10,0	2,4	0,9	3,1	1,00				
Fagiolino fresco	1,0-1,2	2,4	0,9	2,4	0,45	1,2-1,5	1,5	0,5	1,5
Fagiolo secco	2,0-3,0	2,4	1,0	2,7	0,75	0,7-1,0	1,5	0,5	1,5
Favino	2,0-4,0	4,8	1,6	2,3	0,40	3,0-6,0	1,6	0,6	1,4
Finocchio	1,8-2,7	2,8	1,2	3,5	0,80	0,5-0,7	2,8	1,2	3,5
Fragola	3,5-4,5	1,3	0,7	2,5	0,40	5,3-6,8	4,2	1,5	6,0
Fruento duro	3,0-6,0	2,5	1,1	1,3	0,40	4,5-9,0	0,5	0,2	1,1
Fruento tenero	4,0-8,0	2,3	1,0	1,2	0,40	6,0-12,0	0,5	0,2	1,0
Girasole	3,0-6,0	3,3	1,6	1,8	0,40	4,5-9,0	1,0	0,6	3,3
Indivia	1,4-2,1	3,0	1,0	6,0	0,98				
Lattuga	1,2-1,8	3,8	1,1	6,3	0,98				
Loiessa-fieno	7,0-15,0	1,5	0,3	1,0	1,00				
Mais granella	8,0-12,0	1,7	0,8	0,7	0,50	8,0-12,0	0,7	0,3	1,4
Mais trinciato	17,0-28,0	1,3	0,6	1,2	1,00	0,0			
Melanzana	2,4-4,0	2,5	1,0	3,6	0,50	2,4-4,0	4,2	0,9	4,6
Melone	4,0-6,0	1,5	0,8	3,8	0,60	2,7-4,0	5,0	1,8	5,0
Orzo granella	3,0-5,0	2,4	1,1	1,3	0,40	4,5-7,5	0,6	0,4	1,2
Orzo insilato	4,0-6,0	1,2	0,6	1,2	1,00				
Patata	6,9-11,5	1,6	0,6	3,2	0,80	1,7-2,9	4,0	0,7	5,0
Pomodoro da industria	3,6-6,0	2,8	1,1	5,6	0,70	1,5-2,6	4,0	0,9	5,0
Riso	5,0-7,0	1,4	0,8	0,6	0,46	5,9-8,2	0,7	0,4	2,4
Soia	2,0-4,0	6,6	1,7	2,7	0,40	3,0-6,0	1,9	0,6	1,8
Sorgo trinciato	7,0-9,0	1,6	0,5	1,1	1,00				
Spinacio fresco	1,8-2,3	4,5	1,2	6,4	0,90	0,2-0,3	4,5	1,2	6,4
Tabacco Burley	3,0-6,0	2,6	1,1	3,2	0,65	1,6-3,2	2,0	1,1	3,3
Triticale	5,0-8,0	1,9	1,0	0,8	0,45	6,1-9,8	0,4	0,2	1,5
Zucca	3,6-4,8	3,9	1,6	5,5	0,60	2,4-3,2	3,2	1,5	4,6
Zucchini	1,2-1,8	3,9	1,6	5,5	0,60	0,8-1,2	3,2	1,5	4,6

N_p : N apportato con precipitazioni e irrigazione

$$N_p = H_p \cdot [N_p]$$



N_p : quantità di N proveniente dagli apporti idrici

H_p : altezza (mm) degli apporti idrici

N_p : concentrazione media di N nell'acqua irrigua o meteorica



Apporti atmosferici (variabile; $\sim 2 \text{ mg N} \cdot \text{dm}^{-3}$)

Apporti mediante acque irrigue (variabile; $0.1 - 11 \text{ mg N} \cdot \text{dm}^{-3}$)



N_m : N apportato per mineralizzazione della SOM

$$N_m = S \cdot h \cdot \rho_{app} \cdot [N_{Org}] \cdot k_2$$

$$N_m = S \cdot h \cdot \rho_{app} \cdot [N_{Org}] \cdot \sum(k_2 \text{ mensili})$$

$$k_{2 \text{ mensile}} = \frac{(T_{\text{mensile}} - 0.5) \cdot 240}{[(A + 20) \cdot (0.3 \cdot L + 20)]} \cdot 0.5$$

