



3/ Analisi delle piante

Sokrat Sinaj¹, Guillaume Blanchet¹, Selma Cadot¹, Thomas Kuster²,
Raphaël Charles¹ e Bernard Jeangros¹

¹ Agroscope, 1260 Nyon, Svizzera

² Agroscope, 8820 Wädenswil, Svizzera

Contatto: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch

Indice

1. Introduzione	3/3
2. Principi generali di nutrizione delle piante.....	3/3
3. Analisi dei campioni di pianta e metodo di campionamento	3/4
4. Interpretazione dei risultati dell'analisi delle piante	3/5
5. Complementarietà tra analisi delle piante e analisi del suolo	3/7
6. Bibliografia	3/8
7. Indice delle tabelle.....	3/10
8. Indice delle figure	3/10

In copertina: plantule di mais che manifestano sintomi di carenza nutrizionale durante una prova di concimazione fosfo-potassica a Changins (fotografia: Carole Parodi, Agroscope).

1. Introduzione

Durante il periodo vegetativo, l'analisi delle piante può completare le informazioni ottenute con l'analisi del suolo. Infatti, analizzare direttamente le piante consente di valutare lo stato nutrizionale delle colture, mentre l'analisi del suolo non va oltre la stima delle riserve di elementi nutritivi potenzialmente disponibili. L'analisi delle piante è uno dei metodi complementari utilizzabili per gestire in modo dinamico la concimazione delle colture agricole durante il loro sviluppo e per diagnosticare con precisione l'insorgenza di un eventuale problema legato alla concimazione. Nell'ambito della rotazione colturale, questo metodo permette di ottimizzare l'apporto di elementi nutritivi, determinando con precisione le dosi minime di nutrienti richieste dalle colture per assicurare una produzione quantitativamente e qualitativamente ottimale. Così facendo, si minimizza l'impatto ambientale della concimazione e si massimizza l'efficacia dei concimi distribuiti.

L'interpretazione delle analisi delle piante è altrettanto complessa di quella delle analisi del suolo, visto che i tenori in elementi nutritivi sono strettamente legati alle modalità di campionamento (epoca di prelievo, parte di pianta campionata, ecc.). Di conseguenza, per effettuare analisi calibrate sulle singole colture e per ottenere informazioni attendibili e precise sul loro stato nutrizionale, è essenziale capire i diversi meccanismi nutrizionali delle piante.

2. Principi generali di nutrizione delle piante

Il fabbisogno in elementi nutritivi delle colture cambia durante il loro ciclo di sviluppo (figure 1–4, modulo 8). Ciò implica che le piante siano in grado di regolare la loro capacità d'assimilare gli elementi nutritivi presenti nel suolo in quantità variabili e in forme più o meno disponibili (Reuter e Robinson 1997). Questi meccanismi di regolazione per-

mettono loro di garantirsi livelli di elementi nutritivi sufficienti ad assicurare le loro funzioni vitali. Per esempio, le piante cresciute su substrati in cui la concentrazione di fosforo (P) varia di un fattore 625 mostrano, nei loro tessuti, differenze di concentrazione di P molto più limitate (fattore 10) (Asher e Loneragan 1967). Questo esempio illustra la capacità che le piante hanno di regolare la loro nutrizione in substrati più o meno ricchi in elementi nutritivi. Quando si concima una parcella, si cerca di ottenere una concentrazione ottimale di elementi nutritivi nei tessuti della pianta in modo da raggiungere gli obiettivi di produzione prefissati (resa e qualità), evitando, nel contempo, sia situazioni di penuria (carenza) sia d'eccesso (consumo di lusso) (figura 1). Bisogna anche considerare che, in certi casi, la presenza di alcuni elementi nutritivi influenza l'assimilazione di altri. Si parla di antagonismo quando l'assimilazione di un elemento nutritivo avviene a scapito di quella di un altro nutriente (p.es. potassio [K] e magnesio [Mg]) e sussiste un rischio di carenza (Marschner 2012). Quando un elemento nutritivo è particolarmente abbondante, la pianta può assimilarne più di quanto ne abbia bisogno, senza che la sua resa ne tragga beneficio. In questi casi, si parla di consumo di lusso (Marschner 2012).

Durante il ciclo di sviluppo di una pianta, i tenori in elementi nutritivi dei suoi tessuti evolvono notevolmente. Considerando l'intera pianta, i tenori complessivi in nutrienti diminuiscono progressivamente man mano che la pianta produce biomassa (Greenwood *et al.* 1990; Salette e Lemaire 1981). La diluizione degli elementi nutritivi avviene perché la pianta ripartisce le sue risorse in modo specifico tra i suoi organi in crescita. Si osservano tenori diversi dello stesso elemento nutritivo nei differenti organi costitutivi della medesima pianta.

