



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN
SCIENZE DELLE PRODUZIONI VEGETALI**
INDIRIZZO AGRONOMIA AMBIENTALE - CICLO XXIV
Dipartimento di Agronomia Ambientale e Produzioni Vegetali

***MIGLIORAMENTO DELL'EFFICIENZA D'USO
DELL'AZOTO IN COLTURE ERBACEE INVERNALI***

Direttore della Scuola : Ch.mo Prof. Andrea Battisti

Supervisore : Ch.mo Prof. Giuliano Mosca

Dottorando : Stefano Loddo

DATA CONSEGNA TESI

31 gennaio 2012

Declaration

I hereby declare that this submission is my own work and that, to the best of my knowledge and belief, it contains no material previously published or written by another person nor material which to a substantial extent has been accepted for the award of any other degree or diploma of the university or other institute of higher learning, except where due acknowledgment has been made in the text.

A copy of the thesis will be available at <http://paduaresearch.cab.unipd.it/>

Dichiarazione

Con la presente affermo che questa tesi è frutto del mio lavoro e che, per quanto io ne sia a conoscenza, non contiene materiale precedentemente pubblicato o scritto da un'altra persona né materiale che è stato utilizzato per l'ottenimento di qualunque altro titolo o diploma dell'università o altro istituto di apprendimento, a eccezione del caso in cui ciò venga riconosciuto nel testo.

Una copia della tesi sarà disponibile presso <http://paduaresearch.cab.unipd.it/>

Il periodo di ricerca all'estero presso la “*School of Agriculture, Policy and Development*” dell'Università di Reading (UK), è stato finanziato in parte dalla borsa di studio erogata dalla “Fondazione Ing. Aldo Gini”.

Miglioramento dell'efficienza d'uso dell'azoto in colture erbacee invernali.

ABSTRACT.....	7
RIASSUNTO	11
1 INTRODUZIONE	17
1.1 La nutrizione minerale delle piante erbacee	17
1.1.1 I cereali delle 3 “F”: food, feed, fuel	19
1.1.2 I fabbisogni in azoto delle moderne colture cerealicole	20
1.1.3 Panoramica sul consumo di concimi.	21
1.1.4 La tecnica di concimazione nei cereali microtermini	23
1.2 Impatto ambientale delle pratiche di concimazione	25
1.2.1 Lisciviazione dei nitrati	25
1.2.2 Consumo energetico ed emissione di CO ₂	27
1.2.3 Emissioni gassose: N ₂ O e NH ₃	28
1.3 Necessità di miglioramento dell'indice <i>NUE</i> e strategie percorribili	30
2. SCOPO DELLA TESI.....	32
3. LA RICERCA SU GRANO TENERO E DURO.....	33
3.1 “ <i>Proximal sensing</i> ” e nutrizione del grano.....	34
3.1.1 Introduzione	34
3.1.2 Materiali e metodi.....	36
3.1.3 Risultati sperimentali	42
3.1.4 Discussione	53
3.2 Gestione della variabilità spaziale delle colture	57
3.2.1 Introduzione	57
3.2.2 Materiali e metodi.....	59

3.2.3 Risultati sperimentali	66
3.2.4 Discussione	82
3.3 Inibitori della nitrificazione: potenzialità e prospettive	87
3.3.1 Introduzione	87
3.3.2 Materiali e metodi	89
3.3.3 Risultati sperimentali	94
3.3.4 Discussione	102
3.4 Concimazioni tardive in grano duro: impatto su produzione e qualità.....	106
3.4.1 Introduzione	106
3.4.2 Materiali e metodi	108
3.4.3 Risultati sperimentali	113
3.4.4 Discussione	125
3.5 Effetto di alcuni fattori genetici sulla NUE	128
4 RICERCA SU COLZA INVERNALE DA OLIO.....	135
4.1 Epoca di semina in colza e gestione dell'azoto	136
4.1.1 Introduzione	136
4.1.2 Materiali e metodi	138
4.1.3 Risultati sperimentali	141
4.1.4 Discussione	146
5 CONCLUSIONI GENERALI	148
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	151
RINGRAZIAMENTI.....	164
Allegato 1: questionario distribuito alle aziende per il progetto MI.QU.CE.	166
Allegato 2: itinerario agronomico grano tenero MI.QU.CE. 2009-2010.....	171

ABSTRACT

Breeding and technical innovations have enhanced the potential yields, and thus the N requirements, of modern crops. Unfortunately, extensive use of synthetic fertilisers has increased the impact of agriculture on the environment. Chemical fertilisers have high energy costs and can increase losses from the N cycle, with consequent water pollution (NO_3^-) and emission of GHG (N_2O). Nitrogen use efficiency (NUE) is a primary target for development, food safety and environmental sustainability.

Ways of improving NUE are studied here in winter crops, which are crucial for agriculture. Cultivating these species requires high N inputs in spring; when nutrients are more exposed to leaching by rain. In a climate change scenario, with lower summer precipitation, these crops may be more successful than spring-sown ones. This Ph.D dissertation discusses some approaches in improving NUE.

3.1 “Proximal sensing” and wheat nutritional status

Tools for real-time and non-destructive analyses of nutritional status in durum and bread wheat were studied. The first (*Greenseeker*) is a spectroradiometer to measure NDVI, an index closely linked to the photosynthetic activity of the canopy. The second (*SPAD-502*), analysing transmittance, produces an estimate of leaf chlorophyll content. Indexes were read on transects or plots: corresponding biomass was sampled to determine dry matter and N uptake. In order to work on an extensive, heterogeneous data set, information from many trials was aggregated (6 locations in the Veneto region, 4 cvs of bread wheat, 6 of durum wheat).

The NDVI index showed good correlation with N uptake in both bread and durum wheat. Correlations were often more stable when they involved single locations or varieties. An asymptotic tendency was found in the NDVI value for N uptake over $\sim 200 \text{ kg ha}^{-1}$.

SPAD showed good correlation with N status only in bread wheat. Of all observed indexes, the NNI (Nitrogen Nutrition Index) was the most highly correlated. SPAD close to flowering was closely related to final grain protein content.

3.2 Managing spatial variability in crops

In this section, new systems were studied to capture spatial variability in a durum wheat crop. NDVI was mapped on a full-field scale (13.6 ha), from the onset of stem elongation to seed filling. At harvest, information on yield and grain protein was collected with real-time sensors on harvester.

All data were processed with GIS software, extended by kriging to the entire surface and crossed to obtain apparent N balance and efficiency indexes. Over the 13.6-ha surface area, differing N rates were applied according to soil properties: doses were defined as a result of previous experience and bibliography at the beginning of the growing season.

With data collected during the same season, an algorithm based on NDVI measures at the onset of stem elongation was developed to estimate N requirements. The results were compared with effectively distributed N rates, evidencing the truth of the NDVI-based recommendation: if it had actually been applied, it would have maximised yield and N uptake.

3.3 Nitrification inhibitors: perspectives and potentials

As part of the MI.QU.CE. project, a study on the effectiveness of nitrification inhibitors (NI) was performed; controlled environment (pots) and open field experiments were carried out.

The dynamics of N-NO₃⁻ release in pot soil solutions were observed: the effects of the inhibitor lasted 80 days, peaking on day 50. In open fields, 2 opposite plans were compared in 5 farms: a single dose of NI-enriched fertiliser vs. 2 distributions of traditional N. However, from stem elongation to late ripening, no differences emerged in either biomass production or N uptake. Yield levels were comparable and, as both treatments received foliar N supply at heading, no quality differences were detectable.

Fertilisers with NI can be inserted in actual nutrition plans: no yield or quality disadvantages were observed, and farm management could be simplified.

3.4 Late fertilisation in durum wheat: impact on production and quality

The first effects of climate change and breeding of new genotypes are attracting enthusiasm as regards durum wheat crops in Northern Italy. Three new high-quality varieties and 3 high-yielding ones were tested. Fertilisation treatment focused on managing late nutrition, which plays a key role in producing high-quality wheat.

Opposing the traditional practice of spreading urea on soil at heading, foliar fertilisation was tested for its efficacy. This form of N may be mixed with fungicides, simplifying crop management. Compared with heading-untreated controls, late fertilisation did not improve yield, although there was a slight gain in protein content (+0.5% to 0.8%). Foliar N was recovered in higher percentages than soil urea; the rate applied with this technique was lower (15 vs. 35 kg ha⁻¹), so that N surplus was greatly reduced when urea was sprayed. Foliar fertilisation may be a key factor for sustainable and high-quality production.

3.5 Effect of genetics on NUE index

This section reports the text of an article written during experimentation at the University of Reading (UK). Attention focused on NUE variations at fixed or economic optimal N rates. Nine genotypes were compared, deriving from factorial combination of 3 genetic backgrounds (*cv Mercia*, *M. Huntsman*, *M. Widgeon*) for 3 alleles of the *Rht* gene, coding for plant height (tall, semi-dwarf, severe dwarf).

In each genotype, response curves to N rates were fitted for yield, net profit, NUE and its components. At the standard N rate in the UK (200 kg ha⁻¹), the most efficient allele was *Rht-B1b* (semi-dwarf). In any case, comparisons among the 9 genotypes at optimal N for maximum profit, NUE values gave similar results among alleles. This was true in 4 economic scenarios, in which different ratios between fertiliser cost and the price paid for the wheat were simulated.

4.1 Oilseed rape drilling time and N use

Oilseed rape is a crop of renewed interest, thanks to recent regulation promoting biofuels. To be environmentally sustainable, cropping too must reduce its impact: as in other crops, N nutrition is a critical factor.

The influence of a factor not directly related to fertilisation, drilling time, was assessed. Higher N uptake of an early-drilled crop is likely to reduce the amount of soil mineral nitrogen at the end of the autumn growing season; exposure to nitrate leaching may be decreased.

The amount of this reduction was estimated in a 2-year field trial (2009-2011). Three timings were compared: traditional (September 20-30), 3 weeks earlier and 3 weeks later. In both years, early drilling reduced residual N in soil and optimized yield. Late drilling time is doubly deleterious, for both production and the environment.

RIASSUNTO

La genetica da un lato e i mezzi tecnici dall'altro hanno incrementato il potenziale di resa, quindi il fabbisogno in azoto, delle moderne grandi colture. L'ampio ricorso a concimi di sintesi, accentua l'impatto dell'agricoltura sull'ambiente. I concimi presentano elevati costi energetici e incrementano le perdite del ciclo dell'azoto: inquinando i corpi idrici e contribuendo all'emissione di gas serra (N_2O). L'efficienza dell'uso dell'azoto (NUE) è un obiettivo primario per coniugare sviluppo economico, sicurezza alimentare e sostenibilità ambientale. È stato studiato il miglioramento della NUE nelle colture invernali, una vera criticità per il sistema agricolo. Il ciclo colturale di queste specie richiede, infatti, forti apporti di N nel periodo primaverile, quando i nutrienti sono più esposti al dilavamento da parte degli eventi piovosi. In uno scenario di mutamenti climatici caratterizzati da alterazioni delle precipitazioni estive, è probabile che queste colture possano veder ampliare la loro superficie dedicata rispetto a quelle a ciclo primaverile-estivo. Questa tesi di dottorato affronta alcuni approcci agronomici per migliorare la NUE.

3.1 “*Proximal sensing*” e nutrizione del grano

Sono stati studiati, in grano tenero e duro, strumenti per ottenere letture immediate e non distruttive dello stato nutrizionale. Il primo (*Greenseeker*) è uno spettroradiometro: fornisce un indice (NDVI) legato all'attività fotosintetica della vegetazione. L'altro (*SPAD-502*), interpreta la trasmittanza, stimando il contenuto in clorofilla dei tessuti fogliari.

I valori di detti indici sono stati misurati in parcelle e unità sperimentali di maggiori dimensioni mentre le corrispondenti biomasse sono state saggiate per determinare produzione di s.s. e N uptake. Per avere un set di dati sufficientemente ampio ed eterogeneo, sono stati aggregati i dati di più sperimentazioni (6 località venete, 4 varietà di grano tenero e 6 di duro). L'NDVI ha presentato una buona correlazione con l'assorbimento azotato sia in grano tenero che in grano duro. Le correlazioni erano, spesso, più affidabili se riferite a singole cv. o singole località. Si è messo in evidenza un andamento di tipo asintotico della curva dell'NDVI per valori di assorbimento azotato oltre i $\sim 200 \text{ kg ha}^{-1}$.

Lo SPAD ha evidenziato una buona correlazione con lo stato nutrizionale solo in grano tenero. Tra gli altri indici osservati il NNI (Nitrogen Nutrition Index) è apparso il più correlato allo SPAD. L'indice SPAD, in prossimità della fioritura, è risultato fortemente correlato al contenuto finale di proteina della cariosside.

3.2 Gestione della variabilità spaziale delle colture

In questa sezione sono stati definiti sistemi per catturare la variabilità spaziale di una coltura di grano duro. È stata misurata la variazione dell'NDVI su un intero appezzamento di 13,6 ha tra la fase di inizio levata e il riempimento dei semi. Alla raccolta, con sensori in real-time, sono state acquisite informazioni su livello di resa e contenuto proteico. Tutti i dati raccolti sono stati elaborati con software GIS, estesi a pieno campo con la tecnica del Kriging e incrociati per ottenere informazioni sul bilancio dell'azoto, la sua efficienza di assorbimento e conversione.

Sui 13,6 ha sono stati applicati livelli differenziati di concimazione a seconda delle proprietà del terreno: le dosi di N sono state decise sulla base di precedenti esperienze e della letteratura di settore all'inizio della stagione. A posteriori, con i risultati raccolti durante la stessa stagione di crescita, è stato sviluppato un algoritmo per stimare il fabbisogno di concimazione basato su misurazioni NDVI relative allo stadio di inizio levata. Confrontare queste indicazioni con la concimazione effettivamente distribuita ha evidenziato il realismo della dose di N suggerita dall'indice NDVI, che, se fosse stata applicata, avrebbe massimizzato resa e assorbimento in N.

3.3 Inibitori della nitrificazione: potenzialità e prospettive

Nell'ambito del progetto MI.QU.CE. è stato allestito uno studio sull'efficacia degli inibitori della nitrificazione. La ricerca ha previsto un esperimento realizzato in ambiente confinato ed uno a pieno campo. Nel primo caso (vaso) sono state studiate le dinamiche di rilascio di $N-NO_3^-$ nella soluzione circolante a seguito dell'applicazione di un concime azotato con inibitore. L'effetto dell'inibitore si è protratto per 80 giorni circa, raggiungendo il massimo rilascio a 50 giorni dall'apporto. In pieno campo invece sono stati confrontati, in 5 aziende, due piani alternativi: un solo apporto di concime additivato vs. 2 frazionamenti di N tradizionale. Tra levata e tarda maturazione, non vi sono state differenze in produzione di s.s. o N uptake. I livelli di resa erano comparabili, ed avendo entrambe le tesi ricevuto concimazioni fogliari in spigatura, non sono emerse evidenti differenze qualitative.

Dal progetto è emerso che i concimi con inibitore della nitrificazione ben si adatterebbero all'inserimento negli attuali piani di coltivazione: non apportando drammatici cali di resa e qualità, e semplificando la pratica aziendale.

3.4 Concimazioni tardive in grano duro: impatto su produzione e qualità.

I primi mutamenti climatici e lo sviluppo di nuovi genotipi hanno reso interessante la coltivazione del grano duro in Italia settentrionale. Sono stati saggiati 3 genotipi a elevato standard qualitativo, e altrettanti ad alto potenziale di resa. I protocolli di concimazione erano focalizzati sulla gestione della nutrizione tardiva, cruciale per un prodotto di qualità.

In contrapposizione alla pratica tradizionale di distribuire urea a spaglio in spigatura, è stata testata l'efficacia della concimazione fogliare: tale intervento può essere associato ai trattamenti fungicidi, semplificando la tecnica di coltivazione e riducendo i passaggi in campo. Rispetto a un controllo non concimato in spigatura, le concimazioni tardive non hanno migliorato le rese; tuttavia sussiste un leggero incremento del tenore proteico (da +0,5% a +0,8%) per entrambe (fogliare e a spaglio). La concimazione fogliare è stata assorbita in percentuale maggiore rispetto a quella al suolo: questo, in associazione alla minor dose di N applicata (15 vs. 35 kg ha⁻¹) ha notevolmente ridotto il surplus azotato nel bilancio apparente. La pratica della concimazione fogliare potrebbe quindi candidarsi ad assumere un ruolo chiave per produzioni di grano duro sostenibili e di qualità.

3.5 Effetto dei fattori genetici sull'indice NUE.

È stato riportato il testo della pubblicazione redatta durante l'esperienza di ricerca svolta presso l'Università di Reading (UK). Lo studio era incentrato sul variare della NUE a un livello fisso di N, o all'optimum economico. Sono stati confrontati 9 genotipi, derivanti dalla combinazione fattoriale di 3 background genetici (*cv. Mercia, M. Huntsman, M. Widgeon*) per 3 varianti alleliche del gene *Rht*, codificanti per la taglia in grano tenero (alto, semi-nano, nano).

Per ogni genotipo è stata definita la curva di risposta alla concimazione per resa, profitto economico, NUE e sue componenti. Al livello di N standard per il Regno Unito (200 kg ha^{-1}), l'allele più efficiente era *Rht-B1b*, ossia il semi-nano. Confrontando però i 9 genotipi alla dose di N ottimale, al fine di massimizzare il profitto (più elevato nel semi-nano), i valori di NUE risultavano comparabili tra gli alleli. Questo assunto si è verificato in ben 4 scenari economici, ove erano simulati diversi rapporti tra costo dell'unità fertilizzante e prezzo pagato per la granella.

4.1 Epoca di semina del colza e uso dell'azoto

Il colza è una coltura di rinnovato interesse per le recenti normative incentivanti l'uso dei biocarburanti. Nella logica della sostenibilità ambientale, anche la fase di coltivazione deve avere un ridotto impatto: la nutrizione azotata, come in altre colture, rappresenta un fattore critico. È stato saggiato l'effetto di un fattore non direttamente collegato alle concimazioni: l'epoca di semina. Il maggior N uptake di una coltura seminata precocemente riduce, potenzialmente, la quantità di N minerale nel terreno alla fine della stagione autunnale, contenendo il rischio di lisciviazione di nitrati.

L'entità di questa riduzione è stata stimata in una prova biennale (2009-11) di campo. Le epoche rappresentavano la data canonica (3° decade di settembre) e due date anticipate o ritardate di 20 giorni. In entrambi gli anni l'epoca anticipata ha ridotto l'N residuale nel terreno e massimizzato la resa. Semine eccessivamente tardive sono risultate doppiamente deleterie sia per l'aspetto produttivo che per quello ambientale.

LISTA DELLE ABBREVIAZIONI:

<i>3,4-DMPP:</i>	3,4-Dimetilpirazolo fosfato
<i>cv:</i>	cultivar
<i>GDD:</i>	Growing Days Degree (Gradi utili giornalieri)
<i>HI:</i>	Harvest Index (indice di ripartizione della biomassa)
<i>HMW-GS:</i>	High Molecular Weight Glutenin Subunit (subunità delle glutenine ad alto peso molecolare)
<i>LMW-GS:</i>	Low Molecular Weight Glutenin Subunit (subunità delle glutenine a basso peso molecolare)
<i>MI.QU.CE.:</i>	Miglioramento Qualità dei Cereali (progetto PSR misura 124)
<i>Mha:</i>	Milioni di ettari
<i>Mt:</i>	Milioni di tonnellate
<i>NDVI:</i>	Normalized Difference Vegetation Index
<i>NHI:</i>	Nitrogen Harvest Index (indice di ripartizione dell'azoto)
<i>NIR:</i>	Near Infrared (vicino infrarosso)
<i>NIRS:</i>	Near Infrared Spectrometry (spettrometria del vicino infrarosso)
<i>NNI:</i>	Nitrogen Nutrition Index (indice nutrizionale di <i>Justes et al. 1994</i>)
<i>Nr:</i>	Azoto reattivo
<i>NUE:</i>	Nitrogen Use Efficiency (efficienza d'uso dell'N)
<i>NUpE:</i>	Nitrogen Uptake Efficiency (efficienza di assorbimento dell'N)
<i>NUtE:</i>	Nitrogen Utilisation Efficiency (efficienza di conversione dell'N)
<i>PR:</i>	Pronto Rilascio
<i>RC:</i>	Rilascio Controllato
<i>SMN:</i>	Soil Mineral Nitrogen (N minerale del suolo)
<i>S.O.:</i>	Sostanza organica del suolo
<i>s.s.:</i>	Sostanza secca
<i>VRT:</i>	Variable Rate Technology (tecnologia a variazione della dose)
<i>ZO:</i>	Zone omogenee

1 INTRODUZIONE

1.1 La nutrizione minerale delle piante erbacee

Per sostenere la propria attività metabolica e di accrescimento, le piante dipendono da un ampio numero elementi chimici: C, H, O, N, P, K, S, Ca, Mg, Cu, Zn, B, Mo, Mn e Ni. Tali elementi sono sempre stati tradizionalmente suddivisi per la loro abbondanza nei tessuti vegetali in macro- e microelementi; ma sono state anche proposte classificazioni basate sulla loro funzionalità biologica. Tra questi l'azoto ricopre un ruolo cruciale, poiché entra a far parte di numerose molecole (i.e. aminoacidi, acidi nucleici, clorofilla, citochinine, poliammine, metaboliti secondari) fondamentali durante tutto il ciclo biologico dei vegetali (Maffei, 1999).

Nonostante l'azoto sia il principale componente dell'atmosfera terrestre (78%), l'abbondanza delle sue forme biologicamente disponibili "Nr" (*N reattivo*) è relativamente scarsa, risultando spesso limitante per lo sviluppo delle colture. Si stima che nei primi anni '90 le fonti naturali di Nr (scariche elettriche, fissazione biologica terrestre e marina) producessero a livello globale 233 Mt di N reattivo. Tale quantità non è minimamente sufficiente a sostenere l'attuale fabbisogno mondiale per gli usi agricoli e non, e viene integrata dalla produzione industriale (100 Mt) e dalla coltivazione di simbiosi azotofissatrici (31,5 Mt), cui vanno a sommarsi i 24,5 Mt dalle emissioni da combustibili fossili (Galloway et al. 2004). Le previsioni per il 2050 indicano un'ulteriore aumento da 156 a 267 Mt di Nr da fonti antropogeniche a causa dell'aumento della popolazione mondiale e dell'incremento dell'uso di combustibili fossili (Galloway et al. 2004).

Tuttavia la relativa scarsità di Nr nella biosfera non è l'unica problematica legata all'elemento: l'azoto è soggetto ad una serie di reazioni di ossido-riduzione batterica (Fig. 1) che possono fortemente condizionarne la biodisponibilità nel tempo e nello spazio. Nel terreno può essere presente sottoforma di numerosi stati di ossidazione, ma solo le forme nitrica ($N-NO_3^-$) e quella ammoniacale ($N-NH_4^+$) sono direttamente assorbite dalle piante.

La presenza di queste due forme dipende dall'attività microbica di immobilizzazione/mineralizzazione dell'azoto organico presente nel suolo e dalla nitrificazione della forma ammoniacale (Stainer et al. 1988). Delle due il nitrato è la forma più facilmente assorbita dalle piante, ma a causa della sua estrema solubilità in acqua e

della sua debole capacità di essere adsorbito dai colloidali è soggetto a dilavamento. In determinate condizioni (anossia ed elevata temperatura) il nitrato può essere trasformato in ossidi (NO , N_2O) o ridotto ad azoto molecolare (N_2) ed essere potenzialmente rilasciato in atmosfera, con perdita netta di N_r per il sistema (Stainer, 1988).

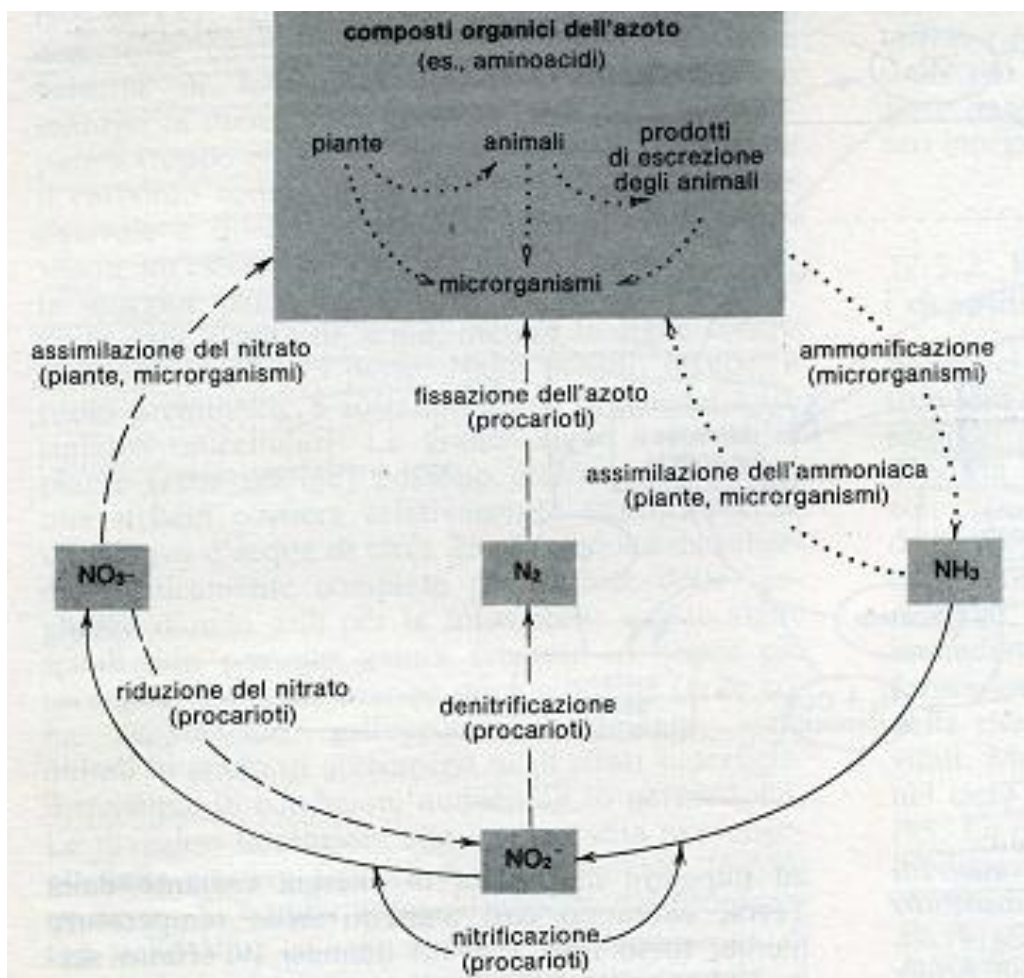


Fig. 1. Schema del ciclo dell'azoto nel suolo agrario (da Stanier et al. 1988; Cap. 27, Fig. 27.3 pag. 528).

1.1.1 I cereali delle 3 “F”: food, feed, fuel

Grazie all'estrema adattabilità ambientale, alla conservabilità e alla loro versatilità per svariati impieghi culinari, i cereali hanno da sempre costituito uno dei principali pilastri della sicurezza alimentare del genere umano. I cereali macro (riso, mais, sorgo, miglio, panico) e microtermi (grano tenero e duro, orzo, avena, segale, triticale e specie minori) ricoprivano nel 2009 una superficie globale di 688 Mha, pari al 49,8% di tutte le superfici arabili (*FAOSTAT, 2011*). Nel corso degli ultimi 50 anni tale percentuale è rimasta pressoché invariata subendo solo modeste oscillazioni.

Le 3 principali colture cerealicole a livello globale sono il grano (225,6 Mha tra tenero, duro e specie minori), il mais (159,6 Mha) e il riso (158,3 Mha) (Fig. 2; *FAOSTAT, 2011*). Tali specie hanno sempre costituito la principale fonte di calorie necessarie per la dieta della maggioranza della popolazione mondiale e nei Paesi in via di sviluppo, sono tuttora una delle poche fonti di proteina.

Tuttavia i 2493 Mt di granaglie prodotte (*FAOSTAT 2011*) vanno suddivisi tra diversi usi per alimentazione umana (Food), alimentazione animale (Feed) e usi industriali, ascrivibili prevalentemente alla recente produzione di biocarburanti (Fuel). La popolazione mondiale in costante aumento, il maggior consumo di prodotti animali nei paesi più ricchi e la continua crescita della domanda energetica impongono un certo livello di competizione per una risorsa sicuramente non illimitata e di difficile sostituzione.

L'introduzione di alimenti concentrati nella razione animale ha indubbiamente contribuito ad elevare i livelli di produttività degli allevamenti, ma sottrae risorse alimentari al consumo umano. Nel 2002 si stima che a livello globale 670 Mt di cereali, pari a una superficie coltivata di 211 Mha, sia stata dedicata all'alimentazione del bestiame (*Steinfeld et al. 2006*). La produzione del bioetanolo di prima generazione assorbe invece il 6% della produzione cerealicola mondiale (*Lal, 2011*). La produttività delle colture, soprattutto cerealicole, diventerà quindi sempre più una criticità per garantire la sicurezza alimentare della popolazione mondiale durante tutto il presente secolo.

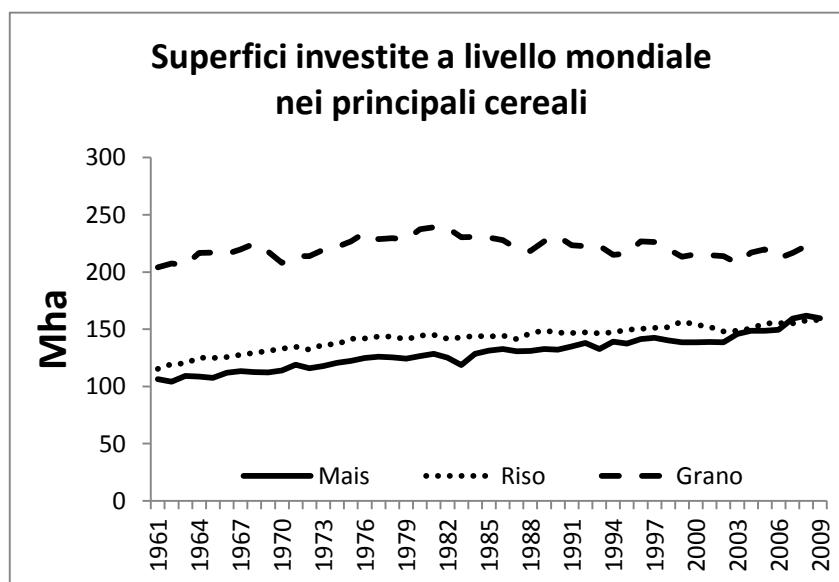


Fig. 2. Andamento delle superfici mondiali investite con i 3 principali cereali, dati espressi in milioni di ettari (fonte FAOSTAT).

1.1.2 I fabbisogni in azoto delle moderne colture cerealicole

La genetica, a partire dagli anni '60 del XX secolo, ha permesso un sostanziale aumento del potenziale di resa di molte colture, in particolare dei cereali (*Austin et al. 1980*). L'introduzione massiva nel breeding del frumento di geni per la riduzione della taglia (*Rht*) ha migliorato l'efficienza nella redistribuzione dei fotosintetati (maggiore *Harvest Index*) ed apportato effetti pleiotropici sulla fertilità della spiga (*Flintham et al. 1997*). Una volta prossimo al limite fisiologico superiore dell'*HI* (*Harvest Index* circa al 60%), il miglioramento genetico si è orientato verso l'aumento della capacità di produzione di biomassa epigea da parte della coltura (*Shearman 2005*). Il maggior potenziale di resa ha portato indubbiamente all'aumento generalizzato dei fabbisogni di azoto da parte delle colture non azotofissatrici, rendendole, di fatto, dipendenti da cospicui apporti di concime minerale. La ridotta statura delle piante ha permesso materialmente tale intensificazione, in quanto, le nuove varietà sono molto meno sensibili al rischio di allettamento rispetto ai predecessori.

La dipendenza dai concimi minerali è particolarmente fondata nel caso del frumento, dove a un iniziale calo del contenuto proteico delle cariossidi per effetti di diluizione, è succeduto lo sforzo per il mantenimento della qualità (*Ortiz-Monasterio et al. 1997*). Dai continui incrementi di resa e dalla sostanziale stabilità del contenuto proteico è derivato un

costante incremento del *N uptake*. Numerosi confronti condotti nel Regno Unito tra varietà datate e di recente introduzione (1977 - 2007) hanno indicato incrementi della dose ottimale di azoto di 12,4 kg ha⁻¹ per decennio, a fronte di corrispettivi aumenti di resa nell'ordine di 0,5 t ha⁻¹ (Sylvester-Bradley e Kindred 2009). Analoghe ricerche svolte in Italia su varietà rappresentanti un più ampio orizzonte temporale (1900-1994) hanno riportato indicazioni simili con aumenti di resa dell'ordine di 0,33 t ha⁻¹ cui sono corrisposti incrementi di assorbimento dell'azoto compresi tra 6,7 e 8,2 kg ha⁻¹ nell'arco di un decennio (Guarda et al. 2004).

Considerando un livello proteico del 13%, comunemente richiesto dall'industria molitoria per un prodotto qualitativamente superiore (NAMIB 2009), la produzione di 7 t ha⁻¹ (s.s.) di cariossidi di grano può richiedere circa 160 kg ha⁻¹ di N. Quantità difficilmente ottenibile dalla sola mineralizzazione della sostanza organica del suolo. Nel caso vi sia anche l'asportazione dei residui colturali, l'intervento di concimazione si rende ancora più necessario per sopperire al depauperamento del terreno.

1.1.3 Panoramica sul consumo di concimi.

Si stima che la stragrande maggioranza di *Nr* in entrata nel sistema agricolo globale sia di origine antropogenica. Dati dei primi anni '90 indicano che dei 170 Mt annuali di *Nr* in ingresso, 50 derivano da forme di *Nr* già presente nel ciclo (deposizione atmosferica, N in rifiuti organici o reflui...), 30 da colture azotofissatrici e 90 dall'impiego di concimi (Galloway et al. 2004). Se agli albori della rivoluzione industriale l'origine dei concimi azotati era principalmente da giacimenti geologici o depositi di guano, con il ciclo *Haber-Bosch* si è aperta la possibilità di sfruttare a costi accessibili la risorsa praticamente inesauribile dell'azoto atmosferico (N₂). Nel 2010 nel mondo venivano fissate 131 Mt di *Nr* sotto forma di NH₃, la maggior parte di questi destinati per usi agricoli; l'estrazione di N da fonti minerarie era praticamente trascurabile e localizzata in prevalenza in alcune aree del deserto cileno (USGS, 2011).

Osservando i dati FAO (2011, Fig. 3) si deduce che il consumo mondiale di concimi sia in continua crescita, infatti nel cinquantennio 1961-2009 è praticamente decuplicato. Tale tendenza è da attribuirsi indubbiamente al maggior fabbisogno delle colture e all'intensivizzazione di molti sistemi colturali. Sotto la pressione demografica, esercitata

soprattutto dai *PVS*, tale consumo sembra destinato ad aumentare ancora durante tutto il prossimo secolo (*Dobermann e Cassman 2005*).

In altre aree del mondo, tuttavia, a partire dagli anni '80 si registra una sostanziale stagnazione dei consumi a cui è seguita, dai primi anni '90, una vera e propria contrazione. Tale tendenza trova spiegazione nella presa di coscienza in molti Paesi industrializzati delle problematiche ambientali indotte dall'uso massiccio di concimi di sintesi e dalle misure conseguenti per mitigarne l'impatto. Osservando l'andamento dei consumi di concimi in Italia nel periodo 1961-2009 (*dati FAO 2011*, Fig. 4) si può avere un chiaro esempio di tale processo. Oltre all'effetto delle politiche ambientali in Italia è da evidenziare come abbia inciso anche la drammatica riduzione delle superfici arabili, a causa del cambio d'uso del suolo e del fenomeno dell'abbandono delle aree marginali.

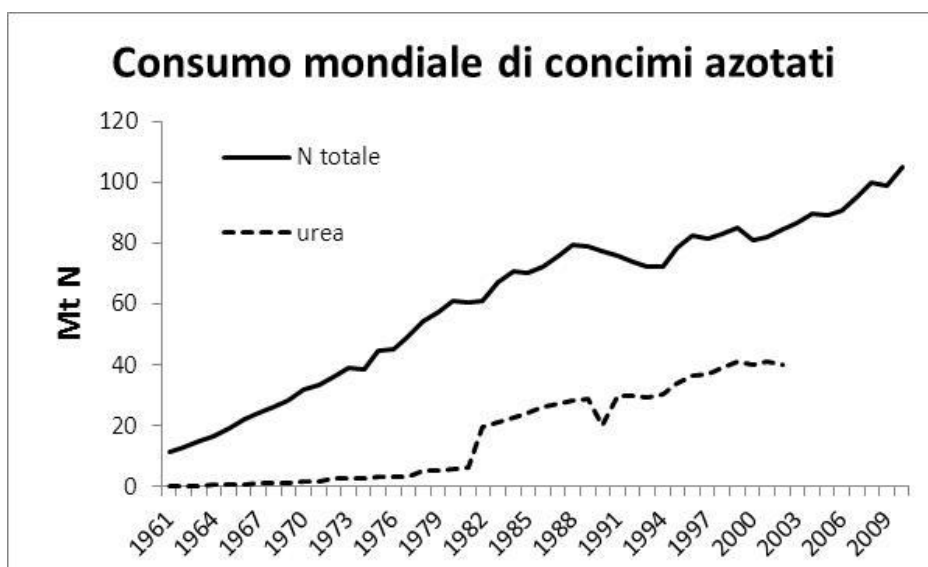


Fig. 3. Consumo di concimi azotati a livello globale, dati espressi in milioni di tonnellate di N. La serie "urea" rappresenta i milioni di tonnellate di N da concimi ureici consumate annualmente, i dati sono disponibili solo per il periodo 1961-2002 (fonte FAO)



Fig. 4. Consumo di concimi azotati in Italia, dati espressi in milioni di tonnellate di N. La serie “urea” rappresenta i milioni di tonnellate di N da concimi ureici consumate annualmente, i dati sono disponibili solo per il periodo 1961-2002 (fonte FAO).

1.1.4 La tecnica di concimazione nei cereali microtermi

La quantità e la distribuzione delle precipitazioni condizionano l’espressione del potenziale di resa delle colture. I livelli di concimazione necessari a soddisfare i fabbisogni di nutrienti minerali variano perciò molto tra i diversi areali di coltivazione. Ambienti poveri di precipitazioni come le pianure australiane offrono possibilità di resa molto scarse per i cereali (media 1,9 t ha⁻¹), ne consegue un uso limitato di concimi azotati (media 48 kg ha⁻¹). In ambienti come l’intera Europa Occidentale, dove le precipitazioni sono più frequenti e meglio distribuite, l’agricoltura segue un modello intensivo e i cereali possono offrire rese maggiori (media 5,5 t ha⁻¹), che necessitano più consistenti input azotati (media 113 kg ha⁻¹) (Dobermann e Cassman 2005).

Anche in Europa esiste una netta differenziazione tra gli ambienti di coltivazione: se per esempio in un ambiente tipicamente mediterraneo (Italia, Sardegna) possono essere ritenuti sufficienti i 100 kg ha⁻¹ N per l’intero ciclo culturale del grano (Giunta e Motzo 2005), in numerosi Paesi del Nord Europa (es.: UK), sono comunemente apportati ben oltre i 180 kg ha⁻¹ N (Sylvester-Bradley e Kindred, 2009).

Per essere efficace l’apporto di nutrienti minerali deve essere coerente con le fasi di sviluppo e le capacità di assorbimento da parte della coltura. Nutrienti poco mobili come P

e K devono essere distribuiti prima della semina per ottenerne un'omogenea distribuzione nello strato lavorato. Per la coltivazione del grano nell'ambiente italiano, le dosi ritenute opportune per questi due nutrienti sono 70-100 e 100-150 kg ha⁻¹ rispettivamente per P₂O₅ e K₂O (Toderi e D'Antuono, 2000). In caso di semina su sodo tali elementi vengono distribuiti con formulazioni microgranulate in dose ridotte lungo la fila.

È noto come la suddivisione della dose di N in più frazionamenti migliori la resa rispetto ad un unico singolo apporto, specialmente se da un terzo a metà della unità totali vengono applicate durante la fase di levata (Garrido-Lestache et al. 2004). A parità di dose totale distribuita, la riduzione della concimazione azotata durante le fasi precoci (accestimento) a favore di quelle più avanzate (levata, spigatura) favorisce un maggior assorbimento dei nutrienti e aumenta l'efficienza della coltura (Blankenau et al. 2002). Quest'approccio comincia a essere considerato valido anche dove, per tradizione e necessità ambientali, l'intera dose di N viene fornita alla semina: la correzione della dose di concimazione con apporti tra fine accestimento ed inizio levata è stata valutata una tecnica economicamente remunerativa (Raun et al. 2002).

La miglior valorizzazione dell'azoto somministrato durante le fasi di più intensa attività vegetativa (levata), dipende dalla maggior capacità d'intercettazione delle piante. Un esperimento in ambiente mediterraneo (Spagna) con tracciante radioattivo (¹⁵N) ha dimostrato che solo una piccola quota dell'azoto fornito in presemina viene effettivamente intercettata dal grano tenero (14,1%). L'azoto ad inizio levata è invece assorbito in proporzione maggiore (54,8%) (Lopez-Bellido et al. 2005). Grosse disponibilità di azoto derivante da mineralizzazione della sostanza organica e dai residui della precedente coltura possono influenzare negativamente l'efficienza (Lopez-Bellido et al. 2005). Indicazioni simili sono emerse dallo studio del grano duro nello stesso ambiente (Lopez-Bellido et al. 2006).

Concimazioni molto tardive, verso le fasi di spigatura/fioritura, pur non avendo significativi effetti sulla resa, possono incrementare il contenuto proteico delle cariossidi e la produzione di proteina per ettaro (Martin et al. 1990; Miceli et al., 1992; Gooding e Davies 1992; Woolfolk et al. 2002).

La distribuzione di concimi azotati in grano deve essere quindi pianificata per evitare stress nutrizionali lungo tutto il ciclo biologico: carenze precoci (pre-antesi) potrebbero limitare il numero di spighe o fiori fertili a m² e quindi la resa, carenze tardive (post-

antesi) potrebbero invece pregiudicare il contenuto proteico e la qualità delle cariossidi (Triboi e Triboi-Blondel, 2002). Al momento di determinare la strategia ottimale di concimazione deve essere ovviamente tenuta in considerazione anche la quantità di azoto derivante dalla mineralizzazione della S.O. del terreno. La conoscenza di tale informazione per quanto dispendiosa in termini economici e logistici può migliorare al contempo resa e efficienza d'uso dell'azoto (Wehrmann e Scharpf 1979; Mengel et al. 2006; Arregui e Quemada, 2008).

1.2 Impatto ambientale delle pratiche di concimazione

Indubbiamente il massiccio impiego di concimi chimici in agricoltura ha apportato, ed apporta tuttora, fortissimi benefici. Sono garantite, infatti, produzioni elevate e stabili per le colture che costituiscono la principale fonte di sostentamento di una popolazione mondiale come più volte ricordato in costante incremento. Tuttavia tale pratica esercita una notevole pressione sull'ambiente, che si esprime in molteplici forme: dalla riduzione della qualità dell'aria, al contributo al riscaldamento globale, all'inquinamento delle acque superficiali.

1.2.1 Lisciviazione dei nitrati

Come già affermato, la forma nitrica dell'azoto (N-NO_3^-) è quella più mobile ed è favorita per l'assorbimento da parte delle radici delle piante. La facilità con cui il nitrato si discioglie in soluzione acquosa e segue il flusso delle acque nel terreno, rende lo ione facilmente soggetto a ruscellamento superficiale (*runoff*) o lisciviazione profonda (*leaching*).

L'eccessiva presenza di ione nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-) nelle acque destinate al consumo umano può essere nociva alla salute, portando gravi intossicazioni e altri disturbi. L'Unione Europea ha pertanto stabilito dei limiti ben precisi di concentrazione massima nelle acque potabili (80/778/CEE, 1980), pari a 50 e 0,1 mg l⁻¹ rispettivamente per lo ione nitrato e quello nitrito.

Un altro grave aspetto dell'inquinamento da nitrati delle acque superficiali è l'eutrofizzazione. Tale fenomeno può occorrere sia in acque marine che in acque dolci

quando l'eccesso di nutrienti azotati favorisce la proliferazione dei microrganismi algali: l'ossigeno in soluzione viene consumato dalle alghe, gli altri organismi acquatici soccombono per anossia e mancata filtrazione della luce negli strati inferiori.

L'agricoltura è, assieme alla gestione delle acque reflue civili, la principale fonte di questo tipo d'inquinamento, l'Unione Europea ha perciò normato e imposto misure ambientali in merito dai primi anni '90 (91/676/CEE). Sono stati sviluppati codici di buone pratiche agricole (BPA) e sono state disciplinate le modalità per l'applicazione di concimi chimici e reflui zootecnici.

Attraverso modelli di simulazione si è dimostrato che l'implementazione di tali misure può essere una via efficace per ridurre la lisciviazione dei nitrati entro i termini di legge. Tuttavia tra queste, lo strumento con maggior margine è la riduzione dell'N surplus: la differenza tra apporti netti (concimi + reflui zootecnici) e asportazione di N da parte delle colture (Kunkel et al. 2010). L'indice N surplus è stato già in precedenza segnalato come un buon indicatore per il rischio di lisciviazione (Sieling e Kage 2006).

Le BPA (ottimizzazione N, *catch-crops*, incorporazione residui colturali) si sono confermate uno strumento molto utile per ridurre la lisciviazione dei nitrati, il loro effetto è però fortemente influenzato da andamento climatico, tipo di suolo e avvicendamento colturale (Beaudoin et al. 2005).

Una tecnica promettente tra le BPA è quella delle *catch-crops* (CC), colture intercalari seminate allo scopo di intercettare i nutrienti nelle fasi della rotazione in cui il suolo non presenterebbe alcuna copertura vegetale. Queste colture, generalmente *Brassicaceae* o *Graminaceae* possono essere seminate ad hoc, o come proposto in casi particolari (colza) derivare da ricacci di colture precedenti (Justes et al. 1999). La coltivazione di CC avviene generalmente tra la raccolta di una coltura e la semina autunnale o primaverile della successiva. A seconda delle condizioni di coltivazione e della CC possono essere intercettati dai 30 ai 50 kg ha⁻¹ N (Justes et al. 1999; Costantin et al. 2011), evitando lisciviazioni di N-NO₃ dell'ordine dei 9 - 32 kg ha⁻¹ N (Costantin et al. 2010), o dimezzando da 91 a 45 mg l⁻¹ la concentrazione di NO₃⁻ nelle acque di percolazione (Justes et al. 1999).

Altre strategie per la riduzione dell'impatto ambientale delle colture coinvolgono le caratteristiche genetiche dei vegetali. Nel grano è stato osservato come genotipi dotati di maggior vigore nello sviluppo radicale possano assorbire maggiori quantità di N

soprattutto nelle prime fasi, limitando il rischio di lisciviazione (*Liao et al. 2006*). La scelta di colture con maggior approfondimento radicale (es. grano a semina autunnale vs. semina primaverile) può sortire gli stessi effetti positivi di una *catch-crop* (*Thorup-Christensen et al. 2009*).

1.2.2 Consumo energetico ed emissione di CO₂

Il processo *Haber-Bosch* avviene a pressioni elevate (150-250 bar), temperature tra i 350-500°C e impiega grandi quantità di gas naturale: è perciò molto oneroso dal punto di vista ambientale. L'energia necessaria a sintetizzare una tonnellata di urea è pari a 22,2 GJ (*Woods et al. 2010*). Il dispendio energetico e le conseguenti emissioni in CO₂ sono decisamente superiore per i concimi azotati (6,69 kg CO₂eq per kg di N) rispetto a quelli derivanti da estrazione mineraria come i fosfatici (0,71 kg CO₂eq per kg di P) o i potassici (0,46 kg CO₂eq per kg di K) (*Woods et al. 2010*).

La dose di concime applicata in campo e la sua efficienza d'uso possono influire notevolmente sulle emissioni di CO₂ derivanti da produzioni agricole. Tali considerazioni sono molto importanti al momento della valutazione d'impatto ambientale, soprattutto nel caso di colture destinate alla produzione di biocarburanti. Riportando alcuni esempi, l'incidenza dei concimi azotati sul bilancio delle emissioni di CO₂ è quantificabile al 50% nel caso del grano tenero coltivato convenzionalmente in Regno Unito (*Williams et al. 2006*) o in un range dal 20 al 50% nel caso della coltivazione di colza per biocarburanti in Germania (*Rathke e Diepenbrock, 2006*). Valutando in Italia uno scenario di coltivazione a fini energetici di soia, girasole e barbabietola da zucchero (*Venturi e Venturi, 2003*), si stima un'incidenza dei concimi azotati sulle emissioni di CO₂ dallo 0% (soia non concimata) al 35% (colza coltivata a low input). Va considerato tuttavia l'effetto positivo sulla produttività della coltura: se le maggiori concimazioni da un lato riducono il rapporto output/input di energia, dall'altro aumentano il guadagno netto in termini di energia per unità di superficie (*Rosenberger et al. 2001*).

Oltre alle emissioni legate al ciclo di produzione industriale dei concimi, sono da considerare anche le variazioni indotte al bilancio della CO₂ del terreno. Studi effettuati in Australia hanno dimostrato come la concimazione, aumentando la produzione di residui

colturali, porti, nel lungo termine, all'accumulo di carbonio nel terreno se questi non vengono asportati (*Wang e Dalal, 2006*).

1.2.3 Emissioni gassose: N₂O e NH₃

Il ciclo dell'azoto nel suolo comporta emissioni gassose di forme azotate quali ammoniaca (NH₃), ossidi di azoto (NO, N₂O) e N molecolare (N₂). L'aggiunta di N nel sistema attraverso le concimazioni può accentuare tali emissioni. Altre fonti sono gli allevamenti, i reflui zootecnici e urbani, le combustioni in generale.

Indubbiamente tali emissioni comportano una perdita in termini economici, ma vi sono anche risvolti ambientali non indifferenti a causa della natura climalterante di alcuni composti. Un kg di protossido d'azoto (N₂O) ha un potenziale in termini di effetto serra pari a 296 kg CO₂eq: si stima che l'eccessivo rilascio di tali gas dalla decomposizione dei concimi chimici possa vanificare in parte, o in toto, il beneficio della coltivazioni di biocarburanti in termini di riduzione dei gas serra (*Crutzen et al. 2007; Smeets et al. 2009*).

Le condizioni che generalmente favoriscono la denitrificazione e l'emissione di N₂O sono: elevate temperature, elevata umidità del terreno, anossia, disponibilità di ioni NH₄⁺ e NO₃⁻, carbonio organico nel terreno (*Zebarth et al. 2008*). Uno studio effettuato su aziende zootecniche in 5 paesi dell'Unione Europea (Austria, Danimarca, Finlandia, Italia e Regno Unito), ha dimostrato come l'emissione di base dal suolo sia mediamente pari a 1,4 kg ha⁻¹ annui di N-N₂O, a cui si somma un tasso di produzione di N-N₂O dell'1,6% per unità di N apportata (*Petersen et al. 2006*). Assumendo tali parametri, una coltura di frumento concimata con 160 kg ha⁻¹ N produrrebbe un'emissione media di 3,96 kg ha⁻¹ di N-N₂O, pari all'effetto serra di 1,84 t di CO₂. L'emissione causata dall'uso concime sarebbe di 2,56 kg, con aggravii in termini di gas serra pari a 1,19 t ha eq CO₂.

Il livello totale di concimazione e il tipo di coltura condizionano la quantità di emissioni di N₂O (*Ruser et al. 2001; Drury et al. 2008*): emissioni più intense sono prodotte una volta superato la capacità massima di assorbimento di nitrati da parte della biomassa (*Zebarth et al. 2008*).

La volatilizzazione ammoniacale costituisce un altro grave canale di perdita di azoto dal sistema agricolo: l'ammoniaca dispersa in atmosfera reagisce con gli ioni acidi e viene

depositata altrove, spesso con conseguenze per l'ambiente quali eutrofizzazione delle acque e acidificazione dei suoli. Nei primi anni '90 le superfici emerse a livello globale emettevano 52,6 Mt di N-NH₃ e ne ricevevano per deposizione atmosferica 38,7; gli oceani ne producevano 5,6 ricevendone 18 (*Galloway et al. 2004*).

Fattori quali elevate temperature, pH del suolo basico e umidità possono favorire il fenomeno; per i concimi a base ammoniacale (urea e nitrato ammonico) le perdite per volatilizzazione di NH₃ sono riportate in un range tra il 2 e il 15% di nutriente apportato (*Sutton et al. 1995*). Il periodo a ridosso degli interventi di concimazione (dai 3 ai 7 giorni) è generalmente il più critico: in questa fase le emissioni possono arrivare anche a 8 kg ha⁻¹ di N giornalieri (*Ma et al. 2010*).

