

Il ruolo della fertilizzazione nel futuro dei seminativi

INTRODUZIONE

La fertilizzazione dei seminativi è una pratica agronomica indispensabile per il conseguimento di risultati produttivi quanti-qualitativi ottimali. Negli ultimi decenni la fertilizzazione ha subito forti limitazioni per due ragioni i cui effetti hanno condotto a risultati analoghi: l'applicazione di regolamenti di tutela ambientale e la forte spinta a ridurre i costi aziendali. Mentre in passato il principale obiettivo di questa pratica agronomica consisteva nell'apportare elementi nutritivi alle colture al fine di incrementarne o sostenerne la risposta produttiva, si cerca oggi di proteggere l'ambiente massimizzando l'efficienza d'uso degli elementi nutritivi (Chien et al., 2009). L'adozione di strategie che consentano di fertilizzare con elevata efficienza agronomica permette teoricamente di perseguire congiuntamente i vari obiettivi.

A livello applicativo, però, non sempre gli obiettivi agronomici, economici e ambientali collimano. I valori medi spesso riportati in letteratura indicano efficienze d'uso nell'impiego degli elementi nutritivi non molto elevate. Ladha et al. (2005), analizzando dati relativi a numerosi esperimenti, indicano valori di efficienza d'uso del fertilizzante azotato in media non superiori al 50% a seguito di perdite per lisciviazione, denitrificazione, volatilizzazione, erosione o riduzione della disponibilità (immobilizzazione nei composti organici, retrogradazione), come anche indicato da Weinbaum et al. (1992) e Chien et al. (2009). Stime recenti relative all'utilizzazione dei fertilizzanti azotati nella

* Dipartimento di Agronomia, Selvicoltura e Gestione del territorio, Università di Torino

** Dipartimento di Scienze delle Produzioni Vegetali, Università di Bari

*** Assessorato Agricoltura, Regione Emilia Romagna

produzione di cereali a livello mondiale riportano valori di efficienza prossimi al 33% (Raun e Johnson, 1999). Questi valori risultano ancora minori per i concimi fosfatici con stime di efficienza d'uso variabili tra il 10 e il 30% e con risorse che, in relazione alle tecnologie attualmente disponibili, appaiono temporalmente limitate (Varanini et al., 2008).

Le efficienze d'uso degli elementi nutritivi nei nostri ambienti, non risultano sempre così basse. Per esempio Montemurro (2003) riporta valori di recupero apparente del fertilizzante azotato pari al 58% per il mais, Delogu et al. (1998), del 63% per l'orzo e 56% per il frumento, e Tei et al. (2002) valori superiori al 68% per il pomodoro da industria. Anche in Italia, però, l'incremento della capacità d'uso delle risorse nutritive da parte delle piante rimane un obiettivo importante da perseguire e sia il mondo della ricerca scientifica che quello industriale sono fortemente impegnati a ridurre le contaminazioni dell'ambiente e salvaguardare le caratteristiche quali-quantitative delle produzioni (Rahn, 2010). Inoltre, i valori di efficienza elevati osservati in alcune condizioni si riferiscono prevalentemente ad attività di sperimentazione e comunque all'impiego di dosi vicine a quelle ottimali e ad applicazioni frazionate dei fertilizzanti. Le efficienze d'uso del fertilizzante azotato, infatti, tendono a diminuire proporzionalmente all'aumentare della quantità apportata e a incrementare con il frazionamento degli apporti (Weinbaum et al., 1992).

Va inoltre osservato che a livello aziendale l'empirismo ancora esistente nella definizione dei fabbisogni nutrizionali delle colture e degli apporti ottimali, ma anche l'elevata variabilità spaziale e temporale della crescita e produzione causata, a sua volta, dalla variabilità delle proprietà del suolo e dell'andamento climatico, determinano spesso il verificarsi di efficienze d'uso basse. Inoltre, grande importanza assumono la tipologia di fertilizzante applicato, l'epoca di somministrazione e la modalità di distribuzione in funzione del tipo di coltura.

Questo lavoro intende pertanto descrivere le strategie disponibili per ottimizzare la gestione della fertilizzazione dei seminativi, discutendone pregi e difetti in una logica agronomica e ambientale e suggerendo gli approcci che possano consentire di aumentare l'efficienza di questa pratica agronomica in Italia. In particolare, dopo alcune considerazioni sul consumo dei fertilizzanti in Italia, e sulla sua evoluzione nell'ultimo ventennio, si concentrerà l'attenzione sulla definizione dei fabbisogni fertilizzanti (dose ottimale di elementi nutritivi da apportare). A tal fine si utilizzerà come riferimento il bilancio degli elementi nutritivi nel sistema suolo-pianta e si descriveranno approcci caratterizzati da diverso grado di complessità: il bilancio medio, il bilancio stagionale semplificato, il bilancio stagionale prevedente l'impiego di indica-

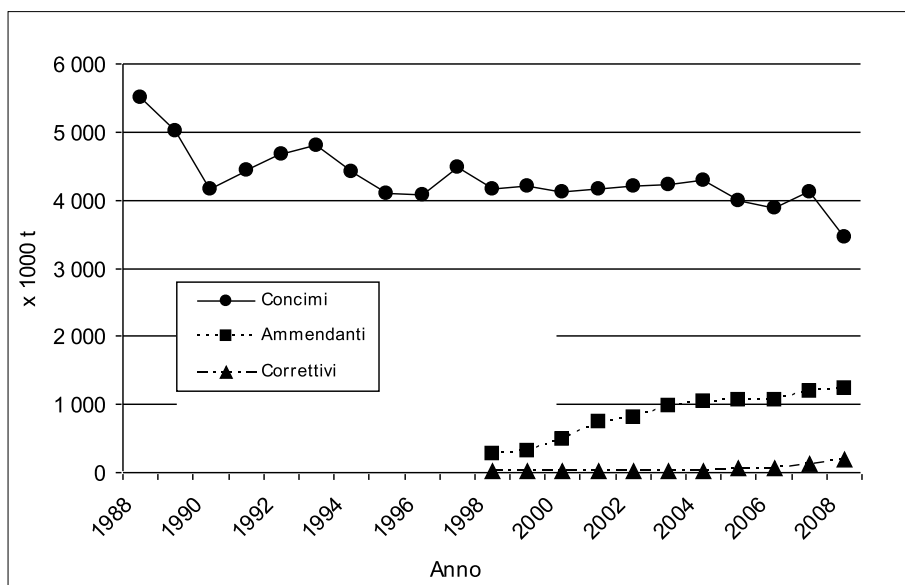


Fig. 1 *Quantitativo di concimi, ammendanti e correttivi commercializzati in Italia da 1988 al 2009 (dati rielaborati da ISTAT)*

tori colturali. Saranno infine descritte le potenzialità di questi ultimi, poiché gli indicatori colturali consentono di tener conto e di gestire la variabilità spaziale e temporale nella crescita delle colture, e di modificare di conseguenza la stima dei fabbisogni fertilizzanti inizialmente stabiliti, rappresentando quindi il presupposto per l'applicazione di strategie di fertilizzazione sito specifica. Allo scopo di riportare i risultati dell'attività di ricerca e sperimentazione condotta sul territorio nazionale, si forniranno esempi basati su alcune colture guida: frumento tenero, grano duro, mais, pomodoro e barbabietola da zucchero. In questa nota si farà riferimento alla sola ottimizzazione della gestione della concimazione azotata.

EVOLUZIONE NEL CONSUMO DEI FERTILIZZANTI

L'impiego dei fertilizzanti può essere descritto dai dati ISTAT relativi al loro impiego (Istat, 2010). In figura 1 e 2 si riporta un'aggregazione a livello nazionale dei dati provinciali disponibili a partire dal 2008.

Con riferimento agli ultimi 21 anni si nota che l'impiego dei concimi minerali ha subito una forte riduzione alla fine degli anni 80, per poi sostan-

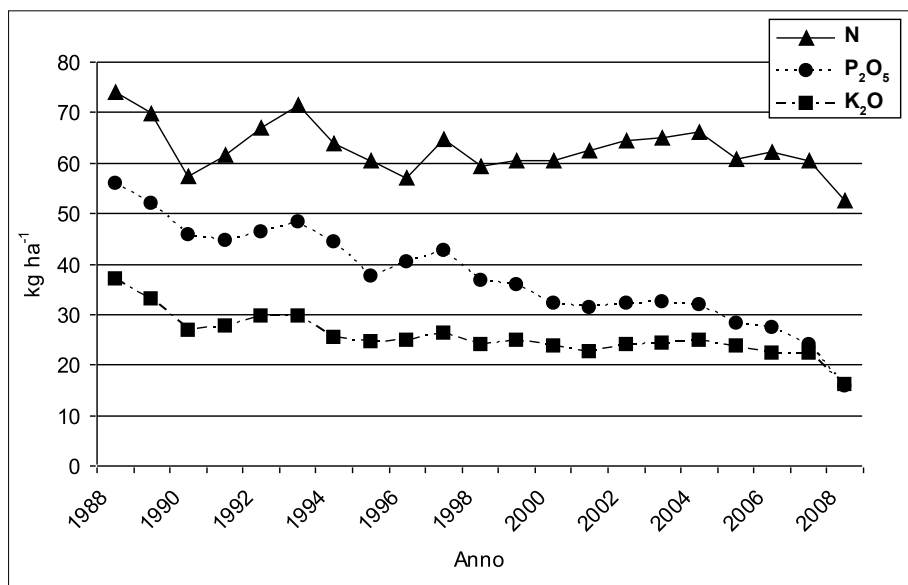


Fig. 2 Unità di macroelementi inclusi nei fertilizzanti commerciali utilizzati in Italia dal 1988 al 2009 (dati rielaborati da ISTAT)

zialmente stabilizzarsi nel quindicennio successivo (fig. 1). Il mercato è risultato nuovamente instabile e tendenzialmente in decrescita a partire dal 2005. All'opposto il consumo di fertilizzanti appartenenti alla categoria dei correttivi, ma soprattutto degli ammendanti (censiti dall'ISTAT solo dal 1998), è risultato essere in continua crescita negli ultimi 11 anni. L'aumento del consumo degli ammendanti equilibra la riduzione del consumo dei concimi minerali.

I dati relativi ai consumi unitari dei tre principali macroelementi sono riportati in figura 2. Da essi emerge una notevole variazione relativa nell'impiego di azoto (N), fosforo (P) e potassio (K). Si nota infatti una forte riduzione nell'uso di P, un calo meno pronunciato nell'uso di K, mentre una maggiore costanza nell'impiego dell'N a partire dal 1990, fatta eccezione per una nuova riduzione riscontrata nell'ultimo biennio (2007-2009). Nel periodo considerato, quindi, al progressivo ridursi nel consumo dei concimi, è corrisposto un aumento del rapporto N/P e N/K di quelli impiegati. Dai dati riportati risulta che oggi i due rapporti sono intorno a 2,5. Per N/P tale valore è prossimo all'effettivo rapporto riscontrabile nella composizione della sostanza secca asportata per la maggior parte delle colture. Per N/K tale valore è adatto alle colture da granella, avvicinandosi alla composizione delle cariossidi, ma troppo alto con riferimento alle colture la cui intera produzione

è asportata dal campo (raccolta sia della granella che dei residui pagliosi). È comunque necessario considerare che gli elevati apporti di concimi potassici spesso effettuati in passato hanno determinato il costituirsi in molti suoli di riserve elevate dell'elemento, che potrebbero giustificare l'attuale riduzione riscontrata.

IL BILANCIO DEGLI ELEMENTI NUTRITIVI

Il bilancio colturale tra apporti e asportazioni delle colture costituisce il punto di partenza e il fulcro per la definizione e interpretazione delle strategie impiegabili per stabilire gli apporti di elementi nutritivi alle colture. Grignani et al. (2003) forniscono un quadro di riferimento delle voci spesso incluse in tale bilancio, che è una semplificazione del più complesso ciclo dell'azoto nel sistema suolo-pianta. In relazione alle voci riportate nella tabella 1 la dose di concime da apportare (F_c) può essere descritta secondo la seguente formula:

$$F_c = Y * b - (F_o + B_{fx} \pm S \pm M_p + M_f + D_a) + Z$$

Quando si applica la formula si adottano alcune semplificazioni pratiche. Fare chiarezza sulle semplificazioni a cui si ricorre è necessario per orientare la concimazione verso l'adozione di criteri di maggiore razionalità. Si noti innanzitutto che così come è proposta la formula di bilancio fa riferimento a un periodo di durata superiore al ciclo colturale e quindi, normalmente, a un intero anno.

