

12 Modellazione del bilancio dell'azoto

I riferimenti in letteratura che riguardano il ciclo dell'azoto nei sistemi colturali sono numerosissimi. In questo capitolo non tenteremo però di fare una rassegna esaustiva di questa letteratura, ma cercheremo piuttosto di definire possibili vie per modellare il ciclo dell'azoto nel sistema pianta-suolo.

L'azoto è un elemento essenziale per la pianta affinché essa possa raggiungere il suo livello potenziale di produttività. Per trattare l'assorbimento di azoto della pianta è necessario considerare diverse componenti del ciclo di questo elemento; per l'analisi del sistema, consideriamo lo schema di figura 12.1:

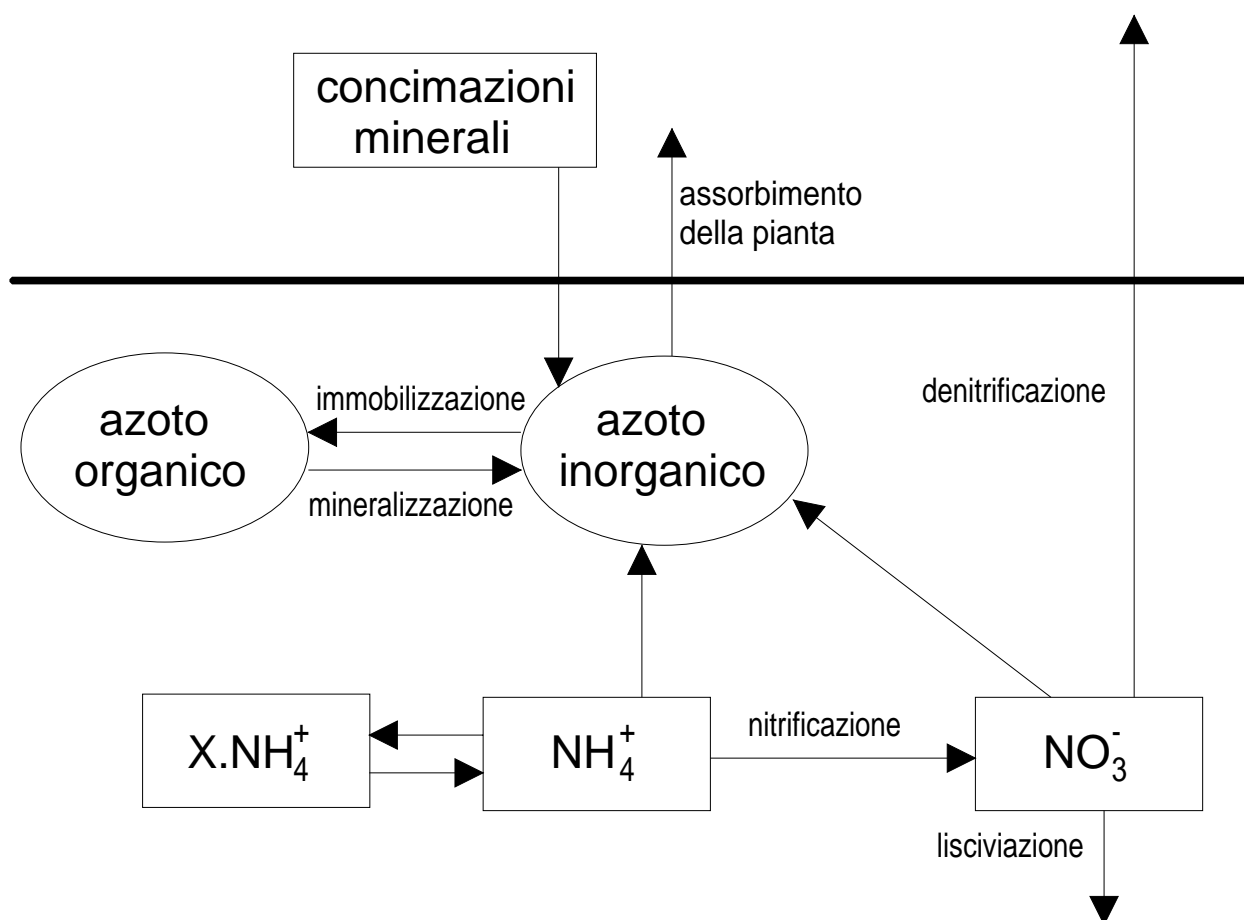


Figura 12.1 Componenti del bilancio dell'azoto nel sistema pianta-suolo.

La concentrazione di nitrati e ammonio (le due specie d'interesse in rapporto all'assorbimento della pianta) nella soluzione del suolo dipende dagli apporti attraverso la fertilizzazione, da quanto risultante dai processi di mineralizzazione che si verificano nel suolo, dall'interazione fra l'ammonio in soluzione e la fase solida del suolo, e infine dal trasporto nel suolo principalmente di nitrati, dovuto a diffusione e convezione.

Trasformazioni dell'azoto

La modellazione delle trasformazioni nel suolo include normalmente la mineralizzazione netta (risultante da mineralizzazione e immobilizzazione), la nitrificazione, la denitrificazione e talvolta la volatilizzazione. Con l'eccezione della volatilizzazione, questi processi, a carico di micro organismi nel suolo, sono modellati assumendo che essi obbediscano ad una cinetica irreversibile di primo ordine (Mehran e Tanji, 1974):

$$\frac{dN}{dt} = -KN \quad [12.1]$$

l'eq. 12.1 può essere integrata diventando

$$N_t = N_0 [1 - e^{(-Kt)}] \quad [12.2]$$