La stima delle emissioni di ammoniaca su scala europea è piuttosto incerta, a causa delle differenze metodologiche tra i diversi paesi, nonostante ciò nel periodo 1980-1998 ne è stato osservato un calo del 14%, mentre per il periodo 1990-2010 si stima una diminuzione del 12% (*Erisman et al. 2003*). Tale tendenza è dovuta alla cessata gestione diretta dell'agricoltura da parte dei governi dell'ex blocco sovietico, e da alcune pratiche favorite in paesi nord europei come l'iniezione dei liquami zootecnici o il loro immediato interrimento (*Erisman et al. 2003*).

1.3 Necessità di miglioramento dell'indice *NUE* e strategie percorribili

La maggior sensibilità ambientale ormai acquisita da gran parte del mondo industrializzato e la spinta di fattori economici rendono un obiettivo prioritario il miglioramento dell'efficienza d'uso dell'azoto (*NUE*). Tale processo è indubbiamente un problema che coinvolge a 360 gradi i possibili aspetti della tecnica agronomica (*Ladha, et al. 2005*):

- Gestione sito-specifica della coltura
- Gestione integrata delle colture
- Utilizzo di tutte le fonti di azoto disponibili
- Composizione e additivazione dei concimi
- Tecnica di distribuzione dei concimi
- Definizione della dose ottimale dei concimi
- Miglioramento genetico
- Uso di strumenti di remote sensing dello stato nutrizionale
- Spazializzazione dell'informazione e agricoltura di precisione
- Tecnologie conservative delle risorse

Esistono numerose definizioni della *NUE* (*Rathke et al., 2006*); una delle più complete, in quanto non si riferisce unicamente all'azoto di concimi e fertilizzanti, è la *NUE* (*Nitrogen Use Efficiency*) come descritta da *Moll et al. 1982 [Eq. 1]*:

$$Eq. 1 \quad NUE = \frac{N \text{ uptake}}{N \text{ available}} \times \frac{Seed \text{ yield}}{N \text{ uptake}}$$

Nel termine “N available” vengono incluse anche le quantità di N derivanti da mineralizzazione della S.O. del suolo, deposizione atmosferica e azotofissazione batterica. Per semplicità di analisi in molti casi l'azoto derivante dagli apporti ambientali è definito come l'assorbimento di una coltura non concimata.

La prima parte dell'equazione (Nuptake/Navailable) è definibile anche come *NU_pE* (N Uptake Efficiency) ed esprime la percentuale di azoto disponibile che la coltura è stata in grado di assorbire. La *NU_pE* può ovviamente essere condizionata dalle perdite per volatilizzazione dei concimi, dai fenomeni di lisciviazione o dalla scarsa funzionalità dell'apparato radicale. Il secondo termine (Seed yield/N uptake) è invece definito come *NU_tE* (Nitrogen Utilisation Efficiency) ed esprime la quantità di seme (o prodotto agrario utile) prodotta per unità di N assorbito, cioè la capacità di conversione della pianta.

Si rimanda l'approfondimento dei diversi approcci percorribili per il miglioramento della *NUE* alle introduzioni di ogni singolo esperimento.

2. SCOPO DELLA TESI

Questa tesi di dottorato affronta le principali strategie per razionalizzare l'uso dei concimi azotati. Come campo d'azione si sono scelte alcune specie a ciclo autunno-primaverile, in quanto, le prospettive di mutamenti climatici, caratterizzati da estati più calde e sempre meno piovose anche negli ambienti del Nord Italia, potrebbero in un futuro prossimo rendere tali colture in grado di sfruttare al meglio le risorse (soprattutto idriche) ambientali. Gli esperimenti hanno riguardato una coltura tradizionale della Pianura Padana, il grano tenero e due altre colture di pari ciclo in probabile espansione negli areali settentrionali: il grano duro e il colza invernale da olio.

L'organizzazione delle prove di campo ha permesso di esplorare strategie per valorizzare l'input azotato, anche molto diverse tra loro. Si è cercato di definire potenzialità e criticità delle più recenti innovazioni tecnologiche (analisi spettrali della coltura, gestione informatizzata dei dati nello spazio, formulazioni innovative dei concimi); ma anche di valutare gli effetti su *NUE* (Nitrogen Use Efficiency) di pratiche agronomiche consolidate (epoca di semina, scelta varietale). I capitoli principali della tesi hanno riguardato quindi le due tipologie di coltura allo studio, il grano (capitolo 3: tenero e duro) e il colza (capitolo 4).

La ricerca è stata dedicata principalmente alla prima grande coltura, ottenendo dei dati sperimentali nelle stagioni 2009-2010 e 2010-2011 presso l'Azienda Agraria Sperimentale "Lucio Toniolo" dell'Università di Padova in Legnaro e presso altre 5 aziende dislocate tra le province di Padova e Venezia. In aggiunta sono stati inseriti anche dei risultati ottenuti in un ambiente molto diverso, come le pianure inglesi del Berkshire, derivanti da un'esperienza di ricerca (Agosto 2010 – Febbraio 2011) svolta presso l'Università di Reading (UK).

La prova su colza invece è stata ripetuta per 2 cicli colturali consecutivi (2009-10 e 2010-11) e si è svolta unicamente nella località di Legnaro.

Ogni argomento di discussione verrà introdotto da brevi cenni bibliografici allo scopo di presentare la problematica e le conoscenze in merito già acquisite finora.

3. LA RICERCA SU GRANO TENERO E DURO



3.1 “*Proximal sensing*” e nutrizione del grano

3.1.1 Introduzione

Una conoscenza precisa dello stato nutrizionale della coltura è determinante per gestire gli interventi di concimazione nel modo più equilibrato possibile; numerosi sono gli approcci e le metodologie proposte per ottenere tale obiettivo (*Lemaire et al. 2008*). Tra questi, “*remote*” e “*proximal sensing*” costituiscono un caso particolare, in quanto, permettono una lettura in tempo reale della situazione. Se associati a tecnologie a dose variabile “VRT” (Variable Rate Technology), consentono regolazioni precise e istantanee delle dosi di input da applicare (*Shanahan et al. 2008*).

Queste tecnologie si basano sulle proprietà delle coperture vegetali di assorbire o riflettere determinate lunghezze d’onda (λ). Calcolando indici tra le riflettanze o assorbanze a diverse λ è possibile ottenere informazioni sintetiche sullo stato della coltura.

In questo esperimento sono stati testati due strumenti appartenenti a questa categoria: il *Greenseeker* (spettrometro attivo) e lo SPAD-502 (basato sulla trasmittanza fogliare). L’impostazione del lavoro è stata quella di raccogliere un elevato numero di osservazioni in diverse località, al fine di produrre calibrazioni valide per un areale sufficientemente ampio. I passi successivi sono stati:

- definire i parametri ecofisiologici meglio descritti dai due sistemi
- definire le relazioni tra indici e status nutrizionale
- quantificare la dispersione tra dati previsti e dati osservati
- valutare realisticamente come tali strumenti possano essere introdotti nella pratica agricola

3.1.1.1 *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*

Un indice che ha già riscosso un buon successo e risulta utilizzabile su scala commerciale è l’NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): usato in applicazioni satellitari (*Fisher et al. 2009*), di fotografia aerea (*Flowers et al. 2003*) o per strumentazione installabile sui macchinari agricoli (*Raun et al. 2002*). L’indice viene definito dall’equazione [Eq.2]:

$$Eq.2 \quad NDVI = \frac{Ref_{NIR} - Ref_{RED}}{Ref_{NIR} + Ref_{RED}}$$

Dove per Ref_{NIR} s'intende la riflettanza sulle λ del vicino infrarosso (Near InfraRed), e per Ref_{RED} quella del rosso visibile. Matematicamente tale indice può variare tra -1 e +1, e può essere applicabile a una qualsiasi superficie che rifletta la luce. Per quanto riguarda le superfici coltivate esso può oscillare tra il valore del suolo nudo ($\sim+0,300$) e quello massimo della coltura (tendente a +1,000).

Il principio su cui si basa l'indice è che una coltura in piena attività fotosintetica assorbe la radiazione necessaria alla fotosintesi e riflette quella infrarossa per evitare il surriscaldamento del *canopy*. L'indice assumerà perciò valori crescenti all'aumentare della superficie coperta dalla coltura e/o della sua attività fotosintetica. Al contrario si riscontreranno valori bassi di NDVI nel caso di colture con scarsa copertura del suolo o tessuti vegetali in carenza/senescenza, quindi non più fotosinteticamente attivi.

Non è stata fissata una definizione precisa delle λ dell'indice NDVI: i diversi sensori disponibili sul mercato possono avere lunghezze d'onda di riferimento diverse tra loro anche di qualche nanometro (nm). La conseguenza è che le misure, pur effettuate contemporaneamente e sullo stesso soggetto, non risultano paragonabili tra strumenti diversi (*Tremblay et al. 2009*).

L'indice è legato a diversi tratti della coltura che interagiscono nel dare una risposta spettrale. Perciò in numerosi lavori l'NDVI è stato collegato a vari parametri quali biomassa fresca e secca, N uptake (*Flowers et al. 2003; Li et al. 2008*), LAI (*Serrano et al. 2000; Aparicio et al. 2000*) e resa finale (*Raun et al. 2001; Osborne, 2007*). L'indice potenzialmente è applicabile a qualsiasi coltura, purché si riesca ad associare alle letture un parametro ben definito e di utilità nel determinare la gestione degli input.

La correzione dei livelli di concimazione con metodi basati su letture NDVI si è dimostrata promettente nel migliorare l'efficienza d'uso apparente delle concimazioni azotate (*Raun et al. 2002*). L'algoritmo sviluppato da *Raun et al.* nel 2002 è stato tuttavia concepito negli ambienti di coltivazione dell'Oklahoma e della Virginia (USA), e si adatta bene perciò solo a tali condizioni pedoclimatiche e alla locale tecnica di coltivazione.

3.1.1.2 Metodo SPAD

Uno strumento associabile a quelli di remote sensing, ma non propriamente ascrivibile a tale categoria, è il misuratore di clorofilla fogliare SPAD (Soil Plant Analysis Development). Lo SPAD, infatti, si basa sul principio di trasmittanza fogliare: misura cioè la differenza tra luce in entrata (emessa da un diodo) e radiazione attraversante la lamina fogliare (letta da una fotocellula). Lo strumento emette radiazione luminosa alle λ di 650 nm (rosso) e 920 nm (infrarosso): la prima radiazione viene assorbita dai tessuti fogliari, la seconda non è interessata dal fenomeno e viene usata come standard. Calcolato per differenza l'assorbimento, il risultato della lettura è riportato in unità adimensionali SPAD comprese tra 0 e 100. Si possono considerare tali valori come un'indicazione sul contenuto di clorofilla fogliare e quindi sullo stato di nutrizione della coltura.

La lettura è istantanea e non distruttiva: una lamina fogliare viene "pinzata" dall'apparecchio e il valore è riportato sul display. Purtroppo tale strumento rende informazioni puntiformi relative a superfici fogliari molto ristrette; la misura SPAD, per avere un suo significato, deve essere perciò ripetuta più volte. Oltretutto, la dinamica della lettura non può essere meccanizzata e richiede quindi che un operatore effettui la misura in più aree di saggio dell'appezzamento.

Lo SPAD è stato impiegato per prevedere resa, N uptake e contenuto proteico del grano (*Le Bail et al. 2005; Arregui 2006*), ma è stato proposto addirittura il suo uso per ottenere anticipazioni sulle qualità tecnologiche delle cariossidi (*Poblaciones et al. 2009*). Tutti gli autori citati concordano nell'affermare che le misure più tardive siano le più affidabili.

3.1.2 Materiali e metodi

La ricerca ha coinvolto entrambe le specie di grano d'interesse commerciale: *Triticum aestivum* L. (grano tenero, esaploide $6n = 42$), e *Triticum turgidum durum* L. (grano duro, tetraploide $4n = 28$). Per ottenere un set di dati completo si è operato in diverse località, coinvolgendo più varietà (Tab. 1 e Tab. 2). Per entrambe le specie è stato possibile ottenere unicamente dati relativi a una singola annata (2009-10: grano tenero; 2010-11:

grano duro). Per il solo grano tenero è disponibile un limitato set di dati relativi anche al 2010-11, utilizzato per validare il modello della stagione precedente. Il campione di aziende agrarie presso le quali si è operato è risultato composto da tipologie di indirizzo ben differenziate: 2 erano ad indirizzo prevalentemente zootecnico (Vescovana, Ponso d'Este), 3 ad indirizzo prevalentemente cerealicolo (Mira, Este, Lozzo Atestino) e 1 ad indirizzo misto (Legnaro). Situazione ottimale questa per calibrare degli strumenti è collezionare un set di dati includenti la maggior variabilità possibile. Nei protocolli sperimentali sono stati perciò introdotti fattori caratterizzati da diversi livelli di concimazione azotata, in comparazione a dei controlli non trattati accanto ad unità di osservazione tester trattate con N non limitante.

I diversi piani di coltivazione adottati sono riportati nel capitolo dei “Materiali e metodi” dei vari esperimenti (grano tenero 2009-2010 cap 3.3.2.2; grano duro Legnaro 2010-2011 cap 3.4.2; grano duro Mira 2010-2011 cap 3.2.2).

GRANO TENERO 2009-2010				
Località	Coordinate aziendali	Var. coltivate	Campioni NDVI (n)	Campioni SPAD (n)
<i>Legnaro (PD) 2009-2010</i>	<i>45° 20' N 11° 56' E</i>	<i>Aubusson PR22R58</i>	<i>121</i>	<i>198</i>
<i>Vescovana (PD)</i>	<i>45°07'N 11°41'E</i>	<i>Kalango Aubusson</i>	<i>24</i>	<i>36</i>
<i>Este (PD)</i>	<i>45° 13' N 11°37'E</i>	<i>Aubusson Africa</i>	<i>26</i>	<i>27</i>
<i>Lozzo Atestino (PD)</i>	<i>45°16'N 11°35'E</i>	<i>Kalango</i>	<i>15</i>	<i>20</i>
<i>Ponso d'Este (PD)</i>	<i>45°11' N 11°34'E</i>	<i>Aubusson Kalango</i>	<i>25</i>	<i>28</i>
<i>Legnaro (PD) 2010-2011</i>	<i>45° 20' N 11° 56' E</i>	<i>Aubusson</i>	<i>24</i>	<i>0</i>

Tab. 1: Località, coordinate geografiche, varietà e numero di campioni di biomassa raccolti per la calibrazione di NDVI e SPAD su grano tenero.

GRANO DURO 2010-2011				
Località	Coordinate	Var. coltivate	Campioni NDVI (n)	Campioni SPAD (n)
<i>Legnaro (PD) 2009-2010</i>	<i>45° 20' N 11° 56' E</i>	<i>Anco Marzio Ariosto Aureo Biensur Liberdur Saragolla</i>	<i>166</i>	<i>166</i>
<i>Mira (VE)</i>	<i>45°22'N 12°08'E</i>	<i>Biensur</i>	<i>82</i>	<i>82</i>

Tab. 2: Località, coordinate geografiche, cv e numero di campioni di biomassa raccolti per la calibrazione di NDVI e SPAD su grano duro.

3.1.2.1 Campionamenti NDVI

Le letture sono state effettuate con uno spettroradiometro attivo (*Greenseeker, Ntech Industries, Ukiah, CA-USA*): le λ usate nel calcolo dell'indice sono 660 nm per il rosso e 770 nm per l'infrarosso (NIR). La scelta dello strumento attivo si rivela vantaggiosa, in quanto, per la misura non è richiesta alcuna standardizzazione della quantità di radiazione incidente. Lo strumento è perciò molto meno sensibile alle interferenze che dipendono dai fattori meteorologici, è utilizzabile praticamente con qualsiasi posizione del sole e a prescindere dal livello di nuvolosità. Questo è un netto vantaggio rispetto ai radiometri passivi, in quanto, non vincolando a determinate condizioni la misura, lo strumento può essere sempre utilizzato.

La misurazione col *Greenseeker* (Fig. 5) è effettuata tenendo il sensore parallelo al suolo a 40-60 cm sopra la vegetazione; l'indice NDVI viene registrato alla frequenza di 10 hz (10 letture al secondo). Nelle aziende a Legnaro, Este, Lozzo Atestino, Ponso d'Este e Vescovana, le letture sono state effettuate avanzando a passo d'uomo (1 m s^{-1}) lungo transetti paralleli alle file di semina della superficie di 8 m^2 circa ($1 \times 8 \text{ m}$). Immediatamente dopo la scansione NDVI, lungo ciascun transetto sono stati raccolti campioni di biomassa epigea (3 aree di saggio larghe 4 file, lunghe 0,5 m). Nell'azienda di

Mira si è proceduto a scansionare con una traiettoria ad “S” per un tempo di 6 s circa (60 letture) aree di saggio di 1 m² (1 x 1 m): l'intera superficie in questo caso è stata raccolta per ottenere i campioni. Il contenuto di sostanza secca (essiccazione a 65 °C per 48 h) e quello in azoto organico Kjeldahl (AACC 46-11.02) sono stati utilizzati per determinare biomassa secca e assorbimento di N per unità di superficie.



Fig. 5. Misurazioni con spettroradiometro attivo NDVI “Greenseeker”, si riportano le immagini per fornire indicazioni relative alle modalità di utilizzo e all'ingombro dell'attrezzatura.

Le misure sono state effettuate in diverse fasi del ciclo biologico della coltura, comprese tra gli stadi fenologici GS 25 (pieno accestimento) e GS 65 (fioritura) (scala di *Zadoks et al. 1974*). Nelle tabelle 3 e 4 sono riportati i dettagli sulle misurazioni.

3.1.2.2 Campionamenti SPAD

Anche per il set di dati SPAD sono state aggregate osservazioni provenienti da esperimenti e località diverse: le misurazioni sono sintetizzate nelle tabelle 3 e 4. Lo strumento impiegato è lo SPAD-502 (*Minolta, Tokyo, Japan*).

Per ciascun campione di biomassa fresca sono stati prelevati 10 culmi, e su questi sono state effettuate le misure. I valori sono stati letti a 1/3 e 2/3 della lunghezza della lamina dell'ultima foglia completamente estesa; i 20 valori sono stati mediati per restituire un valore riferito all'intera parcella.

L'effettiva capacità dello strumento di riconoscere le concentrazioni di clorofilla nei tessuti fogliari è stata saggiata in laboratorio. Per i campioni prelevati a Mira nelle date 19 aprile 2011, 3 e 17 maggio 2011, è stato raccolto 1 g circa di tessuto fogliare adiacente alla

zona in cui era stato misurato lo SPAD. Il tessuto fogliare è stato messo in soluzione di etanolo 95% in rapporto di estrazione 1:50 (peso/volume), tritato finemente (*Ultra Turrax T25, Ika, Staufen, Germania*), agitato e lasciato al buio per 12 h a 4 °C.

La determinazione del contenuto in clorofilla della soluzione estratta è stata svolta con spettrofotometria alle λ di 649 e 665 e calcolata con la formula di *Winterman e De Mott (1965)*. Il contenuto di clorofilla del tessuto fogliare (mg g^{-1}) è stato poi convertito in contenuto per cm^2 , attraverso il rapporto superficie/peso calcolato in precedenza (*LI-COR, Lincoln, NE-USA*) sulle 10 foglie apicali destinate alle misurazioni SPAD.

GRANO TENERO 2009-2010 misure NDVI		
Località	Stadio fenologico (Zadoks) e data	Campioni
Legnaro	25 - Pieno accestimento (24/2/2010)	16
Este, Lozzo, Ponso, Vesc	25 - Pieno accestimento (25/2/2010)	39
Legnaro	32 - Levata 2° nodo (30/3/2010)	32
Este, Ponso	32 - Levata 2° nodo (31/3/2010)	29
Lozzo, Vescovana	32 - Levata 2° nodo (6/4/2010)	28
Legnaro	33 - Levata 3° nodo (12 e 13/4/2010)	35 + 32
Legnaro	30 - Inizio levata (23/3/2011)	12
Legnaro	32 - Levata 2° nodo (5/4/2011)	12
GRANO TENERO 2009-2010 misure SPAD		
Località	Stadio fenologico (Zadoks) e data	Campioni
Legnaro	33 - Levata 3° nodo (12 e 13/4/2010)	32 + 35
Legnaro	45 - Botticella (26/4/2010)	32
Este, Ponso	42 - Borricella precoce (29/4/2010)	29
Lozzo, Vescovana	52 - Spigatura precoce (3/5/2010)	28
Legnaro	55 - Spigatura (6/5/2011)	35
Legnaro	71 - Mat. Lattea precoce (20/5/2010)	32
Vescovana, Lozzo	75 - Mat. Cerosa 26/5/2010	28
Este, Ponso	80 - Mat. Ceroso-lattea (3/6/2010)	26
Legnaro	85 - Mat. Cerosa (10/6/2010)	32

Tab. 3. Località, stadio fenologico, data di raccolta e numero di campioni di grano tenero per la calibrazione degli strumenti ottici di rilevazione dello stato nutrizionale.

GRANO DURO 2010-2011 misure NDVI + SPAD		
Località	Stadio fenologico (Zadoks) e data	Campioni
Mira	25 – Pieno accestimento (9/3/2011)	5
Legnaro	30 - Inizio levata (23/3/2011)	12
Legnaro	30 - Inizio levata (24/3/2011)	72
Mira	31 - Levata 1° nodo (4/4/2011)	5
Legnaro	32 - Levata 2° nodo (5/4/2011)	12
Mira	32 - Levata 2° nodo 7/4/2011	18
Mira	37 - Emergenza foglia bandiera (19/4/2011)	18
Legnaro	55 - Spigatura (2/5/2011)	72
Mira	46 - Piena botticella (3/5/2011)	18
Mira	65 - Piena fioritura (17/5/2011)	18

Tab. 4. Località, stadio fenologico, data di raccolta e numero di campioni di grano duro per la calibrazione degli strumenti ottici di rilevazione dello stato nutrizionale.

3.1.2.3 Analisi statistica

Le analisi statistiche sulle relazioni indici spettrali vs. indici nutrizionali sono state eseguite col programma *Statgraphics*[®] (*Statpoint Technologies, Warrenton, VA-USA*). Unicamente per il calcolo del modello polinomiale + plateau [Eq.4] è stato impiegato il programma *SAS*[®] (*SAS, Cary, NC-USA*). Le correlazioni sono state considerate significative per $P < 0,05$. La dispersione tra modelli calcolati e dati osservati è stata definita attraverso il *RMSE* (Root Mean Square Error) [Eq.3].

$$Eq.3 \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_p - y_i)^2}{n}}$$

Dove “ y_p ” e “ y_i ” rappresentano rispettivamente il dato previsto dal modello per un determinato valore “ x_i ”, e il dato osservato per quel valore; “ n ” indica il numero di singole osservazioni.

3.1.3 Risultati sperimentali

3.1.3.1 Indice NDVI applicato al grano tenero

L'NDVI si è dimostrato un buon indicatore per l'accrescimento della coltura, a prescindere dal momento in cui si effettua la misurazione. Nell'annata di 2009-10, estendendo l'analisi a tutti i 211 campioni disponibili, sono emerse correlazioni (Tab. 5) significative e piuttosto strette del tipo NDVI vs. biomassa fresca (logaritmica; $P < 0,0001$; $R^2 = 0,739$), NDVI vs. biomassa secca (logaritmica; $P < 0,0001$; $R^2 = 0,611$) e NDVI vs. N uptake (logaritmica; $P < 0,0001$; $R^2 = 0,814$). Non è emersa alcuna relazione tra l'indice spettrale e la concentrazione di N nei tessuti vegetali (modello lineare; $P = 0,5409$).

La relazione più interessante è quella tra N uptake e NDVI (Fig. 6a), in quanto il suo reciproco (Fig. 6b) può avere il significato pratico di fornire al momento della concimazione previsioni istantanee sull'assorbimento azotato della coltura.

GRANO TENERO 2009-2010, relazione NDVI vs stato nutrizionale				
Relazione	Tipo	Parametro a (P value)	Parametro b (P value)	P value relazione
NDVI vs biom. fresca	Logaritmica $y = a \cdot \ln(x) + b$	0,16169 ($P < 0,0001$)	0,644334 ($P < 0,0001$)	$P < 0,0001$
NDVI vs biom. Secca	Logaritmica $y = a \cdot \ln(x) + b$	0,13765 ($P < 0,0001$)	0,911147 ($P < 0,0001$)	$P < 0,0001$
NDVI vs biom. N uptake	Logaritmica $y = a \cdot \ln(x) + b$	0,180675 ($P < 0,0001$)	-0,0660003 ($P = 0,0156$)	$P < 0,0001$

Tab. 5. Parametri delle relazioni di NDVI (variabile dipendente) vs. biomassa fresca, biomassa secca e N uptake (variabili indipendenti). Numero di osservazioni per ciascuna relazione 211.

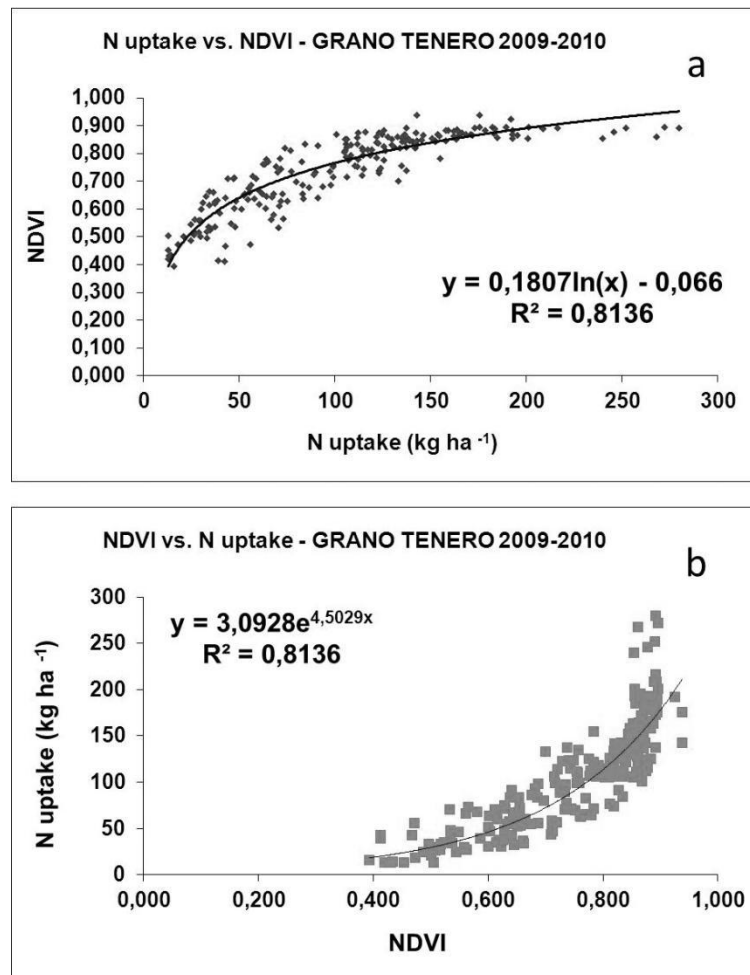


Fig. 6. Relazione tra N uptake e NDVI (a) e suo reciproco (b).

Osservando la relazione tra N uptake e NDVI (Fig. 6a) è evidente come vi sia un plateau compreso tra NDVI 0,800 e 1,000 dovuto probabilmente a effetti di saturazione luminosa del sensore. Le coordinate del flesso sono state identificate con un modello polinomiale + plateau [Eq.4], e risultano pari a un NDVI di 0,882 per un corrispondente valore di circa 195 kg ha⁻¹ N. In tutti i campioni con NDVI oltre questa soglia la determinazione dell'N uptake non è più praticabile.

$$Eq.4 \quad f(x) = \begin{cases} x < 194,8; & y = 0,0126 x^2 + 4,9048x + 404,4 \\ x \geq 194,8; & y = 0,882 \end{cases}$$

Individuato tale limite dello strumento, è stata ricalcolata la relazione esponenziale tra NDVI (variabile indipendente) e N uptake (variabile dipendente) per tutti i campioni che, misurati in campo, presentassero valori NDVI minori di 0,882 e N uptake inferiori a 195 kg ha⁻¹. La significatività della correlazione è rimasta comunque molto elevata (P<0,0001), e l'R² si è solo leggermente ridotto (0,7912).

Per valutare l'influenza di località di coltivazione e genotipo i dati sono stati divisi in sottogruppi (Tab. 6), e su questi sono state calcolate nuove relazioni esponenziali. I dati raccolti presso le quattro aziende nella zona dell'Estense (Este, Ponso d'Este, Lozzo Atestino, Vescovana) sono stati aggregati in un unico set contrapposto a quello di Legnaro.

Serie di dati	Dati (n)	Relazione	Parametro a (P value)	Parametro b (P value)	R ²	RMSE (kg ha ⁻¹ N)
Generale	184	$y=ae^{(bx)}$	3,3869 (P<0,0001)	4,3521 (P<0,0001)	0,7912	21,6
Legnaro	104	$y=ae^{(bx)}$	7,7995 (P<0,0001)	3,3674 (P<0,0001)	0,7582	19,3
Este*	80	$y=ae^{(bx)}$	1,6535 (P=0,0003)	5,1147 (P<0,0001)	0,9090	19,6
Aubusson	99	$y=ae^{(bx)}$	3,8655 (P<0,0001)	4,2039 (P<0,0001)	0,8020	22,1
Kalango	34	$y=ae^{(bx)}$	1,2337 (P=0,2307)	5,5155 (P<0,0001)	0,9357	17,9
PR22R58	40	$y=ae^{(bx)}$	7,6480 (P<0,0001)	3,4250 (P<0,0001)	0,7307	12,8
Africa	11	$y=ae^{(bx)}$	0,2711 (P=0,068)	7,2137 (P<0,0001)	0,9042	18,3

Tab. 6. Relazioni esponenziali NDVI vs. N uptake, per sottogruppi di località e varietà.

*Per Este si intendono i valori delle località Este, Lozzo Atestino, Ponso d'Este e Vescovana, tutti ricadenti entro un raggio di 10 km. I dati per le singole cv sono stati ottenuti da valori osservati in diverse località: Aubusson (Legnaro, Este, Ponso d'Este, Vescovana), Kalango (Vescovana, Ponso d'Este, Lozzo Atestino), PR22R58 (Legnaro), Africa (Este).

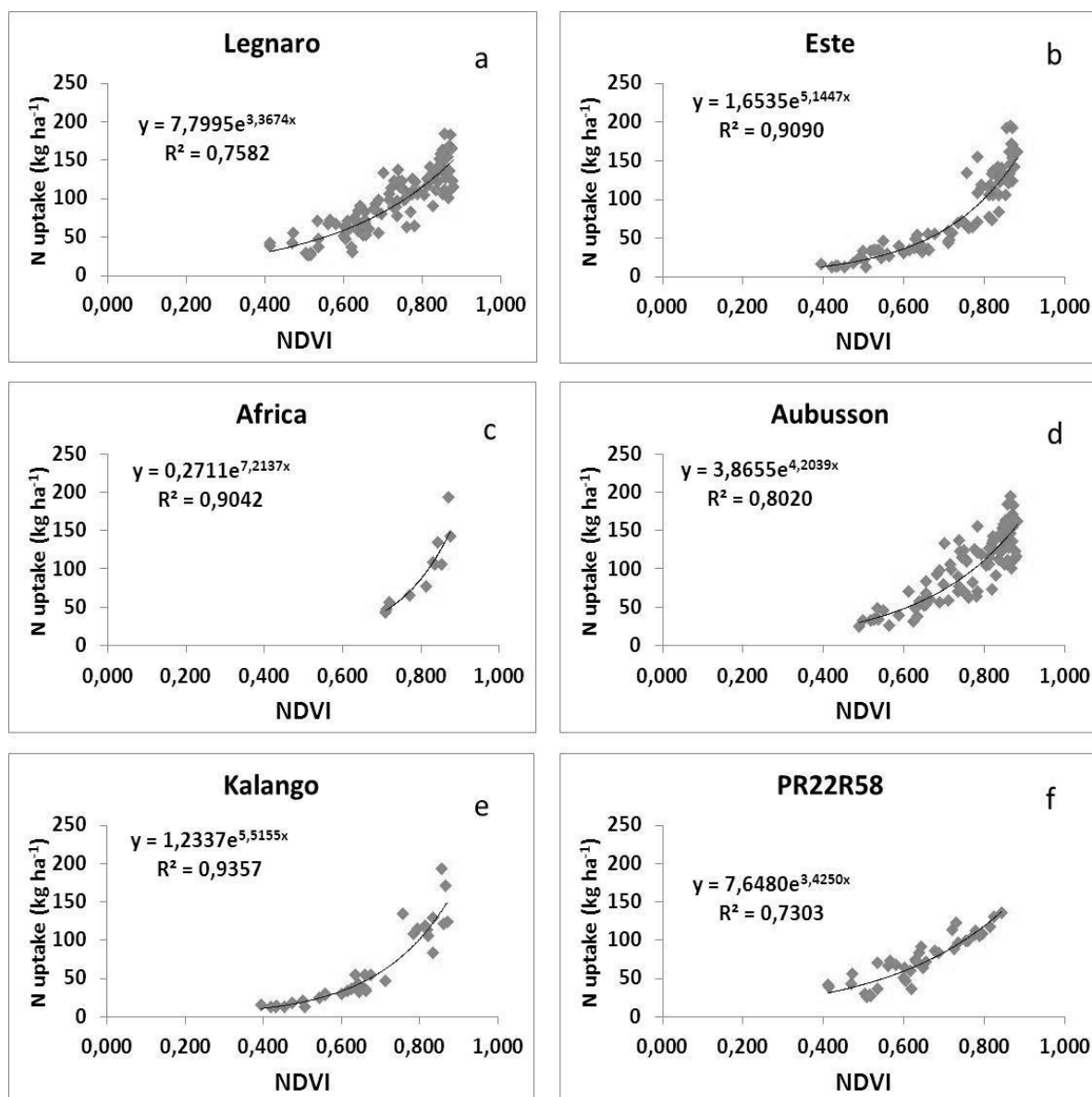


Fig. 7. Correlazioni NDVI vs. N uptake per le diverse località e le diverse cv.

Dividere il set di dati in due località (Legnaro vs. Este) ha diminuito la dispersione dei dati, riducendo in entrambe le località il RMSE di circa il 10% (~2 kg ha⁻¹ N), l'R² ad Este è migliorato di molto superando il 90% (Tab. 6). La forma della curva esponenziale risulta nettamente differente tra Este e Legnaro (Fig. 7a e b), l'utilizzo di diverse curve nelle due località risulterebbe perciò giustificabile, nel caso interessi ottenere stime più precise dell'assorbimento azotato.

Anche tra varietà sono emerse differenze (Tab. 6; Fig. 7); l'N uptake di Kalango è stato ben interpretato dall'indice NDVI (R²=0,9357; RMSE 17,9 kg ha⁻¹ N). Aubusson, la

cv presente in quasi tutte le aziende, ha avuto una più ampia dispersione dei dati (RMSE 22,1 kg ha⁻¹ N), ma ha presentato comunque buon R² (0,8020). La curva di PR22R58 aveva un andamento quasi lineare.

I 24 campioni di grano tenero raccolti durante la stagione 2010-2011 sono stati impiegati per verificare l'affidabilità delle relazioni calcolate l'anno precedente (Tab. 6). La minor dispersione dei 24 dati si è avuta rispetto al modello specifico per la località di Legnaro (RMSE 19,7 kg ha⁻¹ N); il modello per la cv Aubusson e quello generale hanno risentito di maggior dispersione (RMSE rispettivamente 25,9 e 27,3 kg ha⁻¹ N).

3.1.3.2 Indice NDVI applicato al grano duro

In entrambe le località sotto osservazione (Legnaro e Mira) la stagione 2010-11 è stata caratterizzata da abbondanti precipitazioni tra i mesi di ottobre e marzo, e da un periodo particolarmente siccitoso (<30 mm) tra inizio levata e piena fioritura. La lisciviazione invernale dei nitrati e la minor disponibilità idrica in primavera hanno condizionato certamente l'assorbimento di azoto da parte della coltura. Non si sono presentati perciò numerosi casi di elevato assorbimento azotato (oltre 200 kg ha⁻¹ N) come nella precedente stagione. La ricerca di un plateau di saturazione, quindi, non è stata ritenuta opportuna.

Il modello generale, comprendente tutti i 250 campioni di grano duro (Fig. 8), ha evidenziato una maggior dispersione dei dati (R²=0,5652; RMSE 34,7 kg ha⁻¹ N) rispetto al modello per il grano tenero. Come si può osservare in Fig. 8 c'è una forte differenza nel RMSE tra le 2 località: per i soli dati di Legnaro è infatti ben superiore (39,0 kg ha⁻¹ N) rispetto a quello di Mira (23,6 kg ha⁻¹ N). La maggior dispersione può essere spiegata dal fatto che a Legnaro sono state coltivate 6 varietà, mentre a Mira una sola. Le correlazioni NDVI vs. N uptake per singola cv osservate a Legnaro si sono rivelate tutte significative (dal P<0,0001 di Saragolla al P=0,0262 di Biensur), tuttavia gli R² risultavano piuttosto bassi (da 0,6938 di Saragolla a 0,2053 di Biensur).

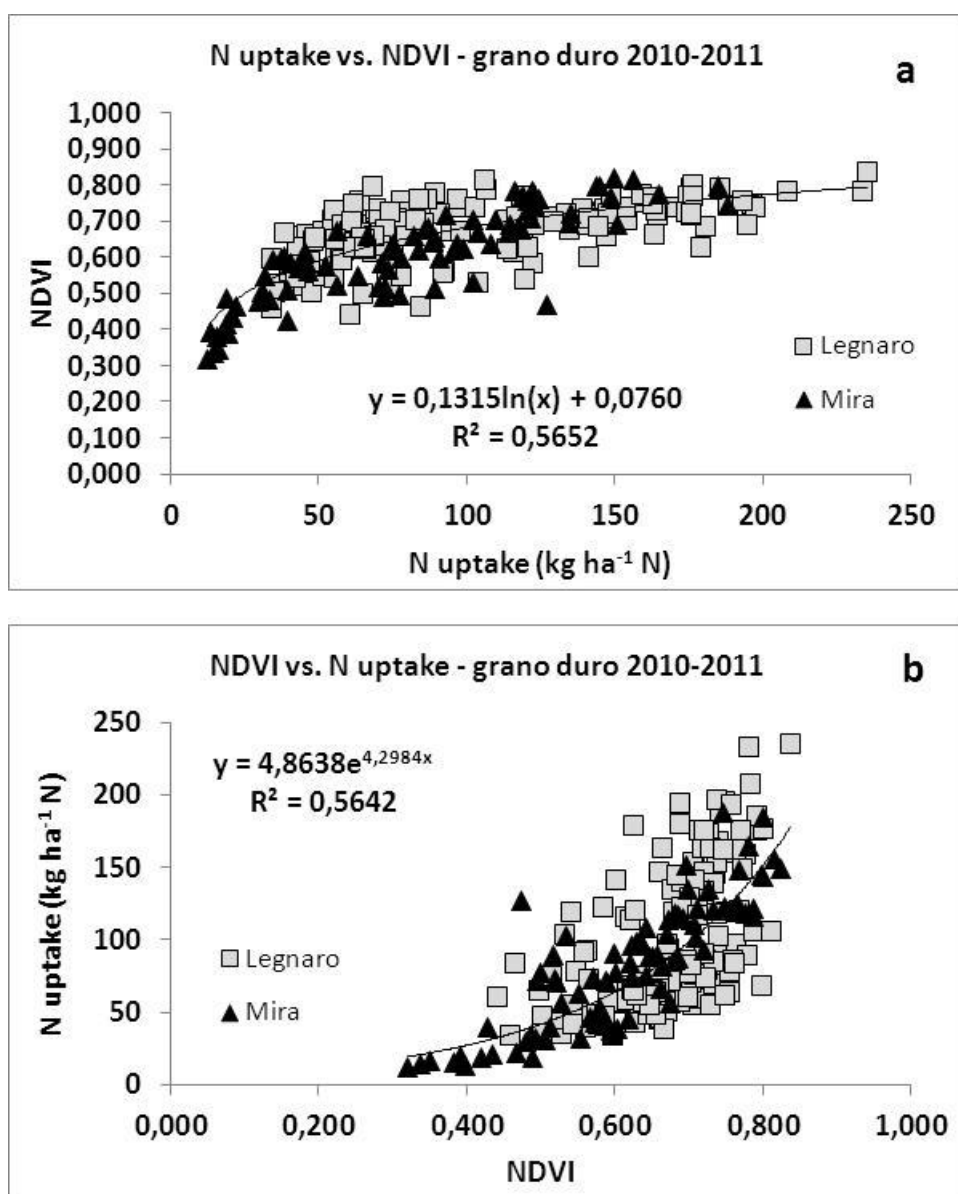


Fig. 8. Relazione tra N uptake e NDVI (a) e suo reciproco (b).

A Mira la variabilità delle osservazioni è derivata dall'eterogeneità delle proprietà del suolo: i 13 ettari di terreno bonificato in gronda lagunare presentavano infatti tessiture molto differenti a seconda della porzione di appezzamento presa in esame. Da queste misure è emersa una correlazione molto significativa tra NDVI e N uptake durante l'intero ciclo ($P < 0,0001$; $R^2 = 0,7616$; RMSE 24,4 kg ha⁻¹ N). Escludendo i campioni derivanti da aree di saggio in senescenza precoce (Fig. 9) tale relazione è apparsa più stretta ($P < 0,0001$; $R^2 = 0,8821$; cfr Tab. 7), con valori ancor meno dispersi rispetto al modello precedente (RMSE = 21,1 kg ha⁻¹ N).

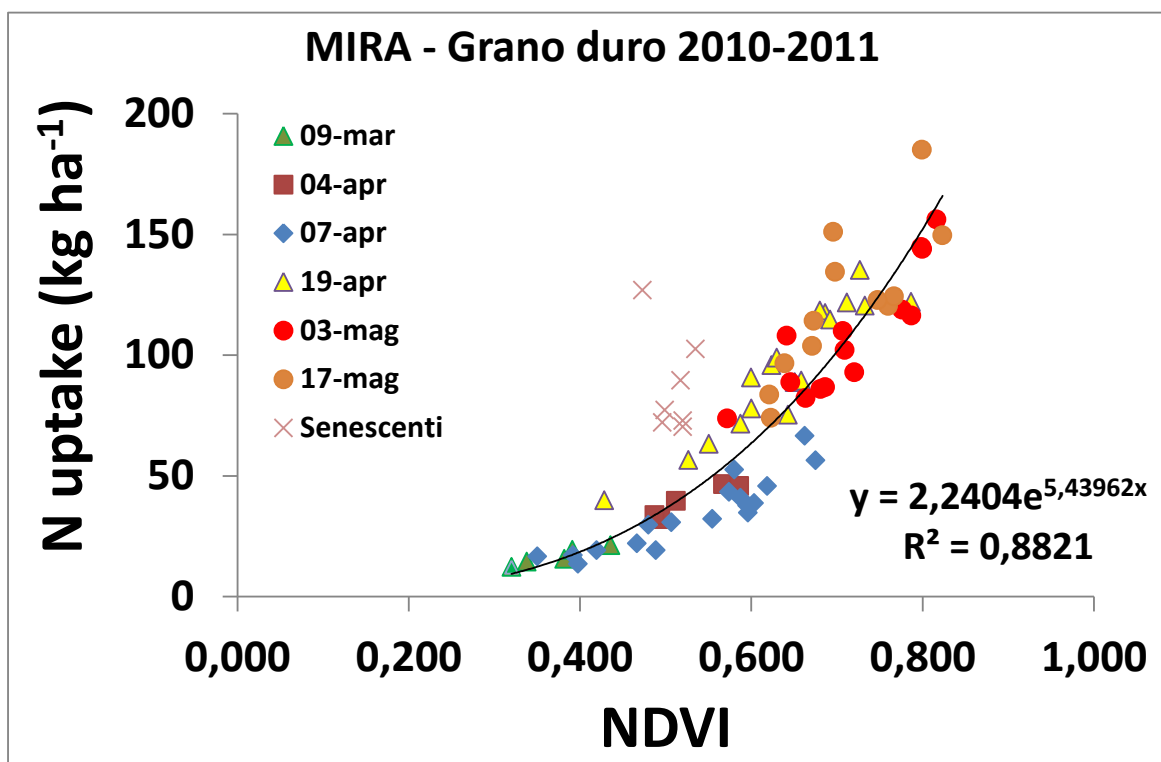


Fig. 9. Relazione tra N uptake e NDVI a Mira per la stagione 2010-2011.

<i>GRANO DURO 2010-2011, relazione NDVI vs stato nutrizionale</i>						
Serie di dati	Dati (n)	Relazione	Parametro a (P value)	Parametro b (P value)	R ²	RMSE (kg ha ⁻¹ N)
Generale	250	$y=ae^{(bx)}$	4,86379 (P<0,0001)	4,29843 (P<0,0001)	0,5653	34,7
Legnaro	168	$y=ae^{(bx)}$	8,60566 (P<0,0001)	3,4575 (P<0,0001)	0,3268	39,6
Mira con punti senescenti	82	$y=ae^{(bx)}$	3,26951 (P<0,0001)	4,94138 (P<0,0001)	0,7616	24,4
Mira senza punti senescenti	75	$y=ae^{(bx)}$	2,24043 (P<0,0001)	5,43962 (P<0,0001)	0,8821	21,1

Tab. 7. Relazioni esponenziali tra NDVI vs. N uptake per le prove di grano duro 2010-11.

3.1.3.3 Metodo SPAD applicato in grano tenero

Le misure SPAD hanno dimostrato una buona correlazione lineare con la quantità di clorofilla nei tessuti fogliari (*Chl*), soprattutto quando tale contenuto era espresso per unità di superficie ($P < 0,0001$; $R^2 = 0,8009$), piuttosto che per unità di peso fresco ($P < 0,0001$; $R^2 = 0,6907$).

In grano tenero (2009-2010) lo SPAD ha dimostrato di poter descrivere efficacemente lo stato nutrizionale della coltura, con buone ($R^2 > 0,4000$) e significative ($P < 0,001$) correlazioni ai principali parametri presi in considerazione.

La relazione generale in grano tenero ha aggregato i dati di 5 località e 4 cv. I valori SPAD si sono correlati in ordine crescente con N% nei tessuti vegetali ($P < 0,0001$; $R^2 = 0,4387$), N uptake della coltura ($P < 0,0001$; $R^2 = 0,5670$) e soprattutto *NNI* (Nitrogen Nutrition Index; $P < 0,0001$; $R^2 = 0,7087$), calcolato come in *Justes et al. (1994)*. L'indice di sufficienza azotata (*NNI*) esprime il rapporto % tra contenuto di azoto della biomassa (N_i) e contenuto ottimale di azoto (N_{ct} ; Critical Nitrogen). Il contenuto ottimale di azoto (N_{ct}) è definito come la quantità minima di N per ottenere la massima produzione di biomassa (SS), e viene determinato con l'equazione [Eq.5]. Il vantaggio di tale tipo di indice è la possibilità di distinguere e quantificare la carenza ($NNI < 1,00$) o l'eccesso ($NNI > 1,00$) di nutrizione azotata; tale concetto è stato esteso anche ad altre colture, quali il colza (*Colnenne et al. 1998*).

$$\text{Eq.5} \quad NNI = \frac{N_i}{N_{ct}}$$
$$(N_{ct}) = \begin{cases} SS > 1,55 \text{ t ha}^{-1}; & N_{ct} = 5,35 * SS^{-0,442} \\ SS \leq 1,55 \text{ t ha}^{-1}; & N_{ct} = 4,40\% \end{cases}$$

Essendo l'*NNI* l'indice maggiormente correlato alle misurazioni SPAD, e potendo discriminare tra diversi livelli di nutrizione sub- e sovra-ottimali, si è ritenuto opportuno valutare l'incidenza della località di coltivazione su di esso, dividendo il singolo data set (Fig. 10a) in due località: Legnaro (Fig. 10b) ed Este (Fig. 10c). Le tre relazioni sono apparse molto simili tra loro; nelle valutazioni successive si è scelto perciò di adottare il modello generale (Fig. 10a).

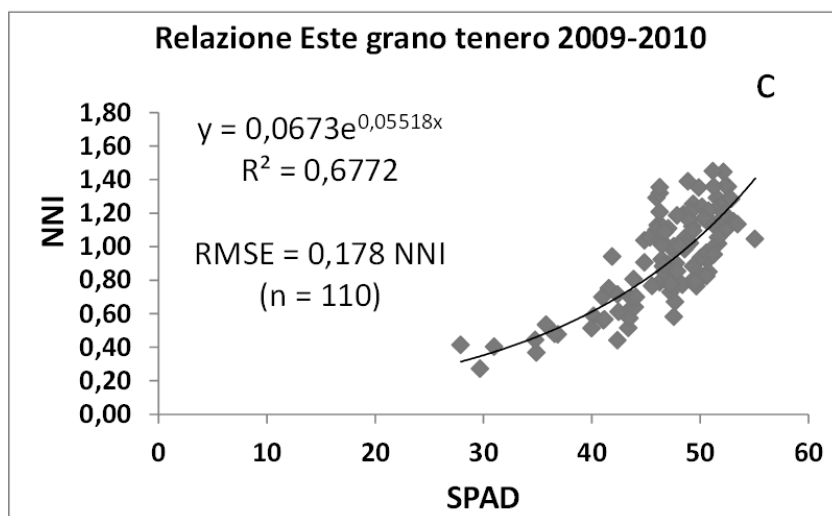
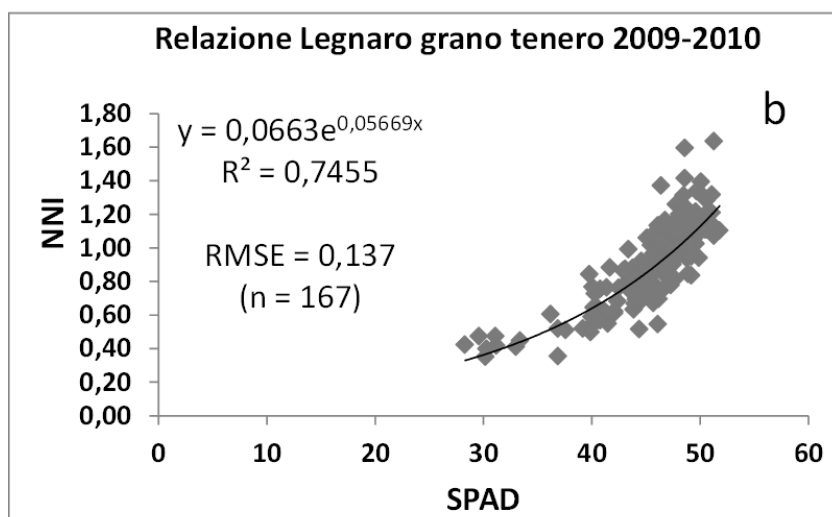
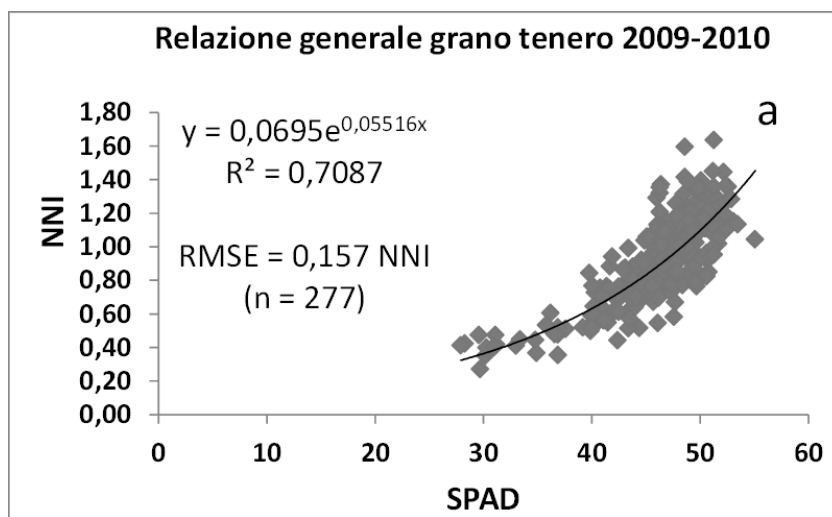


Fig. 10. Relazione tra SPAD e NNI; correlazione generale (a), per la località di Legnaro (b) e grafico aggregato (c) per le 4 aziende nei dintorni di Este (Este, Lozzo Atestino, Ponso d'Este, Vescovana).