L'interpretazione delle analisi delle piante deve considerare che la variabilità dei tenori in elementi nutritivi dipende da: specie in questione, parte della pianta analizzata e suo stadio fenologico al momento del campiona-

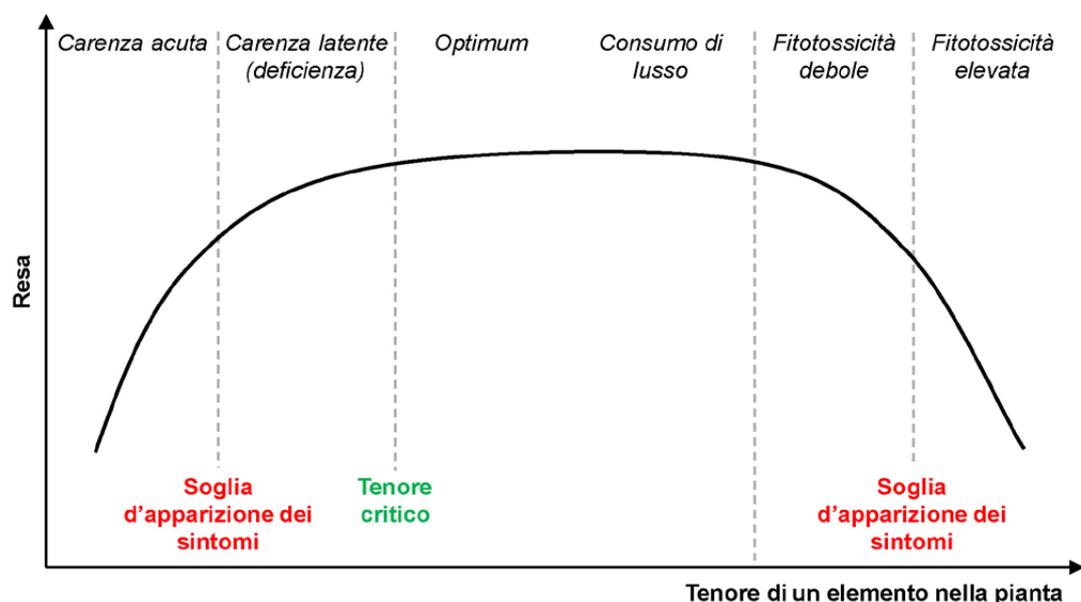


Figura 1. Curva di resa teorica di una coltura in funzione del tenore di un elemento nutritivo nei suoi tessuti (Marschner 2012 – adattato).

mento. In funzione di questi criteri, è possibile diagnosticare in modo attendibile lo stato nutrizionale della coltura presa in esame.

3. Analisi dei campioni di pianta e metodo di campionamento

A seconda del tipo di coltura considerato e degli obiettivi che ci si pone, si possono eseguire diversi tipi di analisi delle piante.

In caso di carenza acuta o di marcato eccesso di uno o più nutrienti, la semplice osservazione diretta può bastare per identificare correttamente i sintomi di entrambe le situazioni di squilibrio nutrizionale. I sintomi si manifestano spesso sotto forma di variazioni di colorazione a livello fogliare oppure attraverso l'apparizione di necrosi o di deformazioni che interessano diverse parti della pianta. L'identificazione visiva di questi squilibri nutrizionali richiede una certa esperienza, anche se esistono numerose pubblicazioni che ne facilitano il riconoscimento. È, quindi, preferibile interpellare un esperto. Alcuni esempi di manifestazioni sintomatiche si trovano, comunque, nei moduli 12 e 13, concernenti viticoltura e frutticoltura. Quando appaiono i primi sintomi, è, spesso, troppo tardi per intervenire efficacemente ancora nella campagna in corso. Nella maggior parte dei casi, però, correggere la concimazione permette di rimediare allo squilibrio nutrizionale a partire dall'anno successivo. Anche se l'osservazione diretta presenta alcuni vantaggi (semplicità d'esecuzione, metodo non distruttivo, costo limitato, ecc.), occorre tenere presenti i suoi limiti. Per esempio, è impossibile quantificare lo squilibrio nutrizionale e, di conseguenza, correggere con precisione la concimazione. Inoltre, è spesso difficile capire la causa delle carenze o degli eccessi riscontrati (disponibilità limitata nel suolo, antagonismo tra due nutrienti, ecc.).