La voce ($Y*b$), che corrisponde alle asportazioni di elementi nutritivi operate dall'intera pianta, può essere suddivisa in asportazioni operate dalla produzione utile raccolta (Y_u e b_u), asportazioni operate da paglie e da altri residui non raccolti (Y_p e b_p), e asportazioni operate da parte degli apparati radicali (Y_r e b_r) (tab. 1). Nell'ottica di gestire a livello aziendale la fertilizzazione, le asportazioni degli apparati radicali sono sempre da trascurare per l'oggettiva difficoltà di misura e perché possono essere considerate come sottocicli di quantità di elementi nutritivi poco suscettibili di perdite o blocco. La distinzione tra Y_u (e b_u) e Y_p (e b_p) dovrebbe invece essere sempre esplicita. Di fatto in alcuni casi non lo è e si confonde la somma ($Y_u + Y_p$) con la sola produzione utile Y_u anche quando i residui sono lasciati in campo. Nei casi in cui solo Y_u sia effettivamente raccolto e Y_p lasciato in campo (ad esempio nel mais da granella, quando stocchi e foglie sono interrati, o nella coltivazione del pomodoro), se il metodo di bilancio utilizzato considera (Y_u

		BIL. CULTURALE MEDIO	BILANCIO CULTURALE STAGIONALE	
		“Limite Massimo”	“Produzione Integrata”	“Indicatori culturali”
Y	Produzione della coltura distinguibile in parte utile raccolta (Yu), paglie o altri residui non raccolti (Yp) e radici (Yr)	Sì, medio	Sì, stagionale	Sì, medio
b	contenuto in N (P o K) della coltura distinguibile (come Y) in bu, bp e br	Sì, medio	Sì, stagionale	Sì, medio
±S	Mineralizzazione/Organicizzazione o altri apporti/immobilizzazioni a carico di pool stabili del suolo	No	Sì, medio	Sì, stagionale
±Mp	Mineralizzazione/Organicizzazione da paglie o altri residui del ciclo culturale precedente	No	Sì, stagionale	Sì, stagionale
Mf	Effetto residuo di apporti di effluenti zootecnici, compost o ammendanti la cui efficacia fertilizzante si manifesta oltre l'anno di somministrazione	No	Sì, stagionale	Sì, stagionale
Da	Deposizioni atmosferiche secche o umide	No	No	No
Bfx	Azotofissazione (in genere di leguminose)	Sì, medio	Sì, medio	Sì, medio
Fc	Apporti da concimi minerali, organo-minerali o organici	Sì, medio	Sì, stagionale	Sì, stagionale
Fo	Apporti da effluenti zootecnici, compost o altri ammendanti	Sì, medio	Sì, stagionale	Sì, stagionale
Z	Perdite, distinguibili in lisciviazione (Zl), ruscellamento superficiale (Zr), volatilizzazione di ammoniaca (Zv) emissione di ossido o protossido di azoto (Zp) o denitrificazione (Zd)	No	Sì, stagionale per la sola lisciviazione	Sì, stagionale

Tab. 1 *Voci del bilancio culturale degli elementi nutritivi e confronto di tre diverse modalità di gestione della fertilizzazione, che considerano le diverse voci come valore medio o valore modulato stagionalmente*

+ Yp), allora diventa importante considerare l'apporto di elementi nutritivi dovuto alla mineralizzazione dei residui culturali con il termine Mp. In rari casi può risultare giustificato considerare Mp negativo, per indicare un blocco di elementi nutritivi dovuto al prevalere di fenomeni di organizzazione (ad esempio a seguito di un apporto molto elevato di paglia). In questi casi, però, tale immobilizzazione deve essere contabilizzata come apporto da parte della mineralizzazione di sostanza organica del suolo (S) negli anni successivi.

La voce Mf dovuta a precedenti apporti di effluenti zootecnici, compost

o ammendanti stabili perché a elevato rapporto C/N risulta di interessante quantificazione solo se riferita ad apporti saltuari o irregolari. Nel caso di somministrazione regolare, invece, la voce M_f può essere inclusa nella quota F_o semplificando l'applicazione della formula del bilancio. In un equilibrato piano di concimazione vale la regola che nel lungo periodo le voci di blocco e mineralizzazione tendono a equilibrarsi almeno per l'N.

La voce di apporto via deposizioni umide o secche (Da) è di necessaria quantificazione solo per N e va considerata pari a un valore compreso tra 20 e 30 kg N ha⁻¹ anno⁻¹.

Il termine B_{fx} indica l'azotofissazione. L'azotofissazione è importante per le leguminose e una serie di valori validi per gli ambienti italiani possono essere dedotti da Grignani et al. (2003). In assenza di altre informazioni più di dettaglio, può essere ritenuto accettabile il considerare le principali leguminose coltivate in Italia come autosufficienti in termini di N ($B_{fx} = Y \cdot b$). Quando si apporta N alle leguminose, la stessa quantità deve essere sottratta a B_{fx} (per l'effetto depressivo della concimazione azotata sull'azotofissazione) o deve essere quantificata con segno opposto nel termine M_p a favore del ciclo colturale successivo (può essere, ad esempio, il caso di prati avvicendati con leguminose che ricevono effluenti zootecnici e che liberano notevoli quantità di N nella coltura da rinnovo).

Varie considerazioni devono essere effettuate circa la quantificazione della voce Z relativa alle perdite.

Innanzitutto le perdite potrebbero essere distinguibili in lisciviazione (Z_l), ruscellamento superficiale (Z_r), volatilizzazione di ammoniaca (Z_v), emissione di ossido o protossido di azoto (Z_p) o denitrificazione (Z_d). Nelle applicazioni del bilancio al piano di concimazione si distingue al massimo la voce Z_l , dalle altre, ma è più frequente il caso in cui vengano considerate congiuntamente.

Le perdite sono sempre da minimizzare (fino al livello delle cosiddette "perdite inevitabili"), ma non sono annullabili e quindi gli apporti di fertilizzante ne devono sempre tenere conto. L'applicazione rigorosa dell'equazione di bilancio quantifica le perdite come differenza tra le voci riportate nell'equazione precedente

$$Z = F_c + (F_o + B_{fx} \pm S \pm M_p + M_f + Da) - Y \cdot b$$

Nei piani di concimazione la voce delle perdite viene quantificata ricorrendo a "coefficienti di efficienza", come ad esempio riportato per gli effluenti zootecnici nei Programmi di Azione regionali in applicazione della Direttiva

Nitrati (DM 7 aprile 2006) o nei disciplinari di produzione integrata predisposti da varie Regioni in conformità alle “Linee guida nazionali per la produzione integrata delle colture” (DM 2722 del 17/04/2008). I coefficienti di efficienza esprimono le perdite come frazione della quantità di fertilizzante apportato e delle disponibilità naturali:

$$Z = (1 - kc) * Fc + (1 - ko) * Fo + (1 - kt) * (\pm S \pm Mp + Mf + Da)$$

La voce kc indica l'efficienza della concimazione minerale. Negli ultimi anni, dopo l'applicazione anche in Italia della Direttiva Nitrati, si considera spesso che kc sia pari a 1, secondo un'interpretazione che confonde l'efficienza del concime chimico con l'obiettivo di politica agro-ambientale derivante dalla necessità di consentire l'uso dei concimi minerali nelle aziende zootecniche solo se impiegati con elevata efficienza agronomica e se il migliore impiego possibile degli effluenti zootecnici non risulti sufficiente a soddisfare il fabbisogno delle colture. Nelle aziende non zootecniche l'impiego del valore 1 è privo di senso agronomico e ambientale. Sarebbe meglio proporre un valore obiettivo molto elevato (ad esempio 0,80), ma realizzabile.

La voce ko indica l'efficienza della fertilizzazione con effluenti zootecnici, compost o altri ammendanti. Per la quantificazione di ko si fa riferimento in genere a quanto riportato in applicazione alla Direttiva Nitrati (DM 7 aprile 2006) dove le efficienze oscillano intorno a valori prossimi allo 0,50, suggerendo quindi un'elevata perdita di azoto nell'ambiente associata all'uso di tali fertilizzanti.

La voce kt è detta “coefficiente tempo” e indica la parte di apporti naturali derivanti dal suolo o dall'atmosfera che risultano disponibili per la coltura in relazione al suo specifico ciclo colturale (Ermes Agricoltura, 2010). Per le colture che coprono il terreno tutto l'anno è pari a 1 (ad esempio i prati), per le colture primaverili estive con ciclo inferiore all'anno, ma assorbimento sincrono ai flussi di mineralizzazione dalla sostanza organica del suolo è di circa 0,70 (ad esempio mais, pomodoro o girasole), per le colture autunno vernine è più basso e di circa 0,60 (ad esempio frumento). Si riduce ulteriormente a valori inferiori a 0,50 nel caso di colture orticole di breve ciclo.

La voce relativa alle vere perdite (Z) non va confusa con le immobilizzazioni reversibili stimate, nell'equazione citata, dalle immobilizzazioni a carico dei pool organici del suolo a lungo turnover ($-S$) o con le immobilizzazioni di breve periodo conseguenti alle somministrazioni di paglie o altri residui organici a elevato rapporto C/N ($-Mp$).

Nel considerare lo sviluppo futuro dei piani di concimazione deve essere considerata criticamente l'utilità di impiegare i coefficienti di efficienza della

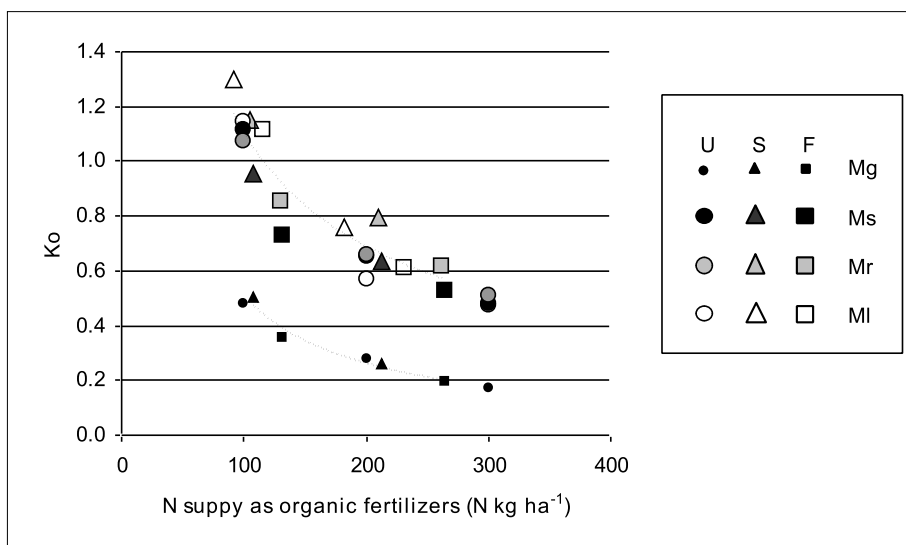


Fig. 3 Variazione del coefficiente di efficienza di apporti crescenti di azoto in funzione della forma del fertilizzante (U urea, S liquame bovino e F letame bovino), su diverse colture (Mg, mais granella, Ms mais insilato, Mr mais insilato – loiessa, Ml mais e prato) (da Zavattaro, dati inediti)

concimazione (kc e ko). L'impiego empirico di tale approccio potrebbe essere considerato corretto solo se effettivamente l'efficienza della concimazione rimanesse costante, almeno nell'intervallo di valori nell'ambito dei quali variano gli apporti di fertilizzanti. Questo è impossibile, anche sul piano teorico, perché kc e ko variano sempre in funzione di un complesso di fattori tra cui gli apporti di concimi (fig. 3). Quindi utilizzare nei piani di concimazione i coefficienti di efficienza per calcolare la quantità di concime da apportare, quando il coefficiente dipende da tale quantità, risulta evidentemente contraddittorio. È auspicabile che in futuro il coefficiente di efficienza nella redazione dei piani di concimazione sia superato e un'effettiva quantificazione delle perdite accettabili sia inclusa esplicitamente.

Il metodo del bilancio è di difficile applicazione nella sua versione completa. Le principali difficoltà che gli agricoltori spesso lamentano riguardano, soprattutto, la necessità di effettuare calcoli non facili e che richiedono l'utilizzo di opportuni software per minimizzare gli errori e rendere confrontabili i risultati. Un'ulteriore difficoltà è collegata alla diffusa reticenza ad acquisire in modo preciso e ordinato tutta una serie di informazioni che riguardano le caratteristiche chimico-fisiche del terreno e la storia agronomica degli appezzamenti. Occorre anche aggiungere che il metodo prende in considera-

zione fattori difficilmente stimabili e ciò determina che in alcune situazioni non si riesca a simulare in modo adeguato la realtà. Risulta quindi agli occhi dell'agricoltore non del tutto comprensibile e si configura come un adempimento burocratico più che una scelta tecnica. L'applicazione completa del metodo del bilancio è quindi di scarso significato applicativo e sono necessarie opportune semplificazioni per consentirne l'impiego a livello aziendale. Tali semplificazioni riguardano il ricorso a bilanci medi o bilanci stagionali caratterizzati da diverso grado di complessità.

I bilanci medi trascurano la variabilità climatica interannuale e si concentrano su soli dati medi. Anche la variabilità tra diversi appezzamenti colturali viene trascurata, a meno che non si traduca in notevoli variazioni negli asporti delle colture. I bilanci stagionali tengono invece conto della variabilità di parametri climatici, pedologici e colturali, ma con approcci caratterizzati da diverso grado di complessità, in relazione al tipo e numero di parametri considerati, alla modalità prevista per la loro quantificazione (per classi o mediante equazioni regressive o deterministiche), e infine alla scala temporale con la quale vengono determinati.