dove N_t è la quantità di azoto trasformato al tempo t , N_0 è la quantità di azoto potenzialmente trasformabile al tempo $t = 0$, e K è un tasso costante con unità di tempo⁻¹. Ulteriori descrizioni di questo approccio alla modellazione sono descritti in Watts e Hanks (1978) e in Campbell e Stockle (1989). Per una rassegna delle trasformazioni dell'azoto il lettore può far riferimento a Stevenson (1982) e a Lambers *et al.* (1986).

La mineralizzazione netta è la trasformazione dell'azoto organico in ammonio, ed è la risultante di dei processi inversi di mineralizzazione e immobilizzazione. La nitrificazione è il processo che trasforma l'ammonio in nitrati. La denitrificazione converte invece l'azoto nitrico in azoto gassoso che è successivamente perso nell'atmosfera. Dal momento che tutte queste trasformazioni sono funzioni della temperatura, il modello che simuli questi processi dovrà includere la temperatura del suolo; ciò potrà essere realizzato usando equazioni che rappresentano il flusso e l'immagazzinamento del calore nel suolo (ad esempio, Campbell, 1985), o metodi più semplici simili a quello proposto da Sharpley e Williams (1990).

La quantità di azoto organico mineralizzato è calcolato come:

$$MIN = MIN_{pot} [1 - e^{(-MRAT\Delta t)}] MF \quad [12.3]$$

dove MIN è la quantità di sostanza organica mineralizzata in ammonio (kg ha⁻¹) nel tempo Δt (un giorno), MIN_{pot} è la quantità potenziale di azoto organico disponibile per la mineralizzazione (kg ha⁻¹), $MRAT$ è il tasso di mineralizzazione (giorno⁻¹), e MF è una funzione dell'umidità del suolo.

Il tasso di mineralizzazione è calcolato come:

$$MRAT = \frac{1}{7} e^{\left(17.753 - \frac{6350.5}{T_s + 273}\right)} \quad [12.4]$$

dove T_s è la temperatura del suolo (°C). La funzione dell'umidità del suolo è dipendente dalla frazione di pori contenenti acqua:

$$MF = 1.111DS \quad ; \quad DS \leq 0.9 \quad [12.5]$$

$$MF = 10 - 10DS \quad ; \quad DS > 0.9 \quad [12.6]$$

dove DS è il grado di saturazione (adimensionale), che varia tra 0 e 1.