La bibliografia indica generalmente che l'affidabilità delle misure SPAD aumenta con la tardività di esecuzione (*Le Bail et al. 2005; Arregui 2006; Poblaciones et al. 2009*). Pertanto l'impiego di tale tecnologia potrebbe essere preferibile allo scopo di prevedere l'utilità delle concimazioni in fase avanzata (tra botticella e fioritura). Questo genere d'intervento è l'ultima possibilità dell'agricoltore per apportare correzioni allo stato nutrizionale, e può migliorare significativamente il contenuto proteico delle cariossidi.

Tra parcelle e appezzamenti, nell'annata 2009-10 erano disponibili in tutto 28 unità sperimentali di grano tenero per cui erano noti sia lo SPAD in spigatura/fioritura che il contenuto proteico alla raccolta. Il grano in queste 28 unità era stato coltivato su terreni diversi e con dosi di N in copertura molto differenti (da 0 a 155 kg ha⁻¹), ma quasi tutte le unità avevano ricevuto il medesimo trattamento in spigatura (fogliare 7 kg ha⁻¹ N).

Applicando la relazione generale (Fig. 10a), si è definito un valore SPAD di 48,3 corrispondente all'*NNI* ottimale (1,00). A questo punto si è fissato un obiettivo minimo di contenuto proteico pari al 12%. In 22 casi su 28 lo SPAD è stato in grado di prevedere il raggiungimento della soglia di proteina (Fig. 11). Al superamento o meno della soglia SPAD di 48,3 sono corrisposti, infatti, valori di proteina rispettivamente superiori o inferiori al 12%. Dei 6 casi non previsti correttamente dal modello, 2 presentavano valori molto prossimi ad entrambe le soglie (*border line*), rappresentando di fatto una stima affidabile. 3 dei 4 casi di previsione disattesa provenivano da appezzamenti di grandi dimensioni, situazione in cui il campione saggiato può aver avuto scarsa rappresentatività a causa della forte variabilità spaziale della coltura.

Escludendo quindi le previsioni non rispettate, ma includendo i valori "*border line*" (n=24) è emersa una buona correlazione lineare ($P < 0,0001$; $R^2 = 0,6432$) tra SPAD in fioritura e proteina alla raccolta (Fig. 11).

3.1.3.4 Metodo SPAD applicato in grano duro

Le letture SPAD in grano duro sono state raccolte anche in fase precoce (cfr. Tab. 4 vs. Tab. 3). Tuttavia ciò non ha migliorato la stima dello stato nutrizionale della coltura.

Le correlazioni con i valori di *NNI* si sono dimostrate più forti considerando unicamente i valori di SPAD misurati in prossimità della fioritura; inserire dati acquisiti in precedenza ha nettamente peggiorato gli R^2 .

Questa condizione si è verificata sia per il modello generale della stagione ($R^2 = 0,3620$ vs. $0,2507$), che per i due modelli calcolati a Legnaro ($R^2 0,3930$ vs. $0,2180$) e Mira ($R^2 = 0,4879$ vs. $0,2257$). I bassi valori di R^2 nella correlazione con l'NNI suggeriscono come probabilmente tale indice, sviluppato in grano tenero (Justes et al. 1994), mal si adatti alla fisiologia specifica del grano duro.

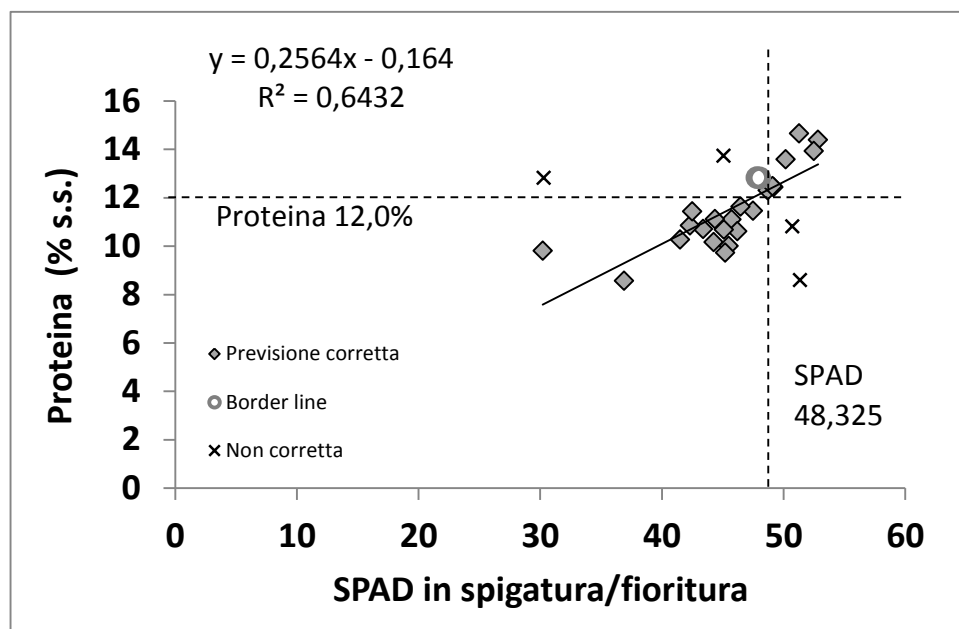


Fig. 11. Relazione tra SPAD misurato tardivamente e contenuto proteico delle cariossidi alla raccolta. Sono evidenziate con linee tratteggiate la soglia di SPAD equivalente a nutrizione ottimale (NNI = 1,00) e il contenuto proteico obiettivo (12%). La relazione lineare è riferita ai soli campioni previsti correttamente dal modello + quelli "border line" (n = 24).

3.1.4 Discussione

I 2 sistemi “*proximal sensing*” hanno dimostrato potenzialità per essere introdotti nella gestione della concimazione di entrambe le specie di grano. La scelta di questo genere di tecnologie rispetto al “*remote sensing*” (acquisizione aerea o satellitare) mette al riparo da tutti i fenomeni di distorsione atmosferica della radiazione luminosa, consentendo valutazioni molto precise della variabilità spaziale della coltura (Govaerts et al. 2007).

L’NDVI si conferma un ottimo strumento per determinare l’accrescimento tra le fasi di accostamento e piena levata. Come riportato in studi precedenti, tale relazione è indifferente allo stadio fenologico, accomunando tutti i campioni osservati in un unico modello (Flowers et al. 2003; Li et al. 2008). È confermata anche la miglior capacità dello strumento *Greenseeker* di prevedere l’N uptake, piuttosto che la biomassa totale della coltura (Freeman et al. 2007).

In grano tenero è emerso un limite di saturazione del sensore NDVI, pari a un assorbimento di 195 kg ha⁻¹ N e NDVI 0,882. In grano duro pur non essendo stato individuato un flesso preciso, si è manifestato un chiaro andamento asintotico dei valori NDVI al raggiungimento della soglia di circa 0,800.

Studi precedenti avevano indicato tale limite essere pari a 100 (Flowers et al. 2003) o 150 kg ha⁻¹ (Li et al. 2008). Le differenze sono spiegabili dal fatto che l’impiego di strumentazioni differenti per la lettura dell’NDVI, porti frequentemente a misurazioni non concordanti per le diverse geometrie dei sensori e λ interpretate (Tremblay et al. 2009).

La valutazione di modelli per singole cv o località ha sensibilmente ridotto la dispersione dei dati (<RMSE; >R²), permettendo valutazioni più affidabili dello stato nutrizionale della coltura.

Le diverse risposte dei genotipi all’NDVI sono probabilmente da attribuire alla specifica architettura del canopy di ogni varietà. Fattori come il LAI, il portamento delle foglie, la presenza di cere o pigmenti, hanno sicuramente effetti marcati nel determinare la risposta delle superfici interessate dal fenomeno di riflettanza.

La NUE, ed in particolare la NUtE, possono influenzare la relazione NDVI vs. N uptake. Genotipi più efficienti nell’uso dell’azoto, a parità di N assorbito, producono un maggior canopy, riflettono una minor quota di PAR (Photosynthetic Active Radiation) e presenteranno perciò un maggior NDVI rispetto a varietà meno efficienti. Il grano duro

coltivato nel 2010-2011 a Legnaro ha evidenziato la maggior dispersione dei dati dal modello generale (RMSE 39,6 kg ha⁻¹): questo probabilmente a causa della variabilità indotta dalla presenza di ben 6 cv in prova. L'analisi della varianza ha evidenziato differenze significative tra i 6 genotipi per la NUtE sia ad inizio levata (P = 0,0263) che in spigatura (P = 0,0343). È molto probabile che le differenti relazioni NDVI vs. N uptake osservate tra le varietà, dipendano in buona parte dalla diversa efficienza di conversione dell'azoto in biomassa.

Quando la copertura della coltura è ancora scarsa, il colore del terreno può condizionare l'NDVI, generando differenze tra località almeno nella prima parte della curva di risposta. Nelle fasi successive, sono verosimilmente le variazioni della tecnica agronomica a mantenere tali differenze. Scelta della cv, densità di semina e larghezza dell'interfila condizionano la costruzione del canopy. L'intensità nel controllo delle malerbe è un altro fattore importante: le specie infestanti contribuiscono alla rifrazione della radiazione, ma non sono ovviamente incluse nel computo dell'assorbimento azotato. Carenze di altri nutrienti (P, K, Ca, Mg e microelementi) che caratterizzino un'azienda o un comprensorio, potrebbero influire nel determinare la funzionalità fotosintetica e la risposta dell'NDVI (*Adams et al. 2000*), alterando la curva di risposta.

Purtroppo definire calibrazioni specifiche è logisticamente ed economicamente oneroso; tale approccio potrebbe essere proposto unicamente in realtà aziendali o consortili di una certa taglia, oppure per le varietà di maggior interesse commerciale.

Disporre di uno strumento che interpreti, anche molto precisamente, l'assorbimento azotato della coltura non equivale ad avere già disponibile un sistema di gestione della concimazione. Le informazioni sullo status N vanno integrate alla conoscenza precisa della fisiologia della coltura, alla sua interazione con l'ambiente, agli obiettivi realistici di resa e alla conoscenza della variabilità spaziale delle proprietà chimico-fisiche del suolo. Un esempio di tale applicazione è riportato nella sezione 3.2.3.2 di questa tesi.

Nell'ambiente della Pianura Padana lo spettroradiometro si candida ad essere impiegato come strumento di supporto alle decisioni per le concimazioni azotate comprese tra le fasi di pieno accestimento (GS 25) e piena levata (GS 32-33). Prima del GS 25 la coltura presenta infatti generalmente una scarsa copertura dell'interfila, e l'interferenza del suolo può disturbare le misurazioni. Gli effetti di saturazione che occorrono oltre una certa soglia di NDVI limitano invece l'utilizzo dello strumento praticamente entro le fasi di

piena levata, a cavallo tra l'allungamento del secondo (GS32) e terzo internodo (GS 33). Per la forma stessa della relazione esponenziale è da osservare come più si è prossimi all'asintoto, più a piccole variazioni di NDVI corrispondono ampie variazioni dell'N uptake, rendendo di fatto la stima sempre più aleatoria.

La gestione delle concimazioni tardive attraverso NDVI è applicabile solo in ambienti in cui il potenziale produttivo della biomassa sia tanto limitato da permettere letture in fase avanzata senza effetti di saturazione (*Marti et al. 2007*). In ambienti più fertili è invece il caso di rivolgersi ad altri sistemi.

Per quanto sia una misura puntiforme e con maggiori richieste in termini di tempo e manodopera, lo SPAD si propone come una buona soluzione per integrare l'NDVI. La correlazione tra SPAD e *NNI* è stata indicata generalmente come poco stabile tra genotipi e ambienti diversi (*Lemaire et al. 2008*), tuttavia in questo studio, almeno in grano tenero, le relazioni sono risultate soddisfacenti. Probabilmente le varietà di grano tenero studiate presentavano risposte ecofisiologiche simili, essendo tutte ben adattate all'areale di coltivazione.

La conoscenza dello status azotato attraverso tale indice può fornire all'agricoltore informazioni utili sull'opportunità degli interventi di concimazione tardiva. Potrebbero essere evitati così interventi tardivi nel caso l'*NNI* sia tanto alto da garantire comunque il raggiungimento della soglia proteica, o così basso da non portare (nonostante le concimazioni) a contenuti soddisfacenti. Una miglior definizione delle soglie *NNI*, potrebbe anche suggerire valori limite di SPAD entro cui proporre interventi correttivi della nutrizione azotata, più o meno incisivi.

La correlazione tra *NNI* e SPAD in grano duro è ancora poco studiata: un precedente bibliografico riporta una buona associazione tra le due misure (*Debaeke et al. 2006*). Tuttavia in questo caso non sono emerse relazioni tanto strette quanto in grano tenero, forse per la necessità di adattare il modello fisiologico dell'*NNI* (eq.5) ai genotipi ed all'ambiente tipici della Pianura Padana.

L'integrazione di queste tecnologie ai sistemi di gestione della concimazione può sicuramente migliorare la *NUE* del grano andando ad allineare le concimazioni ai fabbisogni della coltura. Purtroppo questi strumenti non permettono di conoscere anche la quantità di *SMN* (Soil Mineral Nitrogen), elemento da tenere in considerazione per un uso efficiente dei concimi (*Mengel et al. 2006*). Tuttavia, una stima indiretta della quantità di

N disponibile dal suolo può essere ottenuta proprio valutando l'assorbimento della coltura specialmente durante le prime fasi della ripresa vegetativa (*Raun et al. 2002*). Adeguare così le concimazioni alla mineralizzazione di N dal suolo può contribuire a meglio ottimizzare risorse ambientali, input agronomici e ritorno economico.

3.2 Gestione della variabilità spaziale delle colture

3.2.1 Introduzione

La variabilità spaziale e temporale delle risorse influenza la loro efficienza d'uso: l'applicazione di una dose di input uniforme sull'intero appezzamento, generalmente eccede i reali fabbisogni della coltura (*Lobell et al. 2004*). Per questo motivo l'agricoltura di precisione propone di definire, all'interno dei singoli appezzamenti, zone con proprietà omogenee del suolo (*ZO*), da gestire in modo differenziato (*Franzen et al. 2002; Ferguson et al., 2003*).

Evoluzione di questo concetto è la ripartizione delle superfici in *ZO* predisposte a fornire prodotti con differenti proprietà o destinazioni d'uso. Questa strategia è considerata vantaggiosa per la coltivazione di grano duro (*Stewart 2002*), soia e mais (*Bongiovanni et al. 2007*): applicare management specifici per le diverse *ZO*, e raccogliere in queste granelle di diverse classi qualitative può migliorare il reddito degli agricoltori. In un sistema del genere è tuttavia necessario disporre di sistemi installati sulle macchine da raccolta che, in tempo reale, determinino il contenuto proteico delle granelle e ne effettuino la cernita in classi commerciali separate.

I recenti progressi nella tecnologia di spettroscopia del vicino infrarosso (*NIRS*) hanno reso disponibili sensori del contenuto proteico abbastanza economici, leggeri e affidabili da essere installati su mietitrebbie convenzionali (*Long et al. 2008*), o addirittura parcellari (*Fox et al. 2010*). Collegare tale attrezzatura a ricevitori di segnale GPS (*Global Positioning System*) permette la creazione istantanea di mappe della distribuzione del contenuto proteico (*Long et al. 2005; Taylor et al. 2005*).

In Australia è già stata proposta la mappatura simultanea di resa e contenuto proteico alla raccolta (*Whelan et al. 2009*). I dati di questo esperimento permettono di osservare l'interazione tra coltura e ambiente nel determinare la risposta quanti-qualitativa del grano tenero. Come ben noto (*Triboi et al. 2002*), la relazione tra i due parametri è generalmente negativa; tuttavia, in alcune aree dell'appezzamento analizzato da *Whelan et al. (2009)* sono emerse aree con correlazione positiva tra resa e proteina del seme.

Il metodo di gestione a *ZO* ha purtroppo il limite di non tener conto della variabilità spaziale all'interno delle singole aree: potrebbe essere opportuna una sua integrazione con sistemi in grado di riconoscerla (*Shanahan et al. 2008*). Queste tecnologie si definiscono

VRT (Variable Rate Technology) e permettono la correzione istantanea nella dose di input in base alle letture di un sensore.

Gli indici spettrali permettono di osservare nel dettaglio come la non omogeneità del suolo condizioni lo status della coltura (*Govaerts et al., 2007; Verhulst et al. 2008*): possono perciò essere ottimamente applicati nelle *VRT*. Queste tecnologie riportano indicazioni generali, che vanno associate, di volta in volta, agli stress che condizionano lo sviluppo delle piante. L'NDVI acquisito via satellite, per esempio, ha avuto successo nel definire l'intensità della clorosi ferrica in terreni carenti di questo elemento (*Kyaw et al. 2008*). Letture spettrofotometriche (*NIRS*) della superficie del suolo si sono invece dimostrate utili a migliorare il ritorno economico dell'applicazione di concimi fosfatici in terreni ben dotati (*Maleki et al. 2009*).

L'applicazione delle *VRT* alla concimazione azotata dei cereali invernali è una soluzione promettente per ridurre i surplus nei bilanci apparenti del terreno, migliorando al contempo il reddito degli agricoltori. Tuttavia se l'azoto non è il principale fattore limitante allo sviluppo della coltura, la *VRT* può mal interpretare la giusta dose da applicare, sovrastimandola (*Zillman et al. 2006*). La correlazione spaziale tra contenuto in N del suolo e resa finale, infatti, può essere scarsamente significativa a causa di fattori che esulano dalla nutrizione azotata (*O'Hallaran et al. 2004*). Le tecniche *ZO* e *VRT* sono molto promettenti, ma necessitano tuttora di essere affinate ed integrate.

È stata pertanto avviata una sperimentazione, nell'ambito del progetto “*AGER – Grano Duro*”, al fine di studiare sistemi innovativi nel management della nutrizione azotata in questa coltura. È stato dedicato ampio risalto alla spazializzazione delle informazioni e all'analisi della loro correlazione spaziale.

Sono state pertanto generate:

- Mappe dell'NDVI durante le principali fasi del ciclo vegetativo della coltura.
- Mappe di prescrizione della concimazione basate sull'NDVI.
- Mappe di resa e contenuto proteico.
- Mappe di N uptake, bilancio apparente, efficienza d'uso dell'azoto.
- Analisi economiche spazializzate.

3.2.2 Materiali e metodi

3.2.2.1 Organizzazione e gestione della prova

La prova è stata condotta nell'annata 2010-2011, su un singolo appezzamento di grandi dimensioni (13,6 ha) in località Mira (45°22' N; 12°08' E). Il terreno (Fig. 12) è a 500 metri dalla barena della Laguna di Venezia, deriva da bonifica ed è pertanto caratterizzato da forte eterogeneità per le proprietà del suolo. L'infiltrazione del cuneo salino dal lato est è un'altra fonte di disomogeneità dei possibili stress cui possono essere soggette le colture.

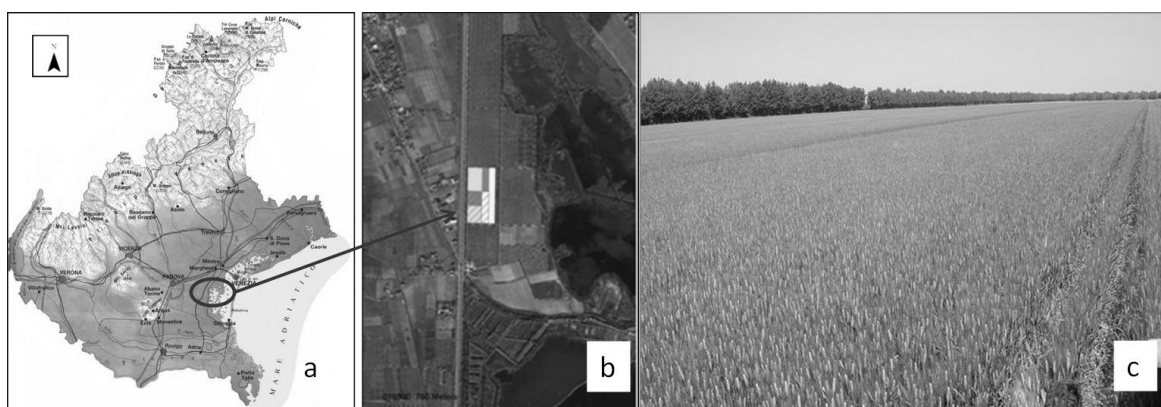


Fig. 12. Localizzazione della prova nella regione veneto (a), fotografia aerea e identificazione dell'appezzamento (b, elaborazione immagine da Google Earth 2011) e panoramica (c).

L'appezzamento è di proprietà di un'azienda privata collaborante con l'Università. In un precedente studio (*Giardini et al. 2010*) il suolo è stato abbondantemente mappato per le principali proprietà chimico-fisiche (Fig. 13):

- Tessitura (sabbia, limo, argilla, g kg^{-1})
- Sostanza organica (g kg^{-1})
- N totale (% e t ha^{-1})
- Conducibilità elettrica (EC) ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
- Densità apparente (t m^{-3})
- pH

In base all'analisi preliminare sono state identificate 3 ZO nell'appezzamento (Fig. 14a), caratterizzate da bassa (5,2 ha), media (5,1 ha) e alta fertilità (3,3 ha).

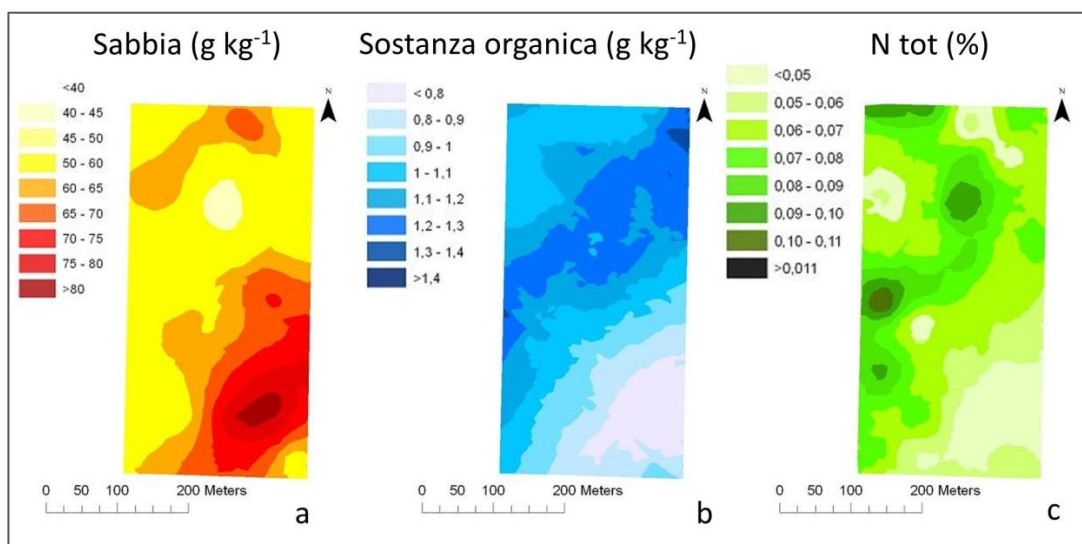


Fig. 13. Distribuzione delle principali proprietà del suolo: tessitura (a), contenuto in sostanza organica (b) e contenuto in azoto totale (c).

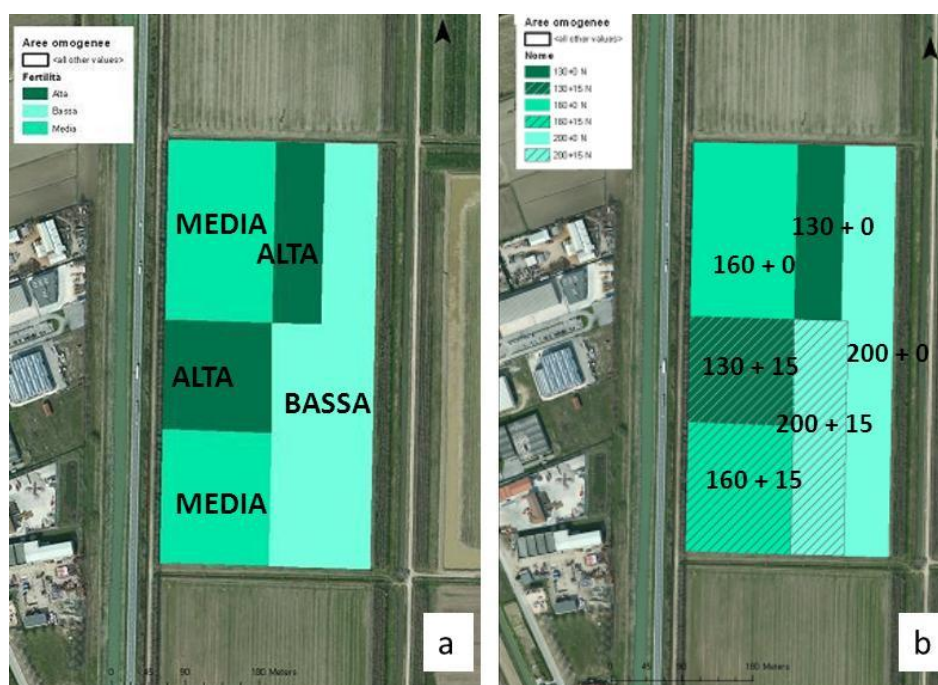


Fig. 14. Divisione in ZO dell'appezzamento (a), l'intensità crescente del colore verde indica maggior fertilità del terreno nell'area. Divisione in aree a differente gestione (b), la zona tratteggiata è stata sottoposta a concimazioni fogliari tardive: i numeri riportati sopra le aree indicano il livello di concimazione in copertura + l'eventuale concimazione fogliare. Fotografie aeree derivanti database *Bing Maps* (*Microsoft*).

Durante la stagione 2010-2011, ciascuna ZO è stata suddivisa in due sottozone: sono stati prodotti perciò un totale di 6 trattamenti di gestione della concimazione azotata (Fig. 14b), descritti in Tab. 8.

La prova è stata seminata in data 23 ottobre 2010 con una macchina da sodo; questa tecnica ha portato a maggiorare la dose di seme a 200 kg ha^{-1} corrispondenti a circa 460 cariossidi m^{-2} . È stata scelta la cv “Biensur” (costitutore e fornitore del seme: *Apsovsementi, Voghera, Italia*) per il suo forte adattamento alle condizioni pedoclimatiche dell’Italia settentrionale e per la sua resistenza alle fitopatologie che più minacciano la qualità della produzione (fusariosi della spiga).

La precessione era sorgo da granella; il terreno è stato preparato semplicemente trinciando i residui della coltura precedente e liberando la superficie dalle infestanti con un’applicazione di glifosate.

Il controllo di graminacee e dicotiledoni infestanti è avvenuto con un’applicazione a inizio levata (1 aprile 2011) di Mefenpir-Dietile (27 g ha^{-1}), Iodosulfuron-metil-sodio (9 g ha^{-1}) e Mesosulfuron-Metile (9 g ha^{-1}). Due applicazioni di anticrittogamici hanno coperto la coltura dal punto di vista fitosanitario, intervenendo nelle fasi di inizio levata (1 aprile 2011; azoxystrobin 140 g ha^{-1} + ciproconazolo 56 g ha^{-1}) e spigatura (9 maggio 2011; protioconazolo 125 g ha^{-1} + tebuconazolo 125 g ha^{-1}).

In questo studio la concimazione è la pratica oggetto di gestione a *ZO*. In presemina non è stato applicato alcun tipo di concime. In copertura, invece, nelle 3 *ZO* sono state applicate quantità crescenti di N al diminuire della fertilità del suolo: le dosi erano di 130, 160 e $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ (Tab. 8).

Durante le fasi avanzate del ciclo le *ZO* sono state divise in due porzioni (Fig. 14b): una (+15) ha ricevuto la concimazione fogliare tardiva tra spigatura e fioritura, l’altra era un testimone non concimato (+0). L’area trattata col concime fogliare è stata concentrata nell’angolo sud-ovest dell’appezzamento e ricopriva una superficie di 5,98 ha (Fig. 14b). Per rispettare la dose massima di etichetta del prodotto, i $15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ sono stati frazionati in due applicazioni ravvicinate, la prima è stata somministrata in concomitanza del trattamento fungicida (9 maggio 2011). Il prodotto scelto per quest’applicazione è stato NSZ 26 (*Cifo, San Giorgio in Piano, Italia*), con una dose di 29 kg ha^{-1} di soluzione in un volume d’irrorazione di 400 l ha^{-1} .

Trattamento	130 + 0	130 + 15	160 + 0	160 + 15	200 + 0	200 + 15
Zona omogenea	Alta	Alta	Media	Media	Bassa	Bassa
Superficie (ha)	1,4953	1,7866	2,9101	2,1870	3,1646	2,0139
Concimazione in accestimento kg ha⁻¹ N (24 febbraio 2011)	52 (NA)	52 (NA)	52 (NA)	52 (NA)	52 (NA)	52 (NA)
Concimazione in piena levata kg ha⁻¹ N (7 aprile 2011)	78 (U)	78 (U)	108 (U)	108 (U)	100 (U)	100 (U)
Concimazione in piena levata kg ha⁻¹ N (19 aprile 2011)	-	-	-	-	48 (U)	48 (U)
Concimazione in spigatura kg ha⁻¹ N (9 e 17 maggio 2011)	-	15 (UAN)	-	15 (UAN)	-	15 (UAN)
TOTALE	130	145	160	175	200	215

Tab. 8: gestione della concimazione, sono riportati i dettagli dei piani di concimazione applicati nei 6 trattamenti. Tra parentesi il tipo di concime impiegato in ciascun intervento: nitrato ammonico (NA), urea (U), soluzione di urea, nitrato ammonico e solfato ammonico (UAN).

3.2.2.2 Rilievi durante il ciclo colturale.

L'NDVI è stato osservato a livello di intero appezzamento tra le fasi di piena levata (7 aprile 2011) e maturazione ceroso-lattea (8 giugno 2011). Lo strumento scelto per effettuare le misure dell'indice spettrale è il *Greenseeker* (*Ntech Industries, Ukiah, CA-USA*) descritto alla sezione 3.1.2.1.

Nel dettaglio le fasi fenologiche scelte per le scansioni NDVI dell'appezzamento sono:

- Levata secondo nodo (GS 32); 7 aprile 2011
- Emergenza foglia bandiera (GS 37); 19 aprile 2011
- Botticella (GS 45); 3 maggio 2011
- Fioritura (GS 65); 17 maggio
- Maturazione ceroso-lattea (GS 83); 8 giugno 2011

Le scansioni dell'intero appezzamento sono state compiute su 17 transetti longitudinali, della larghezza di 1 m, distanziati tra loro 15 m. Lo spettroradiometro è stato installato su una piattaforma portata da un trattore (Fig. 15a-b), e fatto avanzare in corrispondenza delle corsie di transito per i trattamenti fitosanitari. Le misure sono state acquisite alla frequenza di 1 hz (1 lettura al secondo); in contemporanea un ricevitore D-GPS (GPS differenziale) registrava la posizione con la stessa frequenza di tempo. Il cantiere così allestito è stato fatto procedere a passo d'uomo (1-2 m s⁻¹) registrando da 6000 a 11000 punti per singola scansione (Fig. 15).

Le sequenze di punti acquisiti da lettore NDVI e D-GPS sono state accoppiate ed inserite in un sistema GIS (*Geographic Information System*) per gestire i dati georeferenziati. A ogni data di acquisizione i punti sono stati interpolati con la tecnica del Kriging disponibile nel programma GIS Arcmap 10 (*Esri, Redlands, CA-USA*), al fine di estendere la stima dell'NDVI all'intera superficie dell'appezzamento.



Fig. 15: sistema di georeferenziazione dell'NDVI (a-b), e mappatura GIS dei dati raccolta (c).

Tra le fasi di levata al 2° nodo (13 aprile 2011) e la piena maturazione (24 giugno 2011) è stato determinato il contenuto idrico del terreno in 18 punti, ripartiti tra i 6 trattamenti di concimazione. La prima misurazione (13 aprile) è stata compiuta su un profilo di suolo di 30 cm con una sonda *TDR (Time Domain Reflectometry)*.

Per le successive analisi (17 e 31 maggio, 8 e 24 giugno 2011) è stato impiegato un *Diviner 2000 (Sentek, Stepney, Australia)*, strumento in grado di scansionare l'umidità del suolo lungo un profilo diviso in sezioni da 10 cm. La misura è istantanea e avviene semplicemente inserendo l'apparecchio in pozzetti preventivamente installati nel terreno.

In corrispondenza dei 18 pozzetti sono stati prelevati campioni di biomassa durante le principali fasi del ciclo (7 e 19 aprile, 3 e 17 maggio) e su di essi è stato osservato l'NDVI come descritto alla sezione 3.1.2.1.

3.2.2.3 Rilievi alla raccolta

La raccolta è avvenuta il 27 giugno 2011, con una mietitrebbia convenzionale dotata di sistema di rilevamento della resa (*Claas, Harsewinkel, Germania*). La produzione di ogni area è stata pesata singolarmente per validare i dati del sistema elettronico (Fig. 16a). Ciascun valore del sistema di stima è stato corretto per il rapporto tra media delle rilevazioni elettroniche e produzione effettiva in ogni singola area.



Fig. 16: scarico della produzione delle parcelle in singoli rimorchi per validare il dato del sistema di rilevamento della resa (a). Spettrometro NIR installato all'interno della mietitrebbia (b), si notino i tubi di by-pass installati sul sollevatore del prodotto, foto dal sito del costruttore (www.grainit.it)

I parametri qualitativi della granella sono stati catturati in tempo reale da uno spettrometro NIR calibrato per il rilevamento di proteine, amido e glutine umido (Fig. 16b, *Grainit, Legnaro, Italia*). Il sistema era collegato a un'antenna D-GPS, per registrare la posizione e il momento di acquisizione dei dati di resa e qualità.

Le singole letture sono state raccolte alla cadenza di circa 5-6 s, sono stati perciò acquisiti un totale di circa 4500 singoli punti. Le informazioni originali sono state elaborate col software GIS; rimossi tutti i punti in cui la mietitrebbia era ferma o in fase di manovra, i punti effettivi ammontavano a 3159. Su una superficie dell'appezzamento di 13,6 ha equivale a disporre di un punto osservato ogni 43 m². Anche in questo caso le informazioni su resa e qualità sono state interpolate con la tecnica del Kriging, per estendere le osservazioni all'intero appezzamento.

3.2.2.4 Mappatura GIS, interpolazione con metodo Kriging e analisi statistica

L'analisi della varianza del contenuto idrico nel suolo è stata effettuata con il software statistico *Statgraphichs* (*Statpoint Technologies, Warrenton, VA-USA*).

Alla sezione 3.2.3.3 è stato proposto un algoritmo per convertire le misurazioni NDVI direttamente in indicazioni per la concimazione (Tab. 9). Per ottenere un riferimento per le misure dell'indice spettrale si è scelto di impostare una curva di NDVI ottimale che segua lo sviluppo della coltura. Tale relazione è stata identificata attraverso il software freeware "*Curve Expert 1.4.0*" (*Mr. Hyams, Hixson, TN-USA*).

La tecnica applicata per calcolare l'interpolazione spaziale dei dati è stata il Kriging, il software impiegato per tale operazione è denominato "*Geostatistical Analyst*" di *Arcmap 10*. I semivariogrammi costituiscono il modello di dipendenza spaziale su cui si basa l'interpolazione: forniscono cioè indicazioni per valutare l'influenza della distanza tra punti sulla variazione dei dati osservati. Il raggio entro cui si verifica l'effetto di dipendenza spaziale è definito "*range*"; dopo tale intervallo la variabilità si stabilizza su livelli asintotici.

La forza della relazione spaziale può essere misurata confrontando la quota di semivarianza [Eq. 6] dipendente dalla distanza tra i punti osservati (*partial sill*), rispetto alla quota di semivarianza che dipende dalla variabilità casuale (*nugget*).

$$\text{Eq. 6} \quad \gamma(h) = \frac{1}{2} * \sum_{i=1}^{n(h)} \frac{(z(x+h) - z(x))^2}{n(h)}$$

h = intervallo di distanza tra punti osservati; z = dato osservato in un determinato punto, $n(h)$ = numero di coppie di dati osservate alla distanza h .

Dalle principali mappe interpolate (NDVI, resa e contenuto proteico) sono state calcolate nuove mappe attraverso lo strumento "*Raster Calculator*" di *Arcmap 10*. Sono stati quindi prodotti bilanci apparenti dell'azoto, efficienza apparente del concime, bilanci economici.

3.2.3 Risultati sperimentali

3.2.3.1 Andamento meteorologico 2010-11.

La coltivazione del grano duro è stata condizionata dalle anomalie stagionali, in particolare dalla distribuzione delle precipitazioni. L'autunno è stato particolarmente piovoso: i mesi di novembre e dicembre erano ben al di sopra delle medie stagionali (Fig. 17a-c). Una settimana molto piovosa a fine inverno (108 mm dal 13 al 19 marzo) ha creato una buona riserva idrica nel terreno per le prime fasi di levata. Tuttavia, fino all'antesi, le precipitazioni sono state decisamente scarse e hanno compromesso il potenziale produttivo della coltura nelle porzioni di appezzamento con terreno più sciolto. Le temperature sono state leggermente superiori alle media di lungo periodo nei mesi di aprile e maggio; durante il riempimento delle cariossidi sono invece rientrate nella normalità (Fig. 17b-d).

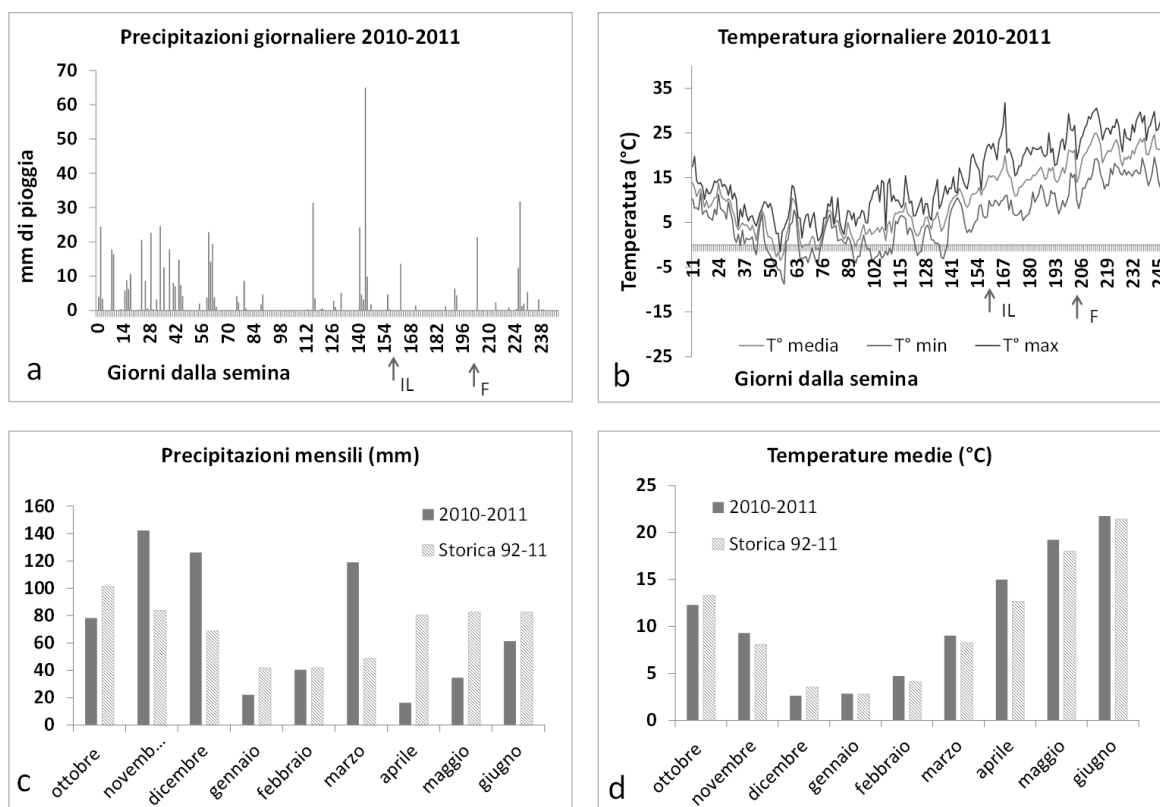


Fig. 17. Andamento meteorologico della stagione 2010-2011, dati giornalieri per precipitazioni (a) e temperature (b); le frecce rappresentano i momenti di inizio levata della coltura (IL) e fioritura (F). Medie mensili e confronto con il periodo di riferimento (1992-2011) per precipitazioni (c) e temperature (d) (dati ARPA Veneto).

3.2.3.2 Letture NDVI

Il rilievo più precoce (7 aprile) registra un'evidente disomogeneità dell'appezzamento a inizio levata. I valori NDVI sono più elevati in una larga fascia che taglia trasversalmente l'appezzamento da nord-est a sud-ovest: questa distribuzione è chiaramente sovrapponibile alle aree con tessitura più fine, maggior SO e Ntot (Fig. 13a-b-c).

Le ampie porzioni di coltura con NDVI inferiore a 0,500 sono localizzate alle testate, in un'ampia porzione equivalente all'intera ZO 200+15 e alla metà sud di 200+0 (Fig. 19, 7 aprile). Il minor indice riscontrato in queste aree è da attribuire alla non completa copertura del suolo da parte del grano.

Nei tre rilievi successivi (19 aprile, 3 maggio, 17 maggio; Fig. 19), la distribuzione di concime azotato, occorsa dopo la prima scansione, ha ridotto l'eterogeneità tra le diverse porzioni di appezzamento. Tuttavia, alcune aree hanno sempre manifestato valori NDVI più bassi della media: le piante in queste zone presentavano accrescimento modesto e sono andate incontro a senescenza precoce (Fig. 18f; Fig. 19). Tutto questo ha ridotto l'attività fotosintetica del canopy ed è stato ben catturato da spettroradiometro e analisi spaziale dei dati.

Confrontando gli NDVI del 3 e del 17 maggio è evidente che l'indice, dopo l'emergenza della spiga, sia diminuito sull'intero appezzamento. Tra fioritura (17 maggio) e maturazione ceroso-lattea (8 giugno) questo calo è stato ancora più drastico.

L'ultima scansione (8 giugno) può essere interpretata anche come un'istantanea del fenomeno di senescenza: è chiaro come quasi tutta la metà est dell'appezzamento abbia subito un maggiore stress in fase di maturazione. Le tre ZO nella metà ovest dell'appezzamento (130+15; 160+15; 160+0) presentano ancora, a 20 giorni dalla raccolta, valori di NDVI superiori a 0,400 in buona parte della loro superficie: le migliori proprietà del suolo hanno garantito evidentemente alla coltura una chiusura del ciclo più lenta. L'osservazione spaziale delle mappe consente comunque di osservare anche nelle ZO a maggior fertilità, isole di vegetazione in senescenza precoce.

I diagrammi "box & whiskers" (Fig. 18) evidenziano, con un impatto visivo immediato, la distribuzione dei valori NDVI nelle ZO a confronto. Se nelle prime 3 epoche la distribuzione dei dati era simile in tutte le zone omogenee, in fioritura (Fig. 18d) e in maturazione (Fig. 18e) sono visibili forti differenze. All'antesi (17 maggio) tutte le

ZO hanno avuto valori della mediana oltre 0,700; tuttavia l'intervallo tra mediana e primo quartile si è molto dilatato per le ZO 130+0, 200+0 e 200+15: in quest'ultima in particolare il valore del 25° percentile era inferiore a 0,400.

Il peggior stato vegetativo di queste 3 zone omogenee è confermato dal rilievo successivo (Fig. 18e): la mediana nelle tre aree è sempre inferiore a 0,250, mentre nelle ZO più fertili (130+15, 160+0, 160+15) era sopra la soglia di 0,350. Tra le ZO più svantaggiate l'area 200+0 presentava una porzione a nord con buone proprietà del terreno e piante in ridotte condizioni di stress, questo ha permesso di ottenere almeno un valore del terzo quartile quasi a livello delle ZO migliori.

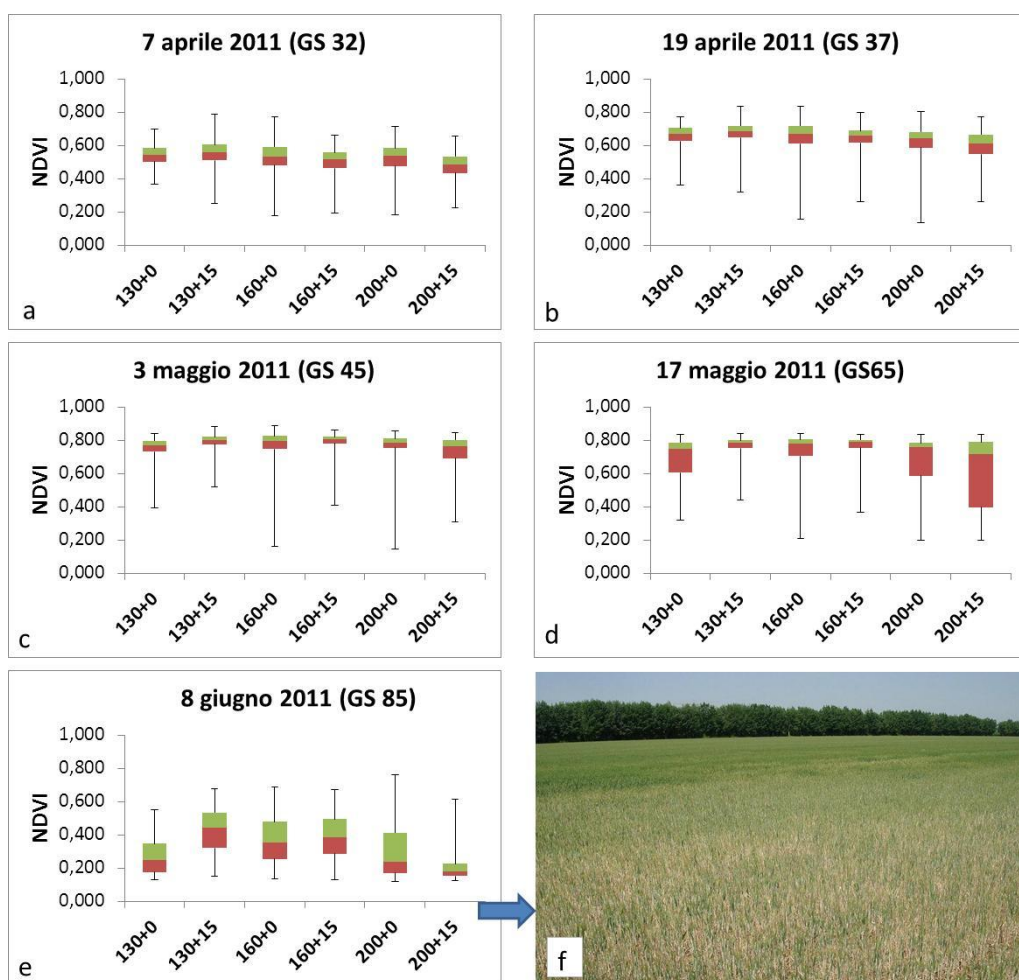


Fig. 18. Diagrammi a “box & whiskers” della distribuzione dei valori NDVI nelle cinque date di rilievo (a-e). La porzione verde rappresenta i dati inclusi tra terzo quartile e mediana, la rossa i valori tra mediana e primo quartile, le due linee indicano la distanza dei valori estremi. La fotografia (f) riporta come si presentava all’8 giugno la porzione sabbiosa (primo piano) rispetto a quelle più fertili (sullo sfondo).

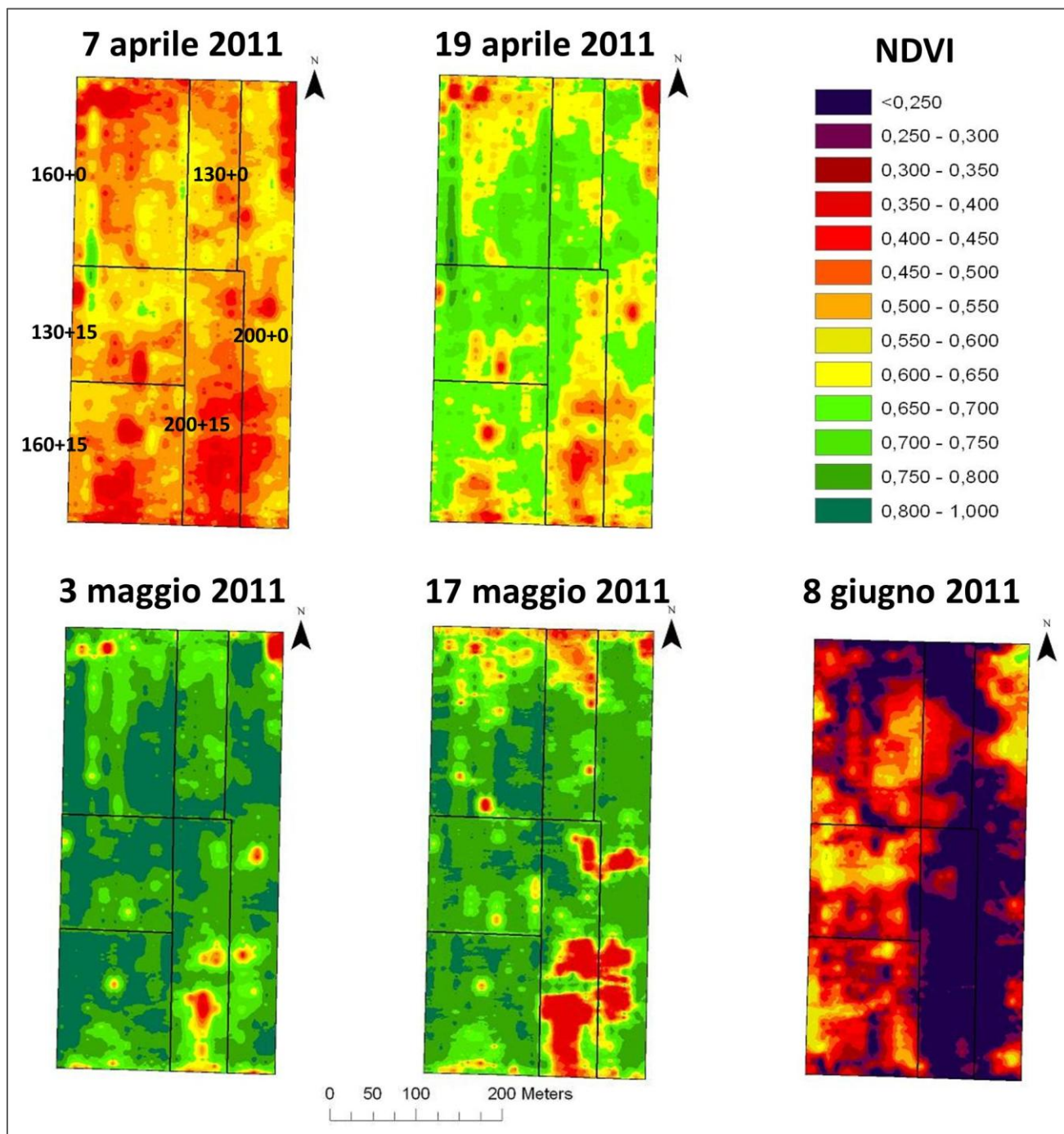


Fig. 19. Acquisizione delle letture NDVI sull'intero appezzamento.

3.2.3.3 Ipotesi per utilizzo di NDVI come sensore per VRT

L'NDVI si è dimostrato in grado di cogliere con sufficiente dettaglio la variabilità dello stato nutrizionale del grano, in particolare per quanto riguarda l'uptake azotato (sezione 3.1.3.2). Tuttavia disporre di un sistema che interpreti in tempo reale l'assorbimento di N non equivale ancora ad avere una VRT. Per ottimizzare la distribuzione del concime è necessario definire, nelle diverse fasi del ciclo, precisi valori NDVI di riferimento.

È stata perciò ottenuta una curva ottimale di NDVI al variare della somma termica. La temperatura base è stata fissata a 0°C (Triboi et al. 2003), l'accumulo è stato calcolato in GDD (Growing Degree Day) a partire dalla semina. Erano disponibili campionamenti di biomassa e letture NDVI in 6 date (9 marzo, 4 aprile, 7 aprile, 19 aprile, 3 e 17 maggio); si è scelto di definire il valore ottimale dell'indice come il 90° percentile dei valori di ogni singolo rilievo.