Nella forma più semplice, infatti, il bilancio stagionale considera solo i valori di parametri calcolati nella fase iniziale del ciclo colturale. Nella forma più complessa, il bilancio stagionale può prendere in esame la variazione di alcuni indicatori nel corso del ciclo colturale (prevalentemente parametri relativi al suolo o alla pianta, ma anche di natura climatica) e di conseguenza calcolare apporti specifici in funzione di effettive esigenze della coltura. Tra i parametri che è possibile considerare, quelli colturali rivestono un ruolo molto importante perché la risposta della coltura racchiude in sé l'effetto dell'interazione dei numerosi fattori di natura diversa che concorrono a determinarla.

Di seguito saranno riportati esempi di applicazione i) di bilancio medio semplificato (a cui si farà riferimento come metodo del *Limite Massimo*), ii) di bilancio stagionale semplificato (a cui si farà riferimento come metodo della *Produzione Integrata*) e infine iii) di bilancio stagionale prevedente l'impiego del metodo degli *Indicatori Colturali* per il monitoraggio e controllo della variabilità spazio-temporale nell'accrescimento delle colture.

UN'APPLICAZIONE SEMPLIFICATA DEL BILANCIO AZOTATO MEDIO: IL METODO DEL *LIMITE MASSIMO*

Un sistema molto semplice per gestire la fertilizzazione delle colture è quello utilizzato nell'applicazione più diffusa dei Programmi di Sviluppo Regionali

	PIEMONTE	EMILIA ROMAGNA	PUGLIA	MEDIA	DEV.ST.
Grano duro (gran.)		2,46	2,24	2,28	0,21
Grano duro (pt. intera)	3,00	3,18	2,50	2,94	0,25
Grano tenero (gran.)		1,98	2,13	2,10	0,15
Grano tenero (pt. intera)	2,60	2,46		2,59	0,19
Grano tenero FF/FPS (gran.)		2,41		2,41	
Grano tenero FF/FPS (pt intera)	3,00	2,89		2,96	0,06
Mais da granella (gran.)		1,50	1,58	1,56	0,18
Mais da granella (pt. intera)	2,20	2,22		2,27	0,23
Mais trinciato (tal quale)	0,40	0,37		0,39	0,10
Barb. da zucchero (pt. intera)	0,30	0,27	0,45	0,31	0,05
Pomodoro da industria	0,30	0,25	0,20	0,26	0,04

Tab. 2 *Asporti unitari di azoto espressi in kg N per 100 kg di produzione. Confronto tra dati proposti per l'applicazione dei disciplinari di produzione integrata in tre Regioni Italiane e come media di tutte le Regioni Italiane (da documentazione elaborata del Gruppo Tecniche Agronomiche – Produzione Integrata). FF/FPS indica grani di forza o speciali*

(Reg. CE n° 2078/92, 1257/99 e 1698/2005) quando si stabilisce un tetto massimo per la concimazione. Esso rappresenta una applicazione del bilancio medio. Come si evince dalla tabella 1, questo approccio (al quale per semplicità ci si riferirà qui come metodo del *Limite Massimo*), nella sua veste più semplificata, è quello che prende in considerazione il minore numero di voci di bilancio.

Questa strategia è stata utilizzata in varie Regioni d'Italia a partire dagli anni 90 per la adozione di pratiche di fertilizzazione più rispettose dell'ambiente e della salute dell'uomo e per consentire alle aziende agricole che aderivano a tali misure agro-ambientali di percepire un premio commisurato all'attesa perdita di reddito aziendale per gli impegni specifici assunti. Oltre alla pratica applicazione del regolamento e al conseguente premio per le aziende, in termini più generali la strategia Limite Massimo ha informato programmi di assistenza tecnica e reso possibile lo sviluppo di "Disciplinari di Produzione Integrata" (DPI). Su questa base sono in fase di adozione marchi di qualità che potrebbero promuovere commercialmente i prodotti agricoli.

La semplicità del metodo Limite Massimo è insita nel fatto che è un bilancio medio. Esso trascura quindi la variabilità climatica interannuale e si concentra sul solo dato di asporto e apporto. L'equazione di bilancio è quindi

estremamente semplificata e, se non sono apportati effluenti zootecnici o altri fertilizzanti organici, è riconducibile alla seguente:

$$F_c = Y b - B f_x,$$

dove Y e b si riferiscono alla sola produzione utile. Per le leguminose è presa implicitamente in considerazione anche la voce relativa all'azotofissazione, pertanto F_c è ridotto rispetto a Yb della quantità Bf_x .

Il livello massimo produttivo Y è legato a statistiche regionali, il contenuto b in elementi nutritivi è stabilito normalmente da valori medi pubblicati dalle Regioni con riferimento al loro intero territorio (tab. 2). I vantaggi e gli svantaggi del metodo Limite Massimo derivano entrambi dall'estrema semplicità dell'approccio. Da un lato questo metodo non prevede difficili controlli sulle modalità di formulazione del bilancio, dall'altro non consente alcun adattamento alle specifiche situazioni aziendali.

Si può concludere che questi metodi così semplificati servono solo per esprimere valori di riferimento (*baseline*), limiti massimi da non superare per l'applicazione di regolamenti agro-ambientali (valori soglia) o come base di ragionamento per applicare più evoluti indicatori colturali della fertilizzazione, che vengono discussi in seguito.

DAL BILANCIO MEDIO AL BILANCIO STAGIONALE: NECESSITÀ DI INDICATORI PER STIMARE LA VARIABILITÀ

I metodi basati sul bilancio medio degli elementi nutritivi per la definizione dei fabbisogni nutrizionali delle colture si fondano sulla definizione della produzione attesa e sulla stima della disponibilità potenziale media di nutrienti nel suolo durante il ciclo colturale. Tuttavia la disponibilità potenziale di elementi nutritivi nel suolo è estremamente variabile in funzione delle caratteristiche pedologiche, delle modalità di gestione agronomica (lavorazioni del terreno, precessione colturale, gestione dei residui colturali, ecc.) e soprattutto della variabilità interannuale delle condizioni climatiche che fa sì che nella stessa località il potenziale produttivo possa differire estremamente negli anni come dimostrato dai risultati di numerosi esperimenti di lungo termine (Scharf et al., 2006).

Per questo motivo risulta estremamente importante considerare altri indicatori di natura climatica, pedologica, colturale e relativi alla gestione agronomica che consentano di tener conto della variabilità tra siti diversi, nell'am-

bito dello stesso anno, e di quella interannuale, nell'ambito dello stesso sito. La quantificazione di tali indicatori consente il calcolo di bilanci stagionali. Come prima indicato, i bilanci stagionali possono prevedere l'impiego di indicatori più o meno semplificati e calcolati nella sola fase iniziale del ciclo colturale, al fine di definire una dose "media" annuale (approccio statico), o nel corso del ciclo colturale, con l'obiettivo di calcolare apporti specifici in funzione delle effettive esigenze della coltura (approccio dinamico). Di seguito saranno descritti entrambi gli approcci e, nel caso dell'approccio dinamico, sarà fatto particolare riferimento all'impiego di indicatori colturali.

METODO SEMPLIFICATO PER CALCOLARE UN BILANCIO STAGIONALE:

IL METODO DELLA PRODUZIONE INTEGRATA

BASATO SULL'IMPIEGO DI INDICATORI SINTETICI

L'eccessiva rigidità del metodo Limite Massimo può essere superata se l'azienda è disposta a quantificare anche altre voci dell'equazione del bilancio. In questo caso è possibile modificare tra diversi anni sullo stesso appezzamento o tra diversi appezzamenti nello stesso anno la dose (F_c) di concime da apportare in funzione di variabili ambientali e agronomiche che possono essere prese in considerazione. Per questo si parla di bilancio colturale stagionale (Grignani et al., 2003). Per arrivare a questa quantificazione occorrono indicatori capaci di descrivere altre voci di bilancio, quali quelle relative al suolo, alla mineralizzazione dei residui colturali o alle perdite. Ci si può basare su semplici indicazioni empiriche o su misure dirette sulla coltura o sul suolo. Una proposta di applicazione di bilancio colturale stagionale basato su indicazioni empiriche è stata originariamente avanzata dalla Regione Emilia Romagna nell'ambito dell'applicazione del proprio PSR, e il metodo è stato denominato "Scheda a dose standard". Tale metodo è stato poi adottato a livello nazionale per la gestione della fertilizzazione per il Marchio di Produzione Integrata. In questo paragrafo si descrive questo approccio come metodo Produzione Integrata (tab. 1).

Il punto di partenza nel metodo Produzione Integrata è simile a quello Limite Massimo: ci si riferisce a una situazione standard e si calcola una dose di concime F_c adatta alla previsione di asporto Y_b sulla base del bilancio descritto. Nel metodo Produzione Integrata, però, si prevede la valutazione di una serie di indicatori che consentono di prendere in considerazione altre voci del bilancio. Lo schema logico utilizzabile è riportato in tabella 3.

I parametri considerati per modificare le condizioni di riferimento e i rispettivi valori variano in funzione delle specie coltivate. In particolare, ven-

VOCE	INDICATORE DI VARIAZIONE	DETERMINA UN AUMENTO DI FC	DETERMINA UNA DIMINUIZIONE DI FC
Y	Produzione attesa variabile da + 20% a - 20% rispetto allo standard	Y superiore a soglia	Y inferiore a soglia
	Epoca di semina	Data di impianto molto anticipata	
b	Scelta varietale	Utilizzo di varietà ad alto contenuto proteico	
±S	Contenuto di sostanza organica (SO) del suolo	SO bassa	SO alta
±Mp	Tipo di precessione culturale	Cereale con interrimento paglia	Sovescio di leguminosa
Mf	Effetto residuo di apporti di letame o compost		Realizzati apporti di ammendanti
Z	Perdite per lisciviazione a seguito di forte piovosità invernale (piogge del periodo ottobre-marzo)	> 300 mm	

Tab. 3 *Voci di bilancio culturale stagionale utilizzate per adottare il metodo Produzione Integrata. Si riporta per tutte le voci che si adattano alle mutevoli situazioni ambientali, l'indicatore di variazione adottato e gli effetti sulla dose Fc di concime da apportare*

gono presi in esame fattori di variazione della produzione attesa (Y), delle asportazioni unitarie (b) e della disponibilità di elementi nutritivi nel suolo. Questi ultimi consentono di adattare il bilancio alle caratteristiche pedologiche e alla tecnica agronomica adottata. Infine viene considerato l'effetto dell'andamento climatico, e in particolare del regime pluviometrico, sulle perdite di elementi dal sistema (Z).

I fattori di variazione della produzione attesa (Y) e delle asportazioni unitarie (b) considerati dal metodo si riferiscono all'epoca di semina e al tipo di varietà impiegata. I fattori di variazione delle disponibilità di elementi nel suolo riguardano la fertilità media dello stesso, espressa come contenuto in sostanza organica, la precessione culturale e la gestione dei residui, l'apporto di ammendanti organici. Per definire l'aumento complessivo massimo si riportano delle soglie da non superare che sono inferiori alla somma di tutte le voci di incremento previste dalla tabella 3.

Le entità delle correzioni in incrementi o decrementi, in genere, sono state definite seguendo criteri empirici di buon senso agronomico rifacendosi

VOCE	INDICATORE SINTETICO DI VARIAZIONE	FRUMENTO TENERO	FRUMENTO DURO	MAIS GRANELLA
Y	Y superiore a soglia	+ 30	+ 25	+ 30
	Y inferiore a soglia	- 30	- 25	- 30
b	Varietà ad alto contenuto proteico	+ 15		
	Varietà a basso contenuto proteico	- 15		
±S	SO bassa	+ 15	+ 15	+ 15
	SO alta	- 15	- 15	- 15
±Mp	dopo cereale con interrimento paglia	+ 30	+ 30	+ 30
	dopo medicaio	- 80	- 80	- 80
	dopo prati consociati graminacee e leguminose	- 40	- 40	- 40
Mf	Realizzati apporti di ammendanti	- 20		
Z	> 300 mm da ottobre a febbraio	+ 20	+ 20	+ 20
Massimo incremento di Fc		+ 40	+ 30	+ 70

Tab. 4 *Esempi di fattori correttivi del bilancio culturale, espressi sotto forma di apporti di N in kg ha⁻¹ medio per l'applicazione del metodo della Produzione Integrata a seguito della variazione di indicatori sintetici*

comunque sempre alle conoscenze acquisite nell'applicazione del metodo del bilancio (tab. 4).

Numerose verifiche sperimentali, relative soprattutto all'elemento azoto e alle colture a ciclo autunno vernino, hanno dimostrato che questo metodo permette di determinare con sufficiente precisione gli apporti ottimali di concimi e riduce al contempo eccessi che aumentano i rischi di inquinamento. A tale proposito si riportano i risultati di prove di verifica condotte su frumento tenero in 52 località alla fine degli anni 90 nell'ambito del progetto "Getramin" (fig. 4).

Le valutazioni effettuate nell'ambito delle azioni di monitoraggio previste dalle misure agro-ambientali dei Programmi di Sviluppo Rurale hanno permesso di verificare che le tecniche di fertilizzazione proposte nei DPI permettono un "risparmio" di unità fertilizzanti dell'ordine del 30%, e risultati produttivi in termini quantitativi e qualitativi generalmente non inferiori a quelli raggiunti con le tecniche usuali. I maggiori costi riguardano aspetti gestionali, come analisi del terreno, predisposizione del piano di fertilizzazione, registrazione degli impieghi, maggior numero di distribuzioni.