La quantità giornaliera di ammonio trasformato in nitrati è calcolato con l'equazione:

$$NIT = NH4 \left[1 - e^{(-NRAT\Delta t)} \right] MF \quad [12.7]$$

dove NIT è la quantità di ammonio trasformata in nitrati ($\text{kg NH}_4 \text{ ha}^{-1}$) in un tempo Δt (un giorno), $NH4$ è la quantità di ammonio disponibile per la nitrificazione (kg ha^{-1}), $NRAT$ è il tasso di nitrificazione (giorno^{-1}), e MF è una la funzione dell'umidità del suolo già vista come eq.ni 12.5 e 12.6. Il tasso di nitrificazione è calcolato moltiplicando il tasso a 35°C per una funzione della temperatura del suolo:

$$NRAT = (0.0105T_s + 0.00095T_s^2) NRAT_{35} \quad ; \quad 10 \geq T_s \geq 0 \quad [12.8]$$

$$NRAT = e^{(0.032T_s - 0.12)} NRAT_{35} \quad ; \quad 35 \geq T_s > 10 \quad [12.9]$$

$$NRAT = (-0.1T_s + 4.5) NRAT_{35} \quad ; \quad T_s > 35 \quad [12.10]$$

dove $NRAT_{35}$ è il tasso di nitrificazione a 35°C .

La denitrificazione che può verificarsi nel corso della giornata è calcolata come:

$$DEN = NO3 \left[1 - e^{(-DRAT\Delta t)} \right] \quad [12.11]$$

dove DEN è la quantità di nitrati che denitrifica ad azoto gassoso (kg N ha^{-1}) in un tempo Δt (un giorno), $NO3$ è la quantità di nitrati nel suolo (kg ha^{-1}), e $DRAT$ è il tasso costante di denitrificazione (giorno^{-1}). Il tasso costante di denitrificazione è calcolato moltiplicando il tasso a 15°C per una funzione della temperatura del suolo e per una funzione del contenuto idrico del suolo:

$$DRAT = 0.67 e^{[0.43(T_s - 10)]} DRAT_{15} WCCF \quad ; \quad T_s < 10 \quad [12.12]$$

$$DRAT = e^{[0.08(T_s - 15)]} DRAT_{15} WCCF \quad ; \quad T_s \geq 10 \quad [12.13]$$

dove $DRAT_{15}$ è il tasso di denitrificazione a 15°C , e $WCCF$ è una funzione di correzione per il contenuto idrico, definita da:

$$WCCF = e^{[0.304 + 2.94(WC_{sat} - WC) - 47(WC_{sat} - WC)^2]} \quad [12.14]$$

dove WC_{sat} è il contenuto idrico alla saturazione e WC è il contenuto idrico nel giorno corrente.

Trasporto dell'azoto nel suolo

Il trasporto dell'azoto nel profilo del suolo è stato modellato in molti modi. Fra questi ci sono metodi complessi che usano soluzioni numeriche come quelle descritte da Murali e Aylmore (1981), oppure implementate nei modelli SHAW (Flerchinger, 1987) o LEACHM (Wagenet e Hutson, 1989). Il trasporto dell'azoto nel suolo può essere modellato moltiplicando i flussi di acqua fra strati per le concentrazioni di nitrati o ammonio nello strato da cui si origina il flusso,

controllando ad ogni passo d'integrazione che il flusso di azoto da uno strato non ecceda le capacità di l'immagazzinamento. Il movimento dell'azoto per diffusione può essere inoltre aggiunto. Per dettagli sul trasporto di acqua e soluti nel suolo il lettore faccia riferimento a Campbell (1985).