Il modello che più si è adattato a descrivere la curva dell'NDVI all'aumentare della somma termica è il reciproco di una quadratica [Eq.7].

$$Eq.7 \quad NDVI = \frac{1}{(5,68031 - 5,6093 \cdot 10^{-3}x + 1,7677 \cdot 10^{-6}x^2)}$$

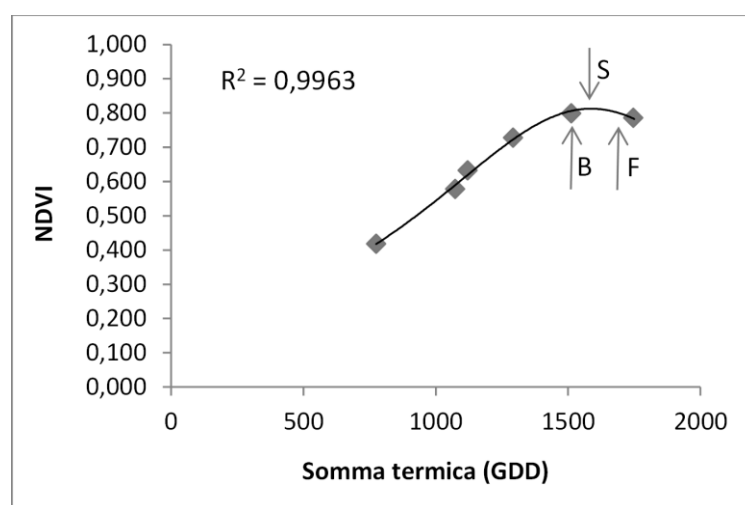


Fig. 20. Andamento del livello di NDVI ottimale al crescere della somma termica. Le lettere tra parentesi indicano i momenti di botticella (B), spigatura (S) e fioritura (F).

Con quest'equazione è stato individuato un valore massimo NDVI di 0,813, equivalente a 1587 GDD; questa somma termica è stata raggiunta approssimativamente a inizio spigatura (Fig. 20). Dal valore massimo dell'indice spettrale (0,813), attraverso la quarta equazione della Tab. 7, è stato determinato, l'equivalente N uptake di 186,3 kg ha⁻¹.

La soglia così identificata è da considerarsi verosimile, in quanto, equivale all'assorbimento totale di una coltura di grano duro che produce 7 t ha⁻¹ di granella (13% di umidità) al 13,5% di proteina, con un *NHI* (Nitrogen Harvest Index) tra 0,75 e 0,80.

Il funzionamento di un'ipotetica *VRT-NDVI* potrebbe essere basato sul calcolo del differenziale tra NDVI osservato e valore ottimale al momento della lettura. Attraverso la quarta equazione della Tab. 7 è possibile convertire tale differenziale in una differenza di N uptake. Di seguito è riportato un esempio per gradi di un ipotetico algoritmo di calcolo basato sui dati della stagione 2010-2011 (Tab. 9). Si è ipotizzato di applicare tale tecnica alle prime fasi di levata: quindi in corrispondenza del rilievo del 7 aprile.

L'algoritmo è stato inserito nel software *GIS* attraverso la funzione "*Raster calculator*" e sono state così ottenute mappe di prescrizione della concimazione variabile a livello d'intero appezzamento (Fig. 21a). Questa *VRT-NDVI* non è stata però applicata: i dati per la sua calibrazione sono stati ottenuti a posteriori e necessitano tuttora di essere consolidati da osservazioni poliennali.

Sommando gli apporti consigliati dalla mappa *NDVI-VRT* per la concimazione del 7 aprile alle 52 unità di N già somministrate in pieno accestimento (24 febbraio), è possibile stimare la dose totale che sarebbe stata distribuita sull'appezzamento. Questa quantità è stata confrontata alla dose effettivamente distribuita con lo schema a *ZO*, e ne è stata ottenuta una mappa di deviazione tra i due sistemi (Fig. 21b).

Osservando questa mappa si deduce come la dose di N distribuita sulla *ZO* 160+15 sia stata coerente alle indicazioni che avrebbe proposto la *VRT-NDVI*: metà della parcella presentava una deviazione di ± 15 kg ha⁻¹, un'altra metà presentava un deficit tra 15 e 45 unità. Da osservazioni simili si deduce che la *ZO* 130+0 è stata sotto-concimata: buona parte della sua superficie presenta infatti un deficit di concimazione tra i 45 e i 60 kg ha⁻¹ N. L'analisi della zona a bassa fertilità (*ZO* 200+0 e 200+15) propone che le concimazioni in tali aree avrebbero potuto essere di entità minore rispetto a quanto è stato realmente distribuito (Fig. 21b).

Step	Operazione	Procedimento	Dato al 7 aprile
1.	Determinare la somma termica al momento dell'applicazione (7 aprile).	Somma termica dalla semina, °T base 0 °C	1121 GDD
2.	Determinare il valore di NDVI ottimale per quella fase.	Utilizzo [Eq. 7]	0,620 NDVI
3.	Determinare il corrispondente N uptake per valore NDVI al punto 2.	Utilizzo [Eq. 4] Tab. 7	65 kg ha ⁻¹ N
4.	Definire il valore massimo di N uptake raggiungibile.	Valore massimo [Eq. 7]	186 kg ha ⁻¹ N
5.	Applicare un coefficiente di <i>NHI</i> per ridurre l'N uptake totale alle sole asportazioni delle cariossidi.	punto 4 * 0,80	149 kg ha ⁻¹ N
6.	Definire la differenza tra N uptake ottimale al punto 3 e l'obiettivo finale (punto 4).	(punto 5 - punto 3)	84 kg ha ⁻¹ N
7.	Maggiorare la dose al punto 6 per un coefficiente d'uso dell'N (N Recovery Efficiency)	punto 6 * $\frac{1}{0,80}$	105 kg ha ⁻¹ N
8.	Calcolare la differenza tra NDVI osservato (0,514) e valore ottimale (punto 2).	0,514 - 0,620	- 0,106 NDVI
9.	Calcolare la differenza in N uptake tra valore osservato ed ottimale.	Utilizzo [Eq. 4] Tab. 7 36,7 - 65,2	Deficit di - 28,5 kg ha ⁻¹ N
10.	Aggiungere (o sottrarre) il differenziale di N uptake al livello di concimazione ottimale stimato al punto 7.	105 + 28,5	Dose da applicare: 133,5 kg ha ⁻¹ N

Tab. 9. I 10 step per il sistema di calcolo della *VRT* di concimazione azotata. I valori di *NHI* e *N Recovery Efficiency* sono stati inseriti arbitrariamente. I valori ai punti 8, 9, e 10 sono un esempio numerico per il calcolo della *VRT*.

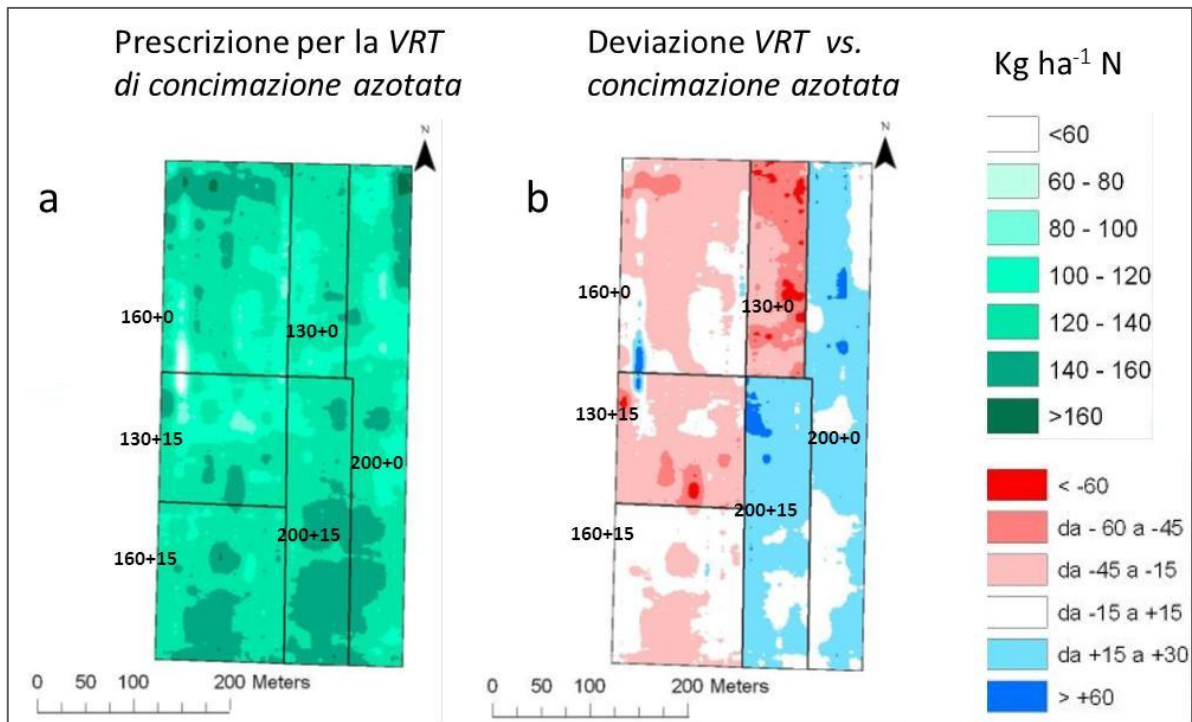


Fig. 21. Mappe di prescrizione della concimazione azotata con *NDVI-VRT* (a); deviazione della prescrizione con *NDVI-VRT* da dosi di concime effettivamente distribuita (b). Si consideri che per calcolare tale differenza, alla quantità di concime prescritto dalla *VRT* sono stati sommati anche i $52 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ distribuiti in pieno accestimento (24 febbraio 2011).

3.2.3.4 Misurazione dell'umidità del suolo

Le misurazioni dell'umidità del suolo hanno evidenziato solo parziali differenze tra *ZO*. I pozzetti situati in 130+15 hanno fatto registrare, in tutte le date, valori di contenuto idrico del suolo statisticamente superiori: sia nello strato superficiale (0-30 cm) che in quello più profondo (30-80 cm).

I pozzetti situati nella zona a bassa fertilità (*ZO* 200+0 e 200+15) hanno sempre evidenziato uno scarso contenuto in acqua dei primi 30 cm di terreno (da 6,5 a 17,5%), spesso però statisticamente non differente da quelli rilevati in parcelle più fertili.

3.2.3.5 Mappatura di resa e proteine

Sul totale dei 13,6 ha in prova, la resa commerciale (umidità 14,5%) si è attestata a un livello medio di $6,4 \pm 1,7 \text{ t ha}^{-1}$. Per l'ambiente del nord-est italiano questo è un risultato discreto, considerando il precedente colturale non favorevole (sorgo da granella), e l'anomalia della stagione primaverile. Il contenuto proteico medio è stato del 12,0%, con tuttavia un'ampia deviazione standard di $\pm 2,26\%$. Tra le ZO, 160+15 si è distinta per gli elevati livelli di resa media ($7,9 \pm 1,5 \text{ t ha}^{-1}$), all'estremo opposto 200+15 ha riportato livelli di resa di sole $4,8 \pm 1,2 \text{ t ha}^{-1}$ di produzione commerciale (Fig. 22c).

Le zone meno produttive hanno presentato le concentrazioni proteiche maggiori: 200+0 aveva, infatti, valori di $13,2\% \pm 2,1$, la ZO 200+15 ha addirittura superato il 14%.

La correlazione spaziale del dato di resa si è estesa fino a 144 m (*range*); la porzione di semivarianza spiegata dal fattore distanza (*partial sill* = 1,657) è stata di poco superiore rispetto a quella dovuta alla variabilità casuale (*nugget* = 1,456), indicando una forte interdipendenza spaziale dei dati di produzione. Una situazione molto simile si è verificata per il contenuto proteico: il "*range*" è stato di poco superiore (186 m), il rapporto tra "*partial sill*" e "*nugget*" era simile (3,094 / 2,549).

L'analisi della dipendenza spaziale tra resa e proteina indica una correlazione negativa tra i due parametri (*partial sill* della covarianza = -1,250), con un'influenza negativa della resa sul contenuto proteico che si estende fino a un raggio di circa 150 m (Fig. 24a).

Come si può osservare le concimazioni differenziate tra ZO non hanno uniformato la resa sull'intero appezzamento; alcune zone sono risultate molto più produttive (Fig. 22a). Tuttavia, anche all'interno delle singole ZO è osservabile una certa variabilità, che giustifica l'ipotesi di introdurre una VRT. Gli effetti sul contenuto proteico della concimazione con irrorazione fogliare non sono evidenti (Fig. 22b): probabilmente la diluizione dell'azoto in diversi livelli di resa è stata molto più influente dell'apporto di nutrizione tardiva.

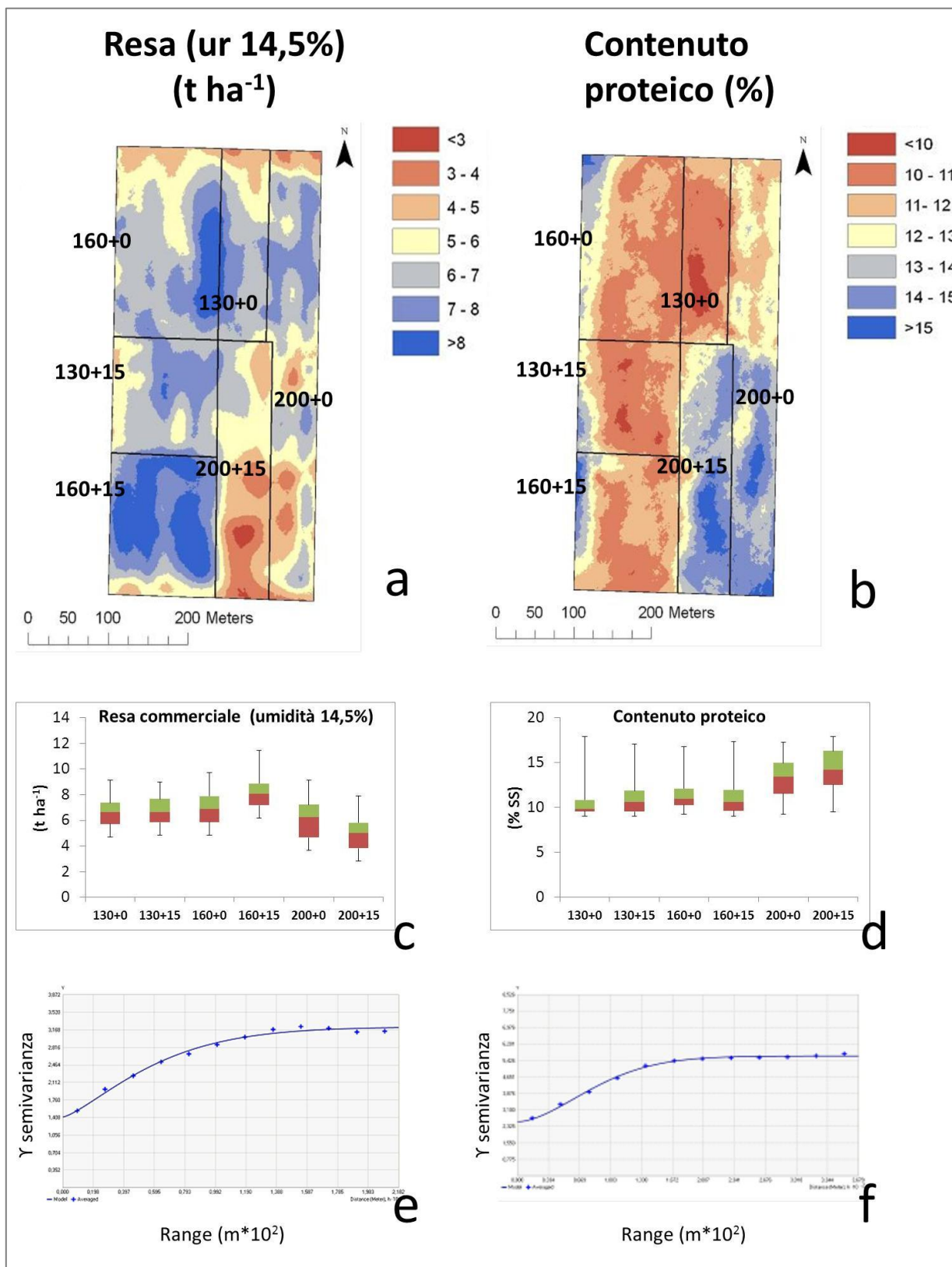


Fig. 22. Mappe con interpolazione Kriging di resa (a) e proteina (b), grafici a “box & whiskers” della distribuzione dei valori per resa (c) e proteina (d), semivariogrammi per resa (e) e proteina (f).

L'assorbimento azotato delle cariossidi (Fig. 22a), è stato calcolato moltiplicando la resa (s.s.) per il contenuto in N (% proteina / 5,7); questo si è rivelato molto variabile all'interno dell'appezzamento. La ZO a maggior assorbimento era 160+15 con valori oltre i 120 kg ha⁻¹ in gran parte della sua superficie, e picchi fino a 160 kg ha⁻¹.

Anche la ZO 200+0 ha beneficiato di un buon assorbimento su gran parte della propria estensione; tuttavia questa è una delle aree che ha ricevuto gli input azotati più consistenti. Zone a basso uptake sono presenti alle testate dell'appezzamento e nella sua porzione sud-est: questi profili sono decisamente sovrapponibili alle letture NDVI in fioritura (cfr. Fig. 19 vs. Fig. 23a), confermando la capacità dello strumento di “leggere” l'assorbimento in N della coltura. L'analisi del semiovariogramma di covarianza tra NDVI al 17 maggio e N uptake delle cariossidi (Fig. 24b), rivela una correlazione positiva tra i due parametri (*partial sill* +1,650) con un'influenza entro i 75 m (*range*).

Conoscendo le asportazioni di N dalla granella e il livello di concimazione è stato ottenuto un bilancio apparente dell'azoto (Fig. 23b). Questo indice riporta l'esposizione al rischio d'inquinamento da nitrati (*Sieling e Kage, 2006*), e può essere usato per compiere valutazioni molto semplici sull'efficienza della coltura. La zona a bassa fertilità (200+0 e 200+15) ha prodotto rese inferiori con maggiori concimazioni. Il contenuto proteico era superiore in quest'area, ma non è stato sufficiente a compensare la minor resa, portando a surplus azotati oltre 75 kg ha⁻¹; in una parte della superficie di ZO 200+15 i bilanci eccedevano addirittura i 125 kg ha⁻¹. Nelle restanti ZO il bilancio è rimasto prevalentemente entro i 50 kg ha⁻¹ N, con alcune eccezioni; in nessun caso sono stati registrati bilanci negativi.

L'efficienza d'uso del concime azotato è stata valutata con la “*Recovery Efficiency*” apparente ($N_{\text{uptake}} / N_{\text{concimazione}}$; Fig. 23c) e con la “*Utilisation Efficiency*” apparente (kg di seme prodotto / kg di concime applicato; Fig. 23c). La zona a bassa fertilità appare la meno efficiente sotto questo punto di vista: nonostante i nutrienti azotati fossero più che abbondanti, non c'è stato sufficiente assorbimento.

Per valutare come la distribuzione del contenuto proteico delle cariossidi possa influenzare il reddito dell'agricoltore, sono stati confrontati due bilanci che includessero, o meno, un premio di qualità per la produzione (Fig. 23e-f).

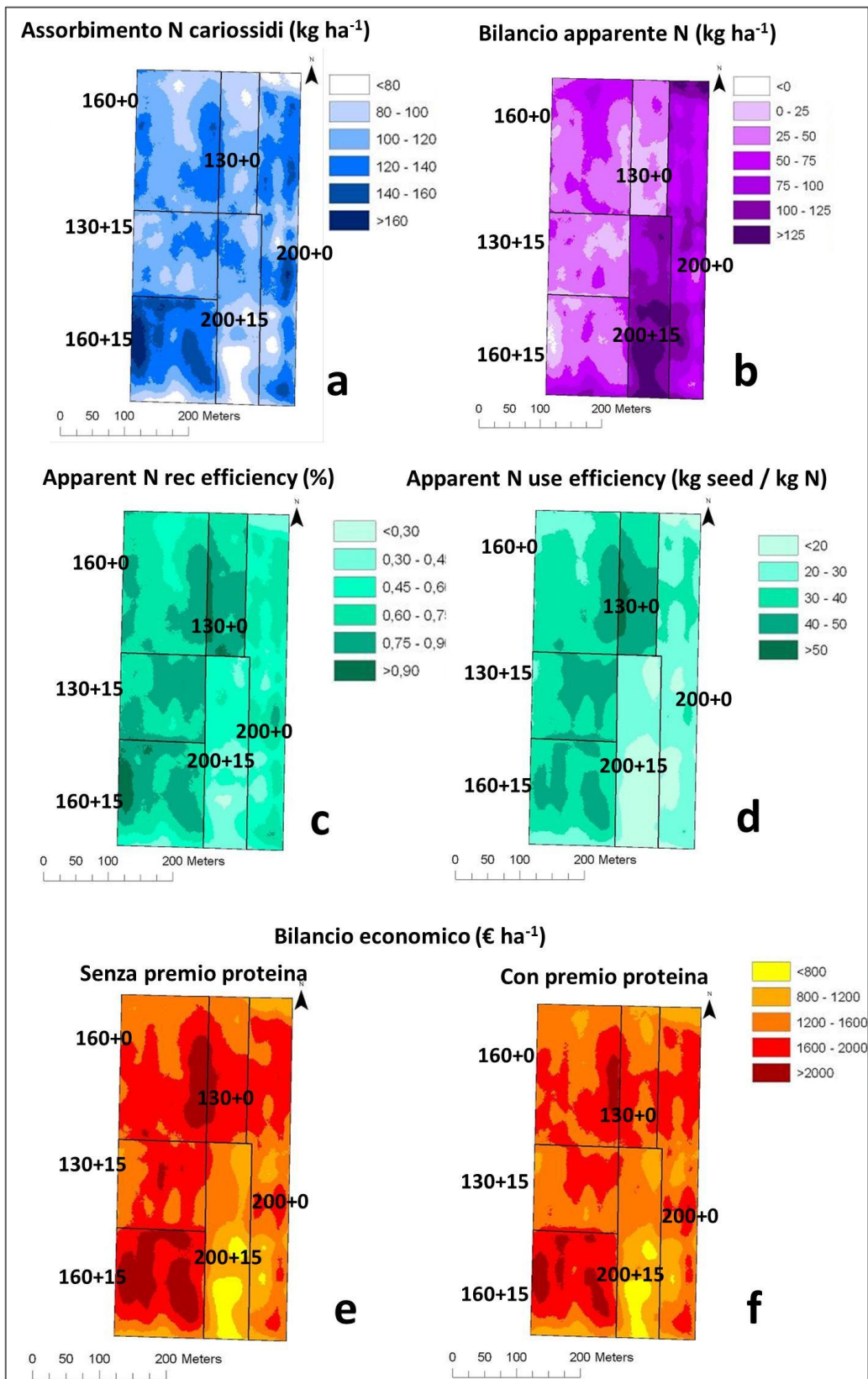


Fig. 23: mappe tematiche dell'appezzamento.

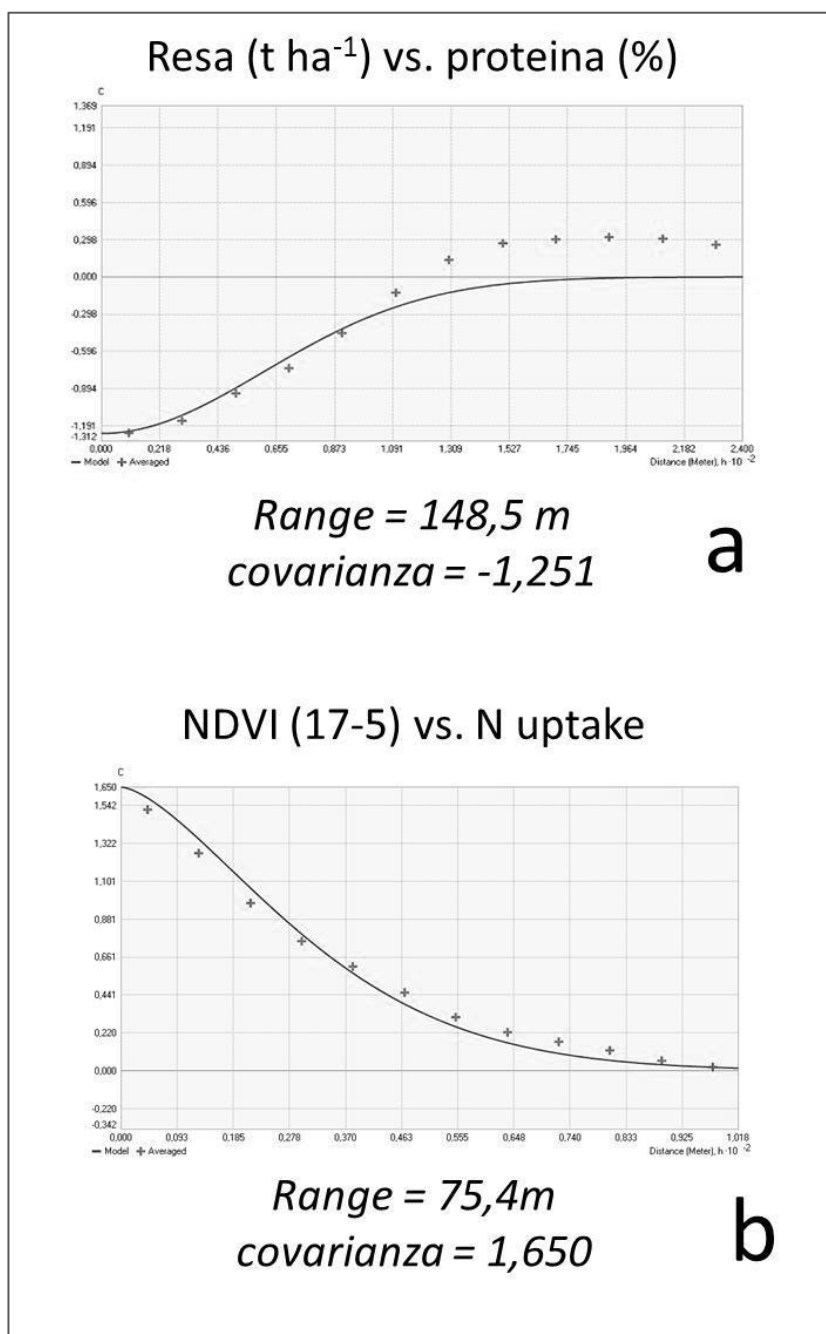


Fig. 24: semivariogramma di covarianza tra resa e proteina (a) e scansione NDVI del 17 maggio e N uptake (b).

Il bilancio economico è stato stilato unicamente sottraendo al valore della PLV (Produzione Lorda Vendibile) la spesa per i diversi livelli di concimazione; tutte le altre voci di costo sono state considerate identiche per l'intero appezzamento e restano da sottrarre ai dati in Fig. 23e-f.

I prezzi sono stati fissati ai valori dell'estate 2011, nell'ordine:

• Prezzo base del grano duro (<i>AGER 2011</i>)	280	€/t
• Prezzo unità di N da nitrato ammonico	1,046	€/kg
Costo concime nitrato ammonico (titolo 26%)	272	€/t
• Prezzo unità di N da urea	0,926	€/kg
Costo concime urea (titolo 46%)	425	€/t
• Prezzo unità di N da NSZ 26	5,600	€/kg
Costo concime NSZ 26	1,40	€/kg
• Premio proteina per ogni $\pm 1\%$ di deviazione dal 13%	± 10	€/t

Il premio per il contenuto proteico è stato ipotizzato come una maggiorazione/riduzione del prezzo base della granella (280 €/t), con un bonus/malus pari a 10 €/t per ogni punto di proteina superiore/inferiore al valore di riferimento (13%). Con questo sistema, per esempio, un grano al 14,5% di proteina è pagato 295 €/t (280 + 15), mentre uno con solo 10,5% di proteina sarebbe pagato 255 €/t (280 - 25).

Considerare il contenuto proteico per definire il prezzo della granella ha ridotto il reddito nelle aree più fertili, dove le elevate rese hanno portato ad accumulare proteine in concentrazioni ben inferiori al 13%. Nelle zone a bassa fertilità le rese sono state così basse che anche un buon incremento del prezzo pagato per tonnellata non avrebbe comunque migliorato di molto la redditività dell'area. I dati derivanti da alcune aree di saggio, prelevate prima della raccolta meccanizzata, indicano che il grano prodotto nelle zone a bassa fertilità, pur avendo un contenuto proteico elevato, presentava un basso peso ettolitrico. Questo rende, di fatto, il prodotto difficilmente collocabile nel settore di mercato del grano duro di qualità.

3.2.3.6 Altri parametri qualitativi

Il sistema *NIRS* impiegato per la lettura della proteina è dotato anche di calibrazioni specifiche per prevedere il contenuto in amido delle cariossidi e la percentuale di glutine umido dell'impasto. Osservando le parcelle (Fig. 25a), si può dedurre come la somministrazione di concime fogliare in spigatura abbia migliorato la concentrazione di glutine nella ZO 200+15 rispetto alla sua omologa non concimata (200+0).

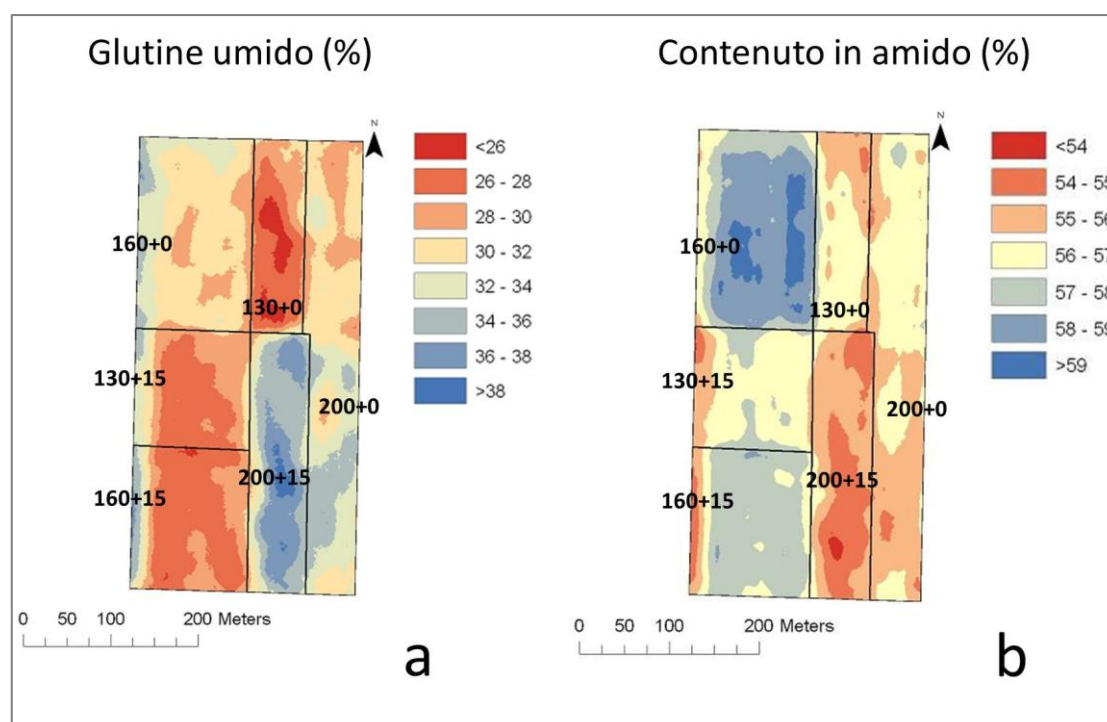


Fig. 25: mappatura della stima NIR del glutine umido (a) e della concentrazione in amido (b).

Un effetto contrario è palese nella zona a media fertilità (Fig. 25a), dove l'area non concimata in spigatura (160+0) presenta maggior tenore in glutine umido rispetto a quella trattata (160+15). Il minor contenuto in glutine di 160+15 potrebbe essere in qualche modo collegato alla maggior produzione: questa ZO ha fatto registrare un valore di resa medio di $7,9 \pm 1,5 \text{ t ha}^{-1}$ contro le $6,7 \pm 1,6 \text{ t ha}^{-1}$ di 160+0 (Fig. 22a-c). La concimazione fogliare ha forse avuto un qualche effetto sulla resa in cariossidi, portando un miglioramento della resa di oltre 1 t ha^{-1} , a scapito della qualità.

I due parcelloni a maggior fertilità di suolo (130+0 e 130+15), hanno avuto un comportamento abbastanza simile, con glutine compreso tra il 26 e il 28% su gran parte

della superficie. Tuttavia nella zona che non ha ricevuto concime fogliare è evidente un'isola centrale con glutine umido inferiore al 26%: il valore più basso di tutti i 13,6 ha in prova. La ZO 130+15 presenta invece una porzione di circa un terzo della superficie con valori superiori a 28%.

La mappa del contenuto in amido delle cariossidi (Fig. 25b) evidenzia come la ZO a media fertilità (la più produttiva) abbia presentato maggiori concentrazioni; all'estremo opposto la zona a bassa fertilità ha accumulato i valori più bassi. La concimazione fogliare sembrerebbe aver sfavorito l'accumulo di amido in queste due aree. La zona ad alta fertilità ha dimostrato un contenuto in amido intermedio e sembrerebbe non essere stata condizionata dalla distribuzione di N in spigatura.

3.2.4 Discussione

Come riscontrato in precedenza (*Giardini et al. 2010*), l'appezzamento in prova è caratterizzato da forte eterogeneità. La scarsità di precipitazioni primaverili ha accentuato le differenze tra *ZO*, penalizzando quelle su terreno più sciolto.

Lo strumento NDVI, collegato a un ricevitore D-GPS, si è dimostrato in grado di cogliere nel dettaglio le variazioni dello stato nutrizionale del grano. In alcune epoche i contorni delle mappe di NDVI erano ben sovrapponibili a quelli delle principali proprietà del terreno, evidenziando la forte influenza che queste esercitano sulla coltura.

L'NDVI è un'espressione dell'attività fotosintetica del canopy (*Serrano et al. 2000*), che è sicuramente legata alla disponibilità di N, naturale o artificiale, del terreno (*Li et al. 2008*). La concimazione, crescente per compensare la minor fertilità del suolo, non è stata però in grado di livellare lo status nutrizionale; l'azoto non costituiva quindi l'unico fattore limitante.

Ciò che nelle aree a bassa resa ha più limitato l'accrescimento della coltura è stata, probabilmente, la scarsa disponibilità di acqua a causa dalla tessitura grossolana del suolo. Un recente studio sulla variabilità spaziale del grano duro indica come l'NDVI si correli positivamente al contenuto idrico del suolo e negativamente alla componente sabbiosa (*Basso et al. 2009*). L'indicazione è coerente con risultati ottenuti in precedenza che definivano come l'NDVI del grano duro migliori in coltura irrigua rispetto al controllo (*Aparicio et al. 2000*). Quest'aspetto è stato colto al meglio dalla lettura NDVI estesa all'intero appezzamento, piuttosto che dai rilievi svolti in 18 singoli punti con apparecchiatura dedicata (*Diviner* e sonda *TDR*).

In virtù della solida correlazione con l'N uptake (sezione 3.1.3), l'NDVI può essere usato in grano duro per correggere le concimazioni con tecnologia *VRT*. Il sistema impostato per convertire la lettura NDVI in una prescrizione di concimazione (Tab. 9) si è rivelato realistico, fornendo indicazioni di concimazione non dissimili dalle quantità effettivamente distribuite in campo durante la prova (Fig. 21b).

Su gran parte della superficie di 130+0 la concimazione distribuita con il sistema a *ZO* è risultata decisamente più bassa (da 45 a 60 kg ha⁻¹ N) di ciò che sarebbe stato proposto dalla *VRT-NDVI*. La parcella è probabilmente andata incontro a una lieve carenza azotata, che ha portato ad ottenere i più bassi valori di resa e proteina tra le aree a media e alta

fertilità. Al contrario, in 160+15, dove è molto evidente la concordanza tra i due sistemi di concimazione (Fig. 21b), sono state ottenute miglior resa e miglior N uptake dell'intero appezzamento (Fig. 22), a testimoniare l'ottimizzazione d'uso dell'azoto che potrebbe essere apportata dalla tecnica *VRT-NDVI*.

La correzione della concimazione con indici spettrali non è però esente da errori. Se la limitazione della resa dipende da avversità non riconducibili a carenze nutrizionali, c'è il rischio di sovrastimare le necessità di concimazione, applicando un intervento che non risolverà le reali cause dello stress (*Zillmann et al. 2006*). Gli autori hanno evidenziato come la *VRT* per l'azoto, basata sulla riflettanza del canopy, sia stata messa in crisi quando applicata proprio su terreni sabbiosi.

In questo esperimento allo stesso modo, se la *VRT-NDVI* fosse stata applicata avrebbe proposto, nelle aree più sabbiose, forti concimazioni alla levata, comprese tra 120 e 160 kg ha⁻¹ N (totale da 172 a 212 kg ha⁻¹). Quantità così elevate sono state effettivamente distribuite in tali aree con lo schema a *ZO* (200 o 215 kg ha⁻¹ totali). La scarsa biomassa prodotta a causa dello stress idrico ha banalizzato il grande investimento di input: gli indici d'efficienza d'uso in queste zone risultano, infatti, i più bassi dei 13,6 ha in prova (Fig. 23c-d). Il rischio d'inquinamento da nitrati è concreto, se si considera il forte surplus nel bilancio apparente (Fig. 23b).

L'optimum di concimazione per la zona a bassa fertilità, in questa particolare stagione, era molto più basso di quanto sia stato effettivamente distribuito o previsto dalla *VRT-NDVI*. Tutti gli studi concordano sulla necessità di diminuire l'apporto di nutrienti al crescere degli indici spettrali (*Raun et al. 2002; Flowers et al. 2003*). Due lavori in controtendenza indicano però, di ridurre le concimazioni anche nelle aree in cui un basso indice spettrale rivela un canopy debole, poco accestito, quindi poco incline a beneficiare degli input (*Bernsten et al. 2006; Holland e Schepers 2010*). Accettare che è realisticamente poco probabile ottenere buone risposte alle concimazioni da aree con scarso sviluppo di biomassa potrebbe essere una buona strategia per evitare apporti di N eccessivi e dannosi, come avvenuto nell'area a bassa fertilità.

I terreni ricchi di SO e con buona capacità di ritenzione idrica garantiscono produzioni abbondanti e stabili nel tempo: definire un ben preciso obiettivo di N uptake per correggere le concimazioni può risultare pertanto cosa semplice. La definizione di un assorbimento finale risulta, invece, molto più complessa in un terreno scarsamente dotato:

la forte dipendenza dall'andamento meteorologico causa maggior variabilità interstagionale. La tecnologia *VRT-NDVI* offre in questi casi previsioni della dose ottimale molto più aleatorie.

Uno strumento utile a superare questa difficoltà potrebbe essere fornito dalla modellistica. Gli ultimi sviluppi della scienza meteorologica offrono previsioni stagionali da 3 a 6 mesi; incrociando modelli colturali e generatori climatici di serie sintetiche di dati meteo, è possibile ottenere già in fase molto precoce (primi di marzo) previsioni affidabili di fenologia e produzione di biomassa per il grano duro (*Ferrise et al. 2011*).

Allineare i parametri della *VRT-NDVI* alle previsioni stagionali di fenologia potrebbe contribuire a ridurre le possibilità di errore del sistema, evitando eccessi di concimazione. Rendere quest'operazione eseguibile via internet potrebbe essere una via per implementare in modo capillare e con la massima semplicità queste tecnologie nella comune pratica aziendale.

L'obiettivo di migliorare la qualità del grano duro non è stato pienamente raggiunto in questa stagione: il contenuto proteico in gran parte della superficie era inferiore al 12%. L'area a bassa fertilità è stata soggetta a forte stress idrico: il limitato potenziale di resa e l'azoto disponibile in eccesso rispetto ai fabbisogni, hanno favorito un maggior accumulo proteico. Questa situazione è riconducibile all'effetto osservato in *Engel et al. (1997)*, dove la siccità riduce il massimo produttivo della resa e permette di raggiungere elevati tenori proteici già a ridotti livelli di concimazione azotata.

La concimazione fogliare non ha sortito effetti evidenti sul contenuto proteico: tutte le *ZO* trattate presentano concentrazioni proteiche simili ai loro omologhi non trattati (Fig. 22b). Alcuni effetti sono però osservabili nella quantità di glutine umido stimata dal sistema NIRS: in due casi (*ZO* alta e bassa fertilità) c'è stato un effetto migliorativo, nel terzo (media fertilità) i valori sono stati ridotti dal trattamento.

La spiegazione del fenomeno può essere attribuita a due ipotesi ben diverse, non approfondite dalle analisi post-raccolta. La prima è da attribuire al fatto che la lettura NIRS non distingue le proteine del pericarpo da quelle concentrate nell'endosperma, fondamentali per le proprietà reologiche del prodotto. L'effetto osservato sul glutine umido potrebbe essere perciò collegato a maggiore o minore deposizione di prolamine nel seme. Ciò è purtroppo scarsamente verificabile in questo esperimento, per l'enorme mole di campioni che si sarebbe reso necessario raccogliere per confermare l'ipotesi.

Una spiegazione alternativa per la variazione del glutine umido a parità di livello proteico è il miglioramento del profilo qualitativo, cioè una variazione dei rapporti reciproci tra le tipologie di proteine del seme.

L'azoto è stato somministrato contemporaneamente in tutti i 6 parcelloni; tuttavia dinamiche e tempistiche delle ultime fasi del ciclo non sono state le medesime per tutte le ZO, come testimoniano le mappature NDVI del 17 maggio e 8 giugno (Fig. 19). L'intervento di concimazione tardiva non è probabilmente caduto quindi nello stesso momento fisiologico per tutte le parcelle, sortendo quindi effetti diversi.

Generalmente è riconosciuto che gli apporti tardivi di N fogliare non migliorino la resa in cariossidi (*Gooding e Davies 1992; Woolfolk et al. 2002; Blandino et al. 2009*), tuttavia se la concimazione di base non è ottimale, possono talvolta esserci sensibili incrementi di produzione (*Varga e Svečnjak, 2006*). Una situazione simile può essere occorsa nella parcella 160+15, dove è evidente una risposta all'incremento di concimazione fogliare di circa 1 t ha^{-1} , rispetto al testimone non trattato in fioritura (160+0). Non è certo se la miglior resa di 160+15 rispetto a 160+0 dipenda dalla concimazione tardiva: potrebbe essere anche un effetto delle proprietà del terreno. Tuttavia, i due parcelloni erano stati iscritti nella stessa classe di fertilità del terreno (media): questo dovrebbe ridurre di molto gli effetti della variabilità derivante da fattori pedologici.

L'insuccesso nell'incremento del contenuto proteico è da attribuirsi, probabilmente, alla ridotta dose di concimazione fogliare apportata in questo esperimento (15 kg ha^{-1}): in altri casi dove è stato osservato un netto miglioramento, era sempre stata apportata una quantità doppia di nutriente (*Woolfolk et al., 2002; Bly e Woodard 2003; Varga e Svečnjak, 2006*). Un esperimento svolto in Nord Italia con quantità ancora inferiori di concime fogliare (5 kg ha^{-1}) non aveva evidenziato alcuna variazione nelle performance della coltura (*Blandino et al. 2009*).

Il netto miglioramento del contenuto in glutine nella ZO 200+15 e la leggera tendenza descritta in 130+15 suggeriscono un probabile miglioramento qualitativo della produzione. In questi due casi probabilmente l'intervento fogliare ha reso disponibili nutrienti in una fase fisiologica più avanzata rispetto all'area a media fertilità. Ritardare l'intervento di concimazione, anche di poco dopo l'antesi, migliora l'efficienza nel redistribuire azoto verso le cariossidi (*Bly e Woodard 2003*). Pur non essendoci stati sensibili miglioramenti del contenuto proteico è possibile che l'anticipo di maturazione in

queste parcelle e la disponibilità di azotati abbiano favorito la deposizione nell'endosperma di gliadine e glutenine proprio nella fase più critica per il loro accumulo, cioè dai 250 GDD dopo l'antesi in poi (*Triboi et al. 2003*). A parità di contenuto proteico, un incremento di questo tipo di proteine può essere molto importante nel migliorare la qualità delle cariossidi, visto l'importante ruolo che queste ricoprono nella determinazione delle qualità tecnologiche degli impasti (*Shewry e Tatham, 1997*).

L'applicazione delle tecnologie di agricoltura di precisione risulta promettente e alcuni parziali risultati possono essere già fruibili. Tuttavia, sono ancora necessari sviluppi e un affinamento delle pratiche agronomiche per la qualità delle produzioni. A tal scopo nella sezione 3.4 è proposto uno studio su più genotipi, che compara concimazione fogliare, testimoni non trattati e la tradizionale pratica di concimazione al suolo.

3.3 Inibitori della nitrificazione: potenzialità e prospettive

3.3.1 Introduzione

La microflora del suolo condiziona tutti i passaggi fondamentali del ciclo dell'azoto (*Stanier et al. 1988*); anche l'N introdotto artificialmente nel sistema con le concimazioni è soggetto a tale controllo. I *Nitrosomonas* sono uno tra i generi batterici più importanti sotto questo punto di vista: ossidano la forma ammoniacale a nitrito, permettendone l'ulteriore ossidazione a nitrato ad opera dei *Nitrobacter*.

Formulazioni chimiche, come la diciandiammide (*DCD*) o il 3,4 dimetilpirazolo fosfato (*3,4-DMPP*), possono inibire temporaneamente l'attività dei batteri nitrificatori. La seconda molecola, in particolare, si dimostra molto interessante per l'impiego in aggiunta a concimi e ammendanti (*Zerulla et al., 2001*) e non presenta particolari criticità tossicologiche o ecotossicologiche (*Andreae, 1999; Roll, 1999*). L'efficacia sul controllo della nitrificazione è fortemente condizionata da fattori legati alla natura del terreno: migliora in suoli sciolti e umidi, condizioni notoriamente favorevoli alla lisciviazione dei nutrienti (*Barth et al. 2001; Barth et al. 2008*).

Il *3,4-DMPP* in associazione a concimi minerali si è dimostrato in grado di ridurre la lisciviazione dei nitrati in esperimenti su lisimetro (*Yu et al. 2007; Cui et al. 2011*) o in prove di coltivazione di agrumi in vaso (*Serna et al. 2000*). Esperimenti d'incubazione in laboratorio (*Di e Cameron, 2011*) o su parcelle in campo (*Klein et al. 2011*) hanno dimostrato la possibilità di ridurre le emissioni gassose (N_2O) o la lisciviazione di nutrienti anche dai reflui organici, se opportunamente miscelati con inibitori della nitrificazione (*DCD e 3,4-DMPP*).

Nella realtà di campo l'aggiunta del *3,4-DMPP* al concime, pur riducendo significativamente le concentrazioni di $N-NO_3^-$ in falda, non costituisce una garanzia per il rientro nel limite di potabilità di 50 mg l^{-1} nelle acque percolate (*Diez-López et al. 2008*). Questo perché la quantità di principio attivo apportata non è sufficiente a controllare anche il destino dei pool di *SMN* derivanti dal terreno stesso (*Arregui e Quemada, 2006*).

Le minori perdite di nutrienti da questi concimi potrebbero aumentare le rese delle colture e orientare gli agricoltori a preferirli a quelli tradizionali; i risultati di diverse sperimentazioni in merito sono però piuttosto discordanti. In orticoltura non sembrano esserci miglioramenti della produttività (*Rodrigues et al. 2010*): il tipo di coltura e la

tecnica agronomica possono, infatti, fortemente condizionare la prestazione dei concimi con inibitore (*Pizzolongo et al. 2011*).

Nei cereali l'utilizzo di concimi con *3,4-DMPP* non ha fatto in genere registrare cali di produzione rispetto all'impiego di concimi convenzionali (*Strenghetto 2007; Arregui e Quemada 2008*); in alcuni casi ha addirittura migliorato sensibilmente le rese (*Pasda et al. 2001; Villar e Guillaumes 2010*). Talvolta l'extra-profitto derivante dalla maggior produzione può più che compensare il maggior costo di questi concimi (*Villar e Guillaumes 2010*). Anche senza vantaggi produttivi la scelta di prodotti con inibitore della nitrificazione può giustificarsi per la semplificazione della pratica agronomica conseguente alla minor necessità di frazionare gli apporti azotati.

Purtroppo spesso all'applicazione di queste tecnologie si è associato uno scadimento della qualità merceologica dei cereali riguardante il contenuto proteico (*Pasda et al. 2001; Strenghetto 2007*). Probabilmente questi concimi mantengono buone disponibilità di N nel terreno in piena levata, ma non ne garantiscono in fase avanzata, quando assorbimenti tardivi possono aumentare la proteina nelle cariossidi (*Strenghetto 2007*).

La tecnica di coltivazione e le variabili ambientali condizionano fortemente l'efficacia dell'inibitore di nitrificazione: per valorizzazione questo genere di prodotti è perciò necessario definire itinerari agronomici ad essi dedicati. Nell'ambito del progetto MI.QU.CE., finanziato dalla misura 124 del PSR sono state allestite su grano tenero una prova in vaso ed una di pieno campo, i cui obiettivi erano rispettivamente:

- Tracciare una curva di rilascio dei nutrienti da concime additivato con *3,4-DMPP*, definirne la durata dell'effetto e il picco di rilascio.
- Valutare le ricadute su quantità e qualità tecnologica della produzione di grano tenero ottenuta con concimi con inibitore della nitrificazione.
- Confrontare un protocollo innovativo (con concimi additivati) con una tecnica di concimazione tradizionale.

3.3.2 Materiali e metodi

3.3.2.1 Prova in ambiente confinato

La prova è stata condotta durante la stagione 2009-2010 su vasi di plastica attrezzati per il prelievo della soluzione circolante. I vasi sono stati riempiti con terreno proveniente dall'Azienda Agraria Sperimentale dell'Università, per testare le performance dei concimi in un substrato il più possibile simile alla realtà di campo. Il terreno prelevato dall'orizzonte superficiale (0-15 cm) è stato essiccato in stufa a 105 °C, macinato e setacciato (<2 mm); le sue proprietà sono riportate in Tab. 19 (anno 2009-2010). Col substrato risultante sono stati riempiti il 16 dicembre 2009 vasi in plastica (6 litri di terreno): in 15 di questi sono state deposte cariossidi della cv di grano tenero Aubusson; i restanti non sono stati seminati. Dopo l'emergenza le piante nei vasi seminati sono state diradate per ottenere una densità equivalente a 400 piante a m².

Prima della ripresa vegetativa su tutti i vasi è stato applicato un sistema di prelievo della soluzione circolante (*Rhizon SMS, Eijkelkamp, Giesbeek, Olanda*) consistente in una sonda porosa (lunghezza 50 mm, Ø 2 mm), un tubo di raccordo in silicone e una siringa della capacità di 10 ml. La sonda è stata inserita orizzontalmente nel vaso ad una profondità di 8 cm, il foro di inserimento è stato sigillato con silicone (Fig. 26).



Fig. 26: sistema di campionamento della soluzione circolante allestito nei vasi.

Il sistema così allestito è in grado di prelevare campioni del volume di circa 5-7 ml senza alterare il contenuto in anioni o cationi. I campioni di soluzione circolante sono stati

prelevati ogni dieci giorni tra le fasi di pieno accostamento (GS 25) e maturazione (GS 89). I vasi durante questa fase sono stati mantenuti umidi con interventi d'irrigazione a seconda dell'evapotraspirazione quotidiana, in quelli non seminati le eventuali infestanti sono state rimosse a mano, perché il loro assorbimento azotato non disturbasse le misurazioni.

Sono state applicate 3 diverse tesi di concimazione: un controllo non concimato, un trattamento "RC" (rilascio controllato) con urea additivata *ENTEK 46 (K+S Nitrogen, Mannheim, Germania)* e un piano di concimazione tradizionale "PR" (pronto rilascio) con frazionamento dell'azoto (Tab. 10). Per un'uniforme distribuzione del concime nel vaso, i granuli di urea (tradizionale o additivata) sono stati sciolti in provette "falcon" con 20 ml di acqua deionizzata e la risultante soluzione è stata versata sulla superficie del suolo.

Il contenuto di nitrato nella soluzione circolante è stato determinato con analisi spettrofotometrica (*Cataldo et al. 1975*). Quando non è stato possibile analizzare i campioni entro le 24 ore dal prelievo si è proceduto a congelarli in attesa di analisi.