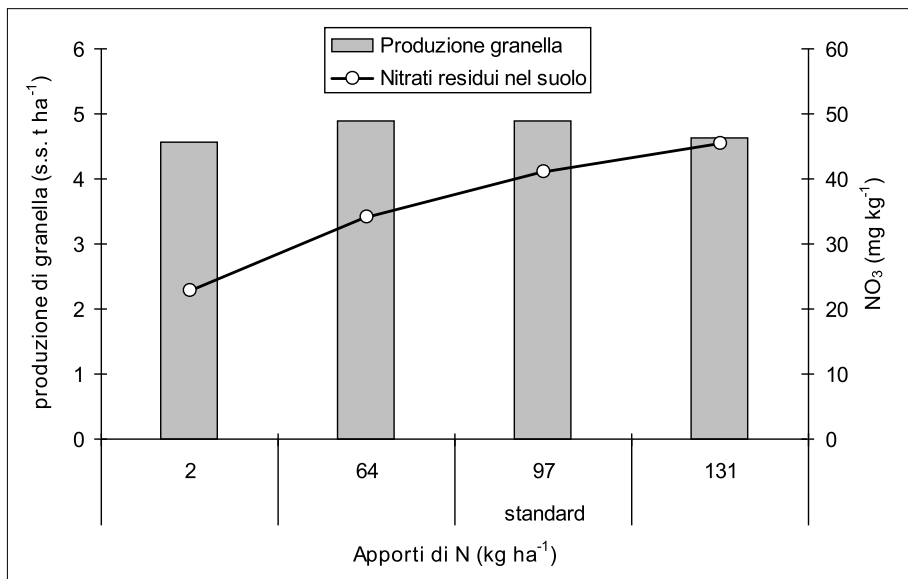


Fig. 4 Effetti sulla produzione di granella di frumento e sul contenuto di nitrati nel suolo di crescenti livelli di concimazione azotata, di cui uno corrispondente alla applicazione della dose standard di azoto (valori medi su 52 prove nell'ambito del progetto "Getramin" della Regione Emilia Romagna)

Tuttavia la variabilità e non predittività a medio termine dell'andamento climatico fa sì che spesso i fabbisogni definiti all'inizio del ciclo colturale possano non rivelarsi adeguati. Condizioni climatiche limitanti possono infatti modificare le dinamiche di crescita e di asportazione delle colture, ma anche indirizzare sia i cicli biogeochimici degli elementi che il movimento degli stessi nel sistema, facendo variare le disponibilità stimate a priori seppure attraverso l'impiego di accurate indagini biochimiche.

Ad aggiungere ulteriore complessità al sistema c'è la variabilità spaziale di proprietà statiche del suolo che, prevalentemente in funzione delle caratteristiche topografiche, può determinare la presenza di aree contraddistinte da considerevole diversità. La variabilità spaziale delle caratteristiche del suolo, interagendo con le condizioni climatiche, può inoltre generare una variabilità della crescita delle colture interna all'appezzamento anche nel corso della stessa stagione di crescita. La differente distribuzione delle componenti tessiturali e la loro interazione con il regime pluviometrico durante il ciclo colturale possono per esempio influenzare la capacità di ritenzione idrica del terreno con conseguente effetto sulla crescita delle colture e sulle asportazioni di N (Basso et al., 2009).

La grande influenza che l'interazione della variabilità spaziale e temporale è in grado di esercitare sulla disponibilità di risorse (in particolare acqua e nutrienti), e di conseguenza sull'accrescimento delle colture, può essere gestita mediante l'adozione di approcci dinamici basati sul monitoraggio dell'andamento di parametri di natura climatica, pedologica e colturale durante il ciclo di crescita al fine di adattare la dose definita a priori ai reali fabbisogni delle colture. Un tale tipo di approccio consentirebbe di ridurre sotto e sovrastime dei fabbisogni nutrizionali incrementando la sostenibilità economica e ambientale del processo produttivo.

La problematica della variabilità spazio-temporale delle disponibilità di nutrienti riguarda in particolare l'N a causa dell'elevata influenza delle condizioni termo-udometriche del suolo sui cicli biogeochimici e dell'effetto dell'andamento climatico sulla disponibilità dell'elemento apportato mediante interventi di fertilizzazione, in particolar modo se si considerano prodotti a lento rilascio e a rilascio controllato.

Nonostante l'interesse suscitato dalle possibilità di modulare gli apporti di elementi nutritivi in funzione degli effettivi fabbisogni nutrizionali (mediante monitoraggio di parametri pedologici, climatici, colturali), molti degli approcci a disposizione sono ancora in fase di definizione e alcuni di essi risultano poco adatti dal punto di vista applicativo. Tuttavia, soprattutto in futuro potranno assumere sempre più valore. In relazione all'impiego di indicatori colturali, per esempio, nonostante gli studi finora effettuati, e i lavori di sintesi condotti sull'argomento (Schröder et al., 1998; Lemaire et al., 2008), sussistono ancora incertezze su quali siano le metodiche e gli strumenti diagnostici più efficaci per supportare le scelte degli agricoltori e soprattutto sulle modalità di interpretazione dei risultati.

Di seguito saranno descritte strategie miranti a razionalizzare la gestione della concimazione mediante impiego di indicatori colturali che consentono di calcolare un bilancio colturale stagionale dinamico.

CARATTERISTICHE DEGLI INDICATORI COLTURALI PER IL CALCOLO DI BILANCI COLTURALI STAGIONALI

L'impiego degli indicatori colturali, che si riferisce a un ampio range di procedure e metodologie che spaziano da analisi quantitative di laboratorio (diagnostica fogliare, diagnostica peziolare, determinazione quantitativa del contenuto di nitrati nella linfa, determinazione quantitativa della clorofilla nei tessuti o dell'attività di particolari enzimi, ecc.) fino a test rapidi semiquan-

titativi o qualitativi eseguibili direttamente in campo, si basa sul principio che «la pianta stessa rappresenti il miglior indicatore della disponibilità degli elementi nutritivi nel corso del periodo di crescita» (Tremblay, 2004; Olfs et al., 2005).

La valutazione dello stato nutrizionale della coltura al fine di modulare le applicazioni di fertilizzanti è sempre stata insita nella pratica agricola. Approcci empirici basati su osservazioni visive della densità o del colore, giudicate in modo assoluto o mediante il confronto con parcelle di riferimento, sono stati successivamente traslati nell'uso di carte colorimetriche. Queste ultime, anche se non hanno avuto grande diffusione in Europa vengono ampiamente impiegate in Asia per la programmazione degli apporti di fertilizzanti su riso (Olfs et al., 2005). La ricerca scientifica e tecnologica ha messo poi a disposizione tecniche analitiche e tecnologie sempre più sofisticate che rendono possibile anche in tempi rapidi, e con grande accuratezza, la differenziazione dello stato nutrizionale delle colture.

Lo stato nutrizionale della coltura può essere definito sia mediante impiego di indicatori diretti, basati sulla valutazione delle concentrazioni dei nutrienti nei tessuti, che indiretti, mediante determinazione di proprietà direttamente legate o influenzate dalla disponibilità di quegli elementi.

La concentrazione effettiva di elementi minerali nella pianta è infatti il risultato dell'interazione tra tutti i fattori che ne influenzano la disponibilità fino al momento del campionamento (contenuto dell'elemento nel suolo, tasso di mineralizzazione di composti organici quali sostanza organica nativa, residui colturali, fertilizzanti precedentemente applicati), stato idrico del suolo e della coltura, accrescimento dell'apparato radicale, efficienza di assorbimento, fenomeni di competizione nutrizionale sui siti di assorbimento), in pratica dell'insieme degli elementi elencati nel bilancio riportato (Rossi, 1972).

Tuttavia, come precedentemente indicato, lo stato nutrizionale della pianta può essere descritto anche con la valutazione di altri indicatori biochimici e fisiologici direttamente influenzati dalla variazione delle concentrazioni dell'elemento in esame. Nel caso dell' N , per esempio, poiché l'elemento riveste un ruolo fondamentale nella biochimica vegetale, una situazione di inadeguatezza nutrizionale ha ripercussioni su molteplici vie metaboliche fondamentali. Pertanto, parametri quali la concentrazione (e la fluorescenza) della clorofilla, le caratteristiche ottiche delle foglie, l'attività di specifici enzimi coinvolti in vie metaboliche che portano alla sua utilizzazione (nitrato-reduttasi), possono essere considerati potenziali indicatori dello stato nutrizionale azotato (Mambelli et al., 1997).

INDICATORI DIRETTI E INDIRETTI		DETERMINAZIONE ANALITICA	DETERMINAZIONE RAPIDA	
			PRINCIPIO	STRUMENTO
Concentrazione di N totale in specifici tessuti o nell'intera pianta		Digestione a umido (Kjeldahl), combustione a secco (Dumas)		
Concentrazione di N nitrico nella linfa o nei tessuti conduttivi		Cromatografia ionica, spettrofotometria, impiego di elettrodi iono-selettivi	Reazioni colorimetriche (e letture mediante carte colorimetriche o riflettometri) Elettrodi iono-selettivi portatili	Merckoquant test strips Nitrat Schnelltest Cardy-meter
Conte- nuto in clorofilla totale a livello di	foglia copertura vegetale	Spettrofotometria	Valutazione delle proprietà ottiche delle foglie o del manto vegetale (riflettanza, trasmittanza)	SPAD, Hydro N tester Strumenti dotati di <i>active light source</i> (greenseeker, cropcircle); radiometri multispettrali (Yara N-Sensor/FieldScan, Crop-scan, Field-spec, ecc.)
Contenuto in polifenoli (EPhen)		Spettrofotometria	Valutazione delle proprietà ottiche delle foglie (fluorescenza della clorofilla)	Dualux, Multiplex

Tab. 5 *Principali indicatori diretti e indiretti dello stato nutrizionale azotato delle colture e metodologie e strumenti impiegati per determinarli*

Poiché spesso le procedure di determinazione analitica di indicatori sia diretti che indiretti dello stato nutrizionale delle colture risultano complesse e onerose dal punto di vista temporale ed economico, grande interesse ha sempre suscitato la possibilità di disporre di metodologie rapide per la stima di parametri strettamente indicativi dello stato nutrizionale al fine di ridurre sia tempi che costi di esecuzione, ma anche di renderne possibile l'applicazione al di fuori del settore della ricerca scientifica (tab. 5).

Gli indicatori diretti o indiretti dello stato nutrizionale delle colture possono essere riferiti sia ai singoli tessuti (foglie, piccioli, fusti, ecc.) che all'intera copertura vegetale. Attualmente esistono numerosi approcci che si differenziano in relazione al tipo di parametri da misurare e al modo in cui l'informazione ottenuta viene utilizzata per programmare l'intervento di concimazione.

In ogni caso, nonostante l'interesse verso queste metodiche e le grandi potenzialità offerte soprattutto dalla messa a disposizione di strumenti rapidi per le applicazioni "on farm", l'impiego degli indicatori colturali al fine di programmare gli interventi di concimazione si è inquadrato sinora soprattutto come strumento di supporto all'impiego di bilanci degli elementi nutritivi e di indicatori di proprietà del suolo e si basa sull'esecuzione di concimazioni di base e sulla modulazione degli apporti in copertura in funzione delle disponibilità indicate dallo stato nutrizionale della coltura stessa. Nelle fasi iniziali del ciclo colturale, infatti, la copertura del suolo non è sufficiente per l'impiego di misure di riflettanza e colorazione delle foglie e il contenuto fogliare riflette prevalentemente le riserve azotate della coltura e non il quantitativo di N presente nel suolo e disponibile per la pianta (Olfs et al., 2005). Di contro, in stadi di crescita più avanzati, spesso gli indicatori colturali si dimostrano più attendibili di indicatori basati sulla valutazione di proprietà del suolo. Il contenuto di N minerale è infatti estremamente variabile nel corso del ciclo colturale e non sempre rispecchia lo stato nutrizionale delle colture (Radersma e van Evert, 2005; Mambelli et al., 1997).

Infine, un aspetto particolarmente critico riguarda l'interpretazione dei risultati. Infatti, la validità dell'uso di indicatori colturali come strumento diagnostico si basa sull'esistenza di una stretta relazione tra la concentrazione di un elemento nutritivo nell'organo considerato, o il valore assunto dall'indicatore, e l'adeguatezza di quell'elemento per la crescita della pianta. Tuttavia, l'uso corretto di ogni approccio basato sull'analisi delle piante richiede un'accurata standardizzazione delle condizioni di esecuzione per minimizzare l'effetto di numerose variabili. Le concentrazioni degli elementi nutritivi nei tessuti vegetali, e di conseguenza i valori degli indicatori a esse correlati, variano infatti oltre che in funzione di fattori esogeni (temperatura, luce, pressione parziale dell'ossigeno, pH, concentrazione salina esterna, interazione tra ioni) anche in funzione di numerosi fattori endogeni (fattori genetici, tipo di tessuto campionato, età e posizione sulla pianta) di cui è necessario tener conto al fine di interpretare correttamente lo stato nutrizionale della coltura, in particolar modo quando si considerano le sole concentrazioni assolute (impiego di range di sufficienza o di concentrazioni critiche) piuttosto che i valori relativi (derivanti dal confronto con indici ricavati da colture in condizioni nutrizionali ottimali).