L'analisi di laboratorio dei tenori in elementi nutritivi permette di effettuare la diagnosi completa dello stato nutrizionale della coltura. Di solito, si individuano i tenori globali in macro- e microelementi, ma, in certe situazioni, le analisi si concentrano solo su alcune forme specifiche di

nutrienti (p.es. nitrato $[\text{NO}_3^-]$ per l'azoto $[\text{N}]$ e solfato $[\text{SO}_4^{2-}]$ per lo zolfo $[\text{S}]$), perché ciò rispecchia meglio lo stato nutrizionale della pianta per questi elementi nutritivi (Marschner 2012). A seconda del ciclo vitale della coltura presa in considerazione (annuale o perenne), l'analisi può interessare l'intera parte aerea della pianta, le sole foglie, i singoli costituenti delle foglie (piccioli, lembi, nervature) oppure i frutti. Le analisi di laboratorio comportano investimenti finanziari e sono onerose dal punto di vista lavorativo (preparazione e spedizione dei campioni, costo dell'analisi, ecc.), ma sono il metodo più affidabile per determinare con precisione il tenore di ogni elemento nutritivo presente nelle colture. Nell'ambito della gestione della concimazione N, l'analisi di laboratorio può anche consentire di correggere i futuri apporti di N, in funzione dello stadio di sviluppo della pianta al momento del campionamento. Per ciò che concerne gli altri elementi nutritivi, la correzione della concimazione si esegue in proiezione futura.

Nel caso specifico della gestione dinamica della concimazione N, da qualche decennio vengono sviluppati metodi di analisi fotometrica, basati sulla stima del tenore in clorofilla delle foglie (Piekielek e Fox 1992; Schepers *et al.* 1992). Uno strumento di misura (p.es. Minolta SPAD meter [Soil Plant Analysis Development, Minolta Camera Co., Osaka, Giappone] oppure Yara N tester [Yara International, Oslo, Norvegia]) rileva la riflessione e l'assorbimento di uno o più fasci di luce a livello fogliare. Partendo da questi dati, si determina il tenore in clorofilla che, essendo direttamente legato al tenore in N delle foglie, permette, a sua volta, di capire se la coltura è attualmente carente in questo elemento nutritivo. Questo metodo d'analisi non permette, però, di appurare se il tenore in N è eccessivo, perché le piante smettono di produrre clorofilla a partire da una certa soglia di N (Schepers *et al.* 1992). La determinazione del tenore in clorofilla offre numerosi vantaggi se si vogliono calibrare gli apporti di N durante tutta la crescita della coltura: è semplice, dà risultati immediati e non è distruttiva. In altre parole, rende possibile ripetere le misure sulla stessa pianta nel corso del periodo vegetativo, così da potere seguire la nutrizione N della coltura in punti diversi della parcella. Studi recenti (Prost e Jeuffroy 2007) hanno

Tabella 1. Sintesi dei principali metodi d'analisi delle piante in funzione delle diverse colture.

Coltura	Analisi possibili	Interpretazione dei risultati
Colture erbacee da pieno campo	Tenori complessivi (macro- e microelementi) Tenore in NO_3^- della linfa Tenore in clorofilla	Valori di riferimento Indice di nutrizione
Superfici prative	Tenori complessivi (macroelementi)	Indice di nutrizione
Frutticoltura	Osservazione dei sintomi Tenori complessivi (macro- e microelementi)	Identificazione dei sintomi Valori di riferimento
Viticoltura	Osservazione dei sintomi Tenori complessivi (macro- e microelementi) Tenore in clorofilla	Identificazione dei sintomi Valori di riferimento
Orticoltura	Tenore in NO_3^- della linfa	Valori di riferimento

mostrato che questo tipo di misura permette anche di quantificare l'indice di nutrizione N delle colture (questo concetto verrà approfondito nel prosieguo di questo capitolo). La tabella 1 sintetizza i principali metodi d'analisi delle piante in funzione delle colture considerate.

Se si decide di analizzare le piante, è essenziale contattare il laboratorio prima di procedere, in modo da informarsi sulle procedure da seguire per prelevare, preparare e inviare i campioni da analizzare. Alcuni laboratori e/o certi tipi d'analisi richiedono protocolli particolari. Per esempio, se si intende analizzare la linfa, si raccomanda di prelevare i campioni la mattina presto, perché il tenore in NO_3^- fluttua nel corso della giornata a causa dell'esposizione alla luce (Neely *et al.* 2010). Infine, le quantità di materiale vegetale richieste per le analisi possono variare da un laboratorio all'altro.