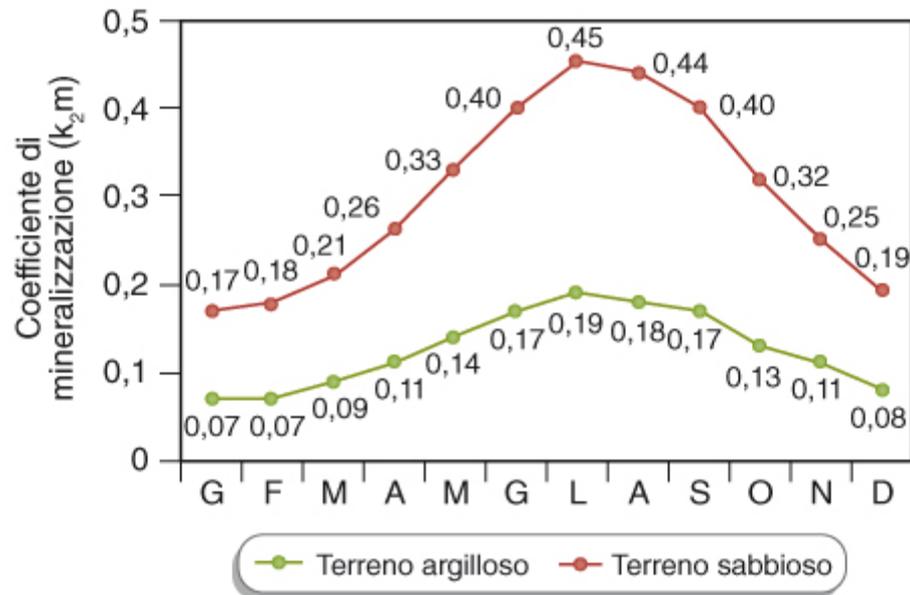


FIGURA 9.2 Valori dei coefficienti mensili di mineralizzazione della sostanza organica del suolo.

N_{co}: N da mineralizzazione di concimi organici della coltura precedente

$$N_{co} = Q_{co} \cdot [N_{co}] \cdot k_{co}$$

Q_{co}: quantità di concime organico distribuito

N_{co}: titolo di N nel concime org.

k_{co}: coefficiente di recupero

TABELLA 9.2 Composizione chimica di alcuni fertilizzanti organici prodotti dalle aziende zootecniche. I valori hanno scopo esemplificativo, la loro elevata variabilità richiede che questi materiali siano analizzati volta per volta prima dell'utilizzo

Fertilizzante	Specie	Sostanza secca (% su t.q.)	Solidi volatili (% su s.s.)	N (kg t ⁻¹ t.q.)	P (kg t ⁻¹ t.q.)	K (kg t ⁻¹ t.q.)	NH ₃ /N tot
Letame	Bovini	20-30,5	75-85	3-7	0,4-1,7	3,3-8,3	27
	Broiler ¹	60-80	75-85	30-47	13-25	14-17	
	Ovini	22-40	70-75	6-11	0,7-1,3	12-18	
	Bufalini	20-40		2-4	0,2-0,9	3,3-6,6	
Liquame	Bovini da latte	10-16	75-85	3,9-6,3	1,0-1,6	3,2-5,2	58
	Bovini da carne	7-10	75-85	3,2-4,5	1,0-1,5	2,4-3,9	58
	Suini	1,5-6,0	65,80	1,5-5,0	0,5-2,0	1,0-3,1	71
	Avicoli	19-25	70-75	10-15	4,0-5,0	3,0-7,5	47
	Bufalini	20	75	1-3	0,3-0,9	1,6-4,1	
Digestato	Bovini	3,5-7,2	68-86	2,2-3,8	0,5-0,9	0,8-4,5	57
	Suini	2,5-6,3	54-77	2,9-4,3	0,6-1,4	1,9-4,5	66
Compost	Da lettiera bovine	35-60	40-50	9-13	3-5	14-23	
	Da pollina con paglia	50-70	55-60	10-20	10-16		
Separato solido	Da liquami	20-25		2,5-3,2	0,5-1,0		
	Da digestati bovini	14-27	84-91	4,1-8,1	0,8-2,9	1,7-4,6	35
	Da digestati suini	15-24	80-87	3,3-7,5	1,2-4,6	2,0-8,4	45

¹ Polli allevati per la produzione di carne.