Tesi	0N	RC (rilascio controllato)	PR (pronto rilascio)
Tipologia di concime	nessuno	Entec 46 (urea 46% N + 0,46% 3,4-DMPP)	Urea (46% N)
Applicazione a GS 25 5 marzo 2010	-	633 mg N per vaso (140 kg ha ⁻¹ N)	204 mg N per vaso (45 kg ha ⁻¹ N)
Applicazione a GS 33 14 aprile 2010	-	-	271 mg N per vaso (60 kg ha ⁻¹ N)
Applicazione a GS 65 13 maggio 2010	-	-	158 mg N per vaso (35 kg ha ⁻¹ N)
Applicazione totale	0 mg N per vaso (0 kg ha ⁻¹ N)	633 mg N per vaso (140 kg ha ⁻¹ N)	633 mg N per vaso (140 kg ha ⁻¹ N)

Tab. 10: piani di concimazione della prova in vaso per le tre tesi. Nelle celle sono riportate le quantità di concime applicate per vaso e tra parentesi l'equivalente dose per unità di superficie.

3.3.2.2 Prova in pieno campo

La prova in pieno campo ha coinvolto l'Azienda Agraria Sperimentale "L. Toniolo" dell'Università e 4 aziende partecipanti alla misura 124. Le località, le coordinate geografiche e le varietà coltivate sono riportate in Tab. 1.

Gli itinerari agronomici per la coltivazione del grano sono stati definiti dopo un sondaggio sulla prassi aziendale per mezzo di questionario distribuito alle aziende (*All. 1*). Dai dati raccolti è stato stilato un protocollo basato sulle necessità di tutti i soggetti coinvolti nella filiera "grano tenero", si è cercato perciò di proporre piani di coltivazione:

- sostenibili dal punto di visto ambientale,
- volti a semplificare la pratica aziendale,
- che permettessero livelli di produttività e redditività adeguati agli agricoltori,
- in grado di fornire materie prime rispondenti alle richieste del mondo della trasformazione.

Sono stati confrontati due piani di concimazione, uno tradizionale (*PR*) e uno semplificato (*RC*): nel primo sono stati proposti due frazionamenti in accestimento (*GS 25*) e piena levata (*GS 32*), il secondo ha invece previsto un unico intervento in accestimento (*GS 25*) con concime additivato al *3,4-DMPP*. È stata data importanza all'intervento di concimazione in spigatura, per garantire un buon contenuto proteico delle cariossidi. La scelta è ricaduta sull'applicazione fogliare in entrambe le tesi: l'opportunità di miscelare il prodotto agli anticrittogamici normalmente distribuiti per la difesa della spiga permette di risparmiare un passaggio in campo.

Non sempre è stato applicabile il protocollo originale proposto agli agricoltori (*All. 2*), e sono stati necessari diversi aggiustamenti, riportati in Tab. 11. Nelle 5 aziende coinvolte dal progetto si è cercato di avere sempre rappresentate 2 cv ed entrambi i piani di concimazione; purtroppo spesso non è accaduto. Nell'azienda dell'Università il grano è stato coltivato in 4 appezzamenti (2 cv x 2 piani). In ciascun appezzamento a *PR* (pronto rilascio) sono state ricavate 2 parcelle *RC* (rilascio controllato) da 72 m² (12 x 6 m), e viceversa. In ogni appezzamento sono state poste anche 2 parcelle spia: un testimone non

concimato e un testimone ad N non limitante, concimato mensilmente con 25 kg ha⁻¹ N in forma di nitrato ammonico fino all'inizio delle concimazioni di copertura.

Azienda:	“L. Toniolo”	Este	Lozzo Atestino	Ponso d’Este	Vescovana
Ammendanti organici	Liq. bovino	No	No	Liq. suino	Pollina
Concimazione presemina	32-96-92 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	0-0-0	0-50-50 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	0-0-0	0-0-0
Data di semina	20 ott 2009	20 ott 2009	2 nov 2009	20 ott 2009 ^a e 27 ott 2009 ^b	30 ott 2009
Data di raccolta	25 giu 2010	2 lug 2010	28 giu 2010	28 giu 2010	28 giu 2010
Piano PR (pronto rilascio)	- 9 mar (NA) 45 kg ha ⁻¹ N - 16 apr (U) 68 kg ha ⁻¹ N	2 mar (NA) ^c 113 kg ha ⁻¹ N	- 17 mar (NA) 50 kg ha ⁻¹ N - 22 apr (U) 75 kg ha ⁻¹ N	- 19 mar (NA) ^d 67 kg ha ⁻¹ N - 17 apr (U) ^d 46 kg ha ⁻¹ N	19 mar (NA) 45 kg ha ⁻¹ N
Piano RC (rilascio controllato)	9 mar (E46) 113 kg ha ⁻¹ N	2 mar (E46) ^e 113 kg ha ⁻¹ N	17 mar (E46) 125 kg ha ⁻¹ N	19 mar (E26) ^f 113 kg ha ⁻¹ N	19 mar (E46) 113 kg ha ⁻¹ N
Concimazione in spigatura	7 mag (NSZ) 7 kg ha ⁻¹ N	9 mag (NSZ) 7 kg ha ⁻¹ N	15 mag (LN) 6 kg ha ⁻¹ N	17 mag (NSZ) ^g 7 kg ha-1 N	17 mag (NSZ) 7 kg ha-1 N
TOTALE concimazione	152 kg ha ⁻¹ N	120 kg ha ⁻¹ N	131 kg ha ⁻¹ N	120 kg ha ⁻¹ N	120 kg ha ⁻¹ N RC 45 kg ha ⁻¹ N PR

Tab. 11: dettagli dei piani di coltivazione nelle aziende del progetto MI.QU.CE. anno 2009-2010.

a = data di semina della cv Aubusson

b = data di semina della cv Kalango

c = piano applicato a cv Aubusson e Africa

d = piano applicato alla sola cv Kalango

e = piano applicato alla sola cv Africa

f = piano applicato alla sola cv Aubusson

g = applicato alla sola tesi Kalango - PR, non applicato su Aubusson - RC.

Sigle usate per identificare i concimi impiegati:

NA = Nitrato ammonico, titolo 26% N.

U = Urea, titolo 46% N.

E46 = Entec 46 (K+S Nitrogen, Mannheim, Germania), titolo 46% N 0,46% 3,4-DMPP.

E26 = Entec 26 (K+S Nitrogen, Mannheim, Germania), titolo 26% N 0,26% 3,4-DMPP.

NSZ = NSZ 26 (Cifo, San Giorgio in Piano, Italia), soluzione liquida titolo 26% N

LN = Last N (Yara, Oslo, Norvegia), soluzione liquida titolo 25% N

Durante la stagione sono stati raccolti campioni di biomassa tra gli stadi GS 25 e GS 85 per calibrare i sistemi di “proximal sensing” descritti al capitolo 3.1. I campioni sono stati essiccati (48 h a 65°C) e saggati al Kjeldhal (AACC 46-11.02) per il contenuto di azoto. Le prove sono state raccolte con mietitrebbia convenzionale. A Legnaro sono state raccolte con una mietitrebbia di piccole dimensioni (barra di taglio 3 m) le parcelle PR nei

campi *RC*, le parcelle *RC* nei campi *PR*, i controlli non concimati e quelli ad azoto non limitante.

3.3.2.3 Analisi qualitative e statistiche.

La qualità tecnologica delle farine è stata analizzata dal laboratorio di un molino industriale cooperante al PSR (*Molino Quaglia, Vighizzolo d'Este, Italia*), sono state presi in considerazione i seguenti parametri tecnologici:

- Contenuto Proteico (%SS)
- Glutine umido (%)
- Peso ettolitrico (kg hl⁻¹)
- Falling number (s), indice dell'attività alfa amilasica
- Picco di viscosità (cP), indice dell'attività alfa amilasica
- W e P/L, indici alveografici di Chopin sulle proprietà meccaniche dell'impasto

Non è stato possibile effettuare analisi statistiche sui dati di resa della prova in pieno campo. Adattare i protocolli di coltivazione alle esigenze produttive delle aziende ha prodotto schemi statistici non simmetrici, permettendo unicamente confronti all'interno di ciascuna azienda.

A Legnaro è stato possibile sottoporre ad ANOVA i campioni di biomassa raccolti tra le fasi di pieno accestimento (GS 25) e maturazione cerosa (GS 83). Questo perché i 2 piani di concimazione sono stati rappresentati da 3 repliche in ciascuno dei 4 appezzamenti, per un totale di 24 dati per singolo rilievo. Per ogni data di campionamento è stata eseguita una singola analisi.

Nella prova in vaso sono invece stati effettuati confronti statistici per singolo campionamento, con 5 repliche per ciascuna tesi. Le analisi sono state condotte con *Statgraphics*[®] (*Statpoint Technologies, Warrenton, VA-USA*).

3.3.3 Risultati sperimentali

3.3.3.1 Prova in ambiente confinato

Il sistema allestito si è rivelato efficiente e ha permesso in tutte le date il campionamento della soluzione circolante. Il contenuto di nitrati delle acque estratte dai vasi seminati si è rivelato sempre molto basso e non sono emerse differenze tra le tesi. Questo perché le sonde, inserite a 8 cm dalla superficie, sono state collocate proprio nella zona più colonizzata dalle radici delle piante: il loro continuo assorbimento di nitrati probabilmente non ha permesso di osservare in laboratorio concentrazioni di nitrato rilevanti.

In compenso le analisi sui vasi non seminati hanno permesso di definire una dinamica di rilascio di nutrienti dai concimi abbastanza chiara (Fig. 27). Nei primi 20 giorni dalla concimazione, la tesi a pronto effetto "PR" rilasciava nella soluzione circolante quantità significativamente più alte di $N-NO_3^-$ rispetto al testimone non concimato, cosa non avvenuta per la tesi RC (Fig. 27).

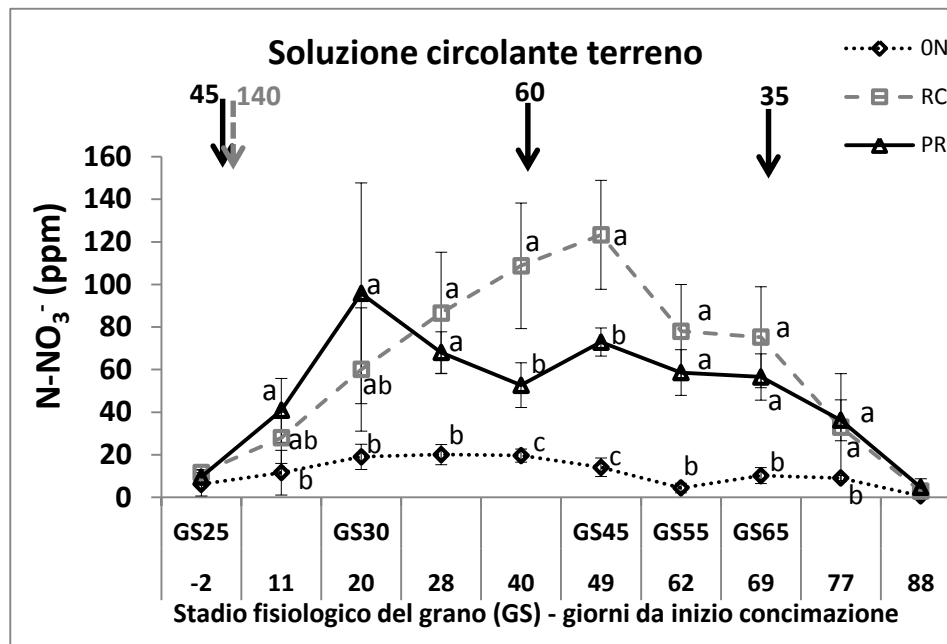


Fig. 27: curva di concentrazione dell'azoto nitrato nei vasi senza piante di frumento. Le frecce e i numeri indicano gli interventi di concimazione (linea continua – pronto rilascio, tratteggiata – rilascio controllato) e la loro entità. Sull'asse delle ascisse sono riportati i giorni dall'inizio del trattamento di concimazione (5 marzo 2010), e il raggiungimento dei principali stadi fenologici della coltura nelle prove in campo. Le lettere indicano differenze significative ($P < 0,05$) per il test di Duncan, differenziano le medie per ciascuna singola data di campionamento.

Durante i successivi 50 giorni (fino al 77°) l'effetto inibitore del 3,4-DMPP è venuto meno e la tesi RC ha sempre espresso concentrazioni maggiori rispetto al testimone non concimato (Fig. 27). In due occasioni (a 40 e 49 giorni dall'inizio della prova) nei vasi "RC" sono stati osservati valori significativamente superiori anche rispetto alla tesi "PR" ($P < 0,05$). Il picco massimo nel rilascio di nitrati è stato registrato a 49 giorni dall'intervento di applicazione del concime con inibitore.

Le concentrazioni di nitrati riscontrate nella tesi a pronto rilascio erano più basse delle attese, soprattutto nella seconda parte del periodo preso in esame. Probabilmente questo effetto è stato causato dal forte dilavamento indotto dagli apporti idrici necessari a rendere estraibile la soluzione circolante.

3.3.3.2 Prova in pieno campo

La stagione 2009-10 è stata caratterizzata da temperature del tutto simili alle medie di lungo periodo (1992-09). L'andamento pluviometrico è invece stato fortemente anomalo (dati ARPA Veneto; Fig. 28): ridotte precipitazioni in ottobre hanno facilitato le operazioni di semina. Le precipitazioni sono state copiose nel periodo compreso tra antesi e maturità della granella: a Legnaro per esempio, anche escludendo un evento piovoso molto intenso in prossimità della raccolta (53 mm il 20 giugno), la pioggia totale ammontava comunque a 113 mm. L'assenza di stress idrico in questa fase critica è stata favorevole al riempimento ottimale delle cariossidi e a elevati livelli di resa.

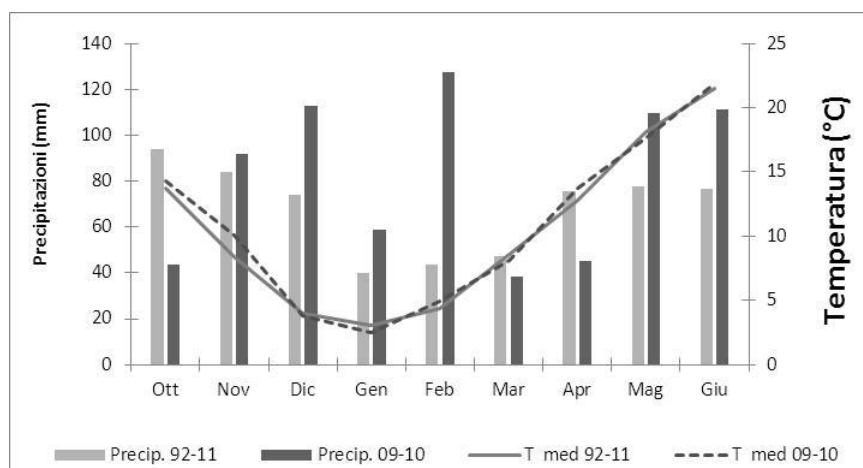


Fig. 28: andamento mensile di temperatura media e quantità di precipitazioni a Legnaro, annata 2009-2010 a confronto della serie storica ventennale 1992-2011 (Dati ARPA Veneto).

Dopo la botticella Aubusson ha dimostrato, rispetto a PR22R58, maggior capacità di accumulare N nella propria biomassa (Fig. 29c). Nell'ultimo rilievo in maturazione cerosa questa tendenza è stata evidente anche per la quantità di sostanza secca prodotta (Fig. 29a). La concimazione con inibitore della nitrificazione non ha mai limitato la produzione di biomassa rispetto alla tesi tradizionale (Fig. 29b). Tra le fasi di piena levata e botticella la tesi RC ha portato a maggiori N uptake rispetto a PR; gli assorbimenti di N erano tuttavia simili tra le due modalità di concimazione nelle fasi finali del ciclo della coltura (Fig. 29d).

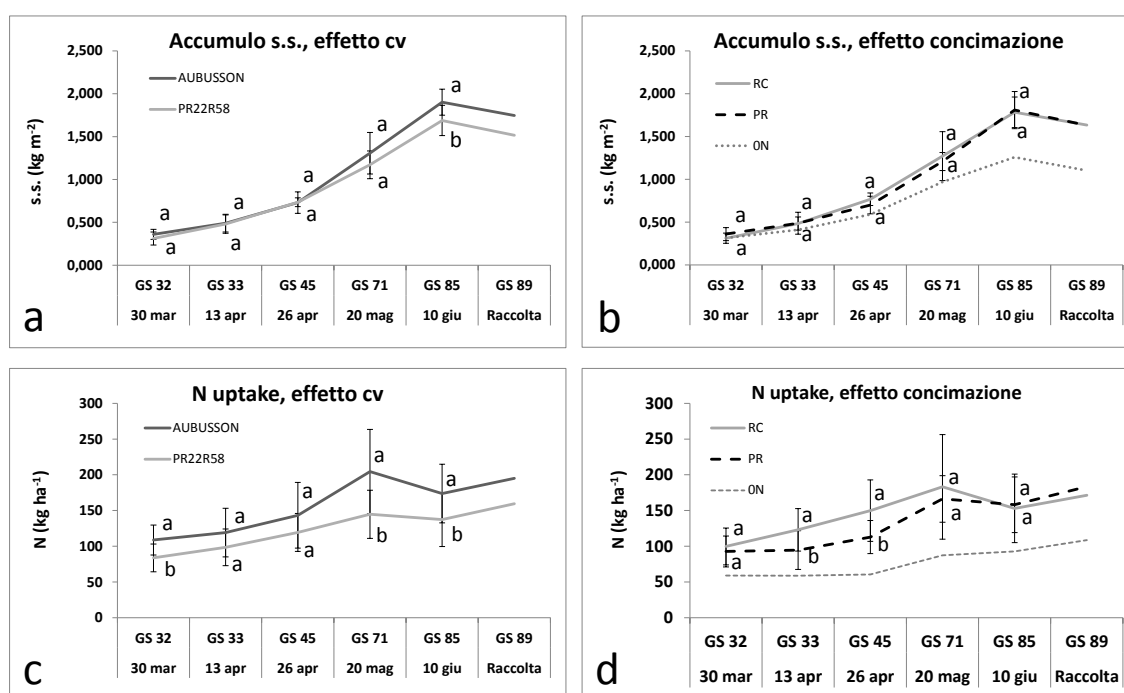


Fig. 29. Andamenti dell'accumulo di biomassa secca (a-b) e azoto (c-d) nei campioni raccolti a Legnaro. Sono rappresentati gli effetti di cv (a-c) e piano di concimazione (b-d). Gli stadi fenologici riportati sono: levata secondo (GS 32) e terzo nodo (GS 33), botticella (GS 45), maturazione lattezza (GS 71) e cerosa (GS 85). Nei grafici sull'effetto di concimazione (b-d) è riportato per confronto l'assorbimento di N nel controllo non concimato. I dati alla raccolta sono una stima ottenuta da resa in granella e HI, e accumulo di N nelle cariossidi e NHI. Lettere diverse indicano medie diverse tra loro per il test di Duncan ($P < 0,05$) e sono riferite a ogni singola data.

L'interazione tra cv e concimazione ha sempre oscillato intorno al limite della significatività ($0,10 > P > 0,01$), sia per l'accumulo di N che per la quantità di biomassa secca prodotta. In particolare, tra le fasi di levata al terzo nodo (GS 33) e maturazione lattezza (GS 71), Aubusson ha dimostrato di trarre vantaggio dalla concimazione a lento rilascio, mentre al contrario PR22R58 sembrerebbe esserne stato sempre penalizzato.

A Legnaro, grazie alle parcelle descritte nei materiali e metodi, ognuna delle 4 tesi (cv x concimazione) era rappresentata in 2 appezzamenti; mediandone i risultati è stato prodotto il grafico in Fig. 30a. La concimazione RC ha penalizzato la resa in granello di circa 0,5 t ha⁻¹ in entrambe le cv. Tuttavia in Aubusson è stato osservato un lieve miglioramento della proteina (+0,6%); al contrario PR22R58, oltre al calo di produzione ha manifestato anche un netto scadimento qualitativo (-1,0% proteina tesi RC vs. PR).

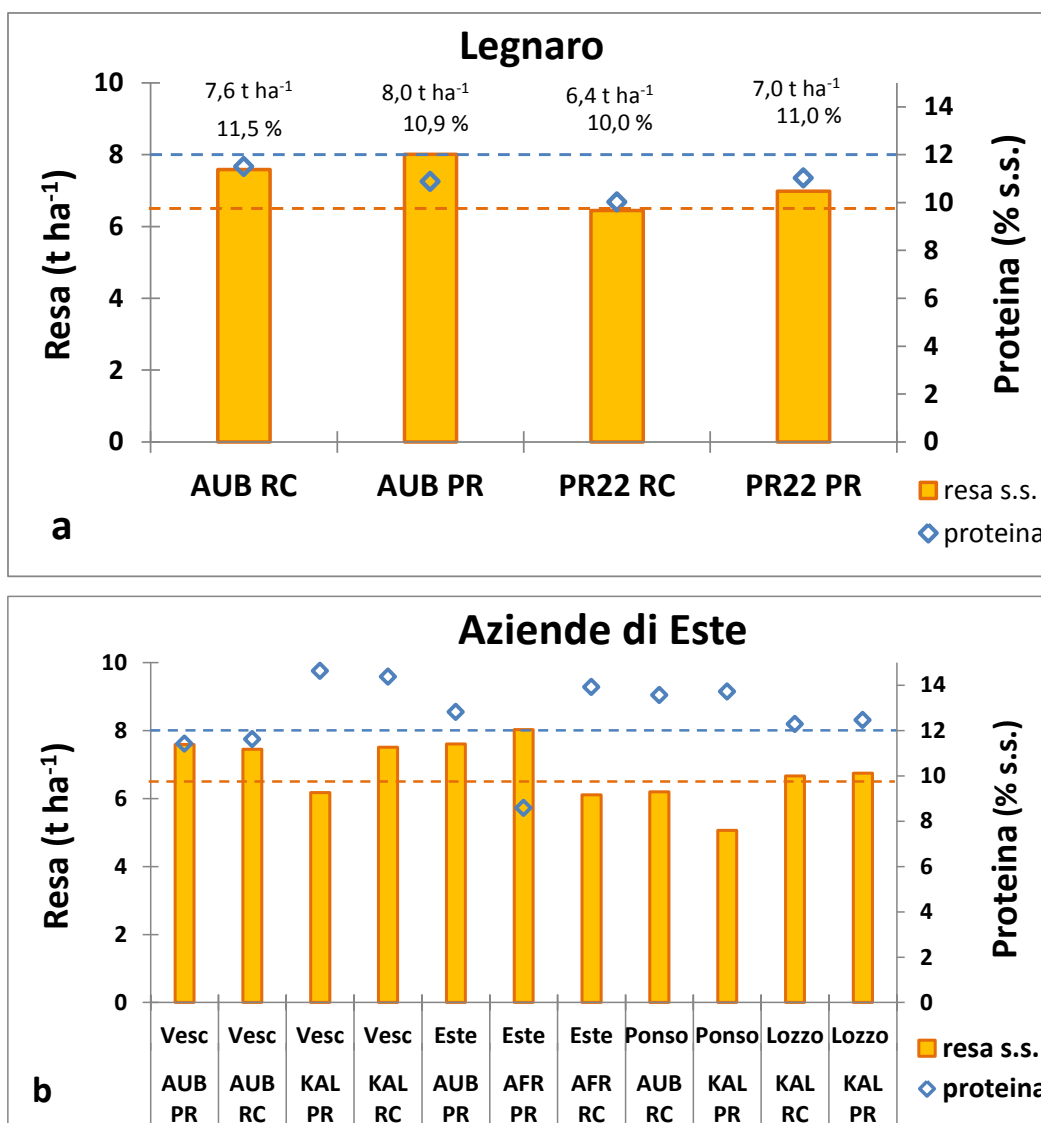


Fig. 30: Resa in cariossidi (SS) e contenuto proteico (%SS) degli appezzamenti in prova a Legnaro (a) e nelle 4 aziende dell'Estense (b). La linea tratteggiata arancione rappresenta il livello di resa soddisfacente per gli agricoltori: 6,5 t ha⁻¹ di s.s. equivalenti cioè a circa 7,5 t ha⁻¹ al 13% di umidità. La linea tratteggiata blu rappresenta invece il livello soddisfacente di 12% s.s. di proteine. AUB = Aubusson; PR22 = PR22R58; KAL = Kalango; AFR = Africa.

Le rese a Legnaro sono state elevate: tutte le tesi hanno raggiunto o superato abbondantemente la soglia di 6,5 t ha⁻¹ s.s. (pari a 7,5 t ha⁻¹ al 13% di umidità), definita arbitrariamente come soddisfacente per l'agricoltore. Il livello minimo di proteina desiderabile dall'industria molitoria era stato fissato al 12% (*AGER Bologna, 2011 – categoria “speciale”*); nessuna delle tesi a Legnaro ha raggiunto questo livello.

Per Aubusson, l'asportazione di N nelle cariossidi è stata identica (153 kg ha⁻¹) tra le due tesi di concimazione, con un bilancio apparente dell'azoto ($N_{\text{concimazioni}} - N_{\text{asportazioni}}$) pari a 0. La tesi *RC* è invece risultata nettamente sfavorevole quando applicata a PR22R58, con un assorbimento inferiore (113 kg ha⁻¹ N) rispetto al trattamento tradizionale (135 kg ha⁻¹) e un surplus maggiore (+40 vs. +18 kg ha⁻¹ N) nel bilancio apparente (Fig. 31).

Degli 11 appezzamenti in prova nei dintorni di Este, 7 hanno superato il livello di resa soddisfacente (6,5 t ha⁻¹ s.s.) e 8 hanno superato la soglia minima di proteina per iscrivere la produzione alla categoria “speciale”. In 4 casi sono stati raggiunti entrambi gli obiettivi contemporaneamente (Fig. 30b).

Particolare è il caso di Lozzo Atestino, dove la cv Kalango ha espresso assoluta equivalenza tra le tesi *RC* e *PR* per performance produttiva e contenuto proteico. La stessa cv a Vescovana ha espresso elevati contenuti proteici in entrambe le tesi (> 14% s.s.), ma rese più elevate (+1,3 t ha⁻¹ s.s.) nella tesi con *3,4-DMPP*, a causa della maggior dose di N effettivamente ricevuta (cfr. Tab. 11). Sempre a Vescovana, Aubusson ha espresso il suo elevatissimo potenziale produttivo, il contenuto proteico purtroppo non ha soddisfatto lo standard del 12%, ma avrebbe comunque permesso di rientrare nei limiti della classe qualitativa immediatamente inferiore (“fino”). A Ponso d'Este il livello di resa minimo non è stato raggiunto, tuttavia il prodotto era piuttosto ricco in proteina (> 13,5% s.s. in entrambi gli appezzamenti).

A Este la cv Aubusson ha espresso buona resa e buon contenuto proteico, le osservazioni più interessanti derivano però dalla cv Africa. In questo caso è stato possibile confrontare a parità di cv, dose azotata e tempistiche di distribuzione, l'impatto del *3,4-DMPP* sulla nutrizione della coltura. Fornire a inizio marzo l'intera dose di N senza inibitore della nitrificazione ha favorito la resa (>8 t ha⁻¹ s.s.), ma depresso il contenuto proteico (8,6% s.s.), l'aggiunta della molecola al concime ha ridotto il potenziale produttivo (-1,9 t ha⁻¹) ma favorito di molto l'accumulo di proteina (+5,1 punti

percentuali). Considerando la quantità di N accumulata nelle cariossidi, questa è decisamente superiore nella tesi dove era stato usato concime additivato (149 vs. 121 kg ha⁻¹; Fig. 31). Lo scarsissimo contenuto proteico della tesi PR declassa la sua produzione alla categoria merceologica più bassa (“uso zootecnico”), tuttavia ai prezzi della stagione 2010 (AGER, settembre 2010), la maggior resa avrebbe comunque garantito un valore della PLV superiore di circa 290 € ha⁻¹ alla tesi con inibitore.

In tutti gli appezzamenti in prova presso le aziende in zona Este il bilancio apparente dell’azoto è stato quasi sempre in deficit: con un valore medio di -39 kg ha⁻¹ N e valori massimi fino a oltre -100 kg ha⁻¹ N (Fig. 31). Solo a Lozzo Atestino le concimazioni sono state particolarmente adeguate alle asportazioni di N dalle cariossidi con bilanci apparenti prossimi alla parità.

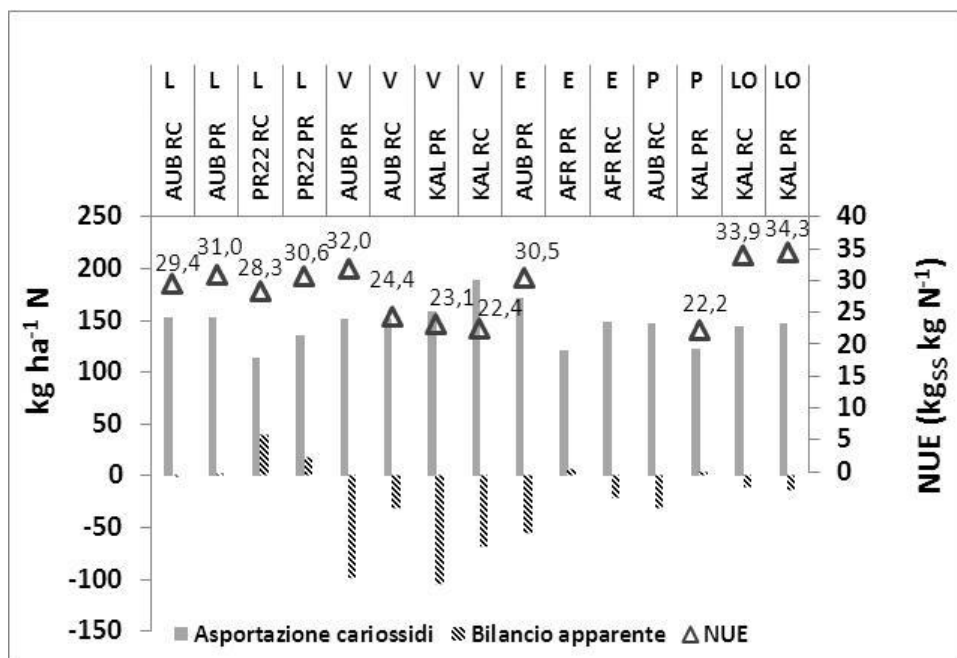


Fig. 31: rappresentazione di N uptake, bilancio apparente (riferiti all’asse a sinistra) e valore di NUE (riferito all’asse a destra). L = Legnaro; V = Vescovana; E = Este; P =Ponso d’Este; LO = Lozzo Atestino. Per le tesi Este – Africa e Aubusson – Ponso d’Este non erano disponibili tutti i dati per il calcolo della NUE.

L’efficienza d’uso dell’azoto è stata calcolata secondo la formula riportata in [Eq.1]. La disponibilità di azoto (N_{available}) è stata definita sommando alle concimazioni le disponibilità di N dal terreno, stimate dall’assorbimento in fioritura delle parcelle spia non concimate (Fig. 32). Nei migliori casi la NUE ha superato i 30 kg di cariossidi prodotte

per kg di azoto disponibile, frequenti sono stati tuttavia gli appezzamenti che non hanno superato i 25 (Fig. 31). L'azienda più efficiente è stata Lozzo Atestino; in nessuno dei casi il concime con inibitore della nitrificazione ha dimostrato di essere migliorativo per la NUE.

Tesi	Proteina cariossidi %SS	Peso hl (kg hl⁻¹)	Glutine umido(%)	Falling number e (RVA peak)	W	P/L
Legnaro AUB -PR	10,9	75,5	26,5	263 - (568)	98	0,79
Legnaro AUB -RC	11,5	76,0	29,0	229 - (462)	124	0,67
Legnaro PR22 -PR	11,0	76,4	27,4	<180 - (45)	115	1,24
Legnaro PR22 -RC	10,0	76,0	24,5	<180 - (49)	92	1,47
Vesc. AUB -PR	11,4	75,9	27,9	263 - (678)	107	0,48
Vesc AUB -RC	11,6	75,4	29,2	290 - (821)	120	0,49
Vesc KAL -PR	14,6	76,9	38,6	332 - (1397)	279	0,81
Vesc. KAL -RC	14,4	78,0	38,7	325 - (1555)	271	0,83
Este AUB -PR	12,8	78,3	34,9	<180 - (30)	133	0,77
Este AFR -PR	8,6	70,9	21,7	325 - (964)	18	0,61
Este AFR -RC	13,9	77,2	38,9	<180 - (27)	193	1,18
Ponso d'E AUB -RC	13,6	73,2	35,6	252 - (445)	151	0,49
Ponso d'E. KAL-PR	13,7	79,1	35,5	339 - (1730)	252	0,78
Lozzo A. KAL -PR	12,3	79,9	32,2	330 - (1932)	217	1,44
Lozzo A. KAL -RC	12,5	79,6	31,7	340 - (2706)	212	1,29

Tab. 12: Analisi qualitativa delle farine derivate dagli appezzamenti in prova.

La qualità tecnologica delle produzioni è stata saggiata in laboratorio sia sulla granella che sulle farine derivate (Tab. 12). La cv Kalango si è contraddistinta in tutte le località in cui è stata coltivata per l'ottimo profilo qualitativo: solo l'alto rapporto P/L (>0,52) avrebbe limitato l'accesso delle farine alla categoria di mercato "*farine di qualità superiore*" (AGER, Bologna 2011) e il conseguente apprezzamento della derrata.

PR22R58 e Aubusson hanno espresso proprietà reologiche modeste: la prima cv in particolare ha dimostrato bassi valori di falling number, indicanti un eccesso di attività alfa-amilasica, ed il conseguente rischio di produrre impasti collosi che tendono ad aderire ai macchinari durante la lavorazione (*Chamberlain et al., 1981*).

In ultimo la cv Africa ha dimostrato un comportamento contrastante, dettato principalmente dal contenuto proteico; nella tesi Africa - RC è stato osservato un forte aumento dell'attività alfa-amilasica che di fatto ha banalizzato il buon W osservato (193).

Dov'era possibile confrontare le concimazioni in modo adeguato (appezzamenti a Legnaro e Lozzo Atestino) non sono emerse chiare differenziazioni qualitative tra le due opzioni di concimazione (Tab. 12).

A complemento delle valutazioni agronomiche sono riportate alcune considerazioni economiche basate sui prezzi di mercato del grano tenero a 3 mesi dalla raccolta 2010 (dati *AGER, settembre 2010*). A Legnaro la tesi Aubusson - RC ha superato l'11% s.s. di proteina (Fig. 30a): questo valore avrebbe permesso di collocare il prodotto nella classe "fino" (227,80 €/t), al contrario della tesi PR, ascrivibile a quella inferiore "buono" (218,30 €). La differenza di prezzo tra le classi di qualità avrebbe compensato la minor produzione di RC (-0,42 t ha⁻¹), portando il valore della PLV (produzione lorda vendibile) a livelli molto vicini tra le due tesi (RC 1986 € ha⁻¹ vs. PR 2009 € ha⁻¹). Una simile stima applicata alla varietà PR22R58 indica che l'uso del concime con 3,4-DMPP avrebbe ridotto il valore della PLV di 211 € ha⁻¹.

Considerando le specifiche per l'accesso alle diverse categorie commerciali del grano tenero ai prezzi di settembre 2010, il valore della PLV in tutte le prove sarebbe stato compreso tra i 1909 € ha⁻¹ della tesi Aubusson PR ad Este ed i 1326 € ha⁻¹ della tesi Kalango RC a Ponso d'Este.

3.3.4 Discussione

L'esperimento in vaso ha definito una durata dell'effetto d'inibizione di circa 11 settimane (77 giorni). Questo dato è coerente alle indicazioni emerse in uno studio precedente che riporta effetti del *3,4-DMPP* fino a un massimo di 95 giorni dall'applicazione (Chaves *et al.* 2006). Il concime additivato ha iniziato a rilasciare quantità di nitrati superiori al testimone non concimato solo a 28 giorni dall'inizio del trattamento. Il *3,4-DMPP* è poco mobile, non viene allontanato dal profilo di suolo da fenomeni di lisciviazione ed è adsorbito dai colloidi del suolo (Azam *et al.* 2001; Fettweis *et al.* 2001). La riduzione della sua attività è causata solo dalla degradazione, che in terreni sciolti può essere anche molto rapida, riducendone a un terzo le concentrazioni originali anche nel giro di 25 giorni (Barth *et al.* 2008). In questo esperimento la tessitura fine del terreno ha probabilmente contribuito alla maggior durata del *3,4-DMPP*.

Per *RC*, il massimo rilascio di nutrienti nei vasi si è manifestato a 49 giorni dall'inizio della prova, in corrispondenza della fase di botticella del grano. Dopo tale periodo, anche per effetto della lisciviazione indotta nei vasi dalle frequenti irrigazioni, la quantità di NO_3^- osservata è calata fino a essere equivalente al testimone non concimato. La durata dell'inibitore avrebbe offerto una qualche copertura dal rischio di lisciviazione dei nutrienti fino all'incirca a 10 giorni dopo la fioritura. Si conferma perciò la necessità di intervenire in prossimità della fase di spigatura per sostenere il riempimento delle cariossidi e soprattutto il flusso di azotati, evitando i noti fenomeni di scadimento qualitativo della produzione (Pasda *et al.* 2001; Strenghetto 2007).

Rimane tuttavia da chiarire se le concentrazioni di nitrato nella fase finale del ciclo in *RC* fossero comparabili al trattamento tradizionale; questo in quanto la tesi *PR* è stata fortemente penalizzata da fenomeni di lisciviazione in vaso, che non hanno permesso probabilmente di osservarne la reale curva di rilascio.

Introdurre nell'itinerario agronomico concimi con inibitore della nitrificazione e applicazioni fogliari tardive, ha permesso di ridurre sensibilmente il numero di passaggi in campo, semplificando la gestione della coltura. I tradizionali 3 passaggi dello spandiconcime, necessari in copertura per una granicoltura di qualità, sono stati così ridotti ad un unico intervento ad inizio levata. La possibilità di miscelare nutrienti ai

fungicidi somministrati in spigatura ha permesso all'agricoltore di non rinunciare all'ultimo importante apporto di N.

Coerentemente a studi precedenti (*Pasda et al. 2001; Strenghetto 2007; Arregui e Quemada 2008*) l'inibitore di nitrificazione ha garantito livelli di resa adeguati anche con un unico apporto di N: non sono stati evidenti gravi cali di produttività conseguenti al mancato frazionamento dell'N (Fig. 30).

La cv PR22R58, coltivata unicamente a Legnaro, si è mal adattata al 3,4-DMPP, subendo riduzioni di resa, contenuto proteico ed N uptake. In Aubusson e Kalango, invece, l'assorbimento azotato era equivalente tra gli appezzamenti che avevano ricevuto un unico apporto di concime additivato o due frazionamenti di N tradizionale (Fig. 31). A Este la cv Africa era stata concimata a inizio levata con un'unica distribuzione per entrambi i tipi di concime: l'inibitore di nitrificazione ha notevolmente favorito l'intercettazione di N da parte delle piante.

Nell'azienda dell'Università il bilancio apparente dell'azoto è risultato in perfetto equilibrio per la cv Aubusson ed in surplus per PR22R58. Questo risultato riflette il minor potenziale di resa della seconda cv e la sua minor capacità di prelievo di nutrienti dal terreno rispetto alle attese (Fig. 31). La buona performance, almeno in una delle due cv, indica che il piano di concimazione è risultato adeguato a rispettare anche esigenze ambientali.

A Vescovana i bilanci apparenti dell'azoto sono stati negativi o molto negativi (media aziendale -77 kg ha^{-1}) per i mancati apporti azotati in presemina e per la rinuncia al secondo intervento in copertura nella tesi PR, a fronte del consistente rischio di allettamento della coltura. Tuttavia, questa situazione non costituisce un rischio di depauperamento del terreno, in quanto i terreni sono frequentemente ammendati con le deiezioni della stalla aziendale. Per la cv Kalango i 68 kg ha^{-1} extra forniti con la concimazione a lento rilascio hanno permesso maggiori produzioni rispetto alla cv tradizionale, a fronte d'identici contenuti proteici.

La NUE nelle aziende è generalmente risultata uguale o superiore ai valori riportati in bibliografia (22~25 kg per kg N; *Sylvester-Bradley e Kindred 2009*), questo per effetto dei minori input applicati nel sistema colturale italiano rispetto a quelli tipici del Nord Europa. L'azienda più efficiente è stata Lozzo Atestino, dove entrambe le tesi hanno portato a valori di circa 34 kg di seme prodotto per kg di N disponibile. La mancanza di attività

zootecnica e ammendanti organici in azienda ha portato il terreno ad essere piuttosto povero in N (Fig. 32) e quindi a fornire il livello più basso di $N_{\text{available}}$ tra le aziende in prova. Come risaputo (Lopez-Bellido et al. 2008; Rahimzadeh et al. 2010), la ridotta disponibilità di nutrienti accentua l'efficienza di assorbimento di N dal terreno (NU_pE) e contribuisce a migliorare la NUE .

La più bassa efficienza è stata osservata a Vescovana e Ponso d'Este: nella prima azienda i forti carichi di N, derivanti dall'attività zootecnica, erano ben oltre le capacità di assorbimento della coltura; nella seconda gli stress subiti durante il ciclo hanno ridotto il potenziale di resa e la conseguente efficienza di conversione dell'azoto assorbito in cariossidi (NU_tE).



Fig. 32: fotografia di una parcella spia non concimata a confronto con il resto dell'appezzamento concimato con $125 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. Lozzo Atestino, 11 maggio 2010.

Le proprietà tecnologiche della granella e della farina sono state dettate principalmente dalla scelta del genotipo. Tra le varietà coltivate, Kalango è quella che ha meglio abbinato potenziale di resa e qualità della produzione. In un'ottica di filiera tale varietà potrebbe soddisfare sia il reddito degli agricoltori, sia le richieste del mondo della trasformazione. Solo il rapporto tra tenacità ed estensibilità dell'impasto (P/L) avrebbe impedito alle farine derivanti da Kalango di ottemperare ai parametri richiesti per le categorie di qualità superiore (AGER Bologna, 2011).

Tale limite della cv potrebbe essere tuttavia superato studiando con cura l'introduzione nei piani di coltivazione di concimi contenenti zolfo, dimostratisi in grado di correggere il rapporto P/L, favorendo l'estensibilità dell'impasto (Zhao et al. 1999; Flæte et al. 2005; Tea et al. 2007).

Due varietà (PR22R58 e Africa) hanno espresso valori molto ridotti di falling number (*FN*), col rischio di compromettere la lavorabilità dell'impasto anche se usati in miscela con farine di qualità superiore. Ridotti *FN*, indice di elevata attività alfa-amilasica, possono manifestarsi in presenza o meno di pre-germinazione in campo quando il seme ha uno scarso livello di dormienza (*Bidduplh et al. 2008*). Nell'annata 2010 l'intenso evento piovoso in prossimità della raccolta (53 mm il 20 giugno) potrebbe aver promosso nei genotipi più sensibili il rilascio degli enzimi litici, avviando la germinazione o riducendone la dormienza.

A margine è proposta una valutazione economica. Considerando che gli appezzamenti in prova erano tutti di proprietà delle aziende, e non gravavano su di essi canoni di affitto, si può assumere che le spese medie di produzione dell'annata 2010 ammontassero a un totale di 1206 € ha⁻¹ (*Gualandi, 2011*). Con i valori della PLV raggiunti nell'annata 2010 nessun appezzamento è andato in perdita: il reddito medio per appezzamento è stato di 542 € ha⁻¹, con valori massimi fino a 800.

Filiere che coinvolgano agricoltori, centri di conferimento e trasformatori sono tecnicamente realizzabili, economicamente ed ambientalmente sostenibili, se il mercato apprezza, e soprattutto paga, la qualità dei prodotti.

3.4 Concimazioni tardive in grano duro: impatto su produzione e qualità.

3.4.1 Introduzione

Il grano duro è una derrata alimentare molto versatile, utilizzabile nella produzione di svariati alimenti, quali: pasta secca e fresca, cous-cous, bulgur, pane e prodotti da forno in genere (*Gooding e Davies, 1997*). L'Italia ha una forte tradizione nella sua produzione: il 70% dei 1,5 Mha investiti a grano nel 2011 era coperto dalla specie tetraploide (*dati ISTAT 2011*). Per garantire gli elevati standard qualitativi, che contraddistinguono il prodotto italiano, la legislazione nazionale consente la produzione di pasta secca e fresca unicamente a partire da semole o semolati di grano duro (*DPR 187, 2001*), escludendo di fatto il grano tenero, contrariamente alla vigente legislazione europea.

Per soddisfare elevati standard merceologici è preferibile una materia prima che presenti buona quantità e qualità di proteine (*Saaman et al. 2006*). L'influenza della genetica nel determinare le proprietà degli impasti di grano duro è preponderante. Le varianti alleliche ai locus che codificano per la sintesi di glutenine e gliadine condizionano tutti i parametri qualitativi legati alla reologia (*Brites e Carillo, 2001; Sisson et al. 2005; Edwards et al., 2007a; Edwards et al., 2007b*). Per produzioni di qualità la scelta della cultivar è quindi fondamentale.

Tuttavia, anche l'ambiente e la pratica agronomica hanno il loro impatto nel determinare la qualità della produzione, agendo principalmente sul tenore proteico. Coltivare il grano duro in ambiente mediterraneo espone generalmente la coltura a stress idrico e alte temperature durante il riempimento delle cariossidi: tali condizioni, pur deprimendo la resa, migliorano quantità e qualità del glutine (*Flagella et al. 2010*).

Per un prodotto ricco di proteine la concimazione deve essere molto abbondante. Uno studio condotto in Spagna indica come la dose per ottimizzare il contenuto proteico (200 kg ha⁻¹ N) equivalga al doppio delle unità necessarie al raggiungimento del massimo potenziale produttivo (*Garrido-Lestache et al. 2005*).

La quantità di N accumulata nella biomassa entro la fioritura, influisce sia sulla dimensione del “sink” per la produzione di carboidrati che ovviamente sulla “source” per la traslocazione di composti azotati al seme (*Jamieson e Semenov, 2000; Triboi et al.,*

2003; Triboi et al., 2006). La maggior capacità di traslocazione dai tessuti senescenti sommata all'eventuale uptake in post-antesi incrementano il pool di N da indirizzare verso il seme in riempimento, favorendo elevati tenori proteici alla raccolta (Jamieson e Semenov, 2000; Triboi et al., 2006; Barneix, 2007).

Un intervento di concimazione a ridosso della fioritura garantisce la disponibilità di N per arricchire di proteina le cariossidi (Martin et al. 1990): in genere vengono distribuiti concimi granulari solidi (urea), con spandiconcime centrifugo. Questo tuttavia complica la gestione della coltura, aggiungendo un'operazione di campo in un periodo in cui l'organizzazione aziendale è monopolizzata dall'avvio delle colture a ciclo primaverile-estivo (soia, mais).

Distribuire soluzioni azotate per sostituire parte della concimazione azotata è una pratica nota da tempo (Finney et al. 1957; Gooding e Davies 1992), che può semplificare la gestione della coltura qualora l'applicazione avvenga in concomitanza con l'indispensabile trattamento fungicida di spigatura. La nutrizione fogliare è molto efficiente per il grano: in ambiente subtropicale (Pakistan) la dose di macro- (N, P) e micro-nutrienti (Mn, Fe, Cu, Zn, B, Mo) può essere anche dimezzata rispetto alla concimazione al suolo, senza evidenti cali di resa (Arif et al. 2006).

Salvo i casi in cui il grano abbia ricevuto scarse concimazioni di copertura (Varga e Svečnjak 2006), la concimazione fogliare in botticella/spigatura non presenta generalmente effetti sulla resa. Apporti consistenti di N (≥ 30 kg ha⁻¹) possono però migliorare il contenuto proteico delle cariossidi (Gooding e Davies 1992; Woolfolk et al 2002; Bly e Woodard 2003; Varga e Svečnjak 2006) o le loro proprietà reologiche (Tea et al. 2005). Il depositarsi della soluzione spray sulla foglia bandiera e sulle sottostanti, garantisce probabilmente all'azoto un più rapido accesso ai semi, in quanto queste foglie sono le principali protagoniste nella traslocazione degli assimilati.

Un aspetto ambientale non trascurabile, derivante dall'impiego di concimazioni fogliari, è la riduzione delle quantità di N applicato. Le soluzioni UAN (Urea-ammonio-nitrato), di norma impiegate a questo scopo, sono meno esposte a fenomeni di volatilizzazione della componente ammoniacale (Edwards et al. 2009) o alla lisciviazione rispetto a formulazioni solide (Gooding e Davies 1992). Ciò è vantaggioso se si considera che la produzione di grano duro ricco in proteine è molto più dispendiosa, in termini

economici e ambientali (inquinamento da N_2O e NO_3^-), rispetto al semplice raggiungimento di livelli di resa soddisfacenti (*Basso et al. 2010*).

La pratica della concimazione fogliare del grano è ancora poco diffusa in Italia, e ancor meno son disponibili informazioni su come i genotipi selezionati in Italia reagiscano a tali apporti. La coltura del grano duro sta espandendo i suoi areali di coltivazione verso nord: nell'ultimo anno la sua percentuale sul totale del frumento coltivato in Veneto ammontava al 12% circa, con interessanti rese medie di 6 t ha^{-1} (*Dati ISTAT 2011*). Render più efficiente la sua tecnica di coltivazione, per puntare a produzioni abbondanti e di qualità, è perciò un obiettivo primario: gli elevati fabbisogni azotati della coltura possono scontrarsi con le criticità ambientali di un territorio ampiamente vulnerabile al rischio da nitrati.

È stata quindi perciò impostata una prova parcellare di coltivazione che mettesse a confronto le due pratiche alternative (al suolo vs. fogliare) su 6 varietà commerciali. Oltre alle performance di resa e contenuto proteico è stata osservata la dinamica di accumulo di s.s. e N nelle cariossidi, per valutare se vi fossero differenze o interazioni tra tecniche e cultivar. Sono stati poi considerati alcuni indicatori di efficienza ambientale e tecnica.

3.4.2 Materiali e metodi

3.4.2.1 Prova in campo

La prova di coltivazione è stata condotta nell'annata 2010-2011 presso l'Azienda Agraria Sperimentale “*Lucio Toniolo*” dell'Università di Padova (Legnaro, $45^{\circ}20' \text{ N}$; $11^{\circ}56' \text{ E}$). Le caratteristiche del terreno sono riportate alla colonna 2010-11 della Tab. 19: il terreno era occupato in parte da una prova parcellare di colza, in parte dalla prova di grano duro.

Lo schema sperimentale era uno split-plot con 3 blocchi, con il fattore concimazione dosato nei parcelloni e le cultivar randomizzate nelle parcelle. Sono state incluse 6 varietà (Tab. 13), appartenenti alle 3 principali ditte protagoniste di questo segmento di mercato: su consiglio di ciascuna sono stati inseriti una varietà orientato alla qualità (Q) ed una orientata alla produzione (P). È stato verificato che non esistessero parentali comuni tra le 6 cv: per una di esse (Biensur) non erano disponibili informazioni genealogiche.

Il terreno, precedentemente coltivato a grano tenero, è stato preparato secondo la prassi aziendale con aratura (40 cm) e 2 passaggi di affinamento con erpice rotante (15 cm). In data 22 ottobre 2010 sono state seminate parcelle della larghezza di 3 m e lunghezza 8 (superficie 24 m²); la distanza tra le file era 12,5 cm per un totale di 24 file. La densità di semina corrisponde a 350 semi germinabili a m², tutta la semente era conciaata.

Cv	Ditta	Or.	Genealogia	Anno di costituzione
Ariosto	Apsov Sementi	Q	<i>Karim x Baio</i>	2005
Biensur	Apsov Sementi	P	nd	nd
Aureo	PSB	Q	<i>Kofa x Svevo</i>	2009
Saragolla	PSB	P	<i>Iride x PSB0114</i>	2004
Anco Marzio	SIS	P	<i>Stot x (Altar84 x ALD)</i>	2003
Liberdur	SIS	Q	<i>(Nefer x Acalou) x Ga7-B14</i>	2007

Tab. 13: cultivar in prova, la lettera alla terza colonna indica l'orientamento varietale verso la produzione (P) o verso la qualità (Q).

È stato eseguito un trattamento erbicida per contenere fin da inizio levata (31 marzo 2011) la competizione delle infestanti: nel dettaglio sono stati applicati con un'unica soluzione Mefenpir-Dietile (27 g ha⁻¹), Iodosulfuron-metil-sodio (9 g ha⁻¹) e Mesosulfuron-Metile (9 g ha⁻¹). La difesa fitosanitaria è stata assolutamente necessaria, visto il non completo adattamento della coltura, il rischio di infezione da *Fusarium spp.* con conseguente contaminazione da micotossine. A tale scopo a inizio levata (31 marzo 2011, azoxystrobin 140 g ha⁻¹; ciproconazolo 56 g ha⁻¹) e spigatura/inizio fioritura (9 maggio 2011, azoxystrobin 250 g ha⁻¹, procloraz 400 g ha⁻¹ e procloraz 90 g ha⁻¹) sono stati distribuiti trattamenti anticrittogamici.