Si possono utilizzare due strategie per campionare le piante da analizzare. Se si desidera conoscere lo stato nutrizionale dell'intera coltura, bisogna prelevare le piante da zone dove la crescita è uniforme e rappresentativa dell'intera parcella. Quando al prelievo delle piante si affianca quello di campioni di suolo, le zone campionate devono coincidere. Se lo squilibrio nutrizionale concerne solo una parte della parcella, è possibile fare due campionamenti specifici: uno sulle piante carenti e uno su quelle apparentemente normali, per essere in grado di eseguire un'analisi comparativa. In questi casi, si raccomanda di prelevare anche campioni di suolo da entrambe le zone interessate, in modo da completare i risultati dell'analisi delle piante. Per garantire l'affidabilità delle analisi, è importante preparare correttamente i campioni in funzione delle esigenze del laboratorio. Di solito, si raccomanda di fare essiccare i campioni all'aria per un po' di tempo o di conservarli in frigorifero, ma solo per qualche giorno. Per la conservazione e l'invio bisogna mettere i campioni in sacchetti di carta o in reticelle di nylon ed etichettarli secondo le istruzioni del laboratorio. I sacchetti di plastica vanno quasi sempre evitati, per scongiurare qualsiasi rischio di marcescenza.

4. Interpretazione dei risultati dell'analisi delle piante

Il metodo più diffuso per interpretare le analisi delle piante si basa su valori di riferimento, stabiliti per i diversi stadi di sviluppo di ogni coltura. Questi valori sono frutto di svariate prove, nelle quali si sono individuati i tenori che caratterizzano lo stato nutrizionale ottimale delle piante considerate. I valori di riferimento si utilizzano per le colture erbacee da pieno campo (tabella 2), in orticoltura (modulo 10), in viticoltura (modulo 12) e in frutticoltura (modulo 13). Si possono ottenere richiedendoli direttamente ai laboratori d'analisi.

L'analisi delle piante per superfici prative e colture erbacee da pieno campo si può anche interpretare basandosi su un indice di nutrizione (IN). Il concetto di IN è stato sviluppato e introdotto da Lemaire *et al.* (1989) per determinare lo

stato nutrizionale dei prati. In seguito, è stato esteso ad altre categorie di colture (Justes *et al.* 1994; Colnenne *et al.* 1998; Plénet e Lemaire 2000). Questo indice si basa su un valore critico, ottenuto da prove di riferimento (Ulrich 1952) concernenti la relazione che descrive la diluizione di un nutriente in funzione della biomassa (Salette e Lemaire 1981; Greenwood *et al.* 1990). Per valore critico si intende il tenore minimo di un elemento nutritivo che permette di massimizzare la resa (figura 1). Questo tenore si ritiene ideale, perché ottimizza l'efficacia dell'elemento in questione. L'indice di nutrizione (IN) si può calcolare con l'equazione seguente:

$$\text{IN}_X = \frac{[X]_{\text{mis}}}{[X]_{\text{crit}}} \times 100 [\%]$$

Dove $[X]_{\text{mis}}$ e $[X]_{\text{crit}}$ sono rispettivamente la concentrazione misurata e la concentrazione critica dell'elemento nutritivo X per una data biomassa.

Questo approccio è interessante perché, utilizzando una concentrazione critica dipendente dalla biomassa, è possibile caratterizzare lo stato nutrizionale di una coltura durante il suo intero periodo vegetativo. La letteratura mette a disposizione equazioni che consentono di stimare la concentrazione critica di N (N_c) o di P (P_c) per alcune colture, in particolare per determinate colture erbacee da pieno campo (tabella 3). Le concentrazioni critiche per prati e pascoli si possono trovare nel modulo dedicato alla foraggicoltura (modulo 9).

Generalmente, si parte dal presupposto che un indice nutrizionale inferiore all'80 % rispecchi condizioni di carenza, alle quali si deve porre rimedio aumentando la con-

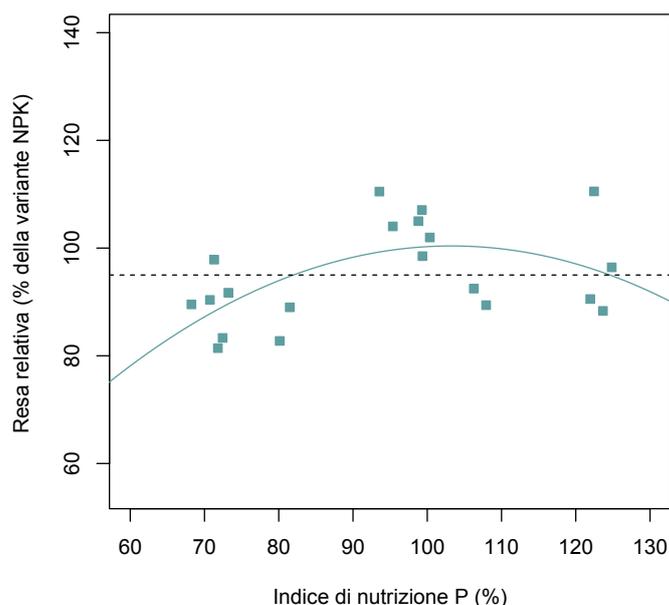


Figura 2. Resa relativa per il frumento autunnale coltivato a Changins in funzione dell'indice di nutrizione P (Cadot *et al.* in corso di pubblicazione). Una resa relativa del 100 % corrisponde alla resa ottenuta con una concimazione NPK secondo quanto riportato nei DBC (Sinaj *et al.* 2009).