Modelli complessi per il trasporto di azoto nel suolo possono non essere utilizzabili per ragioni di praticità in modelli di crescita di coltura; in questo caso sono preferibili approcci più semplici. Esempi di validi modelli di quest'ultimo tipo sono disponibili nella letteratura (Rose *et al.*, 1982a; Rose *et al.*, 1982b; Corwin *et al.*, 1991). In particolare, Corwin *et al.* (1991) hanno proposto un semplice approccio di bilancio delle masse per il trasporto di soluti. Questo modello prevede un coefficiente di bypass (BC) per descrivere la frazione di acqua che transita per lo strato senza interagire con esso, mentre $(1 - BC)$ rappresenta la quota di acqua che è soggetta ad un'azione di tipo "a pistone", che descriveremo più avanti. Il coefficiente di bypass tiene conto in modo semplice del flusso attraverso le crepacciature e i macropori del suolo, differenzia il flusso di una fase idrica mobile rispetto ad un'altra sostanzialmente immobile, e tiene conto dei fenomeni di dispersione e diffusione (Corwin *et al.*, 1991). La concentrazione di azoto dell'acqua che rimane e dell'acqua che lascia uno strato può essere calcolata in tre modi diversi, a seconda della quantità d'acqua contenuta nello strato e della quantità che arriva nello strato. Nel momento in cui l'acqua entra in uno strato, prima riporta il contenuto dello strato a capacità di campo se è in quantità sufficiente. Quando lo strato è a capacità di campo, l'acqua che entra nello strato comincia a spingere fuori da esso l'acqua mobile che in esso era contenuta, sostituendola (azione a "pistone"). La sostituzione continua sino a che tutta l'acqua che era originariamente presente nello strato è sostituita; da quel momento, l'acqua che entra nello strato comincia a uscirne entrando nello strato sottostante.

Nel caso che l'acqua in entrata nello strato sia sufficiente a portare lo strato stesso a capacità di campo, sostituendo l'acqua che era nello strato prima dell'evento, la concentrazione di azoto nell'acqua in uscita dallo strato può essere calcolata come:

$$C_{out} = \frac{W_{in} C_{in} - LTH BC WC_{bi} C_{in} + LTH (1 - BC) WC_{bi} C_{bi}}{W_{out}} \quad [12.15]$$

e la concentrazione di azoto nello strato dopo l'evento è:

$$C_{ai} = \frac{(FC - BC WC_{bi}) C_{in} + BC WC_{bi} C_{bi}}{FC} \quad [12.16]$$

dove C_{out} è la concentrazione di azoto nell'acqua in uscita dallo strato (kg N m^{-3} acqua), C_{ai} è la concentrazione di azoto nell'acqua dello strato dopo l'evento (kg N m^{-3} acqua), C_{bi} è la concentrazione di azoto nell'acqua dello strato prima dell'evento (kg N m^{-3} acqua), C_{in} è la concentrazione di azoto nell'acqua in entrata nello strato (kg N m^{-3} acqua), BC è il coefficiente di bypass (adimensionale, varia tra 0 e 1), LTH è lo spessore dello strato (m), WC_{bi} è il contenuto d'acqua volumetrico prima dell'evento ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), FC è il contenuto d'acqua volumetrico a capacità di campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), W_{in} è l'altezza di acqua che entra nello strato (m) oppure (m^3 acqua m^{-2} suolo), e infine W_{out} è l'altezza di acqua che esce dallo strato (m) oppure (m^3 acqua m^{-2} suolo).