Le tesi di concimazione a confronto sono state la fogliare (SP-F) e quella al suolo (SP-S); ad esse sono stati affiancati un controllo non concimato in spigatura (0N-SP) e un testimone non concimato in copertura (0N). La concimazione di copertura è stata la medesima per i tre trattamenti SP-F SP-S e 0N-SP (Tab. 14).

Per una buona fertilità di base del terreno sono state distribuite in pre-semina 24-72-72 unità di N-P₂O₅-K₂O. Le eccessive precipitazioni del periodo autunnale hanno rallentato l'avvio della coltura, col rischio di penalizzare l'accestimento e compromettere il potenziale produttivo. Per scongiurare tale evenienza sono state distribuite a tutte le tesi 20 unità di N per ettaro in forma di nitrato ammonico in data 4 gennaio 2011.

La concimazione primaverile di copertura ha interessato tutte le parcelle ad eccezione della tesi "0N". In pieno accestimento (9 marzo 2011) sono stati distribuiti 45 kg ha⁻¹ N in forma di nitrato ammonico, alle levata (7 aprile 2011) 71 unità come urea (Tab. 14).

Tesi	0 N	0 N - SP	SP - F	SP - S
Presemina, 20/10/2010 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	24-72-72	24-72-72	24-72-72	24-72-72
Accestimento, 4/1/2011 (kg ha ⁻¹ N)	20 _{NA}	20 _{NA}	20 _{NA}	20 _{NA}
Pieno accestimento, 9/3/2011 (kg ha ⁻¹ N)	-	45 _{NA}	45 _{NA}	45 _{NA}
Levata, 7/4/2011 (kg ha ⁻¹ N)	-	71 _U	71 _U	71 _U
Botticella, 28/4/2011 (kg ha ⁻¹ N)	-	-	7,5 _{UAN}	-
Spigatura, 2/5/2011 (kg ha ⁻¹ N)	-	-	-	35 _U
Fioritura, 11/5/2011 (kg ha ⁻¹ N)	-	-	7,5 _{UAN}	-
Totale (kg ha ⁻¹ N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	44-72-72	160-72-72	175-72-72	195-72-72

Tab. 14: piano di concimazione delle 4 tesi a confronto. A lato delle unità applicate sono indicate le tipologie di concime impiegato: NA (nitrato ammonico), U (urea), UAN (soluzione ureica, ammoniacale, nitrica).

Il trattamento tardivo standard (SP-S) ha ricevuto urea a spaglio in spigatura (2 maggio); per il trattamento fogliare (SP-F) la dose apportata è stata frazionata in due interventi a distanza ravvicinata (28 aprile e 11 maggio; Fig. 33b). Ciò si è reso necessario per rispettare la dose massima d'impiego del prodotto (*NSZ26, Cifo, San Giorgio in Piano, Italia*) ed evitare il pericolo di ustioni fogliari.

La raccolta è avvenuta il 21 giugno 2011 con mietitrebbia parcellare, scartando per ogni parcella le testate (~0,5 m) e due file per bordo (Fig. 33c). Il prodotto raccolto in ciascuna parcella è stato analizzato per il contenuto di umidità, la resa è stata standardizzata per la sostanza secca.

Il tenore proteico delle cariossidi è stato determinato moltiplicando per 5,7 l'azoto organico rilevato dal metodo Kjeldhal (AACC 46-11.02). Il peso dei mille semi è stato derivato pesando campioni di 300 semi; il peso ettolitrico misurato con un chondrometro elettronico.



Fig. 33: misurazione altezza delle piante (a), trattamento fogliare delle parcelle SP-F (b) e raccolta con mietitrebbia parcellare (c)

3.4.2.2 Rilievi eseguiti durante il ciclo vegetativo

A stagione invernale inoltrata (14 febbraio 2011) è stata stimata la densità di piante per metro quadro, conteggiandone il numero su 3 porzioni di fila (1,00 m) per parcella.

In prossimità di inizio levata (24 marzo 2011) e alla spigatura (2 maggio 2011) sono state compiute misure degli indici spettrali (NDVI e SPAD), della produzione di biomassa e dell'assorbimento di N per unità di superficie. L'indice NDVI è stato rilevato passando lo strumento (*Greenseeker, Ntech Industries, Ukiah, CA-USA*) su un transetto lungo ~5-6 m (10 letture s^{-1}) ricavato nella parcella. Lo SPAD è stato misurato con una procedura analoga a quanto descritto alla sezione 3.1.2.2. La biomassa corrispondente alle analisi dei due strumenti è stata prelevata in 2 aree di saggio (3 file x 0,5 m) per parcella.

Nelle date 18 aprile, 27 aprile e 2 maggio, è stato determinato, con una stima visiva, lo stadio fenologico di sviluppo (secondo *Zadoks et al. 1974*). La data di fioritura è stata determinata con osservazioni quotidiane delle parcelle, ed è stata mediata tra le tesi di concimazione e i blocchi. 10 giorni dopo la fioritura (24 maggio 2011) è stata determinata l'altezza delle piante con il sistema del disco in polistirolo descritto da *Addisu et al. 2009* (Fig. 33a). Per stimare la precocità di senescenza sono state effettuate il 26 maggio e il 1 giugno letture SPAD sulla foglia bandiera, con le stesse modalità dei rilievi precedenti.

Per valutare le dinamiche di accumulo di sostanza secca e azoto nelle cariossidi, sono state campionate spighe immature a partire da 10 giorni dopo l'antesi. Da ciascuna parcella sono state asportate 20 spighe per data; la fila di campionamento è stata preventivamente marcata, ed i campioni sono sempre stati raccolti lungo questa, lasciando spazi di 20 cm tra un'area campionata e la successiva.

La raccolta delle spighe per le cv più precoci (Aureo, Anco Marzio e Saragolla) è iniziata 3 giorni prima rispetto alle altre (Ariosto, Biensur e Liberdur); si è sempre cercato di mantenere, per quanto possibile tale differenza nei 4 successivi campionamenti a cadenza settimanale. Le spighe immature sono state messe immediatamente in essiccazione (48 h a 65°C) per essere sgranate in un momento successivo. Dimensione e fragilità del seme nelle prime due epoche, non hanno permesso l'utilizzo di macchine ed è stata necessaria la sgranatura manuale; a partire dalla terza epoca è stato possibile meccanizzare la procedura.

Per ciascun campione sono stati determinati peso fresco e secco delle spighe, peso totale (s.s.) delle cariossidi e peso del singolo seme (media di 50 cariossidi). Il contenuto di N è stato determinato con il metodo Kjeldhal (AACC 46-11.02).

3.4.2.3 Analisi statistica e interpretazione dei risultati

L'analisi della varianza (ANOVA) è stata svolta con il software statistico *Costat* (CoHort Software, Monterey, CA-USA). Lo schema sperimentale impostato è split-plot con fattore concimazione nei parcelloni e cultivar in parcella. Valori di $P \leq 0,05$ sono stati accettati come significativi. Per le analisi statistiche compiute prima della differenziazione della tesi è stata mantenuta questa impostazione dello schema sperimentale, ma non sono stati considerati il fattore concimazione o le sue interazioni. Le differenze tra medie sono state definite con il test di Duncan per un $P < 0,05$.

Le analisi della curva di accumulo di s.s. e N nella cariosside sono state eseguite sulle singole varietà o singole tesi (cv x concimazione). Il calcolo dei modelli di accumulo di s.s. e N nel singolo seme è stato effettuato tramite il software "*Curve Expert 1.4.0*" (Mr. Hyams, Hixson, TN-USA). L'equazione scelta per descrivere il processo è una sigmoide di Richards [Eq. 8].

3.4.3 Risultati sperimentali

La stagione 2010-2011 è stata caratterizzata da forti precipitazioni nel periodo autunnale (Fig. 34a): ciò ha limitato lo sviluppo epigeo e probabilmente ha frenato l'approfondimento dell'apparato radicale. Le precipitazioni sono state nuovamente abbondanti nel mese di marzo, per essere pressoché assenti tra inizio levata e fioritura (13,2 mm, dal 30 marzo al 10 maggio). Una certa piovosità (52 mm in 4 giorni) è occorsa all'inizio del mese di giugno: potrebbe essere stata efficace nel rallentare la senescenza, almeno delle cv più tardive (Ariosto, Biensur, Liberdur).

Le temperature durante il periodo del riempimento sono state elevate (Fig. 34b), e sopra le medie stagionali nei mesi di aprile, maggio e giugno. Le limitazioni all'approfondimento radicale dettate dal ristagno autunnale e la forte siccità primaverile si configurano come situazioni limitanti per l'efficienza d'uso dell'azoto nel terreno. Il terreno di Legnaro, tuttavia, per la sua tessitura pesante e le abbondanti piogge ricevute a marzo, presenta buone capacità di ritenzione idrica e può in parte compensare molti stress legati all'andamento stagionale.

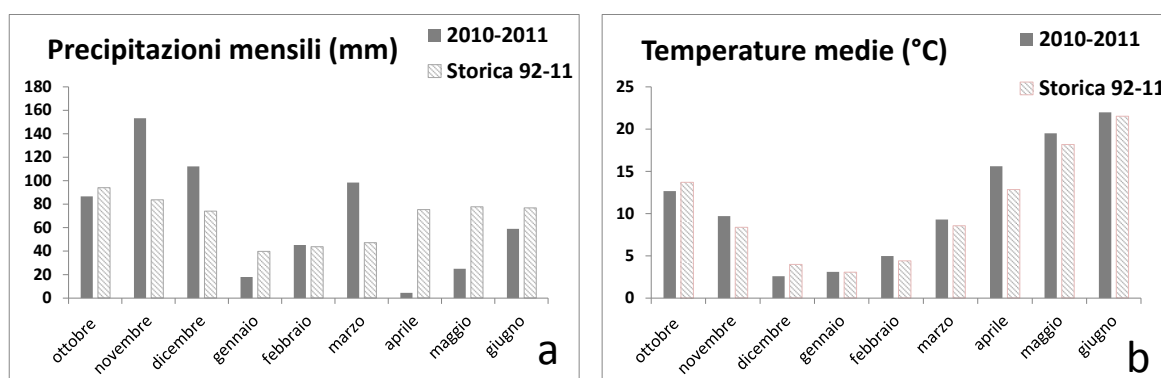


Fig. 34: andamento meteorologico stagione 2010-2011 con riferimento al livello di precipitazioni (a) e alle temperature medie (b).

3.4.3.1 Rilievi eseguiti durante il ciclo vegetativo

Il rilievo in accostamento (14 febbraio 2011) indica differenze significative ($P < 0,001$) tra le cv per quanto riguarda la sopravvivenza alla stagione autunno-vernina. Biensur e Aureo sono state le più vitali (Fig. 35a): nonostante ciò, dei 350 semi germinabili di partenza, la percentuale di sopravvivenza non ha mai superato il 70%.

Anco Marzio, Liberdur e Ariosto, nelle successive fasi, hanno bilanciato il minor investimento con maggior accestimento ($P < 0,001$; Fig. 35b). La capacità delle cv di compensare il minor numero di piante per unità di superficie è evidenziata dall'assoluta equivalenza del numero di spighe a m^{-2} misurato in maggio. I conteggi risultano, infatti, tutti equivalenti tra le diverse varietà ($P = 0,3004$), compresi tra le 392 spighe m^{-2} di Saragolla e le 432 di Biensur.

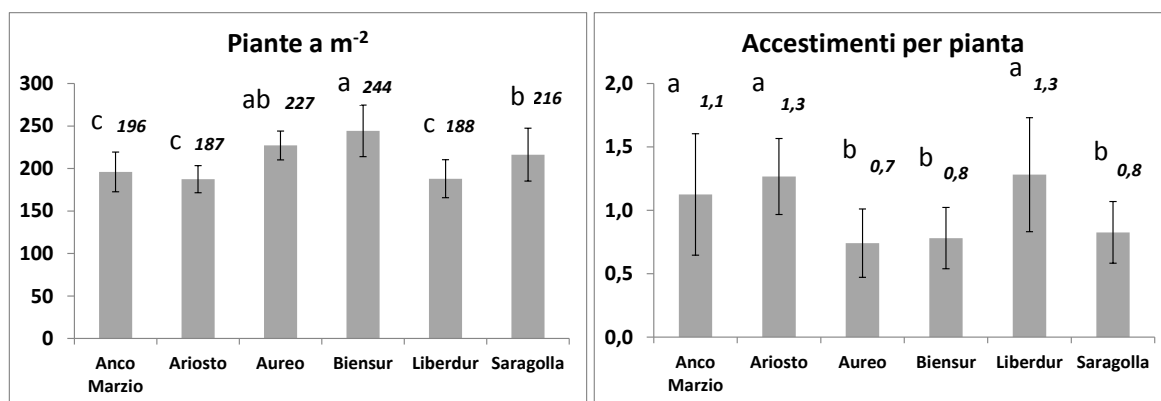


Fig. 35: densità di semina rilevata in accestimento (14 febbraio 2011), e numero di accestimenti oltre al culmo principale (b).

Rilievi effettuati a inizio levata e alla spigatura, evidenziano un effetto della concimazione di copertura su tutti i parametri osservati. La quantità di N disponibile dal terreno era probabilmente limitante, la prova si pone quindi nelle condizioni di rispondere agli interventi di concimazione.

In spigatura è particolarmente evidente la carenza di azoto del controllo 0N: la produzione di biomassa e l'assorbimento azotato si sono ridotti rispettivamente del 12,9 e del 35,7% a confronto delle parcelle concimate (SP-F, SP-S e 0N-SP). Gli indici spettrali hanno colto, in modo significativo, lo stress nutrizionale dettato dalla non concimazione ($P < 0,05$). Dove è mancato l'intervento in copertura, l'NDVI si è ridotto del 15 e del 22%, rispettivamente a inizio levata e in spigatura; lo SPAD ha dimostrato una sensibilità leggermente inferiore, con cali relativi del 6 e del 10%.

Tra le varietà, Ariosto si è distinto in spigatura per il miglior assorbimento azotato ($175 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) e la maggior produzione di biomassa ($1125 \text{ g m}^{-2} \text{ s.s.}$). Le altre cv non si sono differenziate in modo significativo tra loro: il peggior assorbimento di N è stato ad opera di Anco Marzio ($124 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$), mentre Biensur ha prodotto la minor biomassa (928

g m⁻² s.s.). L'incertezza di queste indicazioni è però elevata, viste le sensibili differenze di precocità del ciclo rilevate durante la prova (Tab. 15).

Varietà	GS al 18 aprile	GS al 27 aprile	GS al 2 maggio	Fioritura (GS 65)	DAS ^a fioritura
Anco Marzio	43	58	62	6 maggio	195
Ariosto	38	48	59	10 maggio	199
Aureo	38	54	60	6 maggio	195
Biensur	37	45	57	9 maggio	198
Liberdur	38	45	57	10 maggio	199
Saragolla	41	57	60	7 maggio	196

Tab. 15: stadi fenologici del grano duro in 3 date in prossimità della fioritura. ^a DAS days after seeding, giorni trascorsi dalla semina alla fioritura.

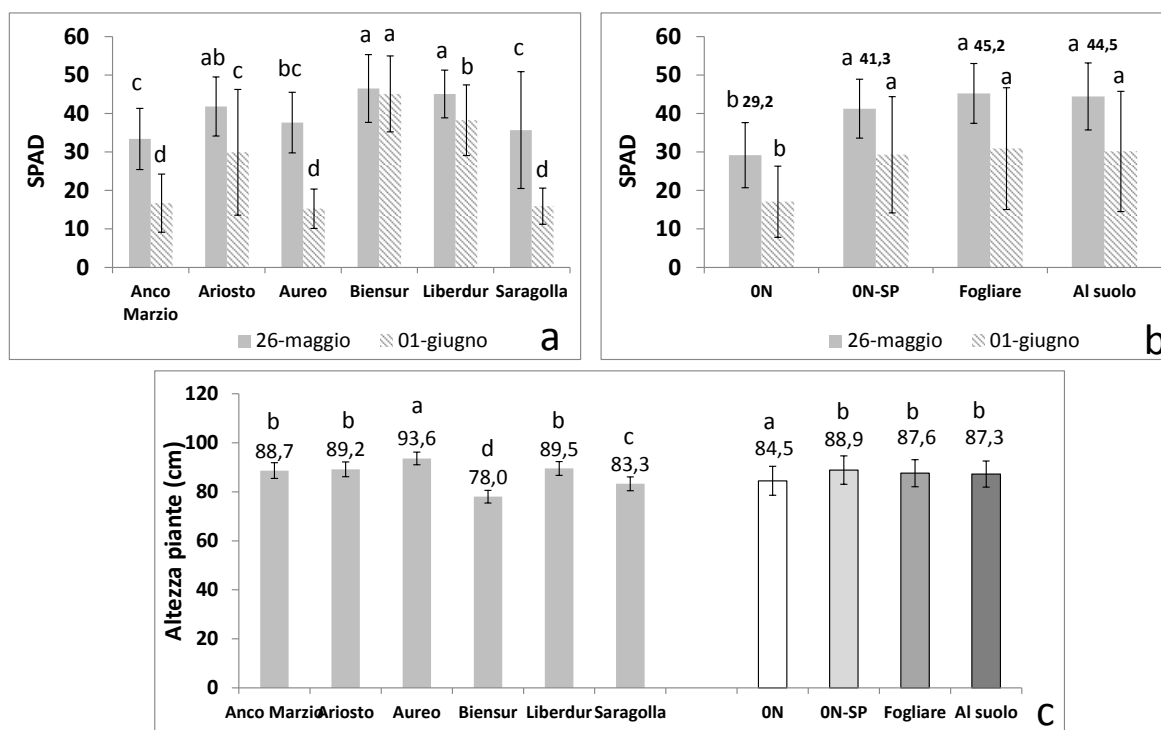


Fig. 36: valori SPAD alla chiusura del ciclo, mediati per varietà (a) o per tesi di concimazione (b). Sono rappresentate anche le altezze delle tesi, al netto della lunghezza delle ariste (c).

Le differenze di precocità tra le cultivar sono state evidenziate dai due rilievi SPAD del 26 maggio e del 1 giugno (Fig. 36a). Alla prima misurazione Biensur, Ariosto e Liberdur presentavano valori simili e ancora relativamente elevati (tra 40,0 e 46,5), Aureo era intermedio (37,7), Saragolla e Anco Marzio manifestavano già sintomi di forte sofferenza con valori intorno alle 35 unità.

Una settimana più tardi (1 giugno), per le 3 cv più precoci (Aureo, Anco Marzio e Saragolla) i valori SPAD erano ormai sotto le soglie delle 25 unità, con foglie bandiera completamente compromesse. Biensur e Liberdur mantenevano buoni valori (Fig. 36a) con canopy ancora attivo.

La concimazione di copertura ha chiaramente allungato la durata dell'apparato fogliare: il testimone 0N presentava, infatti, valori SPAD molto più bassi rispetto alle tesi concimate (Fig. 33b). Il 26 maggio SP-F si è quasi distinta da 0N-SP per il test di Duncan ($P=0,087$): pur essendo un dato al limite della significatività, ciò potrebbe rappresentare un indizio dell'effetto della concimazione fogliare nel ritardare la senescenza.

La concimazione ha inciso scarsamente sull'altezza delle piante ($P=0,0506$): il testimone 0N accusava riduzioni di taglia nell'ordine di 3-4 cm, tutte le altre tesi erano assolutamente comparabili tra loro (Fig. 36c). Biensur è stata la cv più bassa tra quelle in prova (78,0 cm), e ciò potrebbe giustificare la minor biomassa prodotta in spigatura. Aureo non ha mai accusato fenomeni di allettamento, nonostante fosse la più alta tra le cv, sfiorando il metro di altezza nelle tesi concimate.

3.4.3.2 Resa in granella e sue componenti

Nonostante la scarsità di precipitazioni primaverili, la coltura ha prodotto rese più che soddisfacenti: le cv Biensur e Liberdur, nelle tesi concimate, hanno oltrepassato la soglia delle $8,5 \text{ t ha}^{-1}$ di resa commerciale (umidità 13%). I livelli prodotti in parcella sono realistici, se confrontati alla performance del grano duro (Biensur) coltivato a pieno campo nella stessa azienda.

L'effetto della concimazione di copertura è stato significativo ($P=0,0164$): nel controllo non concimato la produzione si è ridotta del 22% rispetto alle altre 3 tesi (Fig. 37b). La concimazione tardiva non ha però sortito alcun effetto sulla resa: SP-F, SP-S e 0N-SP sono risultate assolutamente comparabili per il test di Duncan. Le componenti della

resa sono state influenzate dal livello di concimazione solo in riferimento al testimone non concimato: 0N presentava infatti meno spighe m^{-2} ($P=0,0387$), meno semi per spiga ($P=0,0897$) e dunque meno semi m^{-2} ($P=0,0138$). In compenso i semi di questa tesi erano di maggiori dimensioni ($P=0,0128$). In nessuna delle componenti della resa sono state riscontrate differenze tra 0N-SP, SP-F e SP-S.

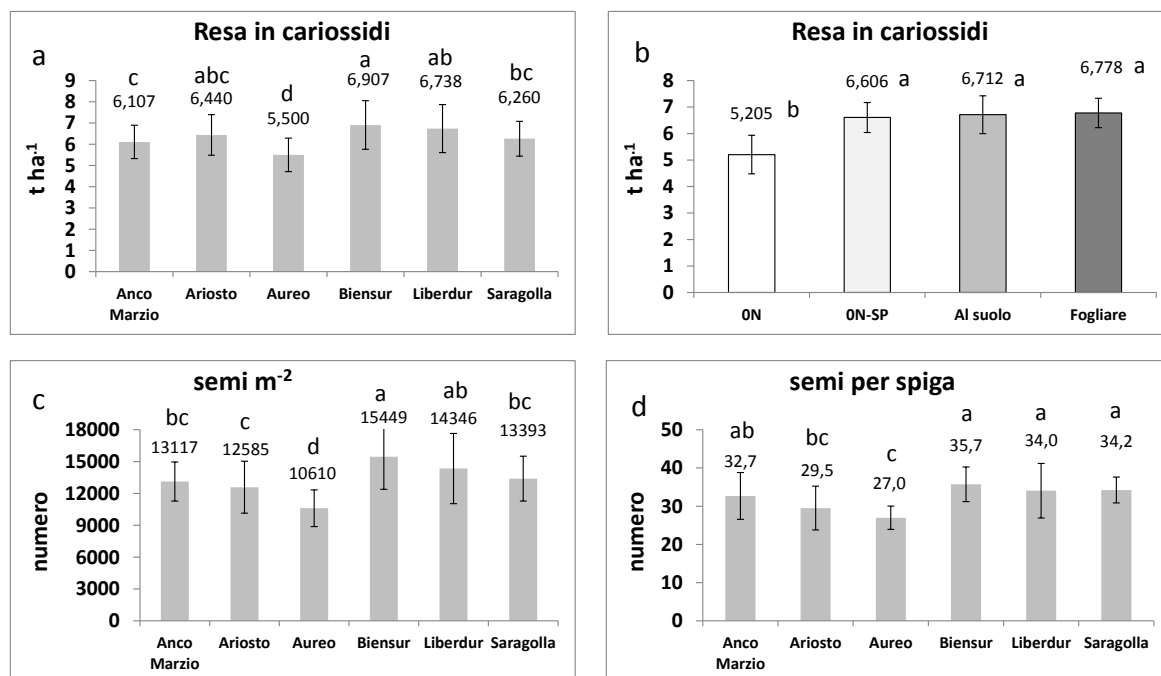


Fig. 37: effetto dei fattori cultivar (a) e concimazione (b) sulla resa in cariossidi. Composizione della risposta alla resa: semi a m^{-2} (c) e semi per spiga (d)

Non sono emerse interazioni “cv x concimazione”, è perciò possibile confrontare direttamente le medie produttive dei 6 genotipi. Biensur e Liberdur sono state le varietà a resa più elevata (Fig. 37a), principalmente a causa della maggior fertilità della spiga (Fig. 37d). Il risultato è una più alta densità di semi a m^{-2} (Fig. 37c): sono state perciò compensate le minori dimensioni delle loro cariossidi.

Nonostante Aureo avesse un numero di spighe a m^{-2} simile alle altre varietà, la ridotta produzione di semi per spiga (Fig. 37d) ha fortemente limitato il potenziale produttivo (Fig. 37a). Ariosto ha espresso un basso numero di semi a m^{-2} , tuttavia l’elevato accumulo di fotosintetati per singola cariosside ha allineato i livelli produttivi della cv alle migliori varietà in prova (Fig. 37a).

3.4.3.3 Contenuto proteico delle cariossidi e valutazioni ambientali

Le analisi hanno rivelato marcate differenze tra le cv per il contenuto proteico ($P < 0,001$): Aureo (14,1%) e Ariosto (13,4%) hanno espresso i tenori più elevati, Saragolla i livelli più bassi (11,7%). Anche la concimazione ha avuto ovviamente effetti significativi sul contenuto proteico ($P = 0,0025$). È apprezzabile notare come sia la concimazione al suolo (13,7%), che quella fogliare (13,4%), abbiano prodotto un incremento di proteina rispetto al testimone 0N-SP, il cui valore medio si attestava a 12,9% (Fig. 38a). Il miglioramento del contenuto proteico è stato molto consistente in alcune varietà: Ariosto, Aureo e Saragolla hanno beneficiato fortemente del trattamento con urea a spaglio, con incrementi intorno al punto percentuale, Liberdur è stato il più avvantaggiato dalla concimazione fogliare (+0,9%) (Fig. 38c).

Non essendo stati effettuati studi con azoto marcato, è stato solo possibile stimare l'efficienza di assorbimento della concimazione tardiva, valutando le differenze in asportazioni delle cariossidi rispetto al testimone 0N-SP. Queste differenze sono state poi percentualizzate sulla dose di concimazione, ottenendo informazioni sul "recovery".

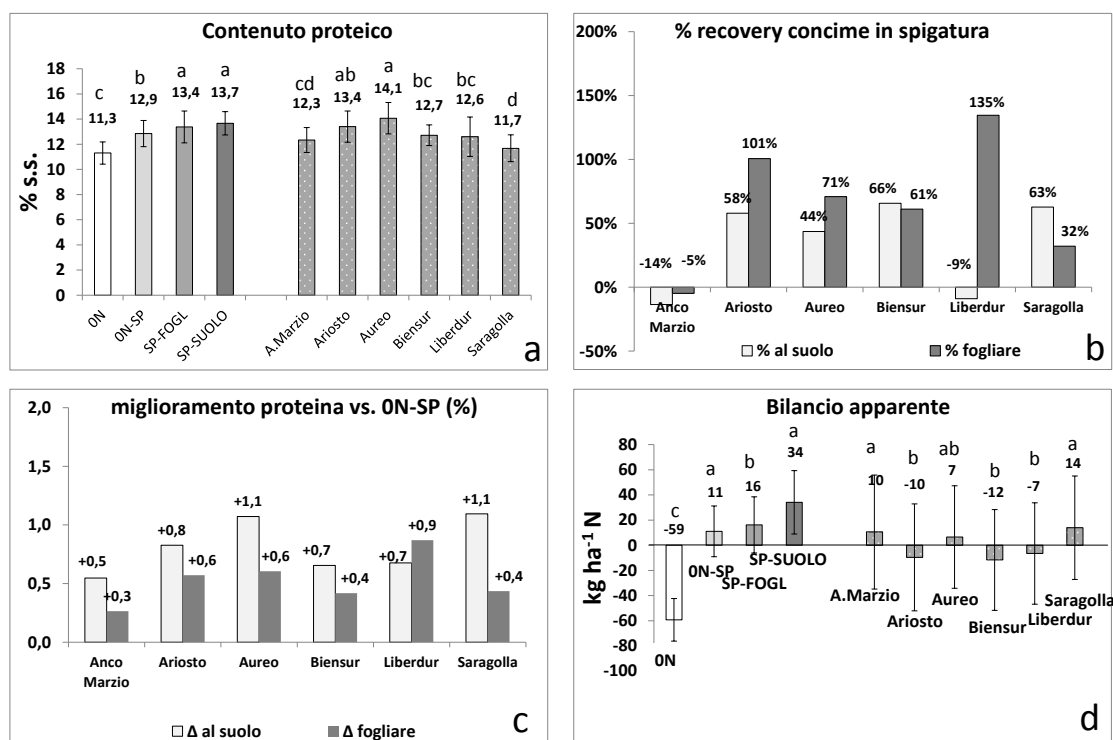


Fig. 38: contenuto proteico delle cariossidi (a), % di assorbimento dei nutrienti presenti nella concimazione azotata tardiva (b), effetto sul miglioramento del contenuto proteico vs. il testimone 0N-SP (c), Bilancio apparente dell'azoto (d).

Alcune cv hanno espresso potenziali notevoli per quanto riguarda la capacità di utilizzo del concime fogliare: Ariosto ha raggiunto il 100%, Liberdur l'ha abbondantemente superato (Fig. 38c). Percentuali simili non sono del tutto irrealistiche: la tesi SP-F potrebbe aver esteso la durata dell'apparato fogliare, migliorato la rimobilizzazione o favorito eventuali uptake tardivi dal suolo. Sulla media delle 6 varietà, il “*recovery*” è stato del 35% per la tesi SP-S e quasi doppio (66%) per SP-F.

La diversa efficienza nell'assorbimento dell'azoto tra varietà potrebbe dipendere da due fattori: precocità e apparato fogliare. Tutte le cv sono state trattate contemporaneamente: tuttavia, avendo precocità diverse è possibile che abbiano ricevuto gli apporti azotati in stadi fisiologici leggermente differenti, con effetti variabili dell'azoto. La composizione della cuticola e l'estensione fogliare potrebbero essere un'altra fonte di variabilità per l'assorbimento di SP-F.

La maggior efficienza nell'N fogliare e le minori dosi applicate rispetto al trattamento al suolo (15 vs. 35 kg ha⁻¹) hanno sicuramente contribuito a ridurre l'impatto ambientale della tecnica. Le differenze tra tesi di concimazione per il bilancio apparente (N input – N offtake) erano significative (P=0,0004). SP-F non ha aggravato il surplus azotato rispetto a 0N-SP (Fig. 38d), il trattamento al suolo (SP-S), invece, ha registrato il peggior N residuale tra le tesi in prova (+34 kg ha⁻¹).

3.4.3.4 Dinamiche di accumulo di azoto e biomassa

Tutte le cv sono state raccolte il 21 giugno 2011: considerando le differenti precocità di fioritura, il periodo antesi-raccolta è variato dai 42 giorni di Liberdur e Ariosto ai 46 di Aureo e Anco Marzio. Tale intervallo poteva essere più breve, se difficoltà logistiche non avessero ritardato la raccolta di quasi una settimana.

Per valutare l'accumulo di s.s. è stata osservata la variazione di peso delle singole cariossidi; l'accumulo di N è stato riferito al singolo seme. Ogni varietà è stata analizzata separatamente: le 6 ANOVA effettuate per i fattori "epoca di rilievo" e "tesi di concimazione" sono riportate in Tab. 16.

Ovviamente il fattore "epoca" ha avuto un peso preponderante in tutte le cv ($P < 0,0001$), sia per l'accumulo di s.s., che per quello di N (Tab. 16). L'effetto della concimazione, in genere, è risultato significativo sull'accumulo di s.s.: la tesi testimone (0N) avendo meno semi m^{-2} ha ripartito maggiori risorse per singolo seme. Tuttavia, le cv Anco Marzio ($P = 0,2214$) e Aureo ($P = 0,0848$) si sono dimostrate indifferenti all'effetto.

I controlli hanno ovviamente accumulato meno N nelle cariossidi (Tab. 16). Liberdur ha costituito un'eccezione ($P = 0,8177$): le maggiori dimensioni del seme a 0N hanno compensato la minor % di azoto, portando il contenuto di N per cariossidi verso valori simili a quelli delle altre tesi (Tab. 16).

In nessuna cultivar è emersa l'interazione "concimazione x epoca": né sull'accumulo di s.s., né per quello di N ($P > 0,05$). Questo significa che la tecnica di concimazione non ha influenzato le tempistiche di accumulo di s.s. e N.

In genere l'accumulo di s.s. alla quarta data di campionamento non era statisticamente differente dal dato alla raccolta (cv Anco Marzio, Ariosto, Biensur e Liberdur), indicando un sostanziale arresto del processo già in tale fase (Tab. 16). Saragolla si è distinta per l'estrema precocità: il peso alla terza epoca era già comparabile al dato finale. Al contrario Aureo era la più tardiva tra le cv.

Anco Marzio e Saragolla avevano già interrotto la mobilizzazione di N alle cariossidi verso la quarta settimana, per Ariosto, Biensur e Liberdur il dato alla raccolta era invece nettamente superiore a tutti i precedenti campionamenti (Tab. 16)

<i>Analisi per singola cv del peso secco della singola cariosside (mg)</i>						
<i>Cv</i>	<i>Anco</i> <i>Marzio</i>	<i>Ariosto</i>	<i>Aureo</i>	<i>Biensur</i>	<i>Liberdur</i>	<i>Saragolla</i>
<i>Concimazione (P)</i>	0,2214 ns	0,0145*	0,0848 ns	0,0000***	0,0000***	0,0092***
<i>Epoca (P)</i>	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
<i>Epoca x conc (P)</i>	0,8576 ns	0,2163 ns	0,5998 ns	0,7677 ns	0,9810 ns	0,9647 ns
<i>1° data</i>	13,3 d	14,0 d	12,4 e	9,0 d	12,2 d	14,3 c
<i>2° data</i>	28,2 c	29,9 c	27,2 d	21,6 c	25,3 c	30,0 b
<i>3° data</i>	42,7 b	46,6 b	44,3 c	36,5 b	40,6 b	44,5 a
<i>4° data</i>	44,7 ab	49,7 a	50,5 b	43,6 a	45,5 a	44,6 a
<i>5° data</i>	46,0 a	50,0 a	52,0 ab	44,2 a	46,7 a	46,8 a
<i>Raccolta</i>	46,7 a	51,7 a	53,3 a	45,0 a	47,8 a	47,0 a
* * *						
<i>Analisi dell'accumulo di N per singola cariosside (mg) e per singola cv</i>						
<i>Cv</i>	<i>Anco</i> <i>Marzio</i>	<i>Ariosto</i>	<i>Aureo</i>	<i>Biensur</i>	<i>Liberdur</i>	<i>Saragolla</i>
<i>Concimazione (P)</i>	0,0246 *	0,0000 ***	0,0010 **	0,0167 *	0,8177 ns	0,0000 ***
<i>Epoca (P)</i>	0,0000 ***	0,0000 ***	0,0000 ***	0,0000 ***	0,0000 ***	0,0000 ***
<i>Epoca x conc (P)</i>	0,1752 ns	0,0808 ns	0,5310 ns	0,4384 ns	0,9355 ns	0,2157 ns
<i>1° data</i>	0,304 d	0,353 e	0,303 e	0,218 e	0,256 e	0,300 d
<i>2° data</i>	0,572 c	0,658 d	0,640 d	0,456 d	0,488 d	0,563 c
<i>3° data</i>	0,850 b	1,031 c	1,014 c	0,755 c	0,800 c	0,847 b
<i>4° data</i>	0,954 a	1,120 b	1,176 b	0,901 b	0,936 b	0,895 ab
<i>5° data</i>	0,977 a	1,144 b	1,281 a	0,905 b	0,961 b	0,930 a
<i>Raccolta</i>	0,994 a	1,210 a	1,303 a	1,002 a	1,057 a	0,961 a

Tab. 16: analisi statistica dell'accumulo di peso secco e di N per cariosside. Per ogni cv è stata effettuata una singola analisi. Le prime 3 righe indicano la significatività dei fattori, le restanti riportano le medie di accumulo di s.s. nei semi. Le lettere indicano la differenza per il test di Duncan ($P < 0,05$). I valori in grassetto e sottolineati indicano la data di rilievo in cui il peso secco era già statisticamente non differente dal valore finale.

Per meglio definire la durata dell'accumulo di s.s. e N, si è ricorso allo sviluppo di un modello: per ciascuna varietà ne è stato prodotto uno. Non è stato ritenuto opportuno differenziare i dati per tesi di concimazione, dato che il fattore ha influenzato le quantità, ma non le tempistiche di traslocazione delle risorse alle cariossidi.

Per i 5 prelievi e per il dato alla raccolta è stata calcolata la somma termica (GDD su base 0 °C) a partire dalla data di fioritura. Per s.s. e N di ciascuna cv erano così disponibili 6 coppie di dati corrispondenti alle 6 epoche (media di 12 dati= 3 blocchi x 4 tesi).

Si è scelto di descrivere il fenomeno di accumulo attraverso una sigmoide: nel dettaglio è stata impiegata un'equazione di Richards [Eq. 8]

$$Eq. 8 \quad y = \frac{a}{(1+e^{b-cx})^{\frac{1}{d}}}$$

Tutte le curve si sono ben adattate ai dati di partenza ($R^2 > 0,95$) confermando che l'accumulo di s.s. nelle cariossidi si è interrotto all'incirca in corrispondenza del quarto prelievo (Fig. 40a-f). La conclusione del processo di accumulo nella cariosside è stata definita in corrispondenza del raggiungimento del 95% del suo peso finale. Per peso finale s'intende il valore osservabile lungo la curva in corrispondenza ai GDD necessari per giungere alla raccolta; questo valore non è sempre risultato equivalente al dato effettivamente osservato, ma vi si è sempre di molto approssimato (cfr. Tab. 16 vs. Tab. 17). La durata del periodo di accumulo del peso secco nella cariosside è variata dai 462 GDD di Saragolla, precoce, ai 614 di Aureo.

Con un procedimento analogo sono stati definiti i tempi di accumulo dell'N. Il processo è stato caratterizzato da una durata maggiore rispetto al peso (Tab. 17) e quantificabile in 527 GDD per Saragolla e in 699 per Aureo. Sulla media delle 6 varietà, l'accumulo di N è proceduto 68 GDD oltre il termine della traslocazione di s.s.; ciò equivale a un intervallo di 3-4 giorni.

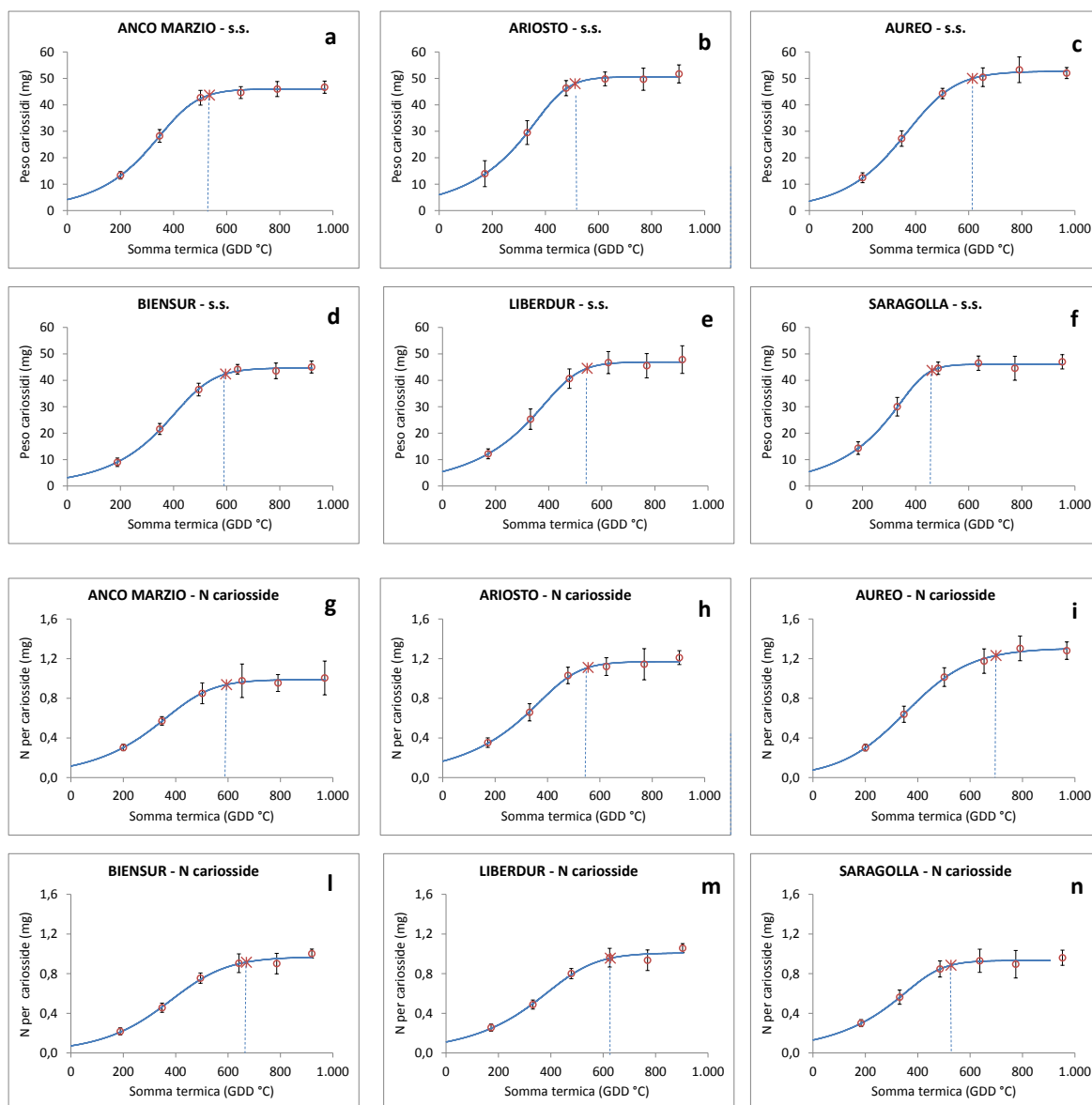


Fig. 39: modelli di accumulo s.s. (a-f) e N (g-n) nella singola cariosside per le 6 cultivar in prova.

<i>Cv</i>		<i>Anco Marzio</i>	<i>Ariosto</i>	<i>Aureo</i>	<i>Biensur</i>	<i>Liberdur</i>	<i>Saragolla</i>
<i>Parametri per definire l'equazione di Richards (Eq. 8)</i>	<i>a</i>	45,9979	50,5487	52,6567	44,6379	46,8890	46,0212
	<i>b</i>	6,2891	8,4109	4,9924	7,0480	8,0993	9,6553
	<i>c</i>	0,0154	0,0194	0,0118	0,0151	0,0177	0,0238
	<i>d</i>	2,6159	3,9447	1,8621	2,6594	3,7681	4,5389
<i>Peso finale cariosside (mg)</i>		46,0	50,5	52,6	44,6	46,9	46,0
<i>Accumulo 95% s.s. (°C GDD)</i>		<u>535</u>	<u>512</u>	<u>614</u>	<u>596</u>	<u>545</u>	<u>462</u>
<i>Durata accumulo (°C GDD)</i>		969	903	969	920	903	952

Tab. 17: parametri per le equazioni di Richards, e stima della somma termica alla fine del periodo di accumulo di s.s. nella cariosside (95% del peso finale).

<i>Cv</i>		<i>Anco Marzio</i>	<i>Ariosto</i>	<i>Aureo</i>	<i>Biensur</i>	<i>Liberdur</i>	<i>Saragolla</i>
<i>Parametri per definire l'equazione di Richards (Eq. 8)</i>	<i>a</i>	0,9883	1,1698	1,3057	0,9686	1,0083	0,9317
	<i>b</i>	5,3851	6,9040	2,9225	4,2702	5,4726	7,0876
	<i>c</i>	0,0124	0,0153	0,0081	0,0098	0,0118	0,0165
	<i>d</i>	2,5163	3,5262	1,0509	1,6430	2,4792	3,5976
<i>Accumulo finale N (mg)</i>		0,9877	1,1696	1,2970	0,9638	1,0061	0,9316
<i>Accumulo 95% N (°C GDD)</i>		0,9384	1,1110	1,2321	0,9156	0,9558	0,8851
<i>Durata accumulo (°C GDD)</i>		<u>594</u>	<u>555</u>	<u>699</u>	<u>670</u>	<u>627</u>	<u>527</u>
<i>Δ accumulo N vs. s.s.</i>		<u>+59</u>	<u>+43</u>	<u>+85</u>	<u>+74</u>	<u>+82</u>	<u>+65</u>

Tab. 18: parametri per le equazioni di Richards, e stima della somma termica alla fine del periodo di accumulo di N nella cariosside (95% del peso finale).

3.4.4 Discussione

Quasi tutte le varietà in prova si sono dimostrate ben adattate alle condizioni di coltivazione della Pianura Padana: alcune di esse (Anco Marzio e Saragolla) hanno però evidenziato limiti connessi all'eccessiva precocità. Il testimone non concimato ha ovviamente risentito della mancanza di apporti in copertura, mentre le 3 tesi 0N-SP, SP-S e SP-F hanno espresso performance molto simili.

Un primo effetto fisiologico della concimazione tardiva liquida è stato il prolungamento della funzionalità dell'apparato fogliare. Il rilievo a due settimane dalla fioritura (26 maggio) ha evidenziato valori SPAD superiori in SP-F vs. 0N-SP, probabile indice di una tendenza al ritardo nella senescenza fogliare. L'effetto di estensione della durata dell'apparato fogliare è fortemente soggetto alla stagionalità e, qualora avvenga, può apportare un sensibile vantaggio nell'ordine di 2 giorni (*Ruske et al. 2003a*). Nell'ambiente italiano (Piemonte), in uno studio precedente, l'effetto non era stato osservato: forse a causa della chiusura più rapida del ciclo vegetativo in un ambiente sottoposto a maggiore stress termico (*Blandino et al. 2009*).

Il potenziale di resa del grano duro è risultato comparabile alle produzioni ottenibili in grano tenero. Con i migliori livelli di concimazione disponibili (SP-S e SP-F), le granelle delle cv Ariosto, Aureo, Biensur e Liberdur hanno raggiunto o superato un tenore proteico del 13%, livello da considerarsi soddisfacente per l'industria di trasformazione.

La cv Aureo ha espresso il miglior contenuto proteico tra i genotipi in prova. La chiave di questo successo risiede probabilmente nella minore fertilità della spiga, che ha limitato fortemente la produzione di semi a m². La minor biomassa di cariossidi, su cui redistribuire l'uptake di N simile alle altre cv, ha portato all'incremento della concentrazione azotata. Questo effetto è riconducibile all'alterato equilibrio source/sink descritto in *Martre et al. (2003)*.

Confermando le osservazioni emerse in numerosi studi precedenti (*Gooding e Davies 1992; Woolfolk et al 2002; Bly e Woodard 2003; Varga e Svečnjak 2006*), la concimazione fogliare ha avuto effetti positivi sul tenore proteico. In tutti questi lavori la dose applicata era compresa tra 30 e 40 kg ha⁻¹ N; è significativo come in questo esperimento siano stati ottenuti risultati apprezzabili con appena la metà delle unità. Un esperimento simile era stato già effettuato in Nord Italia con dosi ancora minori (5 kg ha⁻¹

¹), tuttavia le quantità di N non erano state sufficienti a innescare i miglioramenti attesi (Blandino *et al.* 2009).

L'intervento fogliare appare più efficiente rispetto all'alternativa al suolo. Questa forma di nutrizione è soggetta a un più rapido assorbimento da parte dei tessuti vegetali: gran parte della dose viene assimilata entro 2 settimane dall'intervento (Gooding *et al.* 2007). A confermare questa ipotesi è apprezzabile il fatto che la tesi SP-F, al contrario di SP-S, non abbia aggravato il bilancio apparente dell'azoto rispetto al testimone 0N-SP.

Quando la coltura del grano tenero si avvicina al massimo fisiologico per il contenuto di N per cariosside (1,0 mg), l'efficienza degli apporti tardivi si riduce, per effetto di buone disponibilità di N dalla rimobilizzazione dei tessuti senescenti (Gooding *et al.* 2007). In questo caso non si è verificato tale assunto: il grano duro ha dimostrato capacità di accumulo superiori al grano tenero, (fino a 1,3 mg per cariosside). La tesi SP-S, pur essendo stata meno efficiente, ha incrementato in modo ulteriore il contenuto proteico rispetto a SP-F (Fig. 38a,c), dimostrando che la cariosside aveva ancora capacità di accumulare N.

Le dinamiche di granigione sono state condizionate principalmente da fattori genetici. Le somme termiche necessarie al completo riempimento delle cariossidi sono risultate inferiori rispetto ai dati osservati in grano tenero (Triboi *et al.* 2003), sia per quanto riguarda la s.s. (544 vs. 625 °C GDD), che per l'accumulo di N (625 vs. 746 °C GDD). Al contrario di Triboi *et al.* (2003) in questo studio non è stato osservato alcun effetto della nutrizione azotata tardiva nel prolungare l'accumulo di N nelle cariossidi. È risaputo come un forte stress idrico durante il riempimento dei semi possa fortemente ridurre la durata (somma termica) dell'accumulo proteico in grano (Daniel e Triboi *et al.* 2002). Probabilmente la contrazione della durata di tale fase in tutte le cv ha banalizzato le possibili differenze tra le tesi di concimazione.

Restano da accertare gli effetti sulla qualità reologica degli impasti in risposta ai diversi regimi di nutrizione: alcune variazioni sono presumibili (Ruske *et al.* 2003b; Tea *et al.* 2005). Su questo set di campioni non sono ancora state eseguite analisi complete del profilo qualitativo delle proteine. Tuttavia, risultati preliminari (Visioli *et al.* 2011) indicano un miglioramento delle componenti del glutine (gliadine, HMW e LMW-GS) nella cv Biensur a seguito del trattamento fogliare.

La concimazione fogliare può essere un'ottima alternativa al trattamento al suolo: riduce l'impatto ambientale dell'intervento, semplifica la gestione della coltura e ha effetti migliorativi sul contenuto proteico della granella. Tuttavia in questo esperimento la dose di 15 kg ha⁻¹ N è stata fornita con due applicazioni ravvicinate; questa prassi è poco realistica e va contro la necessità di ridurre il numero delle operazioni in campo.

Applicare urea con soluzioni acquose oltre la soglia del 4% di contenuto in N, può avere effetti fitotossici (*Khan et al. 2009*): in questo esperimento, per rispettare le dosi di etichetta del prodotto, sono state applicate concentrazioni di circa il 2% di N (7,5 kg ha⁻¹ N in 400 l ha⁻¹ di acqua). Potrebbe perciò sussistere un margine per incrementare la dose per singolo intervento, tuttavia sul mercato italiano non sono disponibili prodotti con dosi consigliate così elevate. Ogni tentativo di superare tale soglia potrebbe aumentare il rischio di tossicità sulla coltura, riducendo il potenziale produttivo; sono perciò possibili solo piccole correzioni intervenendo sul volume di acqua impiegata nel trattamento.

Uno dei contesti in cui sarebbe possibile la diffusione di questo genere di pratica è la granicoltura di qualità. La produzione di grano duro di alta qualità può spesso richiedere due interventi fungicidi ravvicinati (spigatura + fioritura) specialmente negli areali del Nord Italia, dove è più consistente il rischio da micotossine. Il doppio intervento fitosanitario si collocherebbe quindi in delle fasi ideali per associare trattamenti mirati alla nutrizione tardiva, ottenendo prodotti sani e ricchi in proteina.

3.5 Effetto di alcuni fattori genetici sulla NUE

È di seguito riportato il testo definitivo della pubblicazione sulla rivista “*Cereal Research Communications*”, redatta durante l’esperienza all’estero sotto la supervisione del prof. *Michael J. Gooding*. L’esperienza, le analisi e la stesura dell’articolo sono state svolte presso le strutture della “*School of Agriculture, Policy and Development*” dell’Università di Reading (UK), (agosto 2010 e febbraio 2011). L’esperienza è stata resa possibile grazie al finanziamento di una borsa di studio da parte della Fondazione “Ing. Aldo Gini” per l’intera durata del soggiorno all’estero.

L’articolo approfondisce alcune conclusioni emerse da uno studio precedente sull’interazione di varianti alleliche nanizzanti in background genetici di frumento (*Gooding et al. 2011*). Viene confrontata in questo caso l’efficienza dei medesimi genotipi a dose fissa di concimazione (200 kg ha⁻¹ N) e al loro optimum economico in 4 diversi scenari.

Sintesi della pubblicazione

L’aumento dell’Harvest Index ottenuto con la rivoluzione verde ha indubbiamente migliorato la NUE del grano (*Ortiz-Monasterio et al. 1997; Barraclough et al. 2010*). Buona parte del successo è effetto dell’introduzione di geni dominanti (*Rht*) per la riduzione della taglia della coltura (*Gooding et al. 2011*). Tuttavia la tendenza all’incremento della dose ottimale di azoto per le moderne varietà potrebbe vanificare questo miglioramento: un vero confronto andrebbe eseguito su livelli diversi di disponibilità azotata (*Sylvester-Bradley e Kindred 2009*).