Di seguito verranno presi in esame alcuni indicatori diretti e indiretti dello stato nutrizionale, in particolare azotato, della pianta facendo riferimento ai risultati finora raggiunti dalla ricerca internazionale e da quella italiana e cercando di valutare limiti e prospettive dell'inserimento di tali indicatori nella

INDICATORI DIRETTI E INDIRETTI	CARATTERISTICHE	LIMITI E FATTORI CHE NE DETERMINANO VARIAZIONE	INTERPRETAZIONE
Concentrazioni di N totale nell'intera pianta insieme a dati relativi alla biomassa prodotta	Fortemente correlata alla risposta delle colture in termini di accrescimento e produzione	Tutti i fattori endogeni ed esogeni. Tra questi ultimi particolare importanza assumono le caratteristiche pedologiche. Laboriosità elevata Forte conservatività dei parametri della relazione nell'ambito delle specie in assenza di altri fattori di stress diversi da quelli di tipo nutrizionale Laboriosità elevata	Impiego di range di sufficienza e concentrazioni critiche definite per stadio fenologico, tessuto della pianta, specie e cultivar Confronto con le concentrazioni critiche derivanti da curve di diluizione definite per singola specie (NNI)
Concentrazione di N nitrico	Correlata alla disponibilità di N minerale nel suolo per la pianta e pertanto più indicativa rispetto alla concentrazione di N totale nella stessa	Oltre ai fattori endogeni, forte influenza delle condizioni ambientali, in particolare del livello di umidità e dell'intensità della radiazione solare nei giorni precedenti il campionamento	Impiego di range di sufficienza e concentrazioni critiche definite per stadio fenologico, tessuto della pianta, specie e cultivar Interpretazione relativa basata sul confronto con valori derivanti da parcelle spia e calcolo di indici di sufficienza. La standardizzazione dei risultati dovrebbe consentire di ridurre l'influenza dei numerosi fattori di variazione.
Contenuto relativo in clorofilla totale a livello fogliare (near sensing)	Correlato alla concentrazione di N Rapido, non distruttivo	Forte influenza di fattori endogeni ed esogeni (specie, cv, posizione ed età della foglia e punto di lettura sulla foglia stessa; stress idrici, termici, caratteristiche pedologiche, ecc.) Capace di discriminare condizioni nutrizionali estreme ma meno efficace nel differenziare lo stato nutrizionale di colture diversamente concimate	Impiego di range di sufficienza definiti per singole specie e cultivar Interpretazione relativa basata sul confronto con valori derivanti da parcelle spia e calcolo di indici di sufficienza. La standardizzazione dei risultati dovrebbe consentire di ridurre l'influenza dei numerosi fattori di variazione.
Riflettanza della copertura vegetale (proximal e remote sensing)	Correlato a parametri strutturali della copertura vegetale (LAI, biomassa, ecc.) Rilevanza legata alla forte correlazione tra contenuto di N, clorofilla fogliare, LAI, biomassa Può consentire l'adozione di tecniche di gestione sito-specifica della concimazione azotata Rapido, non distruttivo		Calcolo di indici vegetazionali

Tab. 6 *Potenzialità e limiti di alcuni indicatori diretti e indiretti dello stato nutrizionale azotato delle colture*

programmazione dell'intervento di concimazione sia in relazione all'adozione di strategie per ottimizzarne l'impiego e l'interpretazione dei risultati che in relazione alle potenzialità delle strumentazioni innovative a disposizione (tab. 6).

CONCENTRAZIONE DI AZOTO NITRICO NELLA LINFA O NEI TESSUTI DELLA PIANTA

L'esistenza di una stretta relazione tra disponibilità di N minerale nel suolo e concentrazione di N nitrico nei tessuti vegetali ha indotto numerosi studiosi a definire lo stato nutrizionale azotato di specie erbacee e arboree a partire dalla concentrazione di nitrati nella pianta (Lemaire et al., 2008; Olf et al., 2005).

Lo ione nitrico infatti rappresenta la principale forma di trasporto dell'N nelle specie che non riducono lo stesso negli apparati radicali; viene traslocato per via xilematica in tutti gli organi in accrescimento dove può essere accumulato all'interno dei vacuoli. La determinazione del contenuto di nitrati, sia in una parte della pianta (picciolo o stelo) che nel succo xilematico, fornisce una stima della riserva azotata della pianta stessa (Mambelli et al., 1997).

Diversi autori ritengono che l'analisi dei nitrati nella linfa dei piccioli possa fornire una migliore indicazione dello stato nutrizionale azotato perché più sensibile a evidenziare fluttuazioni nella disponibilità di N rispetto al contenuto totale; la concentrazione di nitrati, ossia delle forme non metaboliche dell'elemento, reagisce infatti più rapidamente rispetto alla concentrazione totale a variazioni nella disponibilità complessiva dell'elemento. Il contenuto di nitrati nella pianta è infatti il risultato dell'equilibrio dinamico tra acquisizione e assimilazione che dipende dalle caratteristiche del terreno e dalle condizioni climatiche durante la stagione di crescita (Mambelli et al., 1997). Per questo motivo, la valutazione dell'N nitrico nei tessuti viene spesso impiegata per prendere decisioni in relazione all'epoca di applicazione del fertilizzante e, se calibrata correttamente, anche per la definizione della quantità di N richiesto (Olf et al., 2005).

Generalmente la concentrazione dello ione nella pianta è massima nella fase iniziale del ciclo di sviluppo e in seguito decresce. Tuttavia la relazione non è sempre lineare e risulta pertanto difficile trasferire osservazioni sulla concentrazione di nitrati in espressioni quantitative di condizioni di carenze o eccessi nutrizionali (Schröder et al., 2000). Inoltre la concentrazione di N nitrico non riflette il solo stato nutrizionale: si riduce con l'accrescimento della coltura, è influenzata dal tipo di tessuto considerato, si riduce in presenza di concentrazioni elevate di fotosintetati e pertanto varia nell'arco del giorno, in

particolare nel corso della mattinata, e risulta meno variabile in condizioni di elevato soleggiamento. Infine varia in funzione della disponibilità nel suolo e degli interventi di concimazione.

La validità della stima basata su questo indicatore dipende inoltre dall'accuratezza della sua determinazione analitica. La determinazione quantitativa di laboratorio può avvenire per via spettrofotometrica, cromatografica o mediante impiego di elettrodi ione-selettivi. Numerosi test semplici, rapidi, semiquantitativi della concentrazione di nitrati nella linfa sono stati sviluppati per consentire agli agricoltori di determinare direttamente in campo sui tessuti vegetali e sul succo cellulare le concentrazioni di N nitrico e di prendere decisioni in tempi brevi sulla dose ed epoca di applicazione. Tali procedure semplificate sono basate su reazioni colorimetriche (Merckoquant test strips, Nitrate Schnelltest, colorimetro HACH) o sull'impiego di strumenti portatili come misuratori di ioni (Cardy – Horiba) e riflettometri (Nitrachek) (Olf et al., 2005). Non sempre le correlazioni ottenute tra determinazioni analitiche e procedure rapide risultano ottimali, anche se spesso con differenze tali da non influenzare l'interpretazione dei risultati rispetto allo stato nutrizionale della coltura (Mambelli et al., 1997).

A livello europeo, il test dell'N nitrico nei piccioli è una procedura ampiamente standardizzata e impiegata per la rapida determinazione dello stato nutrizionale N delle colture e l'ottenimento di indicazioni sulle dosi da somministrare a colture di patata (Zhang et al., 1996, e Phillips et al., 2004, in Olf et al., 2005) e frumento (Justes et al., 1994b; Justes et al., 1997, in Lemaire et al., 2008). Altri autori hanno mostrato la correlazione lineare esistente durante l'intera stagione di crescita tra risultati di determinazioni analitiche di laboratorio e misuratori portatili (Cardy Nitrate Meter e Nitrate Pocket Colorimeter II, Hach Company) e definito per la patata range di sufficienza per diversi stadi di crescita (iniziazione dei tuberi, riempimento dei tuberi e maturazione) (Errebhi et al., 1998). Tuttavia, altri studi hanno messo in evidenza come fattori endogeni (epoca di campionamento, posizione del picciolo sulla pianta, età della pianta, cultivar) ed esogeni (momento del giorno nel quale le piante vengono campionate e condizioni ambientali estreme prima del campionamento -siccità, forti piogge-) possano influenzare in modo significativo la concentrazione del nitrato nei piccioli. Anche se un'accurata selezione dei piccioli delle foglie più giovani completamente espanse e la circoscrizione del campionamento intorno a mezzogiorno può consentire di controllare parte della variabilità, i numerosi fattori influenzanti la concentrazione di nitrati nei piccioli spiegano perché in alcuni studi questo tipo di valutazione non sia stata ritenuta valida per la definizione dei fabbi-

sogni nutrizionali N sia per la patata che per altre specie (Olfs et al., 2005).

In Italia, la sperimentazione ha evidenziato, soprattutto su colture cerealicole, la forte influenza del grado di umidità del terreno, ma anche delle condizioni di luminosità e temperatura, (Giordani, 2004) sull'attendibilità e ripetibilità dei risultati negli anni.

In particolare, ricerche condotte su frumento hanno mostrato un'elevata correlazione tra gli indici ottenuti con il test rapido Nitrat Schnelltest, di semplice esecuzione e basso costo, e l'effettivo contenuto di nitrati nella parte basale non clorofilliana della pianta (Giordani e Guermandi, 1995). Tuttavia gli stessi autori ritengono che tale criterio possa essere utile solo in fase di accestimento, ma non in fasi successive (spiga a 1 cm e II nodo), benché ritenute più idonee per effettuare la concimazione azotata, a causa della forte influenza sui risultati del contenuto di umidità del suolo (Giordani, 1998). In Francia, infatti, proprio una più uniforme distribuzione delle precipitazioni ha consentito di standardizzare la metodica. In ogni caso, in fase di accestimento, esso risulta più idoneo di altri indici, come quello termo pluviometrico (Giordani, 2008) per stabilire non solo l'epoca, che deve essere posticipata il più possibile, ma anche l'entità del primo apporto di N.

Su orzo, la buona correlazione osservata tra concentrazione dei nitrati nel colletto della pianta, determinata mediante Nitrat Schnelltest, e resa in granello, nelle fasi di accestimento e di raddrizzamento dei culmi, ha indicato la capacità del metodo di discriminare lo stato nutrizionale della coltura (Giordani, 2000). In fase di accestimento valori di 2,4-2,5 vengono riportati come indicativi di condizioni nutrizionali ottimali.

Sul sorgo la valutazione del contenuto di nitrati mediante Nitrat Schnelltest, con metodologia modificata rispetto a quella proposta per il frumento e con l'impiego di sezioni di culmo della zona non clorofilliana di lunghezza di circa 5 mm negli stadi di sviluppo di 4 e 5 foglie e di 5 e 6 foglie, ha mostrato che malgrado l'elevata correlazione osservata tra resa di granello e contenuto di nitrati nella porzione basale della pianta, superiore anche alla relazione osservata tra la stessa e il contenuto di N totale delle lamine fogliari, il test non sembra sempre essere in grado di discriminare sufficientemente lo stato nutrizionale della pianta nelle fasi di sviluppo considerate a causa, anche in questo caso, dello stato idrico del terreno (Giordani et al., 1998).

Per il mais, in fase precoce, la valutazione del contenuto di N minerale nel suolo (PSNT) appare il metodo più valido perché l'analisi dei nitrati nella pianta non è in grado di fornire indicazioni precise a causa dell'enorme variabilità dovuta all'umidità del terreno e alla luminosità nei giorni immediatamente precedenti il rilievo (Giordani, 1997; Giordani et al., 2002).

Da quanto rilevato emerge che l'analisi dei nitrati nel colletto della pianta perde validità quando i rilievi vengono eseguiti con terreno a un grado di umidità tale da non permettere un adeguato assorbimento da parte degli apparati radicali, tanto che è stato proposto di individuare il livello di umidità del terreno che possa essere ritenuto adeguato per rendere confrontabili i risultati negli anni (Giordani et al., 1998b).

Sulla bietola, l'attività di sperimentazione ha evidenziato, oltre alle elevate correlazioni tra nitrati nel colletto e resa in saccarosio, la elevata concordanza negli anni dei valori rilevati indipendentemente dal contenuto di umidità nel suolo a differenza di quanto osservato su colture cerealicole, confermando i risultati positivi ottenuti per questa coltura anche con la valutazione rapida del contenuto in clorofilla (Giordani, 1998). Elevate correlazioni sono state osservate in fase cotiledonare e sono state attribuite alle ridotte e piuttosto costanti modifiche della superficie fogliare che non hanno determinato una forte variazione nella diluizione dell'N, a differenza delle fasi più tardive di 2 e 4 foglie. Gli autori hanno individuato nel valore di 2,4 del Nitrat Schnell-test, eseguito sulla porzione di radice emergente dalla superficie del terreno (generalmente antocianica), il valore che esprime lo stato nutrizionale ottimale per la coltura. Gli indici ottenuti eseguendo il test sui piccioli necessitano invece di ulteriore validazione; determinazioni effettuate in epoche successive allo stadio cotiledonare non sembrano attendibili per poter guidare la concimazione azotata.