Tabella 2. Valori di riferimento dei tenori in macroelementi di alcune colture erbacee da pieno campo.									
Coltura	Parte campionata	Stadio di sviluppo		N	P	K	Ca	Mg	S
		Scala BBCH	Descrizione						
[g kg ⁻¹ SS ¹]									
Cereali	Pianta intera (parte aerea)	13–29	3 foglie – fine accestimento	40,0–50,0	2,0–5,0	25,0–50,0	2,0–10,0	1,4–10,0	1,5–6,5
	Ultima foglia	30–39	Allungamento fusto	40,0–50,0	2,0–5,0	25,0–50,0	2,0–10,0	1,4–10,0	1,5–6,5
	Ultima foglia	40–90	Formazione spiga – raccolta (maturazione)	40,0–50,0	2,0–5,0	20,0–40,0	2,0–10,0	1,4–10,0	1,5–6,5
Mais	Pianta intera (parte aerea)	< 19	Plantula (< 10 cm)	40,0–50,0	4,0–6,0	30,0–40,0	3,0–8,0	2,0–6,0	1,8–5,0
	Ultima foglia	19–52	Allungamento fusto – apparizione infiorescenza	30,0–40,0	3,0–5,0	20,0–30,0	2,5–8,0	1,5–6,0	1,5–4,0
	Foglia adiacente alla spiga superiore	53–69	Infiorescenza – fine fioritura	28,0–40,0	2,5–5,0	18,0–30,0	2,5–8,0	1,5–6,0	1,5–6,0
Colza	Ultima foglia	89	Raccolta (maturazione)	25,0–35,0	2,5–4,0	16,0–25,0	2,0–8,0	1,2–5,0	1,2–4,0
	Ultima foglia	50–59	Infiorescenza	40,0–64,0	4,2–6,9	35,0–51,0	21,0–30,0	1,5–6,2	6,5–9,0
	Ultima foglia	10–29	Inizio crescita	35,0–55,0	3,0–6,0	17,0–25,0	11,0–22,0	0,3–6,0	–
Patata	Ultima foglia	60–69	Fioritura	32,5–50,0	3,0–6,0	15,0–22,5	8,0–14,0	2,5–7,0	2,5–6,0
	Lembi della 4 ^a foglia	11–42	Inizio stagione (crescita pianta e formazione dei tuberi)	60,0–80,0	6,0–9,0	50,0–70,0	15,0–25,0	2,5–7,5	2,0–4,0
	Lembi della 4 ^a foglia	43–45	Metà stagione (crescita dei tuberi)	50,0–70,0	4,0–6,0	35,0–50,0	15,0–25,0	2,5–7,5	2,0–4,0
Girasole	Ultima foglia	47–49	Stagione avanzata (maturazione dei tuberi)	40,0–60,0	2,0–4,0	25,0–35,0	15,0–25,0	2,5–7,5	2,0–4,0
	Ultime foglie	51–69	Infiorescenza e fioritura	20,0–35,0	2,5–5,0	15,0–30,0	3,0–20,0	2,0–15,0	2,0–4,0
Bietola da zucchero	Lembi delle foglie medie	31–39	Crescita della parte aerea	30,0–45,0	1,5–8,0	12,5–60,0	6,0–15,0	2,0–25,0	1,8–2,5

¹ SS: sostanza secca.

Gli intervalli di valore riportati in tabella corrispondono a uno stato nutrizionale ottimale delle colture (Campbell et al. (2000) e American Agricultural Laboratory (2013) – adattato).

Tabella 3. Equazioni delle concentrazioni critiche di N e P per alcune colture erbacee da pieno campo.