Per valutare in quest’ottica l’effetto del gene nanizzante, 3 varianti alleliche sono state osservate a 4 livelli di concimazione: 0, 100, 200 e 350 kg ha⁻¹ N. I genotipi in prova erano il risultato di una combinazione fattoriale di 3 varietà di frumento tenero (Mercia, Maris Huntsman, Maris Widgeon) per 3 varianti alleliche *rht-B1a* (wild type, alto), *Rht-B1b* (semi-nano) e *Rht-B1c* (nano). L’esperienza è stata condotta presso l’azienda sperimentale dell’Università di Reading (Sonning Farm, 51°29’N, 0°56’W) nell’annata 2009-2010.

La coltura è stata gestita secondo le pratiche tipiche dell’areale di coltivazione. La prova era impostata con uno schema a split-plot, fattore genotipo (cv x allele) nei

parcelloni e fattore concimazione nelle parcelle. Le analisi alla raccolta miravano alla determinazione di resa in cariossidi, biomassa totale, contenuto proteico, HI e NHI.

Aggregando i dati delle 3 varietà sono state ottenute, per ciascuno dei 3 alleli, curve di risposta della resa alla concimazione: il miglior adattamento statistico è risultato una polinomiale di secondo grado. Sulla base di queste curve sono poi stati calcolati gli optima economici della dose in azoto (N_{opt}) in 4 scenari, che prevedevano diversi rapporti tra costo del concime e prezzo della granella (3,5:1 – 5:1 – 7,5:1 – 10:1).

Per un livello di concimazione di 200 kg ha⁻¹, attualmente lo standard in Inghilterra, l'allele più efficiente è stato il semi-nano. *Rht-B1b*, infatti, non presentava riduzione nel potenziale produttivo di biomassa (-23,6%) come il nano (*Rht-B1c*) e aveva un HI maggiore (47,0 vs. 45,2%) dell'allele originale (*rht-B1a*).

La maggior responsività agli input del genotipo semi-nano lo pone in tutti gli scenari nella situazione di avere un N_{opt} più elevato rispetto alle altre due varianti, affette da scarsa produzione di biomassa (*Rht-B1c*) o tendenza all'allettamento (*rht-B1a*). Tuttavia, confrontando al loro optimum di concimazione i 3 alleli, i livelli di *NUE*, *NUPE* e *NUtE* sono risultanti statisticamente simili.

Alla dose economica ottimale, in tutte le ipotesi di mercato ipotizzate, l'introduzione dell'allele semi-nano *Rht-B1b* non ha apportato miglioramenti all'efficienza d'uso del concime o alle sue componenti. L'incremento della resa areica derivante dall'impiego di varietà a taglia ragionevolmente contenuta, tuttavia, mantiene la maggior efficienza nell'uso della superficie agricola per produrre materie prime per l'alimentazione umana.

Semi-dwarfing (*Rht-B1b*) improves nitrogen-use efficiency in wheat, but not at economically optimal levels of nitrogen availability

S. LODDO¹ and M.J. GOODING²

¹Department of Environmental Agronomy and Crop Sci.s, University of Padova, Agripolis, Viale dell'Università, 16, 35020 Legnaro, Padova, Italy.

²Crops Research Unit, University of Reading, Early Gate, P.O. Box 237, Reading RG6 6AR, U.K.

A UK field experiment compared a complete factorial combination of three backgrounds (cvs Mercia, Maris Huntsman and Maris Widgeon), three alleles at the *Rht-B1* locus as Near Isogenic Lines (NILs: *rht-B1a* (tall), *Rht-B1b* (semi-dwarf), *Rht-B1c* (severe dwarf)) and four nitrogen (N) fertilizer application rates (0, 100, 200 and 350 kg N/ha). Linear+exponential functions were fitted to grain yield (*GY*) and nitrogen-use efficiency (*NUE*; *GY*/available N) responses to N rate. Averaged over N rate and background *Rht-B1b* conferred significantly ($P < 0.05$) greater *GY*, *NUE*, N uptake efficiency (*NU_pE*; N in above ground crop / available N) and N utilization efficiency (*NU_tE*; *GY* / N in above ground crop) compared with *rht-B1a* and *Rht-B1c*. However the economically optimal N rate (N_{opt}) for N:grain price ratios of 3.5:1 to 10:1 were also greater for *Rht-B1b*, and because *NUE*, *NU_pE* and *NU_tE* all declined with N rate, *Rht-B1b* failed to increase *NUE* or its components at N_{opt} . The adoption of semi-dwarf lines in temperate and humid regions, and the greater N rates that such adoption justifies economically, greatly increases land-use efficiency, but not necessarily, *NUE*.

Keywords: wheat, fertilisation, nitrogen-use efficiency, *Rht*, dwarfing alleles.

Introduction

Inefficient use of nitrogen fertiliser is economically and energetically wasteful and impacts negatively on the environment such as via groundwater contamination with leachate, and atmospheric pollution (Byners 1990). There is, therefore, urgency to enhance N use efficiency (*NUE*) of crops; defined by Moll et al. (1982), as the ability of plants to produce harvestable dry biomass (grain yield; *GY*) per unit of available N. *NUE* has two components: N uptake efficiency (*NU_pE*), the ability to recover available N in crop biomass; and N utilization efficiency (*NU_tE*), the ability to produce *GY* per unit N recovered in crop biomass (Moll et al. 1982). *NUE* at constant N availabilities varies amongst wheat varieties and has been improved by wheat breeders, particularly as dry matter harvest index (*DMHI*; *GY*/ above ground crop DM) increased (Ortiz-Monasterio et al. 1997; Barraclough et al. 2010). The adoption of major alleles for reducing height (*Rht*) has been notably successful in these regards (Gooding et al. 2011). However, modern shorter varieties also justify, economically, a greater use of N fertilizer, and Sylvester-Bradley and Kindred (2009) argue that *NUE* of varieties should be compared at a range of N availabilities. Here we compare three reduced height alleles in different genetic

backgrounds at a range of N rates so as to evaluate *NUE* at constant and economically justified nitrogen fertilizer rates (N_{opt}).

Table 1. Nitrogen (kg/ha) treatments applied during stem extension

Total N applied	23 March (1 node)	28 April (2 nodes)	14 May (flag leaf emerg.)
0	-	-	-
100	50	-	50
200	50	100	50
350	50	250	50

Materials and Methods

A field experiment was set up on a free-draining sandy loam soil, during the 2009-2010 growing season, at the Crop Research Unit, University of Reading, UK (51°29'N, 0°56'W). Nine near isogenic lines (NILs) were included as a factorial combination of three background varieties (Maris Huntsman, Maris Widgeon and Mercia) and three alleles of the *Rht-B1* locus: *rht-B1a* (tall), *Rht-B1b* (semi-dwarf, syn. *Rht1*) and *Rht-B1c* (severe-dwarf, syn. *Rht3*). On 22 October, 300 untreated seeds/m² were drilled into 120 mm rows in 2 x 6 m sub-plots, separated by a 500 mm double track wheeling. Seed bed preparation, crop protection and nutrition other than for N was as per local commercial practice (Addisu et al. 2010). Main plots, randomised in three complete blocks, comprised the nine background x allele combinations; each contained four randomised sub-plots allocated one of four N rates applied as granular ammonium nitrate (Tab. 1). For the five months encompassing stem extension and grain filling, rainfall was low compared to the long term average (46, 22, 12, 21, 32 for March to July respectively), whilst mean air temperatures were close to normal for the site (6.3, 9.1, 11.2, 16.1 and 18.4°C respectively). Crop height was measured five days before harvest with a polystyrene rising disc (Addisu et al. 2009). During the week before harvest, above ground whole crop rows either side of three randomly placed 0.5 m lengths (total area equivalent of 0.36 m²) were collected from each subplot. Samples were partitioned into grains, chaff and straw. After oven drying, dry weight of each component was estimated and N content assessed with the Dumas combustion method (LECO FP-328, LECO, Stockport, UK). Plot combine harvesting on 9 August 2010 was with a 1.4 m cutter bar such that effective separation of subplots was 0.8 m to reduce edge effects. After oven drying a sample for 72 h at 65 °C, *GY* was corrected to dry matter (DM) basis. Information from sample areas was used to calculate *DMHI* and nitrogen harvest index (*NHI*, nitrogen in grain/nitrogen in above ground crop biomass). *NUpE*, *NUtE* and *NUE* were calculated as in Moll et al. (1982).

Appropriate split plot analyses of variance included a treatment structure of Background*Allele*pol (N rate;2) (GENSTAT 13; VSN International, Hemel Hempstead, UK). *GY* and *NUE* response to N rate deviated significantly from linearity ($P < 0.001$ for deviations), and for *GY* there was also some evidence that including a quadratic effect was insufficient ($P = 0.066$ for deviations). The exponential plus linear model ($A + B.r^{Nrate} + C.Nrate$) with constant value of r (0.99), that had previously been found to be appropriate for many sites and seasons in the UK (Foulkes et al. 1998) was, therefore, used (Fig. 1A). Soil available N was taken as the N in the above ground crop biomass at harvest for the zero N treatment (Sylvester-Bradley and Kindred 2009). As genotypes did not differ significantly for this measure (*rht-B1a*, *Rht-B1b*, *Rht-B1c* = 70, 80, 72 kg N/ha

respectively; S.E.D. = 8.6; d.f. = 16) the grand mean of 74 kg N/ha was used. N_{opt} was calculated (Foulkes et al. 1998) for four N: grain (@ 85% DM) price ratios between 3.5:1 and 10:1, i.e. broadly indicative of the range observed in the UK since 2000 (Sylvester-Bradley and Kindred 2009) .

Results and Discussion

For *GY* effects of Background ($P=0.046$), Allele ($P=0.002$), N rate ($P<0.001$), and Allele x N rate ($P<0.001$) were significant (Fig. 1A). There was no Background x Allele interaction ($P=0.78$) nor three factor interaction ($P=0.38$) so all data are presented as Allele x N rate combinations, averaged over background.

Tab. 2. Effect of *Rht*- allele and nitrogen fertilizer application rate on final crop height, above ground crop biomass, and harvest index of winter wheat. Values are means of three genotypic backgrounds.

N rate	Height (mm)			Above ground crop biomass (t DM/ha)			Dry matter harvest index (%)		
	<i>B1a</i>	<i>B1b</i>	<i>B1c</i>	<i>B1a</i>	<i>B1b</i>	<i>B1c</i>	<i>B1a</i>	<i>B1b</i>	<i>B1c</i>
0	910	720	420	8.6	9.3	7.6	44.6	49.0	52.8
100	1020	830	460	14.4	14.8	12.0	45.4	47.9	51.7
200	1020	840	480	16.2	18.2	13.9	45.2	47.0	50.4
350	1000	830	470	16.8	18.6	14.1	45.3	49.8	49.8
S.E.D. (54 d.f.)*			11.0			0.65			1.14
Mean	990	810	460	14.0	15.2	11.9	45.1	48.4	51.2
S.E.D. (16 d.f.)**			11.5			0.58			0.73

*for comparing N rates within alleles; ** for comparing allele means

Dwarfing alleles reduced crop height (Table 2) within expectations (Flintham et al. 1997), i.e. the semi-dwarfing *Rht-B1b* by 18% and the severe dwarfing *Rht-B1c* by 54%. As in previous studies *Rht-B1b* gave the highest *GY* because it produced much more above ground biomass than *Rht-B1c* and a greater *DMHI* than *rht-B1a* (Flintham et al. 1997; Addisu et al. 2010). The *GY* of *Rht-B1b* was the most responsive to N (Fig. 1A) partly because of a combination of comparatively high biomass yield and *DMHI* at the highest N rate (Table 2).

The results presented (Fig. 1B-C) here are consistent with previous work at this site showing semi-dwarfing alleles to increase *NUE*, *NU_pE* and *NU_tE* at a constant nitrogen fertilizer application rate (200 kg ha⁻¹, Gooding et al. 2011). However, we demonstrate that this advantage of *Rht-B1b* disappears if alleles are compared at N_{opt} . *NUE* and its components decline with N rate, whereas the greater N responsiveness of *Rht-B1b* conferred a higher N_{opt} . At none of the N:grain price ratios did the *NUE* at N_{opt} of *Rht-B1b* exceed that of *Rht-B1c* (Fig. 1B). Similar results were obtained when comparing commercial elite lines released between 1977 and 2007 (Sylvester-Bradley and Kindred 2009): more modern, shorter varieties had higher *NUE* at 200 kg N/ha, but as they had greater yield responses to nitrogen fertilizer, they justified heavier N fertilization, and at N_{opt} gave *NUE* similar to older genotypes.

A criticism of our work is its reliance on a single field experiment. However, the decline in *NUE*, *NU_pE* and *NU_tE* with *N* rate (Fig. 1B-C) is not unexpected (Sylvester-Bradley and Kindred 2009), nor is the increased nitrogen responsiveness of semi-dwarf lines (Anderson et al. 1991). We demonstrate that these combined effects can negate benefits of semi-dwarfing alleles for *NUE* when economic considerations are included. It is obvious that land-use efficiency (yield/ha) is greatly increased with the adoption of semi-dwarf lines and the higher fertilization rates that they justify, but improved *NUE* in such circumstances is less likely.

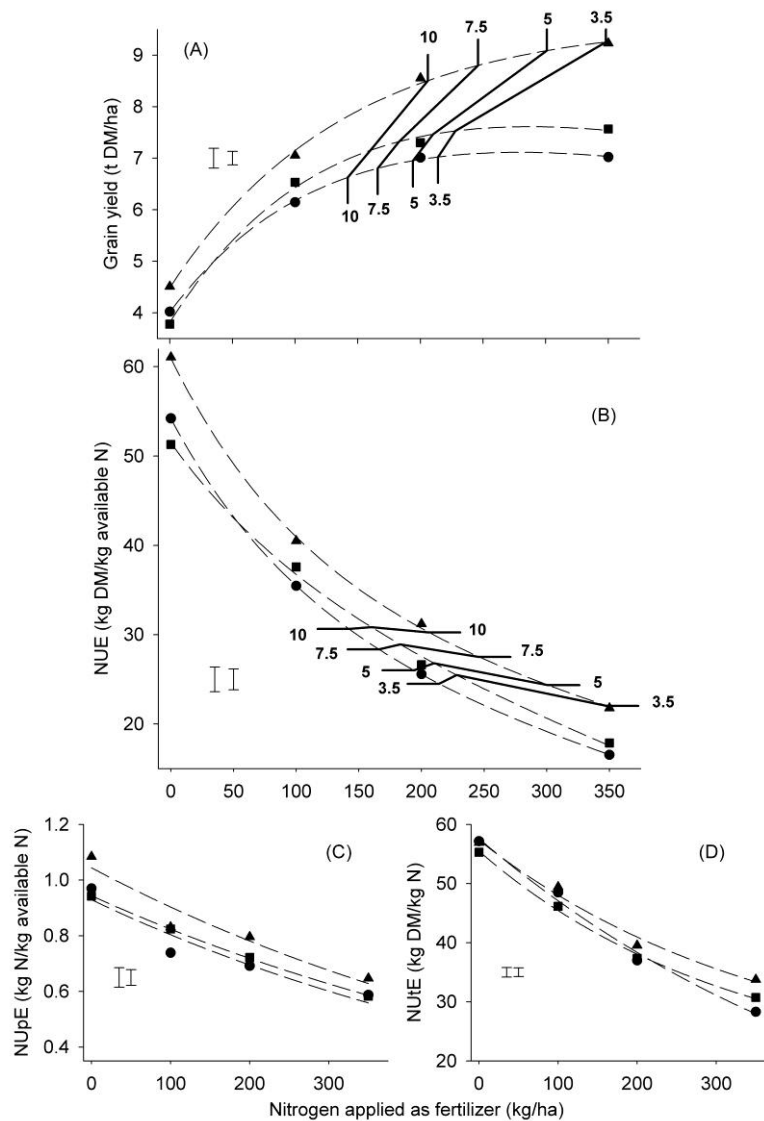


Fig. 1. The effect of allele (■=*rht-B1a*, ▲=*Rht-B1b*, ●=*Rht-B1c*) and nitrogen fertilizer application rate on: A, grain yield; B, nitrogen-use efficiency (NUE, grain yield/available N); C, nitrogen uptake efficiency (NUpE; N in above ground crop/available N); and D, nitrogen utilization efficiency (NUtE; grain yield/N in above ground crop). Solid lines in A and B link points at the economically optimal levels of nitrogen application rates for the different N:Grain (85% DM) price ratios signified by the associated numerals. Error bars are one S.E.D. for (left) comparing alleles at the same N rate, and (right) for comparing N rates with the same allele (54 d.f.)

Acknowledgements

The authors are grateful R.J. Casebow for technical support, to the John Innes Centre for supply of the near isogenic lines, and to “Fondazione Ing. Aldo Gini” for funding a study grant to S. Loddo.

References

- Addisu, M., Snape, J.W., Simmonds, J.R., Gooding, M.J. 2009. Reduced height (Rht) and photoperiod insensitivity (Ppd) allele associations with establishment and early growth of wheat in contrasting production systems. *Euphytica* **166**:249-267.
- Addisu, M., Snape, J.W., Simmonds, J.R., Gooding, M.J. 2010. Effects of reduced height (Rht) and photoperiod insensitivity (Ppd) alleles on yield of wheat in contrasting production systems. *Euphytica* **172**:169-181.
- Anderson, W.K., Seymour, M., D'Antuono, M.F. 1991. Evidence for differences between cultivars in responsiveness of wheat to applied nitrogen. *Aus. J. Agric. Res* **42**:363-377.
- Barraclough, P., Howarth, Jones, J., Lopez-Bellido, R., Parmar, S., Shepherd, C.E., Hawkesford, M.J., 2010. Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement. *Eur. J. Agron.* **33**:1-11.
- Byners, B.H. 1990. Environmental effects of N fertilizer use – An overview. *Fert. Res.* **26**:209-215.
- Flintham, E., Börner, A., Worland, A.J., Gale, M.D. 1997. Optimizing wheat grain yield: effects of Rht (gibberellin-insensitive) dwarfing genes. *J. Agric. Sci.* **128**:11-25.
- Gooding, M.J., Addisu M., Uppal R.K., Snape, J.W., Jones H.E. 2011. Effect of wheat dwarfing genes on nitrogen use efficiency. *J. Agric. Sci.* (in press).
- Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.* **74**:562–564.
- Ortiz-Monasterio, J.I., Sayre, K.D., Rajaram, S., McMahan, M. 1997. Genetic progress in wheat yield and nitrogen-use efficiency under four nitrogen rates. *Crop Sci.* **37**:892-898.
- Sylvester-Bradley, R., Kindred, D.R. 2009. Analysing nitrogen response of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. *J. Exp. Bot.* **60**:1939-1951.

4 RICERCA SU COLZA INVERNALE DA OLIO



4.1 Epoca di semina in colza e gestione dell'azoto

4.1.1 Introduzione

Il colza è una *Brassicacea* attualmente coltivata su una superficie di 31,1 Mha in tutto il mondo (dati *FAOSTAT 2011*). Da sempre è stata nel Nord Europa la tradizionale fonte di oli vegetali per usi alimentari. Tuttavia, le politiche dell'Unione Europea per l'incentivazione dei biocombustibili (*03/30/CE, 2003*) e l'obbligo della loro miscelazione ai carburanti tradizionali (*09/30/CE, 2009*) hanno notevolmente incrementato la richiesta di questa coltura per usi “*no-food*” nel vecchio continente. Dal 2000 a oggi le superfici sono aumentate del 50% considerando i soli paesi della UE-27 (dati *FAOSTAT 2011*), e praticamente raddoppiate se si includono i paesi dell'ex blocco sovietico non entrati nell'Unione (Ucraina, Russia, Bielorussia).

Anche in Italia, pur con alterne fortune, la coltivazione di questa oleaginosa si sta diffondendo e proponendo come una valida alternativa da reddito ai cereali a paglia (*Zanetti et al. 2008*). Pur esistendone genotipi “*spring*”, senza cioè bisogno di vernalizzazione, in Pianura Padana questa coltura trova il suo posto negli avvicendamenti esclusivamente come coltura invernale. La pratica agronomica in questi ambienti è tuttora da consolidare, e necessita di numerosi aggiustamenti.

Al contrario del grano che durante la stagione autunno-vernina assorbe modeste quantità di nutrienti, il colza in tale fase può accumulare fino a oltre 100 kg ha⁻¹ N nella propria biomassa (*Vos e van der Putten 2001; Henke et al. 2008*). Parte di questo azoto può essere perso per fenomeni di defogliazione da gelo, ma una quota consistente è recuperabile dal successivo assorbimento primaverile della coltura o immobilizzata nel terreno (*Dejoux et al. 2000*). La capacità del colza di trattenere tali quantità di azoto, evitandone la lisciviazione durante l'inverno, rende la sua coltivazione più efficiente dal punto di vista ambientale rispetto ai cereali; tuttavia è da porre particolare attenzione al destino dei nutrienti nei suoi residui colturali (*Sieling e Kage, 2006*).

Sulla base di queste peculiarità sono stati sviluppati sistemi di supporto alle decisioni, semplici e largamente utilizzati: come la “*Reglette Azote*” (*Van Paemel e Reau 1998*), che per maggiori accrescimenti invernali suggerisce la riduzione delle concimazioni. Per migliorare la precisione nella stima della dose ottimale di N, sono da tenere in

considerazione anche i pool di *SMN* presenti nel suolo a fine inverno (*Makowski et al. 2005; Henke et al. 2008*).

La concimazione autunnale, se non si manifestano gravi carenze, non incide in genere sulle rese finali (*Sieling e Kage, 2010*) per le ottime capacità di recupero delle piante nei periodi successivi (*Colnenne et al. 2002*). In un'ottica di miglioramento della *NUE* si può quindi affermare che lo sfruttamento del *SMN* presente nel suolo in autunno, sia una tecnica preferibile alla concimazione in quanto valorizza le risorse già presenti nel suolo.

Per verificare come una pratica non direttamente legata alle concimazioni possa influire sull'efficienza d'uso dell'azoto è stato impostato un esperimento della durata di 2 anni sull'epoca di semina. Il colza è stato seminato su terreno non concimato in diverse epoche per creare differenze nell'assorbimento azotato: l'attenzione è stata rivolta alla quantificazione del *SMN* presente nel suolo alla fine della stagione di crescita autunnale e potenzialmente lisciviabile durante l'inverno. Sono stati confrontati i comportamenti di diverse tipologie varietali (ibrido, ibrido semi-nano, varietà a libera impollinazione) per stimare se le differenze nel vigore tra genotipi producessero differenze nei pool di *SMN*.

Esperienze simili sono già state effettuate nei tipici areali di coltivazione europei del colza, come Germania (*Henke et al. 2008*) o Francia (*Dejoux et al. 2003*). Tuttavia nel particolare caso della Pianura Padana, con un clima più mite e semine più tardive, vi potrebbero essere variazioni in queste tendenze.

4.1.2 Materiali e metodi

Il colza è stato coltivato nelle annate 2009-2010 e 2010-2011 presso l'Azienda Agraria Sperimentale "Lucio Toniolo" dell'Università di Padova. I terreni aziendali presentano buone dotazioni di sostanza organica (>2%), e sono periodicamente ammendati con apporti di liquame bovino: la prova si pone pertanto in condizioni coerenti agli obiettivi, in quanto i pool di SMN da analizzare sono cospicui. Le proprietà dei due terreni sono riportate in Tab. 19; in entrambi gli anni la precessione colturale è stata grano tenero. Le lavorazioni principali (discatura + estirpatura a 20 cm) sono state effettuate la settimana precedente alla prima epoca; il letto di semina è stato affinato con erpice rotante immediatamente prima di ogni operazione di semina. La concimazione di fondo ha apportato nutrienti in ragione di 0-60-60 kg ha⁻¹ (N-P₂O₅-K₂O). Nell'annata 2009-2010 si è resa necessaria un'irrigazione a pioggia di 40 mm per rendere lavorabile il terreno. Tale operazione, pur essendo poco realistica nella pratica agronomica, è stata necessaria per simulare le condizioni ottimali del terreno in cui potrebbe porsi una semina anticipata. La prova è stata impostata con uno schema a split-plot in 3 ripetizioni: nei parcelloni sono state distribuite le epoche di semina, nelle parcelle le varietà.

Anno di coltivazione	2009-2010	2010-2011
Tessitura (Argilla Limo Sabbia%)	Franco-limoso (21,2 61,3 17,6%)	Franco-limoso (6,2 54,6 39,3%)
Sostanza organica (g kg⁻¹)	22,6	21,5
N tot (g kg⁻¹)*	1,05	0,60
Rapporto C/N	12,3	19,5
Reazione (pH)	7,95	8,49
N tot (t ha⁻¹)*	5,88	3,36

Tab. 19: proprietà del suolo dei terreni in prova. * L'azoto totale (g kg⁻¹) è calcolato col metodo per combustione, la quantità di N tot per ettaro viene riferita allo strato arabile (40 cm) stimando una densità apparente del suolo di 1,4 t m⁻³. Non sono disponibili dati sul terreno della prova 2009-2010; è stata perciò riportata l'analisi del terreno adiacente.

Alla data di semina canonica nell'ultima decade di settembre (Tab. 20) sono state confrontate un'epoca precoce (prima decade di settembre) e una tardiva (seconda decade di ottobre). È stata impiegata una seminatrice pneumatica di precisione e sono stati deposti

44 semi m⁻² a un'interfila di 45 cm. Le tre varietà seminate sono: Excalibur (ibrido CHH – Monsanto Italia), Catalina (varietà a libera impollinazione – Monsanto Italia) e il semi-nano PR45D01 (ibrido CHH – Pioneer Italia).

Non è stato ritenuto necessario alcun tipo di controllo chimico della flora infestante: l'ampia interfila ha permesso, ove fosse necessaria, la sarchiatura nei mesi autunnali. Le parcelle sono state concimate con 80 kg ha⁻¹ N (solfato ammonico) alla ripresa vegetativa in febbraio e raccolte con mietitrebbia parcellare nel mese di giugno (Tab. 20).

Epoca	Date di semina (S) e raccolta (R) 1° anno	Date di semina (S) e raccolta (R) 2° anno
Precoce	S - 5 settembre 2009 R - 18 giugno 2010	S - 6 settembre 2010 R - 10 giugno 2011
Ottimale	S - 29 settembre 2009 R - 18 giugno 2010	S - 23 settembre 2010 R - 13 giugno 2011
Tardiva	S - 15 ottobre 2009 R - 25 giugno 2010	S - 12 ottobre 2010 R - 20 giugno 2011

Tab. 20: date di semina e raccolta delle prove nelle due annate.

4.1.1.1 Analisi del contenuto di SMN nel suolo (Metodo del carotaggio)

I carotaggi sono stati effettuati alla fine della stagione vegetativa autunnale: il 3 dicembre 2009 ed il 19 dicembre 2010. Le carote di terreno lunghe 70 cm e dal diametro di 4 sono state prelevate sull'interfila e lungo la fila; ogni carota è stata divisa in due sezioni di profondità: 0-35 e 35-70 cm. Nell'anno 2009-2010 le carote sono state prelevate solo sul blocco centrale della prova in 4 repliche per parcella (2 sulla fila, 2 sull'interfila). L'anno successivo sono stati campionati tutti i 3 blocchi, sempre in 4 repliche per parcella (2 sulla fila, 2 sull'interfila). I campioni di terreno così ottenuti sono stati seccati a 105 °C, le zolle macinate e il risultante setacciato a 2 mm. In coincidenza dei carotaggi (3 dicembre 2009 e 6 dicembre 2010) sono stati effettuati campioni di biomassa per i quali sono stati determinati la sostanza secca (essiccazione a 65 °C per 48 h) e il contenuto in azoto (*Kjeldahl* - AACC 46-11.02).

4.1.1.2 Analisi di laboratorio e analisi statistiche dei dati

Sui campioni di terreno è stato determinato l'azoto nitrico, la componente più solubile del *SMN*. Analizzare anche il contenuto in ione ammonio avrebbe reso un'informazione più completa, tuttavia questa forma è meno lisciviabile ed è scarsamente probabile che venga convertita a nitrato durante l'inverno a causa della ridotta attività della flora batterica del suolo. 10 g di terreno sono stati estratti in 25 ml di acqua deionizzata e 0,100 g di CaSO_4 . Dopo un'agitazione di 20' a 90 rpm il risultante è stato filtrato e avviato alla determinazione dei nitrati con metodo spettrofotometrico (*Cataldo et al. 1975*). Per riferire all'unità di superficie le ppm di N-NO_3^- così calcolate, è stato usato un coefficiente di densità apparente del suolo di $1,4 \text{ t m}^{-3}$.

L'analisi della varianza (ANOVA) è stata effettuata con il pacchetto statistico denominato CoStat (*CoHort Software, Monterey, CA-USA*); sono stati considerati significativi valori di $P < 0,05$.

4.1.3 Risultati sperimentali

L'interazione "colza x ambiente" è stata studiata attraverso la somma termica espressa in GDD (*Growing Day Degree*) con temperatura base pari a 0°C (Miralles *et al.* 2001); i dati meteo sono stati ottenuti da una centralina dell'ARPA Veneto situata in azienda (Fig. 34). La somma termica del primo anno, nel periodo compreso tra 1° settembre e 31 dicembre, ha superato di 226 unità quella del secondo (Fig. 40a). Tuttavia, i GDD accumulati tra la semina e il carotaggio son risultati abbastanza coerenti tra i 2 anni e le 3 epoche (Fig. 40b). Dall'inizio delle semine al carotaggio le precipitazioni ammontavano a 325 e 402 mm, rispettivamente per il 2009-2010 e il 2010-2011.

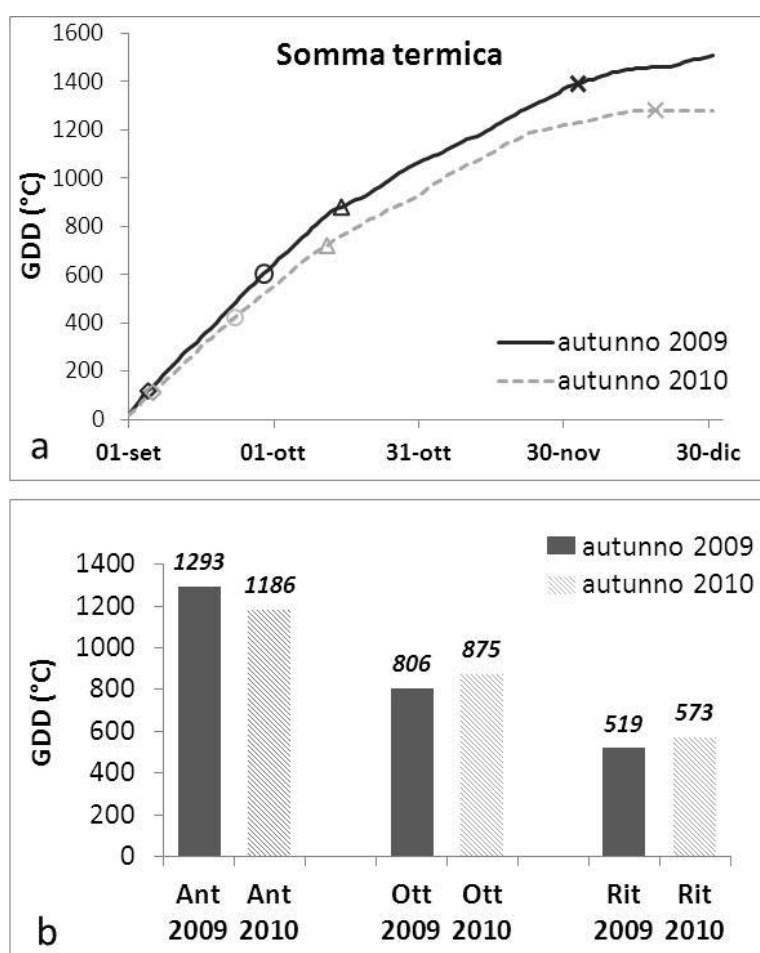


Fig. 40: somma termica nel periodo compreso tra il 1 settembre e il 31 dicembre nelle due annate di sperimentazione (a). Sono evidenziate da un rombo vuoto (\diamond) gli interventi di semina anticipata, da un circonferenza vuota (O) le semine in data ottimale, da un triangolo vuoto (Δ) le semine ritardate e da una croce (X) i carotaggi di terreno. Nella seconda parte del grafico (b) sono rappresentate le somme termiche accumulate tra la semina e il carotaggio dalle diverse tesi nei due anni di sperimentazione (Ant = anticipata, Ott = ottimale; Rit = ritardata).

Lo schema di campionamento non era omogeneo tra le 2 annate: per ciascuna è stata quindi effettuata una singola ANOVA. Vista l'estrema significatività ($P < 0,0001$) della profondità di campionamento, tale fattore non è stato incluso nell'ANOVA e sono state condotte separatamente 3 analisi statistiche su strato superficiale (0-35 cm), strato profondo (35-70 cm) e intero profilo (0-70 cm). Le uniche analisi che hanno considerato lo strato di profondità come un fattore sono state quelle per verificare gli effetti d'interazione con l'epoca di semina (Fig. 42a-c) e la varietà coltivata (Fig. 42b-d).

Il vigore del genotipo non ha inciso in alcun modo sulla quantità totale di nitrati lasciata nel terreno dalla coltura ($P > 0,05$ in entrambe le annate – Fig. 41 b-d). Solo l'analisi condotta il primo anno sullo strato profondo (35-70 cm) ha rivelato che PR45D01 aveva lasciato più nitrati nel terreno rispetto alle due cv a taglia convenzionale.

L'epoca di semina ha indubbiamente sempre condizionato l'accumulo di N nella biomassa e i pool di SMN nell'intero profilo di suolo (0-70 cm; Fig. 41a-b): tale effetto è stato marcato in entrambi gli anni ($P < 0,0001$ nel 2009-2010; $P = 0,0002$ nel 2010-2011). Durante la prima stagione di sperimentazione anticipare l'epoca di semina ai primi di settembre ha ridotto del 46 e del 60% il totale dell'azoto nitrico nel terreno rispetto alle epoche ottimale e tardiva; nella stagione successiva l'effetto si è ripetuto con abbattimenti rispettivamente del 23 e 55% (Figura 41a e Figura 41c).

In entrambe le stagioni l'epoca di semina anticipata e ottimale hanno presentato simile $N\text{-NO}_3^-$ residuale nello strato superficiale; tuttavia in quello profondo sono emerse differenze ($P < 0,05$) a favore della più precoce. Ritardare la semina ha quasi sempre portato all'aumento dei nitrati residui in entrambi gli strati (Fig. 42a-c).

Non sono state rilevate differenze statisticamente significative ($P > 0,05$) tra fila e interfila per la quantità di nitrati nel suolo. Nel primo anno tuttavia è emersa nello strato più profondo un'interazione significativa ($P = 0,049$) tra i fattori epoca e interfila. Pur con quantità di azoto nitrico molto differenti, epoca precoce ($\sim 35 \text{ kg ha}^{-1}$) e tardiva ($\sim 125 \text{ kg ha}^{-1}$) presentavano contenuti coerenti tra fila e interfila. Nell'epoca canonica, invece, erano presenti quantità molto maggiori di N nel terreno campionato sull'interfila (111 vs. 72 kg ha^{-1}). Questa interazione non si è ripetuta nell'annata 2010-2011: i valori di $N\text{-NO}_3^-$ erano, in tutte le epoche, pressoché identici tra fila e interfila per tutti gli strati di terreno analizzati.

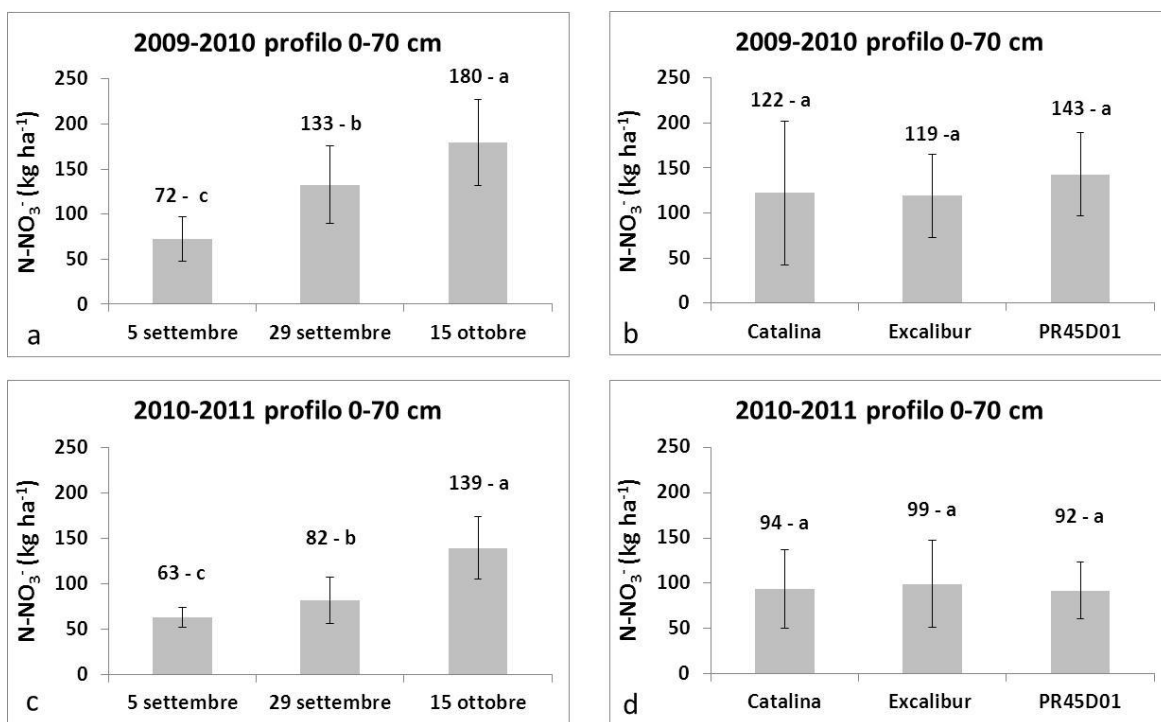


Fig. 41: contenuto in azoto nitrico (N-NO₃) sull'intero profilo 0-70 cm del suolo nelle annate 2009-2010 (a-b) e 2010-2011 (c-d). I dati sono stati divisi per i fattori "epoca di semina" (a-c) e varietà (b-d). Lettere diverse indicano differenze significative (P<0,05) per il test di Duncan.

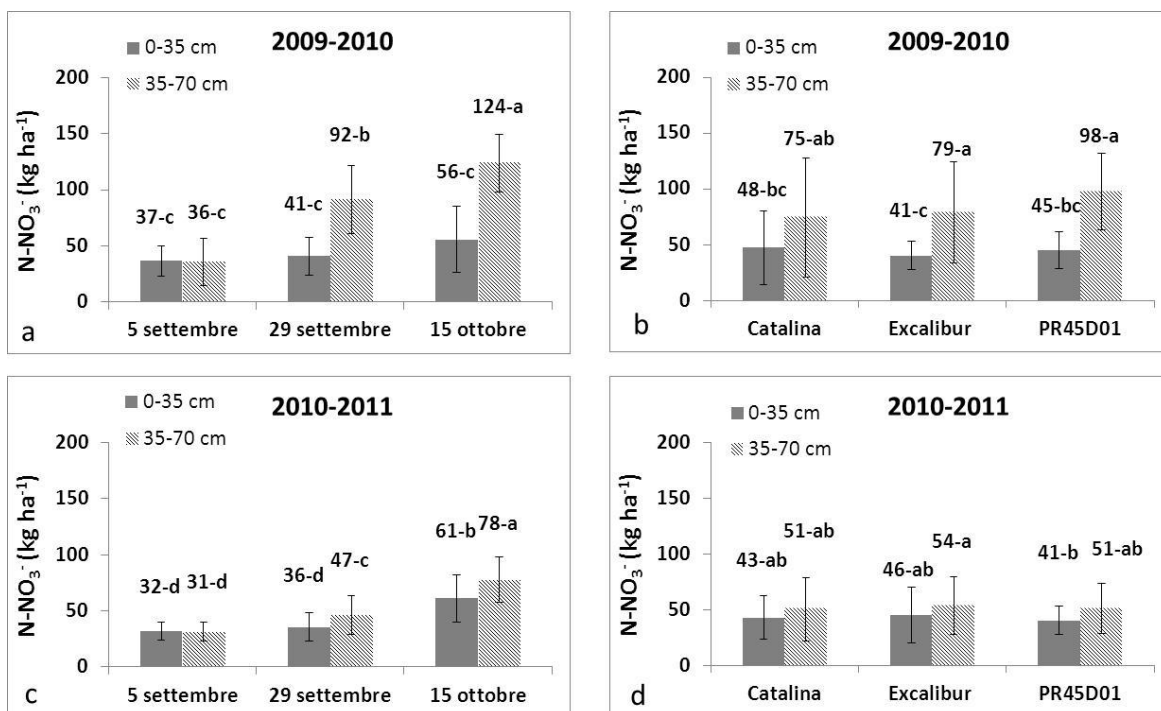


Fig. 42: interazione "epoca x strato" per il contenuto in azoto nitrico (N-NO₃) nell'anno 2009-2010 (a) e 2010-2011 (b). Interazione "cv x strato" nell'anno 2009-2010 (c) e 2010-2011 (d). Lettere diverse indicano valori statisticamente differenti per il test di Duncan (P<0,05).

Nel primo anno di sperimentazione i carotaggi di terreno sono stati svolti su un unico blocco della prova; pur essendoci state repliche per le analisi sul SMN non è stato possibile averne per l'analisi della biomassa. L'ANOVA per l'accrescimento della coltura è stata perciò applicata solo sui dati del secondo anno.

L'N uptake del colza si è molto differenziato a seconda dell'epoca di semina ($P < 0,0001$ nel secondo anno). La più precoce ha portato a un notevole assorbimento di azoto, sempre superiore a 100 kg ha^{-1} per tutte le cv in prova; nel primo anno i due ibridi (Excalibur e PR45D01) hanno addirittura oltrepassato abbondantemente quota 150 kg (Fig. 43a-b). Ritardare la semina anche di soli 15 giorni rispetto all'epoca canonica (fine settembre) ha invece portato ad assorbimenti decisamente modesti: in nessun caso superiori ai $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. Per le semine in epoca ottimale l'ibrido semi-nano PR45D01 ha sempre manifestato il suo scarso vigore, accumulando in entrambe le annate $26 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, i due genotipi più vigorosi (Excalibur e Catalina) si sono invece avvantaggiati nella prima annata, la più calda, accumulando quantità di N nella biomassa intorno ai 50 kg ha^{-1} (Fig. 43a).

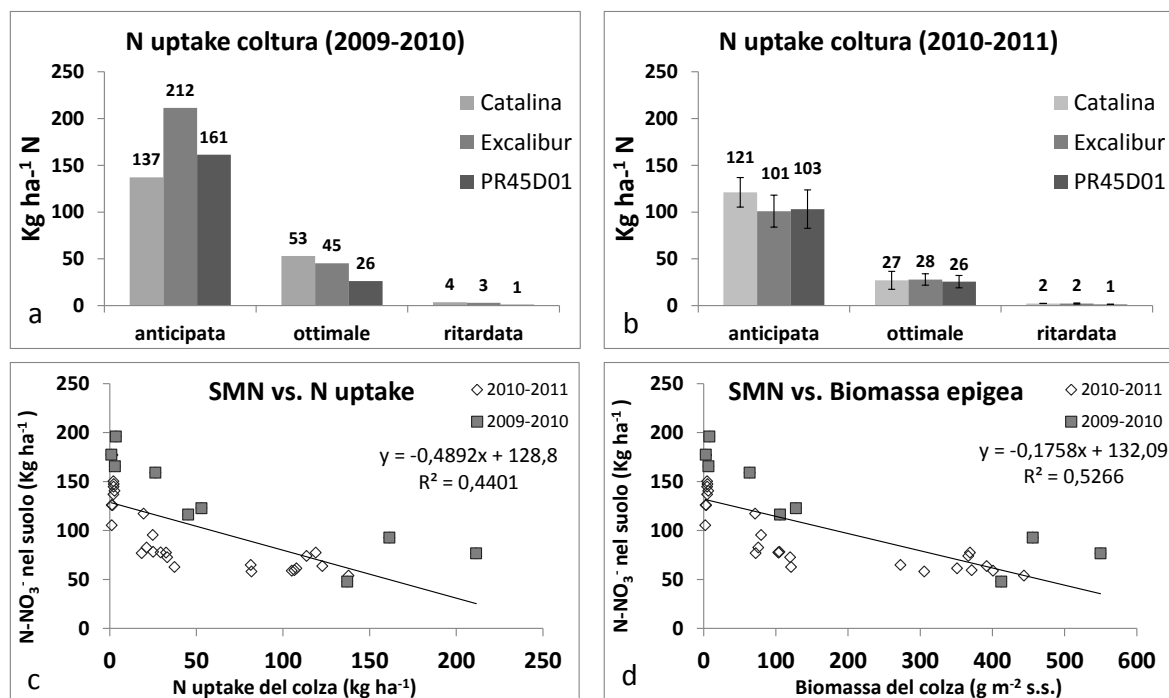


Fig. 43: assorbimento di azoto per le tesi in prova nel primo (a) e secondo anno (b) di sperimentazione. I dati del primo anno non presentano barre di errore in quanto derivano da una singola replica. Nei grafici sottostanti sono rappresentate le relazioni lineari tra uptake azotato della coltura vs. nitrati nel suolo (c) e biomassa secca della coltura vs. nitrati nel suolo (d).

I rilievi effettuati a fine autunno hanno evidenziato come biomassa secca e uptake azotato si siano correlati negativamente ($P < 0,0001$) alla quantità di nitrati presenti nel suolo (Fig. 43c-d). La forte dispersione osservata nei dati ($R^2 = 0,4401$ per N uptake; $R^2 = 0,5266$ per la biomassa) può essere spiegata dalla variabilità spaziale del suolo e dall'assorbimento azotato delle infestanti, aspetto non contemplato dal protocollo sperimentale.

La precocità di semina ha influenzato positivamente la resa della coltura in entrambe le annate. Nel primo anno ($P = 0,0039$) la semina anticipata si è contraddistinta come la miglior opzione ($4,62 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$), mentre la ritardata ha portato a risultati deludenti ($3,00 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$). Il secondo anno ($P = 0,0441$) le rese sono state molto più contenute: epoca di semina precoce ed ottimale sono risultate equivalenti ($\sim 3,00 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$), mentre la semina tardiva si è confermata una pratica svantaggiosa ($2,36 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$).

La stagione 2009-2010 ha enfatizzato le differenze produttive tra le varietà ($P = 0,0006$): le rese di Excalibur ($4,27 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$), Catalina ($3,99 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$) e PR45D01 ($3,46 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$) si sono attestate su livelli statisticamente differenti. L'andamento meteorologico dell'annata successiva ha appiattito le differenze tra le cv ($P = 0,1284$), che hanno tutte prodotto scarse rese in seme comprese in un intervallo di $2,6-3,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$

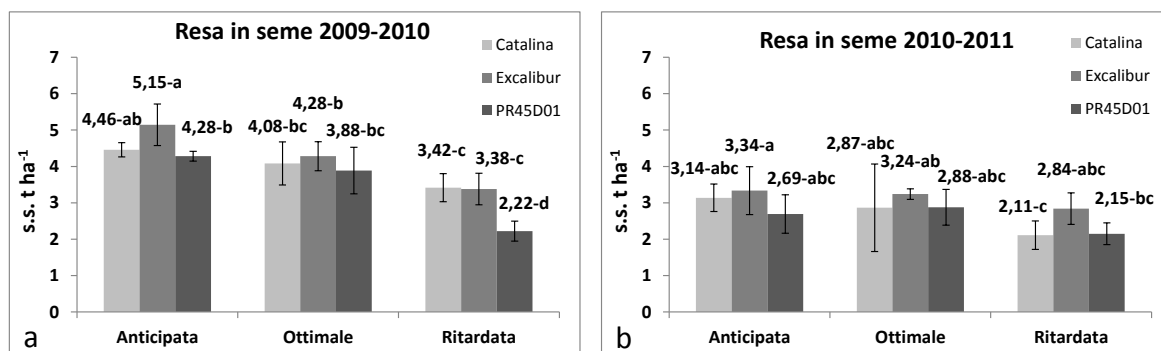


Fig. 44: Resa in seme del colza nelle due annate. Lettere diverse evidenziano rese statisticamente differenti. Le ANOVA nel 2009-2010 (a) e nel 2010-2011 (b) sono state condotte singolarmente per ciascuna annata.

4.1.4 Discussione

In questo contesto pedoclimatico il colza ha dimostrato, durante la stagione autunnale, notevoli capacità di accumulo di N nella propria biomassa: pari o ben superiori a quelle riportate in studi precedenti (*Justes et al. 1999; Costantin et al. 2011*).

Come già descritto in *Henke et al 2008* ritardare la data di semina anche di pochi giorni può ridurre il contenuto di N della biomassa e aumentare la quantità di SMN nel terreno. Pur con N uptake paragonabili tra i due ambienti, nel caso di studio italiano le quantità di SMN entrate in gioco sono risultate ben più consistenti. Le due sperimentazioni hanno esplorato simili orizzonti di suolo (70 cm vs. 60 cm di *Henke et al. 2008*), ma in Italia le quantità del solo N-NO₃⁻ hanno spesso lambito, e in alcuni casi abbondantemente superato, la soglia dei 100 kg ha⁻¹. Nel lavoro svolto su più località in Germania il SMN (comprendente anche l'N-NH₄⁺) in nessun caso aveva oltrepassato i 60 kg ha⁻¹. Il maggior contenuto di azoto minerale nel suolo di Legnaro può essere spiegato dalla forte disponibilità di S.O. derivante dai reflui zootecnici, e dalle più alte temperature autunnali che ne favoriscono la mineralizzazione. Il primo anno i valori di azoto nitrico nel suolo erano superiori rispetto al successivo, probabilmente a causa della maggior dotazione in N tot e S.O. del suolo in prova (Tab. 19), della maggior somma termica e delle minori precipitazioni (8 vs. 13 eventi sopra i 10 mm) durante il periodo preso in esame. Conoscere l'entità di tali pool è importante, soprattutto se la sperimentazione si colloca in una regione, il Veneto, cui buona parte del territorio è classificata come vulnerabile al rischio nitrati.

L'esperimento ha confermato che anticipare il più possibile l'epoca di semina è un'ottima strategia per ridurre la quantità di nitrati esposti a lisciviazione (*Dejoux et al., 2003*), qualora la pratica non comporti gravi limitazioni allo sviluppo della coltura, come attacchi di fitofagi o stress idrici precoci (*Rathke et al. 2006*).

Le *Brassicaceae* hanno ottime capacità di approfondimento radicale e intercettazione dei nitrati (*Kristensen e Thorup-Kristensen, 2004a; Kristensen e Thorup-Kristensen, 2004b*): molto probabilmente in questa sperimentazione all'aumentare della precocità di semina è corrisposta una miglior esplorazione del suolo da parte della coltura e un più intenso prelievo di azoto. Nelle tesi seminate a fine settembre e metà ottobre erano presenti, infatti, maggiori concentrazioni di N-NO₃⁻ soprattutto nello strato più profondo

(Fig. 42a-c), dove l'apparato radicale non aveva probabilmente ancora sviluppato densità radicali adeguate.

A meno di andamenti meteorologici favorevoli, l'ibrido semi-nano ha dimostrato modeste capacità come *catch-crop*, a causa del suo scarso vigore nelle fasi iniziali del ciclo. Nel primo anno oltretutto, PR45D01 ha presentato la peggior performance nel recuperare i nitrati dallo strato più profondo del suolo (35-70 cm). Queste considerazioni sono coerenti alle scarse possibilità di migliorare la *NUE* del colza attraverso l'introduzione di ibridi seminani (Sieling e Kage, 2008).

Le varietà di colza in prova hanno espresso una buona resistenza al gelo invernale: anche le parcelle seminate anticipatamente, ad eccezione di un defogliamento più accentuato, non hanno accusato danni particolari. Tale situazione si è tradotta in un più ampio budget di N a disposizione alla ripresa vegetativa e una miglior competitività nei confronti delle infestanti, col risultato di promuovere fertilità e produttività delle piante.

La primavera 2011 è stata caratterizzata da scarse precipitazioni, che hanno posto lo sviluppo riproduttivo della coltura in condizioni molto limitanti, allineando semine precoci e ottimali sullo stesso livello di resa. La semina ritardata in quest'annata è risultata comunque sfavorita, probabilmente a causa dello scarso approfondimento radicale e della maggior competizione delle malerbe per risorse idriche e nutrienti.