Sul pomodoro da industria, è stata evidenziata l'elevata correlazione tra il contenuto di $N-NO_3$ nella linfa dei piccioli e il contenuto di N totale nell'intera pianta e la capacità del test di discriminare lo stato nutrizionale azotato per circa 2/3 del ciclo colturale, periodo cruciale per la gestione della concimazione azotata (Farneselli et al., 2010). Pertanto, gli autori ritengono che, nonostante i numerosi fattori capaci di influenzare la concentrazione di nitrato nei piccioli, il test possa essere ritenuto attendibile per questa specie.

Al fine di standardizzare le condizioni che determinano la variabilità delle concentrazioni di nitrati nei culmi, sul frumento è stata verificata la possibilità di impiego di una valutazione dei risultati in termini relativi con uso di parcelle spia e calcolo di indici di sufficienza (Giordani, 2004).

CONTENUTO IN CLOROFILLA TOTALE FOGLIARE

La concentrazione di clorofilla totale fogliare riflette lo stato nutrizionale delle piante in relazione alla disponibilità di N, Mg e Fe. Numerose ricerche hanno

messo in evidenza la stretta correlazione esistente in molte specie tra il contenuto di clorofilla e la concentrazione di N totale sia per unità di massa che per unità di area fogliare (Olfs et al., 2005). Il contenuto di clorofilla è inoltre spesso ben correlato con l'attività della rubisco e la capacità fotosintetica e rappresenta anche un sensibile indicatore di condizioni di stress della pianta.

I metodi che consentono la determinazione del contenuto in clorofilla *in vitro* forniscono ottimi risultati, ma risultano laboriosi, costosi e distruttivi. La determinazione *in vivo* è invece resa possibile da tecniche spettrofotometriche non distruttive, che non necessitano della preparazione del campione e che si basano su misure di assorbimento differenziale della luce da parte dei tessuti vegetali, sia a livello di singola foglia che a livello di intera canopy, a diverse lunghezze d'onda (solitamente nel rosso e vicino infrarosso). A livello di singola foglia differenti sistemi portatili (SPAD, Minolta; Hydro N-Tester, Yara) consentono la stima del contenuto relativo in clorofilla delle foglie.

Il misuratore di clorofilla SPAD 502 (Minolta Corp., Japan) è uno strumento portatile che misura la trasmittanza della luce nel rosso (650 nm, range di assorbimento della clorofilla) e nel vicino infrarosso - NIR - (940 nm). La misura addizionale della luce assorbita nel NIR è necessaria al fine di correggere la lettura per lo spessore della foglia e il contenuto di acqua (Schröder et al., 1998; Samborski et al., 2009).

La forte correlazione tra concentrazione di clorofilla e letture di SPAD è stata verificata per un ampio spettro di colture. Per numerose specie sono stati definiti sia protocolli di campionamento che efficaci schemi di N-fertilizer recommendations basati sulle letture di SPAD. Al fine di consentire un più semplice impiego per usi applicativi aziendali, lo SPAD è stato successivamente modificato portando alla produzione dell'Hydro N-Tester (Yara International ASA, Norway), strumento particolarmente adatto a supportare le strategie aziendali di applicazione frazionata di fertilizzanti (Olfs et al., 2005).

Molti studi hanno cercato di predire la risposta produttiva delle colture con l'impiego di questi strumenti durante le fasi di crescita e sviluppo. Altri autori hanno cercato di utilizzare queste misure per stimare i fabbisogni azotati delle colture. Tuttavia molte di queste relazioni predittive sono risultate spesso piuttosto deboli perché le letture sono altamente influenzate dalla variabilità interannuale, dalla cultivar impiegata e da numerosi altri fattori.

Infatti, benché la concentrazione fogliare di N abbia l'effetto più marcato sulle letture, risultati sperimentali (Olfs et al., 2005; Schröder et al., 2000; Tremblay, 2004) hanno mostrato che: carenze di S mostrano chiara influenza sulla concentrazione di clorofilla; in condizioni di carenza idrica la concentrazione di clorofilla tende a incrementare senza che ciò sia indice di un migliore stato

nutrizionale; le varietà differiscono nel loro contenuto in clorofilla che è una caratteristica genetica; stato idrico e peso specifico fogliare inducono variazioni dei valori assoluti (Schlemmer et al., 2005). Anche lo stadio di accrescimento, l'età della foglia da misurare, nonché il punto di misura sulla foglia stessa condizionano la lettura. È stata evidenziata poca rappresentatività derivante dalla ristretta area di lettura non essendo la distribuzione dell'N uniforme nella foglia. Inoltre, l'N contenuto nelle molecole di clorofilla rappresenta solo il 2% dell'N totale della foglia che è dominato dall'N delle proteine fotosintetiche; pertanto la relazione sperimentale che può essere stabilita tra clorofilla e contenuto di N rimane altamente empirica (Houles et al., 2007; Lemaire et al., 2008).

Infine a livello di canopy, la stima della clorofilla non fornisce misure accurate del contenuto di N perché la sua distribuzione segue un gradiente verticale all'interno della copertura vegetale: il contenuto di N diminuisce negli strati più bassi e il decremento è linearmente correlato alla riduzione nella intensità luminosa (Grindlay, 1997); inoltre è anche limitato a misure puntuali e non può praticamente essere impiegato a livello spaziale su ampie superfici.

Tenendo conto di queste possibili fonti di variazione, l'uso della misurazione di clorofilla per la gestione della concimazione azotata necessita come ogni altro indicatore colturale di rigidi protocolli di campionamento (Schröder et al., 2000). Alcuni autori suggeriscono l'impiego di valori assoluti e di fattori di correzione in funzione della varietà (Olfs et al., 2005).

Tuttavia anche in questo caso non si riuscirebbe a controllare la variabilità interannuale. Pertanto, sempre più accreditato risulta l'uso di approcci relativi derivanti dal confronto tra i valori delle letture effettuate nell'appezzamento e quelli di parcelle di riferimento in condizioni nutrizionali non limitanti (aree adeguatamente concimate, *well fertilized reference plots*). L'interpretazione viene successivamente effettuata mediante calcolo di indici di sufficienza (*sufficiency index*, o indice di sufficienza azotata – ISA); quando il valore di questo indice risulta inferiore al 95% si rende necessario apportare N. Questo metodo dovrebbe consentire di standardizzare gli effetti di fattori genetici e ambientali.

In Germania numerosissime sperimentazioni di campo su cereali vernini sono state condotte con l'impiego dello Yara N-Tester al fine di programmare la concimazione in funzione di determinazioni eseguite allo shooting (GS 30–32) e ear emergence (GS 37–51) e in alcune regioni, tali N-fertilizer recommendations sono ritenute una strategia idonea a supportare la gestione agronomica per il rispetto dei vincoli imposti dalle normative ambientali (Olfs et al., 2005).

In Italia su mais e bietola sono state individuate buone correlazioni tra contenuto in N totale delle foglie e valori di SPAD (Giordani e Guermandi, 1994 e 1997) su diverse specie.

In particolare, per la bietola i risultati hanno evidenziato che nella fase cotiledonare e dopo lo sviluppo della 6° foglia lo SPAD è in grado di definire lo stato azotato della coltura, poiché i valori mostrano ripetibilità negli anni (Giordani e Bernati, 1998). Tuttavia, gli autori riportano che nello stadio cotiledonare il ridotto intervallo di variazione dei valori potrebbe risultare critico per consentire di discriminare efficacemente lo stato nutrizionale; allo stadio di 6 foglie, nonostante la maggiore attendibilità del dato rilevato, il verificarsi di piogge intense potrebbe rendere poco utilizzabile il test per problemi relativi all'assorbimento del nutriente indipendentemente dalla disponibilità nel suolo (Giordani e Bernati, 1998). Infine, allo stadio di due foglie l'indice non sembra poter fornire risultati ripetibili perché lo sviluppo delle stesse è particolarmente influenzato dalla temperatura.

Su orzo, le letture di SPAD effettuate in fase di accestimento hanno mostrato correlazioni significative con la resa in granella. I buoni risultati ottenuti nelle fasi fenologiche di 2° nodo e di ultima foglia assumono invece minore importanza perché in queste epoche la concimazione non rientra tra le pratiche agronomiche ordinariamente eseguite per la coltura (Giordani, 2000). Lo studio ha tuttavia anche messo in evidenza l'influenza della densità di semina sui valori dell'indice, con valori più elevati rilevati in condizioni di minore densità causata dal verificarsi di danni da freddo.

Sul sorgo, solo a partire dallo stadio di 8° foglia i valori manifestano ripetibilità negli anni e presentano una elevata correlazione con la resa di granella, comportamento attribuito al fatto che la pianta attraversa una fase, che si protrae probabilmente fino alla fecondazione, durante la quale le modifiche del contenuto di N nelle foglie avvengono quasi esclusivamente in dipendenza della disponibilità di N nel suolo (Giordani et al., 1998). Questo stadio fenologico, per il sorgo, a differenza di quanto avviene per la bietola e il mais, risulta idoneo all'esecuzione di interventi in copertura poiché coincide con l'epoca abituale per effettuare la sarchiatura.

Sul mais le analisi rapide del contenuto in clorofilla hanno fornito indicazioni migliori rispetto alla valutazione del contenuto di nitrati nella pianta anche se non sono state ottenute indicazioni precise nella fase V6. Studi condotti su diversi ibridi hanno mostrato come, mentre nello stadio di 4-5° foglia (epoca della sarchiatura) non sia possibile individuare valori precisi e ripetibili, nella fase di 8° foglia sia possibile individuare un unico valore specifico per ogni ibrido, in grado, con un sufficiente livello di precisione, di definire lo stato nutrizionale ottimale della coltura (Giordani, 2002).

Sia per il mais che per il frumento l'adozione di approcci relativi, basati sull'impiego di parcelle spia e di indici di sufficienza, ha fornito risultati at-

tendibili. In particolare, per il mais tale tipo di approccio consentirebbe non solo di evitare l'influenza varietale ma anche di non dover essere così precisi in relazione allo stadio di sviluppo della coltura, anticipando l'epoca di valutazione dello stato nutrizionale che risulta per questa coltura la maggiore limitazione legata all'impiego dello strumento. In ogni caso, anche questo indice sembra aver fornito risultati interessanti solo dopo l'emissione dell'8° foglia.

Per il frumento, l'indice di sufficienza azotata calcolato mediante l'impiego dell'N tester viene proposto come metodo da adottare durante la fase di levata per praticità e attendibilità (Giordani, 2008).

Per il pomodoro da industria, le letture di SPAD sono risultate meno sensibili e attendibili rispetto alle informazioni fornite da altri indicatori (concentrazione dei nitrati nei piccioli e dell'N totale nell'intera pianta) nel caratterizzare lo stato nutrizionale della coltura, avendo fatto rilevare differenze significative solo a 42 e 71 giorni dopo il trapianto (DAT) e solo tra tesi concimate e non concimate (Farneselli et al., 2010). La minore capacità di discriminare lo stato nutrizionale, confermata anche dalla bassa correlazione rilevata tra letture di SPAD e la concentrazione di N totale nell'intera pianta, è stata attribuita dagli autori alla ridotta variazione del peso specifico fogliare nello strato superiore della copertura vegetale e al fatto che l'N presente nella clorofilla rappresenti una bassa percentuale della concentrazione totale di N.

CONCENTRAZIONE TOTALE DI N

La determinazione quantitativa della concentrazione di N totale nell'intera pianta o in specifici tessuti è da annoverare tra i primi e più importanti indicatori diagnostici per la valutazione dello stato nutrizionale delle colture (Mills e Jones, 1996).

La sua validità si basa, come precedentemente indicato, sull'esistenza di una stretta relazione tra la concentrazione dell'elemento nell'organo considerato e l'adeguatezza di quell'elemento per la crescita della pianta.

La sua interpretazione immediata consiste nel confronto univariato dei risultati ottenuti con range di sufficienza o concentrazioni critiche (concentrazioni che consentono di ottenere una produzione compresa tra il 90 e il 95% della massima) definiti, per numerosissime specie e varietà, in funzione di precisi stadi fenologici e di specifici tessuti vegetali campionati, al fine di standardizzare le condizioni di esecuzione e minimizzare l'influenza di fattori endogeni sulle concentrazioni dell'elemento.

Tuttavia, la forte variabilità nell'accumulo di sostanza secca in funzione

anche di fattori esogeni e, in particolare, in funzione delle caratteristiche pedologiche (pH, contenuto in carbonati, conducibilità elettrica, contenuto in sostanza organica) e dell'andamento climatico (temperatura, luminosità, disponibilità idrica) con le sue oscillazioni interannuali, rende difficile l'impiego di standard di riferimento anche se appositamente definiti per precise varietà. Valori alti o bassi possono non sempre essere indicativi di condizioni di adeguatezza nutrizionale o carenza; inoltre la variazione nelle concentrazioni relative di altri elementi nutritivi può modificare lo stato di equilibrio nutrizionale del tessuto. La constatazione che i valori relativi delle concentrazioni di elementi nutritivi possano essere più rappresentativi di quelli assoluti per la caratterizzazione dello stato nutrizionale delle colture ha portato alla definizione di metodi interpretativi basati sulla valutazione bivariata (DRIS) o multivariata (CND) delle concentrazioni dei nutrienti nei tessuti vegetali. Questi metodi, benché abbiano il vantaggio di considerare simultaneamente più elementi nutritivi, necessitano di standard di riferimento definiti in condizioni pedo-climatiche e varietali simili a quelli richiesti, per la loro costituzione, la disponibilità di un numero molto elevato di campioni.