Coltura	Concentrazione critica di N (N_C)	Concentrazione critica di P (P_C)
Frumento autunnale	$N_C = 5,35 \times SS^{-0,44}$ (Justes <i>et al.</i> 1994)	$P_C = 4,44 \times SS^{-0,41}$ $P_C = 0,083 N + 0,88$ (Cadot <i>et al.</i> in pubblicazione)
Frumento primaverile	$N_C = 3,85 \times SS^{-0,57}$ (Ziadi <i>et al.</i> 2010)	$IN_N > 80 \%$: $P_C = 0,94 + 0,107 N$ $IN_N < 80 \%$: $P_C = 1,70 + 0,092 N$ (Ziadi <i>et al.</i> 2008)
Colza autunnale	$N_C = 4,48 \times SS^{-0,25}$ (Colnenne <i>et al.</i> 1998)	$P_C = 5,18 \times SS^{-0,39}$ $P_C = 0,657 N + 1,67$ (Cadot <i>et al.</i> in pubblicazione)
Lino	$N_C = 4,69 \times SS^{-0,53}$ (Flénet <i>et al.</i> 2006)	
Mais	$N_C = 3,40 SS^{-0,391}$ (Hermann e Taube 2004)	$P_C = 3,49 \times SS^{-0,18}$ $P_C = 0,083 N + 0,39$ (Cadot <i>et al.</i> in pubblicazione)
Orzo autunnale	$N_C = 4,76 \times SS^{-0,39}$ (Zhao 2014)	
Girasole	$N_C = 4,53 \times SS^{-0,42}$ (Debaeke <i>et al.</i> 2012)	

Le concentrazioni in N e P sono espresse in % di sostanza secca (SS). I valori di SS sono espressi in t ha⁻¹. Le equazioni fornite da Cadot *et al.* (in corso di pubblicazione) sono state stabilite nelle condizioni svizzere (Changins, VD), ciò che non è il caso per le altre equazioni.

cimazione. Viceversa, un indice superiore al 120 % segnala un eccesso. Queste soglie si possono adattare alle singole colture eseguendo prove che stabiliscano accuratamente la relazione tra resa e stato nutrizionale della pianta considerata, come illustrato dalla figura 2 per il frumento autunnale coltivato a Changins. In questo esempio, indici nutrizionali di P varianti tra l'82 e il 124 % hanno assicurato almeno il 95 % della resa di riferimento ottenuta con una concimazione NPK ottimale (Cadot *et al.* in corso di pubblicazione).

Le concentrazioni critiche di fosforo (P_C) si esprimono, di regola, in funzione del tenore in N della biomassa (Duru e Thélier-Huché 1997; Farruggia *et al.* 2000; Bélanger *et al.* 2015). Il modello che utilizza la relazione P_C -N è più universale di quello basato sulla relazione P_C -sostanza secca (SS) (tabella 3), perché (i) gli stessi parametri del modello si possono utilizzare indipendentemente dalle condizioni pedoclimatiche della stazione (Bélanger *et al.* 2015) e (ii) non è necessario determinare la biomassa, ma unicamente i tenori in elementi nutritivi, pertanto è più pratico.

La determinazione delle curve di riferimento per ogni coltura è un obiettivo importante della ricerca agronomica attuale. L'utilizzo degli indici di nutrizione è destinato a diffondersi.

5. Complementarietà tra analisi delle piante e analisi del suolo

L'analisi delle piante consente di valutare *a posteriori* se la disponibilità di elementi nutritivi del suolo basta a coprire il fabbisogno nutrizionale delle colture, mentre grazie all'analisi del suolo si può pianificare *a priori* la concimazione.

Come nel caso delle relazioni tra resa di una coltura e tenori in nutrienti della pianta (indice di nutrizione), la relazione tra resa di una coltura e tenore in un elemento nutritivo del suolo (p.es. P disponibile) può servire a stabilire la soglia critica per interpretare lo stato di fertilità del suolo, cioè il tenore minimo dell'elemento nutritivo del suolo che consente di ottenere almeno il 95 % della resa di riferimento, raggiunta con una concimazione NPK ottimale. In una prova di lunga durata, eseguita a Changins su un suolo con pH neutro ($pH_{[H_2O]} = 6,8$) e tenori in argilla e in sostanza organica (SO) rispettivamente del 54 e del 5 %, Cadot *et al.* (in corso di pubblicazione) si sono evidenziate alcune soglie critiche per P-NaHCO₃ (Olsen *et al.* 1954), P-AAE10 e P-CO₂ (Agroscope 1996) pari a 11,9, 10,0 e 0,3 mg kg⁻¹ per il mais da granella, di 14,7, 12,1 e 0,3 mg kg⁻¹ per il frumento autunnale e di 15,6, 15,2 e 0,8 mg kg⁻¹ per la colza (figura 3). Secondo la versione precedente dei PRIC (già DBC) (Sinaj *et al.* 2009), simili tenori in P-AAE10 avrebbero richiesto, in queste condizioni sperimentali, l'aumento della norma di concimazione P. Questi risultati evidenziano la necessità di estendere lo studio di queste soglie critiche ad altre condizioni pedoclimatiche e ad altre colture, prima di potere generalizzare le raccomandazioni di concimazione basate su relazioni precise tra i tenori in elementi nutritivi del suolo sui tenori interni alla pianta e sulla resa delle colture.