Nel caso invece in cui la quantità d'acqua che raggiunge lo strato non è sufficiente a sostituire tutta quella presente, ma è comunque maggiore di quella necessaria per portare il contenuto idrico del suolo a capacità di campo, allora si avrà

$$C_{out} = C_{bi} \quad [12.17]$$

$$C_{ai} = \frac{(LTHFC - W_{in})C_{bi} + W_{in}C_{in}}{LTHFC} \quad [12.18]$$

Nel caso infine in cui la quantità d'acqua in entrata sia inferiore a quella necessaria per portare il contenuto d'acqua dello strato a capacità di campo, le due equazioni per calcolare la concentrazione di azoto in uscita dallo strato e quella nello strato dopo l'evento, saranno

$$C_{out} = 0 \quad [12.19]$$

$$C_{ai} = \frac{LTHWC_{bi}C_{bi} + W_{in}C_{in}}{LTHWC_{bi} + W_{in}} \quad [12.20]$$

Adsorbimento dell'ammonio

I movimenti dell'ammonio nel suolo sono limitati dal fatto che l'ammonio è adsorbito dalla fase solida. La quantità di ammonio nei siti di scambio della fase solida, XNH_4 , può essere stimata assumendo che essa sia legata con la concentrazione dell'ammonio in soluzione attraverso la relazione:

$$XNH_4 = \frac{KQ[NH_4]}{1 + K[NH_4]} \quad [12.21]$$

dove K e Q sono costanti per un dato suolo. La massa totale di ammonio per unità di volume di suolo, $soilNH_4$, è data da:

$$soilNH_4 = [XNH_4 + w(NH_4)]D_b \quad [12.22]$$

dove w è il contenuto di acqua in peso e D_b è la densità apparente del suolo. La concentrazione di ammonio nella soluzione del suolo, in equilibrio con la fase solida per una massa totale data di ammonio, può essere calcolata combinando le eq.ni 12.21 e 12.22 e risolvendo rispetto a $[NH_4]$.

Assorbimento dell'azoto da parte della coltura

Consideriamo la schematizzazione della figura 12.2 per illustrare un possibile modello:

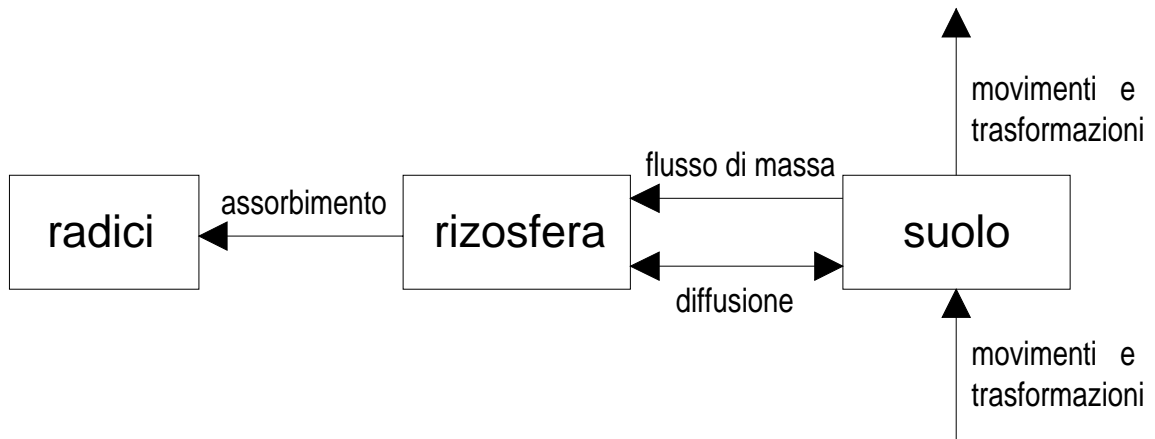


Figura 12.2 Schema di modello per l'assorbimento di azoto.

Quando le concentrazioni di nitrati e ammonio sono state stabilite per i vari strati, si può calcolare l'assorbimento della coltura. La disponibilità di azoto per l'assorbimento da parte delle piante non è determinata dalla sua concentrazione nella soluzione circolante del suolo, ma è piuttosto funzione della concentrazione di azoto in prossimità della superficie delle radici. Il tasso di trasporto dell'azoto alla superficie delle radici è legato alla concentrazione di azoto nella soluzione del suolo, dalla penetrazione e diffusione delle radici nel suolo.