Un ulteriore approccio per la interpretazione dello stato nutrizionale prende in considerazione le dinamiche di asportazione e rimobilizzazione dei costituenti azotati nell'intera copertura vegetale, e prevede la valutazione contemporanea di informazioni relative al tasso di crescita della coltura e alla concentrazione di N. Questo approccio è reso possibile dalla teorizzazione della relazione tra concentrazione di N nei tessuti e accumulo di sostanza secca nella pianta, che si basa sul presupposto che in ogni momento del ciclo colturale esista una concentrazione minima e ben definita dell'elemento che consenta di ottenere il massimo tasso di crescita (concentrazione critica) e che tale concentrazione si riduca con il progredire dell'età della pianta.

La legge che lega questi parametri è nota come legge di diluizione perché il decremento della concentrazione di N è legato alla crescita delle piante come parte di un fenomeno di diluizione dell'elemento da parte degli assimilati di carbonio. I parametri caratterizzanti questa relazione risultano altamente conservativi non solo nell'ambito delle singole specie ma anche dei gruppi metabolici.

Da un punto di vista teorico questo processo deriva dall'assunzione che la pianta sia composta da due pool, uno metabolico (associato ai processi di fotosintesi e di crescita) e uno strutturale (Greenwood et al., 1991; Justes et al., 1994a). Questi pool mantengono la stessa composizione ma variano nella presenza relativa durante la crescita delle piante a causa di due processi: (i) il

declino nel *leaf-shoot ratio* man mano che la biomassa incrementa e (ii) l'allocazione preferenziale di N allo strato superiore di foglie ben illuminato man mano che la canopy si sviluppa.

Il concetto di diluizione, applicato alla concentrazione critica di N, porta alla definizione di curve di diluizione critica. Queste ultime consentono di caratterizzare lo stato nutrizionale delle piante attraverso il calcolo del Nitrogen Nutrition Index -NNI-, indice diagnostico che descrive il rapporto tra la concentrazione effettiva e la concentrazione critica per ogni specifico livello di sostanza secca. Valori di NNI maggiori di 1 indicano colture in buone condizioni nutrizionali mentre valori minori di 1 indicano carenza di N. Il NNI può essere calcolato in ogni momento durante la crescita della coltura e consente di diagnosticare l'esistenza di carenze di N e la loro intensità.

La validità della relazione fisiologica alla base della teoria della diluizione ne ha determinato il grande impiego anche nei modelli di simulazione per la definizione dello stato nutrizionale delle colture. Recentemente sono state tuttavia mosse critiche all'approccio, in particolare alla capacità di simulare la risposta delle piante in presenza di condizioni di stress legate a fattori diversi rispetto a quelli di tipo nutrizionale (Confalonieri et al., 2009).

Nonostante gli aspetti critici, il NNI rimane il più attendibile tra gli indicatori colturali. Considerata pertanto la validità scientifica e l'attendibilità di questo indice diagnostico, la determinazione del Nitrogen Nutrition Index a determinati intervalli durante la crescita vegetativa delle colture potrebbe essere di grande supporto nell'ottimizzare i tempi e il tasso di applicazione dei fertilizzanti azotati al fine di far corrispondere il più precisamente possibile gli apporti di N ai fabbisogni della coltura in funzione della produzione ipotizzata. Tuttavia, una misurazione così frequente, possibile nelle attività di sperimentazione, non è proponibile nelle aziende agricole. La determinazione del NNI implica infatti (i) la quantificazione della biomassa prodotta (actual crop mass, W_a) su aree di campionamento rappresentative e (ii) la determinazione della concentrazione effettiva di N mediante analisi di laboratorio (%N_a). Pertanto, il NNI può essere considerato un valido indicatore di base dello stato nutrizionale delle piante ma è necessario sviluppare metodi indiretti per stimare il suo valore o le sue componenti (W_a e %N_a).

Le ricerche condotte sinora hanno studiato le relazioni tra il NNI e altri indicatori dello stato nutrizionale, quali misure del contenuto di clorofilla, di N nitrico nei tessuti conduttivi, di N totale nelle foglie dello strato superiore della copertura vegetale.

La scelta di quest'ultimo indicatore è legata al fatto che, essendo il decre-

mento della concentrazione di N causato anche dall'allocazione preferenziale dell'elemento allo strato superiore di foglie ben illuminato man mano che la copertura vegetale si sviluppa, il contenuto di N per unità di area fogliare nello strato superiore dovrebbe rimanere più o meno costante in una condizione di approvvigionamento uniforme (Lemaire et al., 2008). La costanza della concentrazione di N dello strato superiore di foglie durante tutto il periodo di crescita e la buona correlazione con il NNI è stata verificata in ricerche condotte su specie foraggere (Gastal et al., 2001, Farrugia et al., 2004, e Gonzalez-Dugo et al., 2005, in Lemaire et al., 2008).

Justes et al. (1994b) hanno invece sviluppato uno strumento di diagnosi integrata basato sulla concentrazione di nitrati nella linfa per la gestione della concimazione azotata in frumento duro e mais, per definire le applicazioni di fertilizzanti. Tuttavia, la relazione tra concentrazione di nitrati nella linfa e NNI necessita opportuna calibrazione per usi applicativi, poiché è complessa e non sempre univoca considerato che la concentrazione di nitrati nel fusto dipende, come precedentemente descritto, da molti fattori tra i quali stadio fenologico, cultivar, temperatura e radiazione solare e non solo dallo stato nutrizionale N della coltura. Nonostante la debole correlazione tra concentrazione di nitrati nella linfa e NNI, gli autori hanno osservato la seguente relazione: quando il NNI era < 1 , la concentrazione non era mai maggiore di 1 g/l, mentre per $\text{NNI} > 1$ la concentrazione di nitrati nella linfa variava da 1 a 10 qualsiasi fosse il valore di NNI. Questo test non può pertanto essere adottato per la stima quantitativa dello stato N della coltura, mentre consentirebbe di distinguere situazioni con probabile deficit di N da situazioni con probabile stato soddisfacente e quindi di adattare di conseguenza la strategia di gestione della fertilizzazione.

Farneselli et al. (2010) hanno osservato, su pomodoro da industria, una elevata concordanza nella valutazione dello stato nutrizionale tra concentrazione di nitrati nei piccioli e NNI tranne che nella fase finale del ciclo colturale (84 DAT), epoca in cui comunque la gestione della concimazione azotata non assume più un ruolo cruciale. La minore correlazione rilevata nell'ultima fase è stata attribuita al fatto che la concentrazione nelle foglie dello strato superiore della copertura vegetale, dal quale i piccioli venivano raccolti, tende a rimanere costante (Farneselli et al., 2010).

In relazione all'impiego di misuratori portatili di clorofilla per la stima indiretta della concentrazione fogliare di N dello strato di foglie superiore, e pertanto del NNI, l'impiego in termini relativi sembra consentire di standardizzare gli effetti del genotipo e dell'ambiente sulla regressione tra SPAD e NNI (Debaeke et al., 2006).

STIMA DEL NNI MEDIANTE VALUTAZIONE
DELLE PROPRIETÀ OTTICHE DELLA COPERTURA VEGETALE

Considerata la difficoltà di individuare stime ripetibili del NNI a partire da misure puntuali di indicatori sia diretti che indiretti dello stato nutrizionale, diversi autori propongono di operare a livello di copertura vegetale. Tale approccio può essere adottato con l'impiego di tecniche di remote e proximal sensing, basate sulla valutazione delle proprietà ottiche dei tessuti vegetali e in particolare della riflettanza. Le tecniche di *remote sensing* possono fornire infatti una rapida stima dello stato nutrizionale con elevata risoluzione spaziale e sono riconosciute essere superiori all'analisi delle singole piante perché consentono di monitorare contemporaneamente un'intera comunità di piante per unità di superficie. Alcuni autori hanno inoltre suggerito di lavorare a scala integrata ossia non in termini di concentrazione (Cab) ma in termini di quantità di clorofilla (QCab) e N presenti nella copertura vegetale al fine di risolvere la difficoltà di convertire i contenuti da unità di superficie a unità di massa (Lemaire et al., 2008).

Al fine di verificare l'attendibilità di diverse strategie basate su misure puntuali o integrate per la valutazione dello stato nutrizionale azotato, Houlès et al. (2007) hanno messo a confronto tre metodi caratterizzati da diverso grado di complessità e prevedenti la determinazione del NNI sia in termini di rapporto tra le concentrazioni che in termini di rapporto tra le asportazioni di azoto.

In particolare, i tre metodi confrontati riguardano:

- i) la stima diretta del NNI tramite relazioni empiriche con la concentrazione di clorofilla derivante dalla riflettanza dell'intero manto vegetale;
- ii) la stima indiretta del NNI come rapporto tra concentrazione effettiva di N fogliare (derivante da relazioni empiriche con la concentrazione in clorofilla fogliare - Cab) e concentrazione critica (ottenuta a partire dalla actual biomass ($\%N_c = a_c W^{-b}$) calcolata a sua volta da relazioni empiriche con il LAI stimato mediante remote sensing);
- iii) la stima indiretta del NNI come rapporto tra asportazione complessiva di N (stimata da relazioni regressive con il contenuto totale di clorofilla per unità di superficie di suolo - QCab) e asportazione critica (*critical N uptake*) (calcolata a partire dalla actual biomass, W, ($N = a' W_I^{-b}$) ottenuta come descritto nel metodo precedente).

Gli autori al termine del confronto hanno indicato che le informazioni più attendibili possono essere ottenute i) operando sulle relazioni tra con-

tenuto di N e clorofilla, e in particolare misurando direttamente la concentrazione di clorofilla, senza ricorrere all'impiego di misuratori indiretti che introducono altre fonti di errore, e tenendo conto dello stadio di crescita; ii) lavorando a livello di copertura vegetale, ossia determinando le relazioni tra Q_{Cab} e asportazione effettiva (NUR) piuttosto che tra le loro concentrazioni, come proposto nel terzo metodo valutato. Ciò è di particolare interesse per l'impiego del remote sensing considerato che Q_{Cab} viene stimata meglio di Cab mediante inversione di misure di remote sensing.

Pertanto l'impiego di tecniche di remote sensing, sia attraverso misure satellitari che mediante misure di *proximal sensing*, sembra avere la potenzialità di fornire stime accurate dello stato nutrizionale azotato della coltura. Un tale tipo di stima presenterebbe inoltre il vantaggio di poter essere ripetuto nel tempo e nello spazio consentendo di ottenere informazioni molto precise sulle dinamiche spazio-temporali di accrescimento e di variazione dello stato nutrizionale della coltura, risultando pertanto estremamente utile sia per una valutazione dinamica dello stato nutrizionale medio di campo che per l'adozione di strategie di gestione sito-specifica della concimazione nell'ambito delle tecniche di agricoltura di precisione.

CONCLUSIONI

Considerato il ruolo cruciale rivestito dalla fertilizzazione nel determinare la sostenibilità ambientale ed economica dei processi produttivi nel settore agricolo, si rende necessario individuare strategie che consentano di gestirla razionalmente. Troppo spesso infatti gli agricoltori definiscono le quantità, le epoche e le modalità di distribuzione dei concimi in modo molto empirico. La ragione principale di un tale comportamento deriva in primo luogo dal fatto che non sempre è facile e manifesta la risposta delle colture sia in termini quantitativi e qualitativi alla somministrazione dei concimi, ma non di poco conto è anche l'oggettiva difficoltà a individuare metodi predittivi efficaci e affidabili, capaci di quantificare le effettive necessità colturali. Si impone pertanto non solo la diffusione di approcci razionali, ma anche l'individuazione di quelli che di volta in volta possano risultare più opportuni.

Al fine della ottimizzazione degli apporti, lo strumento cruciale è senz'altro rappresentato dal bilancio degli elementi nutritivi, che stima le possibili entrate e uscite di tali elementi nel sistema suolo-pianta. Questo strumento, che ha trovato a partire dagli anni 80/90 un'ampia applicazione nell'ambito

dei “Disciplinari di produzione integrata”, può prevedere approcci caratterizzati da diverso grado di semplificazione (bilancio medio, bilancio stagionale con indicatori sintetici e approccio statico, bilancio stagionale con impiego di indicatori colturali, pedologici e climatici e approccio dinamico), che possono risultare utili in condizioni diverse. Il bilancio medio, un’applicazione del quale è qui rappresentata attraverso il metodo del Limite Massimo, serve solo per esprimere valori di riferimento (baseline), ovvero limiti massimi da non superare per l’applicazione di regolamenti agro-ambientali o da considerare base per l’applicazione di più evoluti indicatori della fertilizzazione. All’opposto l’adozione di bilanci stagionali di tipo dinamico, ossia prevedenti il monitoraggio di parametri di natura pedologica, colturale e climatica, rappresenta uno degli approcci più razionali per la gestione della fertilizzazione. In particolare il bilancio stagionale prevedente l’impiego di indicatori colturali può consentire di tener conto e di gestire la variabilità spaziale e temporale nella crescita delle colture, modificando di conseguenza i fabbisogni fertilizzanti, e rappresenta il presupposto per l’applicazione di modalità di gestione sito specifica di questa pratica agronomica.