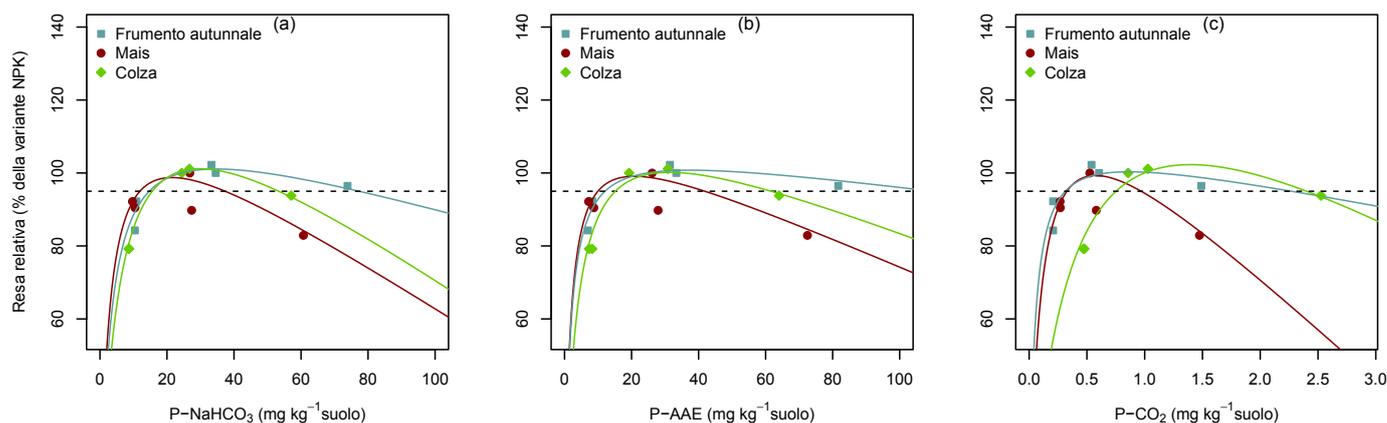


Figura 3. Resa relativa per frumento autunnale, mais da granella e colza in funzione del P disponibile del suolo (Cadot et al. in corso di pubblicazione). Queste curve sono state stabilite nelle condizioni pedoclimatiche di Changins. Per valutare il P disponibile sono stati utilizzati tre metodi d'estrazione differenti: a) metodo NaHCO_3 (riconosciuto internazionalmente), b) metodo AAE10 (P-AAE) e c) metodo $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ (P- CO_2) (b e c sono i metodi di riferimento utilizzati in Svizzera). Una resa relativa del 100 % corrisponde alla resa ottenuta con una concimazione NPK secondo quanto riportato nei DBC (Sinaj et al. 2009).

6. Bibliografia

Agroscope, 1996. Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope, Volume 1: Analyse de terre et du substrat pour conseil de fumure. Édition 2015.

American Agricultural Laboratory, 2013. Plant Tissue Interpretative Guidelines. Link: <https://www.olsenlab.com>.

Asher C. J. & Loneragan J. F., 1967. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. I. Growth and phosphorus content. *Soil science* 103, 225–233.

Bélangier G., Ziadi N., Pageau D., Grant C., Lafond J. & Nyiraneza J., 2015. Shoot Growth, Phosphorus-Nitrogen Relationships, and Yield of Canola in Response to Mineral Phosphorus Fertilization. *Agronomy Journal* 107, 1458–1464.

Cadot S., Bélangier G., Ziadi N., Morel C. & Sinaj S., 2017. Yield response and critical plant and soil phosphorus for wheat, maize, and rapeseed after 44 years of phosphorus fertilization. *Agric. Ecosyst. Environ.* (in corso di pubblicazione).

Campbell C. R. (ed), 2000. Reference Sufficiency Ranges for Plant Analysis in the Southern Region of the United States. Southern Cooperative Series Bulletin 394. Versione aggiornata nel 2013. Link: <http://www.ncagr.gov/agronomi/saesd/scsb394.pdf> [4. 5. 2017]

Colenne C., Meynard J. M., Réau R., Justes E. & Merrien A., 1998. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Oilseed Rape. *Annals of Botany* 81, 311–317.

Debaeke P., van Oosterom E. J., Justes E., Champolivier L., Merrien A., Aguirrezabalaga L.A.N., González-Dugo V., Massingnam A.M. & Montemurro F., 2012. A species-specific critical nitrogen dilution curve for sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Field Crops research* 136, 76–84.