TABELLA 9.3 Coefficiente di recupero (%) dell'azoto da fertilizzanti organici in funzione della frequenza di applicazione

Materiale	Distribuzione			
	annuale	biennale	triennale	saltuaria
Letame, compost	50	30	20	20
Liquame bovino	30	15	10	
Liquame suino e pollina	15	10	5	

N_{CP} : N derivante dalla mineralizzazione dei residui della coltura precedente

$$N_{CP} = \left(Q_{RSS} \cdot N_{SS} - Q_{RSS} \cdot k_1 \cdot N_{Humus} \right) \cdot \frac{n}{12}$$

Q_{RSS} : quantità di residui colturali interrati

N_{SS} : titolo di N nei residui colturali

k_1 : coefficiente isoumico

N_{Humus} : titolo di N nell'humus (circa 5%)

n : numero di mesi tra l'interramento dei residui colturali e la raccolta della coltura da concimare

N_L : N perduto per lisciviazione

Viene stimato per periodi

➤ 1 ottobre - 28 febbraio

$$N_L = N_{PL} \cdot k_L / 100 = (N_m + N_{CP} + N_P) \cdot k_L / 100$$

TABELLA 9.4 Metodo di stima del coefficiente di lisciviazione (k_L)

Precipitazioni ottobre-febbraio (mm)	k_L
<250	0,0
250-300	16,7
301-350	37,5
351-400	50,0
401-450	58,3
451-500	64,3
501-550	68,8
551-600	72,2
601-650	75,0
651-700	77,3
701-750	79,2
751-800	80,8
801-850	82,1
851-900	83,3
901-950	84,4
951-1.000	85,3
>1.000	86,1

➤ 1 marzo - 30 aprile (se <100 mm=0; se >100 mm=10 kg N·ha⁻¹)

➤ 1 maggio - 30 settembre (~0 kg N·ha⁻¹)

N_v : N perduto per volatilizzazione

Stimabile per concimi ed ammendanti contenenti $N-NH_4^+$
variabile dal 10 al 40% dell'N distribuito secondo:

- ❖ tipologia del prodotto
- ❖ modalità di distribuzione
- ❖ temperatura ed umidità del suolo
- ❖ pH del suolo

N_D : N perduto per denitrificazione

Mediamente basso: variabile da 1 a 5 kg N·ha⁻¹·a⁻¹

Nel riso coltivato in sommersione: fino a 50 kg N·ha⁻¹·a⁻¹

Stima della quantità di N efficiente da distribuire

Anticipando il concetto di efficienza d'uso dei nutrienti, viene definita l'**efficienza agronomica apparente dell'N** (ANR) la quantità percentuale di N distribuita con il concime che viene effettivamente assorbita dalla coltura.

$$ANR = \frac{N_{AC} - N_{AT}}{N_C} \cdot 100$$

N_{AC} : quantità di N assorbito dalla pianta

N_{AT} : quantità di N assorbito dalla pianta non conc.

N_C : quantità di N distribuito

Per l'N contenuto nei **concimi minerali** la media attuale è **~60%**, per quello dei concimi organici e degli effluenti zootecnici varia dal **20 al 90%**.