Tuttavia quando si adottano approcci razionali e complessi è necessario che essi vengano usati con consapevolezza affinché possano fornire i risultati più idonei. A tale proposito è importante innanzitutto fare chiarezza sull’equazione di bilancio alla quale si fa riferimento e sui termini considerati. Inoltre, molto importante è la rappresentatività delle informazioni che si impiegano. Sarebbe infatti importante riferirsi alle condizioni del territorio su cui si opera, ma molto spesso questo non è possibile perché non sono a disposizione informazioni complete o, pur esistendo, non sono organizzate in maniera sistematica. La definizione di un’equazione di bilancio adattata alle condizioni del territorio italiano, e delle diverse aree peculiari che lo caratterizzano, è infatti un obiettivo prioritario non solo della comunità scientifica, ma anche di funzionari pubblici esperti di concimazione e del mondo industriale.

Non è meno importante, infine, individuare il tipo più idoneo di approccio da impiegare in funzione delle condizioni in cui si opera. Infatti, benché il bilancio stagionale con approccio dinamico rappresenti il mezzo più razionale per gestire questa pratica agronomica, non sempre questo tipo di criterio può rappresentare la scelta ottimale. Caratteristiche aziendali, modalità di gestione, disponibilità di apparecchiature e di personale in grado di utilizzarle e interpretarne correttamente i risultati, possono di volta in volta rendere vantaggiose o inutili le strategie avanzate volte a razionalizzare la fertilizzazione.

Pertanto, anche se il futuro sarà sempre più orientato verso modalità di

gestione sito specifica delle risorse, l'aspetto più importante è conoscere limiti e potenzialità di metodi e strumenti a disposizione e applicare di volta in volta quelli più opportuni, adattandoli alle condizioni aziendali e alla realtà agricola in esame.

RIASSUNTO

Dopo aver discusso gli aspetti critici relativi alla gestione della tecnica agronomica della fertilizzazione, e aver fatto cenno all'evoluzione del consumo dei fertilizzanti in Italia, questa nota concentra la sua attenzione sulle strategie disponibili per ottimizzare la fertilizzazione dei seminativi, con particolare riguardo alla definizione dei fabbisogni fertilizzanti, discutendone pregi e difetti in una logica agronomica e ambientale e suggerendo quali approcci possono consentire di aumentarne l'efficienza. A tal fine, il bilancio culturale degli elementi nutritivi nel sistema suolo-pianta viene considerato il punto di partenza per la definizione e interpretazione delle strategie di fertilizzazione impiegabili. Si descrivono approcci caratterizzati da diverso grado di complessità, alcuni di tipo statico, quali il bilancio medio, altri dinamico, quali il bilancio stagionale semplificato e il bilancio stagionale prevedente l'impiego di indicatori culturali. Sono infine classificate e descritte le potenzialità di questi ultimi, poiché gli indicatori culturali, consentendo di tener conto e di gestire la variabilità spaziale e temporale nella crescita delle colture, possono permettere di modificare i fabbisogni fertilizzanti inizialmente stabiliti, e rappresentano il presupposto per l'applicazione di strategie di gestione sito specifica della fertilizzazione. Vengono riportati alcuni risultati di attività di ricerca e sperimentazione condotta sul territorio nazionale, con riferimento alla concimazione azotata, fornendo esempi basati su alcune colture guida: frumento tenero, grano duro, mais, pomodoro e barbabietola da zucchero.

ABSTRACT

The main focus of this paper is the analysis of possible strategies to apply efficiently fertilizers and rationally define the fertilizer needs of crops. Other issues considered include a discussion about the most critical aspects of fertilization management and a presentation of the evolution of fertilizers consumption in Italy. Fertilization must be oriented towards the agronomic objectives of productive crops and the environmental objectives of a sustainable environment to avoid losses and pollution. In order to fulfil these objectives a well adapted crop balance must define and include most important nutrients input and outputs in the soil-crop systems. Nutrient balances can be classified on the base of their different complexity. The average nutrient balance is a static approach and produce very simple information on fertilization baselines. The seasonal nutrient balance is dynamic and adapted to give information about space and time variability. A seasonal nutrient balance can be simplified when it takes into account only simple information about the crop in its very early growing stages, or it is more complex and informative when it uses advanced indicators normally based on the crop growth. We discuss which crop indicators are most necessary to fine tune fertilization on site specific characteristics. Some experimental results are reported in order to highlight the experiences obtained in Italy

using advanced method for nitrogen fertilization management with reference to some important crops: soft wheat, durum wheat, maize, tomato and sugar beet.

BIBLIOGRAFIA

- BASSO B., CAMMARANO D., GRACE P.R., CAFIERO G., SARTORI L., PISANTE M., LANDI G., DE FRANCHI S., BASSO F. (2009): *Criteria for selecting optimal nitrogen fertilizer rates for precision agriculture*, «Italian Journal of Agronomy», 4, pp. 159-170.
- CHIEN S.H., PROCHNOW L.I., CANTARELLA H. (2009): *Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts*, «Advances in Agronomy», 102, pp. 267-322.
- CONFALONIERI R. ET AL. (2009): *Il progetto Mazinga: oltre la teoria della diluizione*, «XXXVIII Convegno Nazionale della Società Italiana di Agronomia», pp. 31-32.
- DEBAEKE P., ROUET P., JUSTES E. (2006): *Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index: application to durum wheat*, «Journal of Plant Nutrition», 29, pp. 75-92.
- DELOGU G., CATTIVELLI L., PECCHIONI N., DE FALCIS D., MAGGIORE T., STANCA A.M. (1998): *Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat*, «European Journal of Agronomy», 9, pp. 11-20.
- ERMES AGRICOLTURA (2010): <http://www.ermesagricoltura.it/Sportello-dell-agricoltore/Come-fare-per/Produrre-nel-rispetto-dell-ambiente/Fare-agricoltura-integrata-produzioni-vegetali/Disciplinari-di-produzione-integrata/Norme-general-2010>
- ERREBHI M., ROSEN C.J., BIRONG D.E. (1998): *Calibration of a petiole sap nitrate test for irrigated 'Russet Burbank' potato*, «Soil Sci. Plant Anal.», 29, pp. 23-35.
- FARNESELLI M., BENINCASA P., TEI F. (2010): *Validation of N nutritional status tools for processing tomato*, «Acta Horticulturae», 852, pp. 227-232.
- FONTES P.C.R. E RONCHI C.P. (2002): *Critical values of nitrogen indices in tomato plants grown in soil and nutrient solution determined by different statistical procedures*, «Pesq. Agropec. Bras.», 37 (10), pp. 1421-1429.
- GIORDANI G. (1998): *Analisi dei nitrati nella radice e nei piccioli delle foglie di bietola*, «L'Informatore Agrario», 16, pp. 43-46.
- GIORDANI G. (2002): *Misurare la clorofilla per definire la concimazione azotata delle colture di mais*, «L'Informatore Agrario», 12, pp. 39-43.
- GIORDANI G. (2004): *Nitrati nel frumento e indice di sufficienza azotata*, «L'Informatore Agrario», 12, pp. 57-58.
- GIORDANI G. (2008): *Individuare la richiesta di azoto per concimare meglio il frumento*, «L'Informatore Agrario», 2, pp. 53-57.
- GIORDANI G., BERNATI E. (1998 a): *Definizione degli stadi di sviluppo ottimali per l'impiego dello SPAD nella bietola*, «L'Informatore Agrario», 17, pp. 59-63.
- GIORDANI G., BERNATI E., BARTOLINI M. (1998 b): *Metodi diagnostici per stabilire lo stato nutrizionale del sorgo*, «L'Informatore Agrario», 21, pp. 41-44.
- GREENWOOD D.J. ET AL. (1991): *Growth rate and % N of field grown crops: theory and experiments*, «Annals of Botany», 67, pp. 181-190.
- GRIGNANI C., BASSANINO M., SACCO D., ZAVATTARO L. (2003): *Il bilancio degli elementi nutritivi per la redazione del piano di concimazione*, «Rivista di Agronomia», vol. 37, pp.

- 155-172, ISSN: 0035-6034.
- GRINDLAY D.J.C. (1997): *Towards an explanation of crop nitrogen demand based on the optimization of leaf nitrogen per unit leaf area*, «Journal of Agricultural Science», Cambridge, 128, pp. 377-396.
- HOULÈS V., GUÉRIF M., MARY B. (2007): *Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations*, «European Journal of Agronomy», 27, pp. 1-11.
- ISTAT (2010): <http://www.istat.it/agricoltura/datiagri/mezzipro/elecon.html>
- JANSSEN B.H. (1998): *Efficient use of nutrients: an art of balancing*, «Field Crops Research», 56, pp. 197-201.
- JUSTES ET AL. (1994a): *Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops*, «Annals of Botany», 74, pp. 397-407.
- JUSTES, E., MEYNARD, J.M., MARY, B., LAURENT, F., (1994b): *JUBIL: a new method of conducting the nitrogen fertilization in winter wheat crops*, «Proceedings 3rd ESA Congress», Padova, pp. 490-491.
- LACERTOSA G. e MONTEMURRO F. (2001): *Test rapidi per determinare il contenuto in azoto di alcune colture tipiche del Meridione*, «L'Informatore Agrario», 14, pp. 67-70.
- LADHA J.K., PATHAK H., KRUPNIK T.J., SIX J., VAN KESSEL C. (2005): *Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects*, «Advances in Agronomy», 87, pp. 85-156.
- LEMAIRE G., JEUFFROY M.H., GASTAL F. (2008): *Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management*, «European Journal of Agronomy», 28, pp. 614-624.
- MAMBELLI S., DAL RIO M.P., VENTURI G. (1997): *Razionalizzare la concimazione azotata: ruolo della diagnosi dello stato nutrizionale della pianta*, «Rivista di Agronomia», 31(3), pp. 554-564.
- MILLS H.A., JONES J.B. JR. (1996): *Plant analysis handbook II. A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide*, «MicroMacro Publishing», Inc., Athens, GA, pp. 422.
- MONTEMURRO F. (2003): *L'azoto nelle colture erbacee coltivate nell'Italia meridionale*, «L'Informatore Agrario», 44, pp. 45-47.
- NAUD C., MAKOWSKI D., JEUFFROY M.H. (2008): *Is it useful to combine measurements taken during growing season with a dynamic model to predict the nitrogen status of winter wheat*, «European Journal of Agronomy», 28 (3), pp. 291-300.
- OLFS H.W., BLANKENAU K., BRENTROP F., JASPER J., LINK A., LAMMEL J. (2005): *Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming*, «Journal of Plant Nutrition and Soil Science», 168, pp. 414-431.
- RADERSMA S., VAN EVERT F.K. (2005): *Crop related indicators: is the crop able to tell the farmers what to do?*, «Proceedings of the XIV N Workshop», pp. 247-249.
- RAHN C.R. (2010): *The future of research into the nutrient requirements of field vegetable crops*, «Acta Horticulturae», 852, pp. 335-345.
- RAUN W.R., JOHNSON G.V. (1999): *Improving nitrogen use efficiency for cereal production*, «Agronomy Journal», 91, pp. 357-363.
- ROSSI N. (1972): *La diagnostica fogliare*, «L'Informatore Agrario», 28, pp. 10913-10919.
- SAMBORSKI S.M., TREMBLAY N., FALLON E. (2009): *Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations*, «Agronomy Journal», 101, pp. 800-816.
- SCHLEMMER M.R., FRANCIS D.D., SHANAHAN J.F., SCHEPERS J.S. (2005): *Remotely meas-*

- uring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content*, «Agronomy Journal», 97, pp. 106-112.
- SCHRÖDER J.J., NEETESON J.J., OENEMA O., STRUIK P.C. (2000): *Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art*, «Field Crops Research», 66, pp. 151-164.
- SHANAHAN J.F., KITCHEN N.R., RAUN W.R., SCHEPERS J.S. (2008): *Responsive in-season nitrogen management for cereals*, «Computers and electronics in agriculture», 61, pp. 51-62.
- TEI F., BENINCASA P., GUIDUCCI M. (2002): *Critical nitrogen concentration in processing tomato*, «European Journal of Agronomy», 18, pp. 45-55.
- TREMBLAY N. (2004): *Determining nitrogen requirements from crops characteristics. Benefits and challenges*, «Recent Research Development in Agronomy & Horticulture», 1, pp. 157-182.
- VARANINI Z., CESCO S., MONTE R., TOMASI N., PINTON R. (2008): *La nutrizione delle piante tra limitazioni chimiche e costrizioni fisiologiche: è possibile un approccio sostenibile?*, «Italian Journal of Agronomy», 1 suppl., pp. 129-141.
- WEINBAUM S.A., SCOTT JOHNSON R., DEJONG T.M. (1992): *Causes and consequences of overfertilization in orchards*, «HortTechnology», 2 (1), pp. 112-120.