Duru M. & Thélier-Huché L., 1997. N and P-K status of herbage: use for diagnosis of grasslands. In: INRA (Ed.), Diagnostic Procedures for Crop N Management and Decision Making, Paris (Les Colloques n° 82), 125–138.

Farruggia A., Thélier-Huché L., Violleau S., Lebrun J. M. & Besnard A., 2000. L'analyse d'herbe pour piloter la ferti-

lisation phosphatée et potassique des prairies. Exemples d'application de la méthode. *Fourrages* 164, 447–459.

Flénet F., Guéris M., Boiffin J., Dorvillez D., Champolivier L., 2006. The critical N dilution curve for linseed (*Linum usitatissimum* L.) is different from other C3 species. *European Journal of Agronomy* 24, 367–373.

Greenwood D. J., Lemaire G., Gosse G., Cruz P., Draycott A. & Neeteson J. J., 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany* 66, 425–436.

Hermann A. & Taube F., 2004. The Range of the Critical Nitrogen Dilution Curve for Maize (*Zea mays* L.) Can Be Extended Until Silage Maturity. *Agronomy Journal* 96, 1131–1138.

Justes E., Mary B., Meynard J-M., Machet J-M & Thélier-Huché L., 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany* 74, 397–407.

Lemaire G., Gastal F. & Salette J., 1989. Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. In: Proceedings of the 16th International Grassland Congress. Nice. France. 179–180.

Marschner P., 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Troisième édition. Editions Academic Press, London, UK. 672 pp.

Neely H. L., Koenig R. T., Miles C. A., Koenig T. C. & Karlsson M. G., 2010. Diurnal Fluctuation in Tissue Nitrate Concentration of Field-grown Leafy Greens at Two Latitudes. *HortScience* 45 (12), 1815–1818.

Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe F. S. & Dean L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. In U.S. Dept. of Agric., Circ. 939, Washington DC.

Piekielek W.P & Fox R. H, 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. *Agronomy Journal* 84, 59–65.

Plénet D. & Lemaire G., 2000. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and Soil* 216, 65–82.

- Prost L. & Jeuffroy M-H., 2007. Replacing the nitrogen nutrition index by the chlorophyll meter to assess wheat N status. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 321–330.
- Reuter D. & Robinson J.B. 1997. *Plant analysis: An Interpretation Manual*. Deuxième édition. Editions CSIRO, Australia. 450 pp.
- Salette J. & Lemaire G., 1981. Sur la variation de la teneur en azote des Graminées fourragères pendant leur croissance: formulation d'une loi de dilution. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 292 (III), 875–878.
- Schepers J. S., Blackmer T. M. & Francis D. D., 1992. Predicting N Fertilizer Needs for Corn in Humid Regions: Using Chlorophyll Meters. In: Bock B.R. & Kelley K.R. (ed.), *Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions*. Bull. Y-226. National Fertilizer and Environmental Research Center, Muscle Shoals, USA.
- Sinaj S., Richner W., Flisch R. & Charles R., 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF-GCH). *Rev. suisse Agric.* 41, 1–98.
- Ulrich A., 1952. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants, *Annual Review of Plant Physiology* 3, 207–228.
- Ziadi N., Bélanger G., Cambouris A.N., Tremblay N., Nolin M.C. & Claessens A., 2008. Relationship between Phosphorus and Nitrogen Concentrations in Spring Wheat. *Agronomy Journal* 100, 80–86.
- Ziadi N., Bélanger G., Claessens A., Lefebvre I., Cambouris A.N., Tremblay N., Nolin M.C. & Parent L.E., 2010. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Spring Wheat. *Agronomy Journal* 102, 241–250.
- Zhao B., 2014. Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley. *Field Crops Research* 160, 64–72.

7. Indice delle tabelle

Tabella 1. Sintesi dei principali metodi d'analisi delle piante in funzione delle diverse colture.	3/4
Tabella 2. Valori di riferimento dei tenori in macroelementi di alcune colture erbacee da pieno campo.	3/6
Tabella 3. Equazioni delle concentrazioni critiche di N e P per alcune colture erbacee da pieno campo.	3/7

8. Indice delle figure

Figura 1. Curva di resa teorica di una coltura in funzione del tenore di un elemento nutritivo nei suoi tessuti.	3/3
Figura 2. Resa relativa per il frumento autunnale coltivato a Changins in funzione dell'indice di nutrizione P.	3/5
Figura 3. Resa relativa per frumento autunnale, mais da granella e colza in funzione del P disponibile nel suolo.	3/8