Soil N balance: un esempio con frumento tenero

$$Q_N = F_N - (N_P + N_m + N_{co}) + (N_L + N_v + N_D) \pm N_{CP}$$

Fabbisogno culturale	Granella: produzione attesa	Y	6	t ha ⁻¹
	Granella: concentrazione di N	$[N_Y]$	24,0	kg t ⁻¹
	Granella: contenuto di N	$N_Y=Y \cdot [N_Y]$	144	kg ha ⁻¹
	Harvest Index	HI	0,55	
	Residui aerei: quantità prodotta	$W=(Y/HI)-Y$	4,9	t ha ⁻¹
	Residui aerei: concentrazione di N	$[N_W]$	8,0	kg t ⁻¹
	Residui aerei: contenuto di N	$N_W=W \cdot [N_W]$	39,3	kg ha ⁻¹
	Radici: quantità prodotta	$R=(Y+W) \cdot 0,15$	1,6	t ha ⁻¹
	Radici: concentrazione di N	$[N_R]$	8,0	kg t ⁻¹
	Radici: contenuto di N	$N_R=R \cdot [N_R]$	13,1	kg ha ⁻¹
	Fabbisogno culturale	$F_N=N_Y+N_W+N_R$	196	kg ha ⁻¹
Azoto apportato con le precipitazioni	Precipitazioni: altezza	H_p	1.000	mm
	Precipitazioni: concentrazione di N	$[N_p]$	2	mg l ⁻¹
	Precipitazioni: azoto apportato	$N_p=H_p \cdot [N_p]$	20	kg ha ⁻¹



P. Ceccon, M. Fagnano, C. Grignani, M. Monti, S. Orlandini

Agronomia

EdiSES

Soil N balance: un esempio con frumento tenero

$$Q_N = F_N - (N_P + N_M + N_{CO}) + (N_L + N_V + N_D) \pm N_{CP}$$

continua

N proveniente dalla coltura precedente	Residui coltura precedente (mais)	Z	10	t ha ⁻¹	
	Residui: concentrazione di N	[N _Z]	7	kg t ⁻¹	
	Residui: contenuto di N	N _Z =Z·[N _Z]	70	kg ha ⁻¹	
	Residui: coefficiente isoumico	k ₁	12	%	
	Humus: quantità prodotta	SO=Z·k ₁	1,2	t ha ⁻¹	
	Humus: concentrazione di N	[N _{SO}]	50	kg t ⁻¹	
	Humus: contenuto di N	N _{SO}	60	kg ha ⁻¹	
	Durata della coltivazione	d	8	Mesi	
	Azoto lasciato dalla coltura precedente	$N_{CP}=N_Z - N_{SO} \cdot (d/12)$	7	kg ha ⁻¹	
N proveniente dalla mineralizzazione della sostanza organica	Terreno: superficie	S	10.000	m ²	
	Terreno: spessore	h	0,4	m	
	Terreno: densità apparente	Da	1,3	t m ⁻³	
	Terreno: peso	W _T =S·h·Da	5.200	t ha ⁻¹	
	Terreno: concentrazione di N	[N _T]	1	kg t ⁻¹	
	Terreno: contenuto di N	N _T =W _T ·[N _T]	5.200	kg ha ⁻¹	
	Azoto: coefficiente di mineralizzazione	k ₂	12	g kg ⁻¹ anno ⁻¹	
	Azoto: quantità mineralizzata per anno	N _{MA} =N _T ·k ₂	62	kg ha ⁻¹	
	Azoto proveniente dalla mineralizzazione	N _M =N _{MA} /12·d	42	kg ha ⁻¹	
Lisciviazione	Azoto: mineralizzato novembre-febbraio	N _{NF} =N _{MA} /12·4	21	kg ha ⁻¹	
	Azoto: precipitazioni novembre-febbraio (H _{NF} =700 mm)	N _P =H _{NF} ·[N _P]	14	kg ha ⁻¹	
	Azoto potenzialmente lisciviabile	N _{PL} =N _{NF} +N _P	35	kg ha ⁻¹	
	Coefficiente di lisciviazione	k _l	773		
	Azoto lisciviato	N _L =N _{PL} ·k _l	27	kg ha ⁻¹	
Denitrificazione	Valore empirico	ND	5	kg ha ⁻¹	
Dose di concime	$Q_N = F_N - (N_P + N_M) + (N_L + N_D) \pm N_{CP}$			160	kg ha ⁻¹