Il tasso di trasporto dell'azoto alla superficie delle radici in ogni strato del suolo può essere modellato moltiplicando il contributo dello strato al flusso di traspirazione della coltura per la somma della concentrazione dell'azoto in soluzione (trasporto convettivo) con un coefficiente di diffusione cilindrica (Campbell e Stockle, 1989). Questo componente viene calcolato moltiplicando il gradiente di concentrazione tra la massa del suolo e il suolo intorno alle radici per una conduttanza che include il coefficiente di diffusione del suolo e la distanza media tra le radici.

L'assorbimento di azoto in ogni strato per unità di radici, N_U , può essere simulato utilizzando un'equazione del tipo di quella di Michaelis-Menten, basata sulla teoria elaborata da Nye e Thirner (1977) e Barber (1984):

$$N_U = N_{u\max} \frac{[N_r]}{K + [N_r]} \quad [12.23]$$

dove $N_{u\max}$ è il tasso massimo di assorbimento di azoto per unità di lunghezza delle radici, $[N_r]$ è la concentrazione di azoto alla superficie delle radici e K è una costante. In condizioni di campo, il tasso di assorbimento di azoto da parte della coltura può essere molto vicino al suo massimo anche con concentrazioni molto basse di azoto nella rizosfera.

L'eq. 11.23 descrive l'assorbimento dell'azoto indipendentemente dalle condizioni della pianta. Peraltro, le piante non assorbono azoto oltre una data concentrazione anche se l'elemento è disponibile; è quindi necessario prevedere un meccanismo di feedback sul tasso di assorbimento di nutrienti. Questo meccanismo può essere modellato riducendo gradualmente sino a zero il tasso massimo di assorbimento allorché si approssima nella pianta un dato valore massimo di concentrazione dell'azoto.

Sono possibili anche modelli semplificati dell'assorbimento dell'azoto. Una semplificazione piuttosto comune è quella di non considerare il calcolo della concentrazione dell'azoto in prossimità delle radici e la componente diffusiva del trasporto dell'azoto, utilizzando solamente la concentrazione dell'azoto nel suolo. Un'altra semplificazione è quella di calcolare

l'assorbimento di azoto come prodotto del flusso traspirativo per la concentrazione di azoto nitrico nel suolo. Tutti questi approcci presumono che tutti nitrati presenti nel suolo siano prontamente disponibili per l'assorbimento della pianta e che non ci sia quindi limitazione al movimento dei nitrati verso la superficie delle radici. Queste assunzioni sembrano rispettate se l'acqua non è limitante, ma non risultano valide nel caso il suolo abbia un contenuto idrico sub ottimale e quindi sia al di sotto di una soglia che peraltro non è semplice identificare.

Un metodo semplice ma efficace per simulare l'assorbimento di azoto da parte di una coltura può essere ottenuto adattando un approccio suggerito da Godwin e Jones (1991). L'assorbimento effettivo di azoto è determinato come il minimo tra la "richiesta" della coltura e la disponibilità nel suolo. La richiesta di azoto da parte della coltura è data dalla quantità di azoto che la coltura richiede per esprimere una crescita potenziale, quest'ultima definita dalle limitazioni di fattori come acqua, temperatura e luce. Ai livelli dei fattori elencati corrisponde una "richiesta per deficienza" di azoto; questa è la differenza tra la concentrazione critica e quella attuale prima di nuova crescita, dove la concentrazione critica è quella a cui la coltura cresce al tasso potenziale. Questo modello può essere esplicitato con l'equazione seguente:

$$ND = (NC_{crit} - NCONC_b)(TM + RM) + N_{crit}(PRG + PTG) \quad [12.24]$$

dove ND è la richiesta di azoto della coltura (kg ha^{-1}), NC_{crit} è la concentrazione di azoto critica della coltura (kg N kg^{-1} biomassa), $NCONC_b$ è la concentrazione di azoto prima della crescita (kg N kg^{-1} biomassa), TM è la biomassa epigeica cumulata (kg ha^{-1}), RM è la biomassa ipogeica cumulata (kg ha^{-1}), PTG e PRG sono, rispettivamente, la crescita potenziale di sostanza secca epigeica e ipogeica (kg ha^{-1}). Il primo termine a destra nell'eq. 12.24 è la richiesta per deficienza in azoto; il secondo termine rappresenta la domanda per nuova crescita. È possibile che la richiesta della pianta in azoto sia negativa quando la disponibilità di azoto è sufficiente (Godwin e Jones, 1991); questo accade quando la pianta sta maturando e la sua concentrazione critica, che è funzione dello stadio di sviluppo, decresce ad un ritmo più rapido di quanto non aumenti la sostanza secca accumulata. In questo caso la pianta ha una riserva di azoto.

L'assorbimento potenziale dal suolo è calcolato per ogni strato del suolo e successivamente cumulato per tutto il profilo esplorato dalle radici. Per ogni strato è calcolato come segue:

$$N_{upt} = U_{max} RL N_{avail} SWF^2 \quad [12.25]$$

dove N_{upt} è l'assorbimento potenziale di azoto ($\text{kg N ha}^{-1} \text{giorno}^{-1}$), U_{max} è l'assorbimento massimo per unità di lunghezza di radice ($\text{kg N giorno}^{-1} \text{m}^{-1}$), RL è la lunghezza delle radici (m), N_{avail} è un fattore di disponibilità dell'azoto (adimensionale, varia tra 0 e 1), e SWF è un fattore di disponibilità idrica nel suolo (adimensionale, varia tra 0 e 1). Il fattore di disponibilità dell'azoto è calcolato secondo Godwin e Jones (1991):

$$N_{avail} = 1.0 - e^{(-aN_s)} \quad [12.26]$$

dove N_{avail} è il fattore di disponibilità dell'azoto, a è una costante (0.0275 per i nitrati e 0.025 per l'ammonio), e N_s è la concentrazione di azoto nel suolo (kg ha^{-1}). Il fattore di disponibilità idrica nel suolo è calcolato come rapporto tra acqua disponibile nel giorno e acqua disponibile massima:

$$SWF = \frac{WC - PWP}{FC - PWP} \quad [12.27]$$

dove WC è il contenuto idrico volumetrico del suolo nello strato ($m^3 m^{-3}$); PWP e FC sono il contenuto idrico volumetrico dello strato, rispettivamente al punto di appassimento e a capacità di campo ($m^3 m^{-3}$).

Allocazione dell'azoto e interazione con il carbonio

L'azoto assorbito dalla pianta deve essere allocato nei diversi organi della stessa. L'azoto richiesto dalla pianta per la produzione di biomassa è conseguente il rapporto carbonio/azoto di ogni organo. Uno schema di partizione simile a quello presentato nel capitolo 10 è stato proposto da Stockle e Campbell (1989). In questo approccio, è stata proposta una equazione di Michaelis-Menten per ogni elemento:

$$G = G_{\max} \left[\frac{C}{K_C + C} \right] \left[\frac{N}{K_N + N} \right] \quad [12.28]$$

dove G è tasso di crescita, G_{\max} è il tasso di crescita potenziale del genotipo, C e N sono le riserve di carbonio e azoto nella pianta, K_C e K_N sono le costanti di tasso per carbonio e azoto. Queste costanti possono essere calibrate (indipendentemente) per rispettare priorità nell'allocazione tra i diversi organi della pianta..

Un altro elemento da considerare nell'associazione carbonio-azoto è che quando la concentrazione di azoto nelle foglie è ridotta ad un livello minimo a causa di penuria di questo elemento nel suolo, si riduce molto anche la fotosintesi, riducendo quindi la fissazione del carbonio.