Come raramente accade nella pratica agricola, una tecnica con risvolti ambientali positivi si presenta anche economicamente vantaggiosa. L'anticipo dell'epoca di semina, infatti, non ha unicamente ridotto i pool di N-NO_3^- esposti alla lisciviazione invernale, ma ha anche permesso di ottenere, in un anno su 2, rese superiori a parità di dose di concime apportato; la *NUE* può così migliorare soprattutto per effetto di una miglior N Uptake Efficiency. Oltretutto, le minori dosi di concimazione necessarie alla ripresa vegetativa per una coltura seminata precocemente, andranno a ridurre l' $\text{N}_{\text{available}}$, ossia il denominatore della frazione che compone la *NUE*, a netto vantaggio quindi dell'efficienza.

L'organizzazione aziendale e le condizioni meteo rendono difficile l'applicazione di questa pratica tutti gli anni, ma sfruttare anche un vantaggio di pochi giorni, quando la somma termica giornaliera è ancora elevata, può avere effetti significativi sullo sviluppo successivo della coltura e sulla cattura dei nitrati.

5 CONCLUSIONI GENERALI

I risultati della ricerca effettuata indicano la possibilità di associare alla redditività dei sistemi agricoli l'efficienza d'uso dell'azoto e, quindi, una migliore tutela ambientale.

Nel primo esperimento sono state individuate calibrazioni degli strumenti “*proximal sensing*” in grado di fornire indicazioni in tutte le fasi critiche per la nutrizione del grano.

L'NDVI si è dimostrato adatto a fornire indicazioni sull'assorbimento azotato, almeno entro le fasi di piena levata; letture più tardive sono utili se gli effetti di saturazione del sensore non si sono ancora manifestati. Includere questa misura nella pratica di campo permetterebbe agli agricoltori di ottenere indicazioni di concimazione precise per gli interventi che più sono critici nel determinare il livello di resa. Purtroppo non è stato possibile individuare un'unica relazione tra le due variabili (NDVI e N uptake), in quanto genotipo e ambiente di coltivazione condizionano pesantemente i parametri della relazione. Sono necessari un maggior approfondimento delle cause di questa variabilità e la validazione delle curve con dati raccolti in più annate.

Lo SPAD, pur presentando grossi limiti nell'operatività di campo, si candida a supplire al ruolo delle misure NDVI in fase avanzata quando spesso lo spettroradiometro è soggetto a effetti di saturazione. La forte correlazione, emersa in grano tenero, tra valori SPAD in fioritura e contenuto proteico finale è una buona base per determinare l'utilità o meno di concimazioni tardive.

Nella seconda sezione un'applicazione di queste relazioni è stata testata con risultati molto promettenti per un'ipotetica correzione degli input di concimazione. Essendo disponibili solo i dati del primo anno di progetto non era possibile applicare direttamente il modello. Un riscontro sull'efficacia della correzione VRT basata sull'NDVI è quindi da rimandare a successivi sviluppi. Manca ancora del tutto l'integrazione con modelli previsionali, atti a individuare l'assorbimento ideale di N, al variare di proprietà del terreno e andamento stagionale.

L'implementazione di queste tecnologie nella pratica agricola passa, per forza di cose, attraverso un lavoro di semplificazione delle procedure a cura dell'utente; non deve essere però dimenticata la conoscenza della coltura e dell'ambiente di coltivazione da parte dell'agricoltore.

Con questi due esperimenti è stato possibile ottenere maggiori elementi di conoscenza per ottimizzare tempistiche, quantità e allocazione dell'input azotato. Tuttavia, è auspicabile anche un miglioramento dell'efficienza intrinseca dei prodotti utilizzati.

In questi termini il concime con inibitore della nitrificazione si è dimostrato una buona soluzione. Nell'esperimento in vaso ha espresso una lunga durata dell'effetto di stabilizzazione sulla componente nitrica, fornendo disponibilità di N più bilanciate rispetto a più apporti di N a pronto rilascio. Il complementare esperimento in campo non ha sollevato criticità produttive o qualitative eclatanti tra le due strategie a confronto. L'altra innovazione in prova, la concimazione fogliare, ha ridotto l'impatto dell'apporto tardivo di N, permettendo di ottenere comunque l'incremento del tenore proteico ricercato.

Accoppiando queste due tecnologie (inibitori + fogliare), si possono eliminare 2 dei 3 passaggi di frazionamento della concimazione, solitamente necessari per una produzione di qualità. La minor richiesta di operazioni agromeccaniche da parte della coltura può ripagare in parte il maggior costo degli input, e sgrava la gestione aziendale in una fase critica, dove si accavallano le fasi di preparazione e avvio delle colture a semina primaverile.

L'esperimento condotto presso l'Università di Reading voleva enfatizzare l'importanza del genotipo nella definizione della NUE. L'habitus vegetativo semi-nano si conferma il più efficiente, manifestando maggior efficienza a dose fissa di N e livelli di resa più elevati all'optimum economico di concimazione (pur con NUE simili alle altre varianti alleliche). La selezione genetica deve rivolgersi a caratteri morfologici e metabolici rivolti all'efficienza azotata, per rendere più sostenibili le attuali colture (*Hirel et al. 2007; Foulks et al. 2009*). Tuttavia, nella scelta della varietà e della tecnica di concimazione si dovrebbero tenere in considerazione le eventuali interazioni genetiche che condizionano l'efficacia delle diverse pratiche. Nell'esperimento 3.3 sono emerse, per esempio, limitazioni di resa, biomassa e N uptake per la cv PR22R58, quando venga concimata con prodotti additivati con inibitori. Allo stesso modo, tra le cv di grano duro sono palesi le differenze per l'affinità alla concimazione fogliare (N recovery e effetto sul tenore proteico).

La NUE, tuttavia, non è un indice di efficienza azotata sempre ottimale per descrivere il grano. Le cv caratterizzate da elevato tenore proteico risultano infatti svantaggiate dalla definizione del parametro, in quanto presentano maggiori fabbisogni azotati a parità di

livello produttivo (*Barracough et al. 2010*). Nella sezione 3.4, l'analisi di N recovery, bilancio apparente e incremento del contenuto proteico si è rivelata molto più interessante di ciò che poteva emergere dalla NUE o le sue componenti.

Dall'esperienza su colza, infine, si può dedurre che un contributo al miglioramento della NUE possa derivare anche da pratiche che prescindano dalle concimazioni. Tali strumenti sono molteplici: gestendo avvicendamenti colturali, preparazione del terreno, *catch-crops*, scelte varietali, modalità irrigue è possibile sviluppare un approccio integrato per ottimizzare l'utilizzo degli input azotati.

In un'ottica futura di prezzi ulteriormente crescenti degli input, reddito economico e salvaguardia ambientale potrebbero coniugarsi nel nome di una maggiore efficienza. Il minor utilizzo di input, o una loro miglior conversione in prodotto agrario utile potrebbe andare a beneficio dell'azienda sia in termini di riduzione dei costi che in termini di reddito lordo.

6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

NORMATIVE e METODICHE UFFICIALI

1. 03/30/CE. *Direttiva 2003/30/CE Del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'8 maggio 2003 sulla promozione dell'uso dei biocarburanti o di altri carburanti rinnovabili nei trasporti.*
2. 09/30/CE. *Direttiva 2009/30/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 Aprile 2009 che modifica la direttiva 98/70/CE per quanto riguarda le specifiche relative a benzina, combustibile diesel e gasolio nonché l'introduzione di un meccanismo inteso a controllare e ridurre le emissioni di gas a effetto serra, modifica la direttiva 1999/32/CE del Consiglio per quanto concerne le specifiche relative al combustibile utilizzato dalle navi adibite alla navigazione interna e abroga la direttiva 93/12/CEE.*
3. 80/778/CEE. *Direttiva 778/80/CEE del Consiglio del 15 luglio 1980, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano. Allegato 1, tabella B, righe 21 e 22.*
4. 91/676/CEE. *Direttiva 676/91/CEE del Consiglio del 12 dicembre 1991 relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole.*
5. *AACC International. Approved Methods of Analysis, 11th Ed. Method 46-11.02. Crude protein—improved Kjeldahl method, copper catalyst modification.*
6. *DPR 187/2001. DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 9 febbraio 2001, n.187. Regolamento per la revisione della normativa sulla produzione e commercializzazione di sfarinati e paste alimentari, a norma dell'articolo 50 della legge 22 febbraio 1994, n. 146.*

SITI INTERNET

7. *AGER Bologna, 2011. Listino prezzi borsa merci Bologna, <http://www.agerborsamerici.it/listino/listino.html>*
8. *ARPA Veneto, dati meteo: <http://www.arpa.veneto.it/indice.asp?l=cmt/meteo/meteo.htm>*
9. *NAMIB, 2009. Recommended Code of Practice for Mill Intake July 2009. <http://www.nabim.org.uk/content/1/30/wheat-contracts.html>*
10. *USGS, 2011. Mineral commodities summaries, Nitrogen fixed – Ammonia. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/nitrogen/>*
11. *FAO, 2011. Database internet FAOSTAT. <http://faostat.fao.org/>*
12. *ISTAT 2011, sito internet agri.istat.it*

BIBLIOGRAFIA

13. Adams, M.L., Norvell, W.A., Philpot, W.D., 2000. Toward the discrimination of manganese, zinc, copper, and iron deficiency in 'Bragg' soybean using spectral detection methods. *Agron. J.*, 92, 268-274.
14. Addisu, M., Snape, J.W., Simmonds, J.R., Gooding, M.J. 2009. Reduced height (Rht) and photoperiod insensitivity (Ppd) allele associations with establishment and early growth of wheat in contrasting production systems. *Euphytica*, 166, 249-267.
15. Andreae M (1999) ENTEC (DMPP) – ein neuer Ammoniumstabilisator: ökotoxikologische Bewertung. In: BASF AG (ed Düngen mit einer neuen Technologie Innovation in der Düngung ENTEC. Atti di un colloquio scientifico 17–18 Maggio 1999, BASF Agricultural Center Limburgerhof. BASF, Limburgerhof, pp 45–49.
16. Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, L., Royo, C., 2000. Spectral vegetation index as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agron. J.*, 92, 83-91.
17. Arif, M., Chohan, M.A., Ali, S., Gul, R., Khan, S., 2006. Response of wheat to foliar application of nutrients. *J. Agric. Biol. Sci*, 1, 30-34.
18. Arregui, L.M., Lasa, B., Lafarga, A., Irañeta, I., Baroja, E., Quemada, M., 2006. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilisation in winter wheat humid Mediterranean environment. *Eur. J. Agr.*, 24, 140-148.
19. Arregui, L.M., Quemada, M., 2006. Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes. *Plant Soil*, 288, 57-69.
20. Arregui, L.M., Quemada, M., 2008. Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions. *Agron. J.*, 100, 277-284.
21. Austin, R.B. Bingham, J. Blackwell, R.D. Evan, L.T. Ford, M.A. Morgan, C.L. Taylor, M. 1980. Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci.*, 94, 675-689.
22. Azam, F., Benckiser, G., Müller, C., Ottow, J.C.G., 2001. Release, movement and recovery of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions. *Biol. Fertil. Soils*, 34, 118-125.
23. Barneix, A.J., 2007. Physiology and biochemistry of source-regulated protein accumulation in the wheat grain. *J. Plant Physiol.*, 164, 581-590.
24. Barraclough P., Howarth, Jones, J., Lopez-Bellido, R., Parmar, S., Shepherd, C.E., Hawkesford, M.J., 2010. Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement. *Eur. J. Agron.*, 33, 1-11.
25. Barth, G., von Tucher, S., Schmidhalter, U., 2001. Influence of soil parameters on the effect of 3,4-dimethylpyrazole on phosphate as a nitrification inhibitor. *Biol. Fertil. Soils*, 34, 98-102.
26. Barth, G., von Tucher, S., Schmidhalter, U., 2008. Effectiveness of 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate as nitrification inhibitor in soil as influenced by inhibitor concentration, application form and soil matrix potential. *Pedosphere*, 18, 378-385.

27. Basso, B., Cammarano, D., Chen, D., Cafiero, G., Amato, M., Bitella, G., Rossi, R., Basso, F., 2009. Landscape position and precipitation effects on spatial variability of wheat yield and grain protein in southern Italy. *J. Agron. & Crop Sci.*, 195, 301-312.
28. Basso, B., Cammarano, D., Troccoli, A., Chen, D., Ritchie, J.T., 2010. Long-term wheat response to nitrogen in a rainfed Mediterranean environment: field data and simulation analysis. *Eur. J. Agron.*, 33, 132-138.
29. Beaudoin, N., Saad, J.K., Van Laethem, C., Machet, J.M., Maucorps, J., Mary, B., 2005. Nitrate leaching in intensive agriculture in northern France: effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 111, 292–310.
30. Berntsen, J., Thomsen, A., Schelde, K., Hansen, O.M., Knudsen, L., Broge, N., Hougaard, H., Hørfarter, R., 2006. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. *Prec. Agric.*, 7, 65-83.
31. Biddulph, T.B., Plummer, J.A., Setter, T.L., Mares, D.J., 2008. Seasonal conditions influence dormancy and preharvest sprouting tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) in the field. *Field Crop Res.*, 107, 116-128.
32. Blandino, M., Pilati, A., Reyneri, A., 2009. Effect of foliar treatments to durum wheat on flag leaf senescence, grain yield, quality and deoxynivalenol contamination in North Italy. *Field Crop Res.*, 114, 214-222.
33. Blankenau, K., Olfs, H.W., Kuhlmann, H., 2002. Strategies to improve the use efficiency of mineral fertilizer nitrogen applied to winter wheat. *J. Agron. Crop Sci.*, 188, 146-154.
34. Bly, A., Woodard, H., 2003. Foliar nitrogen application timing influence on grain yield and protein concentration of hard red winter and spring wheat. *Agron. J.*, 95, 335-338.
35. Bongiovanni, R.G., Robledo, C.W., Lambert, D.M., 2007. Economics of site specific nitrogen management for protein content in wheat. *Comp. & Electronics Agric.*, 58, 13-24.
36. Brites, C., Carillo, J.M., 2001. Influence of high molecular weight (HMW) and low molecular weight (LMW) glutenin subunits controlled by locus *Glu-1* and *Glu-3* on durum wheat quality. *Cereal Chem.*, 78, 59-63.
37. Cataldo, D.A., Haroon, M., Schrader, L.E., Youngs, V.L., 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 6, 71-80.
38. Chamberlain, N., Collins, T.H., McDermott, E.E., 1981. Alpha amylase and bread properties. *International J. of Food Sci. & Tech.*, 16, 2, 127-152.
39. Chaves, B., Opoku, A., De Neve, S., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Hofman, G., 2006. Influence of DCD and DMPP on soil N dynamics after incorporation of vegetable crop residues. *Biol. Fertil. Soils*, 43, 62-68.
40. Colnenne, C., Meynard, J.M., Reau, R., Justes, E., Merrien, A., 1998. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Ann. Bot.*, 81, 311-317.
41. Colnenne, C., Meynard, J.M., Roche, R., Reau, R., 2002. Effects of nitrogen deficiencies on autumnal growth of oilseed rape. *Eur. J. Agron.*, 17, 11-28.
42. Constantin J., Mary, B., Laurent, F., Aubrion, G., Fontaine, A., Kerveillant, P., Beaudoin, N., 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen

- fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 135, 268-278.
43. Costantin, J., Beaudoin, N., Laurent, F., Cohan, J.P., Duyme, F., Mary, B., 2011. Cumulative effects of catch crops on nitrogen uptake, leaching and net mineralization. *Plant soil*, 341, 137-154.
 44. Crutzen, P.J., Mosier, A.R., Smith, K.A., Winiwarter, W., 2007. N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7, 11191–11205.
 45. Cui, M., Sun, X.C., Di, H.J., Tan, Q.L., Zhao, C.S., Effective mitigation of nitrate leaching and nitrous oxide emissions in intensive vegetable production systems using a nitrification inhibitor, dicyandiamide. *J. Soil Sediment*, 11, 722-730.
 46. Daniel, C., Triboi, E., 2002. Changes in wheat protein aggregation during grain development: effects of temperatures and water stress. *Eur. J. Agron.*, 16, 1-12.
 47. Debaeke, P., Rouet, P., Justes, E., 2006. Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index: Application to durum wheat. *J. Plant Nutr.*, 29, 75-92.
 48. Dejoux, J-F., Recous, S., Meynard, J-M., Trinsoutrot, I., Leterme, F., 2000. The fate of nitrogen from winter-frozen rapeseed leaves: mineralization, fluxes to the environment and uptake by rapeseed crop in spring. *Plant Soil* 218, 257-272.
 49. Dejoux, J.-F., Meynard, J.-M., Reau, R., Roche, R., Saulas, P., 2003. Evaluation of environmentally-friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France. *Agron. Sustain. Dev.*, 23, 725–736.
 50. Di, H.J., Cameron, K.C., 2011. Inhibition of ammonium oxidation by a liquid formulation of 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) compared with a dicyandiamide (DCD) solution in six new Zealand grazed grassland soils. *J. Soil Sediment*, 11, 1032-1039.
 51. Díez-López, J.A., Hernaiz-Algarra, P., Aurazo-Sánchez, M., Carrasco-Martin, I., 2008. Effect of a nitrification inhibitor (DMPP) on nitrate leaching and maize yield during two growing seasons. *Spanish J. Agr. Res.*, 6, 294-303.
 52. Dobermann, A. Cassman, K. 2005. Cereal area and nitrogen use efficiency are drivers of future nitrogen fertilizer consumption. *Sci China C Life Sci*, 48, 745-758.
 53. Drury, C.F., Yang, X.M., Reynolds, W.D., McLaughlin, N.B., 2008. Nitrous oxide and carbon dioxide emissions from monoculture and rotational cropping of corn, soybean and winter wheat. *Can. J. Soil Sci.*, 88, 163-174.
 54. Edwards, N.M., Gianibelli, M.C., McCaig, T.N., Clarke, J.M., Ames, N.P., Larroque, O.R., Dexter, J.E., 2007a. Relationships between dough strength, polymeric protein quantity and composition for diverse durum wheat genotypes. *J. Cereal Sci.*, 45, 140-149.
 55. Edwards, N.M., Preston, K.R., Paulley, F.G., Gianibelli, M.C., McCaig, T.N., Clarke, J.M., Ames, N.P., Dexter, J.E., 2007b. Hearth bread baking quality of durum wheat varying in protein composition and physical dough properties. *J. Sci. Food Agric.*, 87, 2000-2011.
 56. Edwards, J.T., Arnall, D.B., Zhang, H., 2009. Nitrogen fertilization timing and source affected hard red winter wheat yield but application method does not. *Crop Management*, pubblicato l'11 maggio 2009.

- <http://www.plantmanagementnetwork.org/pub/cm/research/2009/wheat/>
57. Engel, R., Long, D., Carlson, G., 1997. *On-the-go grain protein sensing is near. Does it have a future in precision agriculture management for wheat. Better Crops*, 81, 20-23
 58. Erisman J.W., Grennfelt, P., Sutton, M., *The European perspective on nitrogen emission and deposition. Environment International*, 29, 311-325
 59. Ferrise, R., Moriondo, M., Pasqui, M., Primecero, J., Bindi, M., 2011. *Una metodologia per la previsione delle rese di frumento duro in Toscana. Atti del XL° convegno della Società Italiana di Agronomia, Teramo, 6-9 settembre 2011, 174-175.*
 60. Ferguson, R.B., Lark, R.M., Slater, G.P., 2003. *Approaches to management zone definition for use of nitrification inhibitors. Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67, 937-947
 61. Fettweis, U., Mittelstaedt, W., Scimansky, C., Führ, F., 2001. *Lysimeter experiments on the translocation of the carbon-14-labelled nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in a gleyic cambisol. Biol. Fertil. Soils*, 34, 126-130.
 62. Finney, K.F., J.W. Meyer, F.W. Smith, Fryer, H.C., 1957. *Effect of foliar spraying on Pawnee wheat with urea solutions on yield, protein content, and protein quality. Agron. J.*, 49, 341-347.
 63. Fisher, P.D., Abuzar, M., Rab, M.A., Best, F., Chandra, S., 2009. *Advances in precision agriculture in south-eastern Australia. I. A regression methodology to simulate spatial variation in cereal yields using farmers' historical paddock yields and normalized difference vegetation index. Crop & Pasture Sci.*, 60, 844-858.
 64. Flåte, N.E.S., Hollung, K., Ruud, L., Sogn, T., Faergestad, E.M., Skarpeid, H.J., Magnus, E.M., Uhlen, A.K., 2005. *Combined nitrogen and sulphur fertilisation and its effect on wheat quality and protein composition measured by SE-HPLC and proteomics. J. Cereal Sci.*, 41 (3), 357-369.
 65. Flagella, Z., Giuliani, M.G., Giuzio, L., Volpi, C., Masci, S., 2010. *Influence of water deficit on durum wheat storage protein composition and technological quality. Eur. J. Agron.*, 33, 197-207.
 66. Flintham, E. Börner, A. Worland, A.J. Gale, M.D. 1997. *Optimizing wheat grain yield: effects of Rht (gibberellin-insensitive) dwarfing genes. J. Agric. Sci.*, 128, 11-25.
 67. Flowers, M., Weisz, R., Heiniger, R., 2003. *Quantitative approaches for using color infrared photography for assessing in-season nitrogen status in winter wheat. Agron. J.*, 95, 1189-1200.
 68. Fox, G.P., Bloustein, G., Sheppard, J., 2010. *On-the-go NIT technologies to assess protein and moisture during harvest of wheat breeding trials. J. Cereal Sci.*, 51, 171-173.
 69. Foulks, M.J., Hawkesford, M.J., Barraclough, P.B., Holdsworth, P.B., Kerr, S., Kightley, S., Shewry, P.R., 2009. *Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: recent advances and future prospects. Field Crop Res.*, 114, 329-342.
 70. Franzen, D.W., Hopkins, D.H., Sweeney, M.D., Ulmer, M.K., Halvorson, A.D., 2002. *Evaluation of soil survey scale for zone development of site-specific nitrogen management. Agron. J.*, 94, 381-389

71. Freeman, K.W., Girma, K., Arnall, D.B., Mullen, R.W., Martin, K.L., Teal, R.K., Raun, W.R., 2007. By-plant prediction of corn forage biomass and nitrogen uptake at various growth stages using remote sensing and plant height. *Agron. J.*, 99, 530-536.
72. Galloway, J.N. Dentener, F.J. Capone, D.J. Boyer, E.W. Howarth, R.W. Seitzinger, S.P. Asner, G.P. Cleveland, C.C. Green, P.A. Holland, E.A. Karl, D.M. Michaels, A.F. Porter, J.H. Townsend, A.R. Vorösmarty, C.J. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70, 153–226.
73. Garrido-Lestache, E. Lopez-Bellido, R. Lopez-Bellido, L. 2004. Effect of N rate, timing and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crop Res.*, 85, 213-236.
74. Garrido-Lestache, E. Lopez-Bellido, R. Lopez-Bellido, L. 2005. Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilisation. *Eur. J. Agron.*, 23, 265-278.
75. Giardini, L., et al. 2010 “Agricoltura di precisione e conservativa”, in Giardini L. et al., 2010. *Messa a punto di modelli produttivi innovativi nelle colture estensive per una gestione ecocompatibile nell’ambito del Bacino Scolante in Laguna di Venezia. 2007-2009 Sintesi dei risultati. Veneto Agric., Legnaro, 2010.*
76. Giunta, F. Motzo, R. 2005. Grain Yield, dry matter, and nitrogen accumulation in the grains of durum wheat and spring triticale cultivars grown in a Mediterranean environment. *Aus. J. Agr. Res.*, 56, 25-32.
77. Gooding, M.J., Davies, W.P., 1992. Foliar urea fertilization of cereals: A review. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2, 209-222.
78. Gooding, M.J., Davies, W.P., 1997. *Capitolo 1. Libro: Wheat production and utilisation – System, quality and the environment, Cambridge, 1997.*
79. Gooding, M.J., Gregory, P.J., Ford, K.E., Ruske, R.E., 2007. Recovery of nitrogen from different sources following applications to winter wheat at and after anthesis. *Field Crop Res.*, 100, 143-154.
80. Gooding, M.J., Addisu, M., Uppal, R.K., Snape, G.W., Jones, H.E., 2011. Effect of wheat dwarfing genes on nitrogen-use efficiency. *J. Agric. Sci. (in press).*
81. Govaerts, B., Verhulst, N., Sayre, K.D., De Corte, P., Goudesenne, B., Litcher, K., Crossa, J., Deckers, J., Dendooven, L., 2007. Evaluating spatial within plot variability for different practices with an optical sensor? *Plant Soil*, 299, 29-42.
82. Gualandi, E. 2011. Ai prezzi attuali torna la redditività. *Terra e vita*, 52 (35), 48-51.
83. Guarda, G. Padovan, S. Delogu, G. 2004. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *Eur. J. Agron.*, 21, 181-192.
84. Henke, J., Sieling, K., Sauermann, W., Kage, H., 2008. Analysing soil and canopy factors affecting optimum nitrogen fertilization rates of oilseed rape (*Brassica napus*). *J. Agric. Sci.*, 147, 1-8.
85. Hirel, B., Le Gouis, J., Ney, B., Gallais, A., 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *J. Exp. Bot.*, 58, 2369-2387.
86. Holland, K.H., Schepers, J.S., 2010. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. *Agron. J.*, 102, 1415-1524.

87. Justes E., Mary, B., Meynard, J-M., Machet J-M., Thelier-Huches, L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann. Bot.*, 74, 397-407.
88. Jamieson, P.D., Semenov, M.A., 2000. Modelling nitrogen uptake and redistribution in wheat. *Field Crop Res.*, 68, 21–29.
89. Justes, E., Mary, B., Nicolardot, B., 1999. Comparing the effectiveness of radish cover crop, oilseed rape volunteers and oilseed rape residues incorporation for reducing nitrate leaching. *Nutr. Cycl. Agriecosys.*, 55, 207–220.
90. Khan, P., Memon, M.Y., Imtiaz, M., Aslam, M., 2009. Response of wheat to foliar and soil application of urea at different growth stages. *Pak. J. Bot.*, 41, 1197-1204.
91. Klein, C.A.M., Cameron, K.C., Di, H.J., Rys, G., Sherlock, R.R., 2011. Repeated annual use of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) does not alter its effectiveness in reducing N₂O emissions from cow urine. *Animal Feed Sci. Technol.*, 166-167, 480-491.
92. Kristensen, H.L., Thorup-Kristensen, K., 2004a. Root growth and nitrate uptake of three different catch crops in deep soil layers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 529-537.
93. Kristensen, H.L., Thorup-Kristensen, K., 2004b. Uptake of ¹⁵N labeled nitrate by root systems of sweet corn, carrot and white cabbage from 0.2–2.5 meters depth. *Plant Soil*, 265, 93-100.
94. Kunkel, R., Kreins, P, Tetzlaff, B., Wendland, F., 2010. Forecasting the effects of EU policy measures on the nitrate pollution of groundwater and surface waters. *J. Environ. Sci.*, 22, 872-877.
95. Kyaw, T., Ferguson, R.B. Adamchuk, V.I., Marx, D.B., Tarkalson, D.D. McCallister, D.L., 2008. Delineating site-specific management zones for pH-induced iron chlorosis. *Precision Agric.*, 9, 71–84.
96. Lal, R., 2011. Managing soils for a warming earth in a food-insecure and energy-starved world. *J. Plant Nutr Soil Sci.*, 173, 4-15.
97. Le Bail, M., Jeuffroy H-M., Bouchard, C., Barbottin, A., 2005. It is possible to forecast the grain quality and yield of different varieties of winter wheat from Minolta SPAD meter measurements? *Eur. J. Agron.*, 23, 379-391.
98. Lemaire, G., Jeuffroy, H.M., Gastal, F., 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage Theory and practices for crop N management. *Eur. J. Agron.*, 28, 614-624.
99. Lhada, J.K., Pathak, H., Krupnik, T.J., Six, J., van Kessel, C., 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Adv. Agron.*, 87, 85-156.
100. Li, F., Gnyp, M.L., Jia, LL., Miao, Y., Yu, Z., Koppe, W., Bareth, G., Chen, X., Zhang, F., 2008. Estimating N status of winter wheat using a handheld spectrometer in the North China Plain. *Field Crop Res.*, 106, 77-85.
101. Liao, M., Palta, J.A., Finney, I.R.P, 2006. Root characteristics of vigorous wheat improve early nitrogen uptake. *Aus. J. Agric. Res.*, 57, 1097–1107.
102. Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I.O, Asner, G.P., 2004. Relative importance of soil and climate variability for nitrogen management in irrigated wheat. *Field Crop Res.*, 87, 155-165.

103. Long, D.S., Engel, R.E., Carpenter, F.M., 2005. On-combine sensing and mapping of wheat protein concentration. *Crop Management*, pubblicato il 27 maggio 2005; <http://www.plantmanagementnetwork.org/cm/2005.asp>
104. Long, D.S., Engel, R.E., Siemens, M.C., 2008. Measuring grain protein concentration with in-line near infrared reflectance spectroscopy. *Agron. J.*, 100, 247-252.
105. Lopez-Bellido, L. Lopez-Bellido, R.J. Redondo, R. 2005. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crop Res.*, 94, 86-97.
106. Lopez-Bellido L. Lopez-Bellido, R.J. Lopez-Bellido, F.J. 2006. Fertilizer nitrogen efficiency in durum wheat under rainfed mediterranean conditions: effect of split application. *Agron. J.*, 98, 55-62.
107. Lopez-Bellido, R.J., Castillo, J.E., Lopez-Bellido L., 2008. Comparative response of bread and durum wheat cultivars to nitrogen fertilizer in a rainfed Mediterranean environment: soil nitrate and N uptake and efficiency. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 80, 121–130.
108. Ma, B.L., Wu, T.Y., Tremblay, N., Deen, W., McLaughlin, N.B., Morrison, M.J., Stewart, G., 2010. On-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer on ammonia volatilization. *Agron. J.*, 102, 134-144.
109. Maffei, A. 1999. Cap.8: La Nutrizione delle piante, pp 385-426. In: *Biochimica Vegetale*. Ed. Piccin N. L., Padova, 1999.
110. Makowski, D., Maltas, A., Morison, M., Reau, R., 2005. Calculating fertilizer doses for oil-seed rape using Plant Soil data. *Agron. Sustain. Dev.*, 25, 159-161.
111. Maleki, M.R., Zamiran, A., 2009. Evaluating the profitability of a soil sensor-based variable rate applicator for on-the-go phosphorus fertilization. *Int. J. Agr. Biol.*, 11, 651-658.
112. Marti, J., Bort, J., Slafer, G.A., Araus, J.L., 2007. Can wheat yield be assessed by early measurements of normalized difference vegetation index? *Ann. Appl. Biol.*, 150, 253-257.
113. Martin, M., Miceli, F. Mosca, G. Zerbi, G. 1990. Influence of nitrogen and timing of application on the yield of winter wheat varieties. *Agr. Med.*, 120, 129-137.
114. Martin M., Miceli, F., Mosca, G., Zerbi, G., 1990. Nitrogen level and time of application effect on growth of two winter wheat varieties, *Agr. Med.* 120: 281-287.
115. Martre, P., Porter, J.R., Jamieson, P.D., Triboi, E., 2003. Modeling grain nitrogen accumulation and protein composition to understand the sink/source regulations of nitrogen remobilization for wheat. *Plant Phys.*, 133, 1959-1967.
116. Mengel, K., Hütsch, B., Kane, Y., 2006. Nitrogen fertilizer application rates on cereal crops according to available mineral and organic soil nitrogen. *Eur. J. Agron.*, 24, 343-348.
117. Miceli, F., Martin M., Zerbi, G., 1992. Yield, quality and nitrogen efficiency in winter wheat fertilized with increasing N levels at different times. *J. Agron. & Crop Sci.* 168: 337-344.
118. Miralles, D.J., Ferro, B.C., Slafer, G., 2001. Developmental responses to sowing date in wheat, barley and rapeseed. *Field Crop Res.*, 71, 211-223

119. Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A., 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.*, 74, 562–564.
120. O'Hallaran, I.P., von Bertoldi, A.P., Peterson, S., 2004. Spatial variability of barley (*Hordeum Vulgare*) and corn (*Zea mays L.*) yields, yield response to fertilizer N and soil N test levels. *Can. J. Soil Sci.*, 84, 307-316.
121. Ortiz-Monasterio, J. I. Peña, R.J. Sayre, K.D. Rajaram, S. 1997. CIMMYT's genetic progress in wheat grain quality under four nitrogen rates. *Crop Sci.*, 37, 3, 892-898.
122. Osborne, S., 2007. Determining nitrogen nutrition and yield of canola through existing remote sensing technology. *Agric. J.*, 2, 180-184.
123. Pasda, G., Hähndel, R., Zerulla, W., 2001. Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitors DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops. *Biol. Fertil. Soils*, 34, 85-97.
124. Petersen, S.O., Regina, K., Pöllinger, A., Rigler, E., Valli, L., Yamulki, S., Esala, M., Fabbri, C., Syväsalo, E., Vinther, F.P., 2006. Nitrous oxide emissions from organic and conventional crop rotations in five European countries. *Agric. Ecosys. Environ.*, 112, 200–206
125. Pizzolongo, G., Bilotto, M., Zaccardelli, M., Perrone, D., Riccardi, R., Morra, L., 2011. Efficacia dei concimi azotati a lento effetto in orticoltura di pieno campo. *Atti del XL° convegno della Società Italiana di Agronomia, Teramo, 6-9 settembre 2011*, 198-199.
126. Poblaciones, M.J., López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., 2009. Field estimation of technological bread-making quality in wheat. *Field Crop Res.*, 112, 253-259.
127. Rahimzadeh, M., Kashani, A., Zare-Feizabadi, A., reza Koocheki, A., Nassiri-Mahallati, M., 2010. *Australian J. Crop Sci.*, 4, 363-368.
128. Rathke, G.-W., Diepenbrock, W., 2006. Energy balance of winter oilseed rape (*Brassica napus L.*) cropping as related to nitrogen supply and preceding crop. *Eur. J. Agron.*, 24, 35-44.
129. Rathke, G.-W., Beherens, T., Diepenbrock, W., 2006. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus L.*): A review. *Agric. Ecosys. Environ.* 117, 80–108.
130. Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.B., Stone, M.L., Lukina, E.V., 2001. in-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron. J.*, 93, 131-138.
131. Raun, W.R. Solie, J.B. Johnson, G.V. Stone, M.L. Mullen, R.W. Freeman, K.W. Thomason, W.E. Lukina, E.V. 2002. improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron. J.*, 94, 815-820.
132. Rodrigues, M.A., Santos, H., Ruivo, S., Arrobas, M., 2010. Slow-release N fertilisers are not an alternative to urea for fertilisation of autumn-grown tall cabbage. *Eur. J. Agron.*, 32, 137-143.
133. Roll R (1999) Zur Toxikologie von DMPP. In: BASF AG (ed) *Düngen mit einer neuen Technologie Innovation in der Düngung ENTEC*. *Atti di un colloquio scientifico 17–18 Maggio 1999*, BASF Agricultural Center Limburgerhof. BASF, Limburgerhof, 39–44.

134. Rosenberger, A., Kaul, H-P., Senn, H., Aufhammer, W., 2001. Improving the energy balance of bioethanol production from winter cereals: the effect of crop production intensity. *Appl. Energ.*, 68, 51-67.
135. Ruser, R., Flessa, H., Schilling, R., Beese, F., Munch, J.C., 2001. Effect of crop-specific field management and N fertilization on N₂O emissions from a fine-loamy soil. *Nutr. Cycl. Agriecosys.*, 59, 177–191.
136. Ruske, R.E., Gooding, M.J., Jones, S.A., 2003a. The effects of adding picoxystrobin, azoxystrobin and nitrogen to a triazole programme on disease control, flag leaf senescence, yield and grain quality of winter wheat
137. Ruske, R.E., Gooding, M.J., Dobraszczy, B.J., 2003b. Effects of triazole and strobilurin fungicide programmes, with and without late-season nitrogen fertiliser, on the baking quality of Malacca winter wheat. *J. Cer. Sci.*, 40, 1-8.
138. Saaman, J., El-Khayat, G.H., Manthey, F.A., Fuller, M.P., Brennan, C.S., 2006. Durum wheat quality: II. The relationship of kernel physicochemical composition to semolina quality and end product utilization. *Int. J. Food Sci. Tech.*, 41, 47-55.
139. Serna, M.D., Bañuls, J., Quiñones, A., Primo-Millo, E., Legaz, F., 2000. Evaluation of 3,4-dimethylpyrazole phosphate as a nitrification inhibitor in a Citrus-cultivated soil. *Biol. Fertil. Soils*, 32, 41-46.
140. Serrano, L., Filella I., Peñuelas, J., 2000. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Sci.*, 40, 723-731.
141. Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R., Schepers, J.S., 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Comput. Electron. Agr.*, 61, 51-62.
142. Shearman, V.J. Sylvester Bradley, R. Scott, K. Foulkes, M.J. 2005. Crop physiology & metabolism. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. *Crop Sci.*, 45, 175-185.
143. Shewry, P.R., Tatham, A.S., 1997. Disulphide bonds in wheat gluten proteins. *J. Cereal Sci.*, 25 (3), 207-227.
144. Sieling, K., Kage, H., 2006. N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape – winter wheat – winter barley rotation. *Agric. Ecosys. Environ.*, 115, 261–269
145. Sieling, K., Kage, H., 2008. The potential of semi-dwarf oilseed rape genotypes to reduce the risk of N leaching. *J. Agric. Sci.*, 146, 77-84.
146. Sieling, K., Kage, H., 2010. Efficient N management using winter oilseed rape. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 30, 271-279.
147. Sissons, M.J., Ames, N.P., Hare, N.A., Clarke, J.M., 2005. Relationship between glutenin subunit composition and gluten strength measurements in durum wheat. *J. Sci. Food Agric.*, 85, 2445-2452.
148. Smeets, E.M.W., Bouwman, L.F., Stehfest, E., van Vuuren, D.P., Posthuma, A., 2009. Contribution of N₂O to the greenhouse gas balance of first-generation biofuels. *Glob. Change Biol.*, 15, 1–23.
149. Stanier, R.Y. Ingraham, J.L. Wheelis, M.L. Painter, P.R. 1988. Capitolo 27.6: Il ciclo dell'azoto. Libro: *Il mondo dei microrganismi*. Titolo originale: *The Microbial World*, fifth edition. Edizione originale: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ – USA, 1988; Edizione Italiana: Zanichelli, Bologna, 1988.
150. Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Hann, C., 2006. Chap. 2.3: “Geography of livestock resources”. Pub.: “Livestock’s long

- shadow environmental issues and options. Ed. "Food and Agriculture Organization of the United Nations", Roma, 2006.
151. Stewart, C., 2002. Site-specific durum wheat quality and its relationship to soil properties in a single field in northern New South Wales. *Prec. Agr.*, 3, 155-168.
 152. Strenghetto, I., 2007. Environmental and agronomic aspects of development of production chain "Wheat Quality". OT: Aspetti agronomici ed ambientali dello sviluppo della filiera "Grano Qualità". PhD Thesis. University of Padua.
 153. Sutton, M.A., Place, C.J., Eager, M., Fowler, D., Smith, R.I., 1995. Assessment of the magnitude of ammonia emissions in the United Kingdom. *Atmos. Environ.*, 29, 1393-1411.
 154. Sylvester-Bradley, R. Kindred, D.R. 2009. Analysing nitrogen response of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. *J. Exp. Bot.*, 60 (7), 1939-1951.
 155. Taylor, J., Whelan, B., Thylen, L., Gilbertsson, M., Hassall, J., 2005. Monitoring wheat protein content on-harvester: Australian experience. *Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture*, Wagening Academic Publishers, the Netherlands.
 156. Tea, I., Genter, T., Violleau, F., Kleiber, D., 2005. Changes in the glutathione thiol-sulfide status in wheat grain by foliar fertilization: consequences for the rheological properties of dough. *J. Cereal Sci.*, 41 (3) , 305-315.
 157. Thorup-Kristensen, K., Salmerón Cortasa, M, Loges, R., 2009. Winter wheat roots grow twice as deep as spring wheat roots, is this important for N uptake and N leaching losses? *Plant Soil*, 322, 101-114.
 158. Toderi, G. D'Antuono, L.F. 2000. Capitolo: 12 Frumento (*Triticum sp.pl*), pp 75-78. Libro: *Coltivazioni erbacee, cereali e proteaginose – Terza edizione*. Pàtron Editore, Bologna, 2000.
 159. Tremblay, N., Wang, Z., Ma, B-L., Belec, C., Vigneault, P., 2009. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. *Prec. Agric.*, 10, 145-161.
 160. Triboi E. Triboi-Blondel A.M. 2002. Productivity and grain or seed composition: a new approach to an old problem-invited paper. *Eur. J. Agron.*, 2002, 16, 163–186.
 161. Triboi, E., Martre, P., Girousse, C., Ravel, C., Triboi-Blondel A.M., 2002. Unravelling environmental and genetic relationships between grain yield and nitrogen concentration in wheat. *Europ. J. Agron.* 25, 108-118.
 162. Triboi, E., Martre, P., Triboi-Blondel A.M., 2003. Environmentally-induced changes in protein composition in developing grains of wheat are related to changes in total protein content. *J. Exp. Botany*, 54, 1731-1742.
 163. Van Paemel, H., Reau, R., 1998. Fertilisation Azotée du colza Prendre en compte l'absorption automnale. *Perspectives Agricoles*, 233, 75-79.
 164. Varga, B., Svečnjak, Z., 2006. The effect of late-season urea spraying on grain yield and quality of winter wheat cultivars under low and high basal nitrogen fertilization. *Field Crop Res.*, 96, 125-132.
 165. Venturi, P., Venturi G., 2003. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass Bioenerg.*, 25, 235-255.
 166. Verhulst, N., Govaerts, B., Sayre; K.D., Deckers, J., François, I.M., Dendooven, L., 2008. Using NDVI as soil quality analysis to assess influence of agronomic

- management on within-plot spatial variability and factors limiting production. *Plant soils*, 317, 41-59.
167. Villar, J.M., Guillaumes, E., 2010. Use of nitrification inhibitor DMPP to improve nitrogen recovery in irrigated wheat on a calcareous soil. *Spanish J. Agr. Res.*, 8, 1218-1230.
 168. Visioli G., Gullì M., Marmioli N., Loddo S., Boschiero M., Mosca G., 2011. Northern Italy cultivated durum wheat: low input nitrogen fertilization coupled by increased grain nutritional value. *Atti II Conv. COST*, 23-26 nov. 2011, Venezia.
 169. Vos, J., van der Putten, P.E.L., 2001. Field observations on nitrogen catch crops. III. Transfer of nitrogen to the succeeding main crop. *Plant Soil*, 236, 263-273.
 170. Wang, W.J., Dalal, R.C., 2006. Carbon inventory for a cereal cropping system under contrasting tillage, nitrogen fertilisation and stubble management practices. *Soil Till. Res.*, 91, 68-74.
 171. Wehrmann, J., Scharpf, H.C., 1979. Der mineralstickstoff gehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoff düngerbedarf (Nmin- methode). *Plant Soil* 52, 109-126.
 172. Whelan, B.M., Taylor, J.A., Hassall, J.A., 2009. Site-specific variation in wheat grain protein concentration and wheat grain yield measured on an Australian farm using harvester-mounted on-the-go sensors. *Crop & Pasture Sci.*, 60, 808-817.
 173. Williams, A.G., Audsley, E., Sandars, D.L., 2006. Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities. *Final Report to Defra on Project IS0205*. Cranfield University (UK).
 174. Winterman, J.F., De Mots, A., 1965. Spectrophotometric characteristics of chlorophylls a and b and their pheophytins in ethanol. *Biochemical Biophysical Acta*, 109, 448-453
 175. Woods, J., Williams, A., Hughes, J.K., Black, M., Murphy, R., 2010. Energy and the food system. *Philos. T. Roy. Soc. B*, 365, 2991-3006.
 176. Woolfolk, C.W. Raun, W.R. Johnson, G.V. Thomason, W.E. Mullen, R.W. Wynn, K.J. Freeman, K.W. 2002. Influence of late-season foliar nitrogen applications on yield and grain nitrogen in winter wheat. *Agron. J.*, 94, 429-434.
 177. Yu, Q.-G., Chen, Y.-X., Ye, X.-Z., Tian, G.-M., Zhang, Z.-J., 2007. Influence of the DMPP (3,4-dimethyl pyrazole phosphate) on nitrogen transformation and leaching in multi-layer soil columns. *Chemosph.*, 69, 825-831.
 178. Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.*, 14, 415-421.
 179. Zanetti F., Mosca G., Loddo S., 2008. Colza, remunerativo ma da specialisti. *Informatore Agrario*, 33, 31-36..
 180. Zhao, F.J., Salmon, S.E., Withers, P.J.A., Monaghan, J.M., Evans, E.J., Shewry, P.R., McGrath, S.P., 1999. Variation in the breadmaking quality and rheological properties of wheat in relation to sulphur nutrition under field conditions. *J. Cereal Sci.*, 30 (1), 19-31.
 181. Zebarth, B.J., Rochette, P., Burton, D.L., 2008. N₂O emissions from spring barley production as influenced by fertilizer nitrogen rate. *Can. J. Soil Sci.*, 88, 197-205.

182. Zerulla, W., Barth, T., Dressel, J., Erhardt, K., Horchler von Locquenghien, K., Pasda, G., Rädle, M., Wissermeier, A.H., 2001. 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) – a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. *Biol. Fertil. Soils*, 34, 79-84.
183. Zillmann, E., Graeff, S., Link, J., Batchelor, W.D., Claupein, W., 2006. Assessment of cereal nitrogen requirements derived by optical on-the-go sensors on heterogeneous soils. *Agron. J.*, 98, 682-690.

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento va a tutte le persone che hanno reso possibile la stesura di questa tesi di dottorato e il lavoro di ricerca nei 3 anni. Ciascuno ha contribuito a suo modo alla mia formazione tecnica, scientifica, professionale e umana.

- *Ringrazio il prof. **Giuliano Mosca**, che nel suo ruolo di supervisore ha seguito i miei progetti. È sempre riuscito a indirizzare i miei entusiasmi con le sue indicazioni, lasciandomi sempre massima autonomia nelle decisioni. Ho apprezzato il rapporto che si è instaurato in questi 3 anni e ne porterò un ottimo ricordo anche sul piano umano.*
- *Ringrazio anche i professori **Berti, Vamerali e Morari**, che nelle singole sperimentazioni hanno potuto consigliarmi e aiutarmi nello svolgimento del mio lavoro.*
- *Thanks to professor **Mike J. Gooding**, who hosted me in his research group during my experience in Reading. I have to thank also all his staff (Richard, Alistar, Simon, Bridget, Hanna and many others) that made possible all my experience in Reading.*
- *Ringrazio i tecnici dell'Azienda Agraria Sperimentale **Andrea e Pierluigi**, con cui mi sono dovuto spesso confrontare per lo svolgimento delle prove. Grazie anche ad **Adriano** e tutto il personale della "Lucio Toniolo".*
- *Grazie ai tecnici di laboratorio **Vittorio e Luciano** per tutte le analisi di questa tesi, e dai quali ho potuto imparare i rudimenti delle tecniche analitiche.*

Sento di dover ringraziare tutte le persone che hanno condiviso con me i momenti più sereni e quelli più difficili in questi 3 anni. Un grazie va a tutti coloro che mi sono sempre stati vicini e mi hanno insegnato tante cose che non si apprendono con gli studi.

- *Grazie prima di tutto ai miei genitori **Felice e Aquilina**, che mi hanno sempre sostenuto e hanno sempre rappresentato per me un porto sicuro a cui ritornare. Grazie a mio papà, per essermi sempre stato d'esempio e aver cercato di educarmi alla difficile arte della tenacia e del non darsi mai per vinto. Grazie a mia mamma, per avermi sempre ascoltato e insegnato a prendere ogni mia scelta ragionando con serenità.*
- *Ringrazio la mia ragazza **Chiara**, che mi ha svelato che il futuro è di chi crede nella bellezza dei propri sogni: guardando a lei ho imparato che la conquista della felicità è possibile, ma è fatta di tanti sforzi quotidiani per costruire qualcosa di grande. La ringrazio anche per avermi "marcato stretto", dandomi sempre sicurezza e facendomi sempre sentire importante.*
- *Grazie a mia sorella **Laura**, suo marito **Wayne** e al piccolo **Alexander**, per avermi sempre dato un motivo per cui correre a casa nei mesi estivi. Un grazie a mia sorella per tutto il sostegno che mi ha dato nonostante le tante miglia di oceano che ci separano.*

- *Grazie a **Pino, Angelisa, Dirce e Norma**, per avermi fatto sentire il calore di una famiglia, in questi 3 anni in cui sono spesso dovuto stare lontano da casa.*
- *Grazie a **Enrico**, molto più di un collega: un vero amico. Credo che i nostri frequenti confronti sulla passerella, o in campo tra le parcelle, siano serviti a entrambi per migliorarci sul piano professionale e guardare a tutto con più realismo!*
- *Grazie a **Federica, Gianluca, Giuseppe, Jacopo Carlo, Marianna, Martina, Mohamed e Paola**, per aver condiviso con me il tempo dedicato al lavoro e i momenti di relax.*
- *Thanks to **Michael, Robert, Chris, Ziheng, Ilmar and Sheik**, who shared with me a roof and many experiences during my 7 months in UK. You all helped me to improve my English and made easier and happier my staying in Reading.*
- *Grazie a tutti gli amici di Marcon: **Fabio, Carlo, Alessandro, Andrea, Marco, Niccolò, Maddalena, Valerio, Celeste, Marco** e tanti altri. Per essermi stati tutti vicini e avermi aiutato a svagarmi quando il lavoro in Università mi dava tanti pensieri.*
- *Grazie a **Don Claudio** che ora mi guarda da lassù, ed è sempre stato una guida spirituale.*

Allegato 1: questionario distribuito alle aziende per il progetto MI.QU.CE.



Misura 124 “Cooperazione per lo sviluppo di nuovi prodotti processi e tecnologie nel settore agricolo, alimentare e forestale, attuata tramite il PIF Agroalimentare”.

Progetto Mi.Qu.Ce. (Miglioramento Qualità Cereali)

Questionario

- 1)
 - a. Nome Azienda _____
 - b. Comune _____ Prov _____
 - c. Superficie aziendale: _____ ha (solo seminativi)
 - d. Superficie mediamente destinata a frumento: _____ ha
 - e. Superficie mediamente destinata a mais (da granella) _____ ha

- 2) **TERRENO:** ove disponibili allegare al questionario fotocopia delle analisi dei terreni
 - a. Tessitura (barrare l'opzione):
 medio impasto sabbioso argilloso limoso torboso
 franco limoso franco sabbioso franco argilloso altro (specificare) _____
 - b. Contenuto in sostanza organica: _____ %
 - c. pH _____



3) **AVVICENDAMENTO COLTURALE** (scegliere almeno una delle 3 opzioni a, b, c)

a. Indicare rotazione tipo se praticata. Durata _____ anni

1° anno _____

2° anno _____

3° anno _____

4° anno _____

5° anno _____

b. nel caso non si pratici una rotazione indicare la superficie destinata alle diverse colture negli ultimi 3 anni

Frumento _____ % Mais _____ %

_____ % _____ % _____ %

c. La coltura che normalmente precede il frumento è _____

La coltura che normalmente precede il mais è _____



4) **PREPARAZIONE DEL TERRENO** (lavorazioni)

OPERAZIONE	Tipo di attrezzo	Profondità (cm)	Attrezzatura di proprietà o ricorso a terzi?
1.			
2.			
3.			
4.			

5) **SOSTANZA ORGANICA**

Vi sono apporti di sostanza organica prima della semina? Se sì, segnalare il tipo di sostanza organica (liquame, letame, pollina, altro) apportata, l'origine (bovino, suino, altro) e la quantità

[SI]

[NO]

Tipo di sostanza organica	Quantità per ettaro	Unità di misura (Barrare l'opzione)
		(m ³) (ton) (qb)
		(m ³) (ton) (qb)



<p>6) SEMINA a) Varietà impiegate</p> <p>_____ ditta _____ _____ ditta _____</p> <p>b) Data _____ c) Dose di seme _____ kg / ha</p> <p>d) Tipo di seminatrice <input type="checkbox"/> meccanica <input type="checkbox"/> pneumatica <input type="checkbox"/> mecc. da sodo <input type="checkbox"/> pneum. da sodo <input type="checkbox"/> altro _____</p> <p>7) CONCIMAZIONI a. Presemina, indicare le dosi per i nutrienti _____ N _____ P₂O₅ _____ K₂O</p> <p>In alternativa indicare tipo di concime (semplice o composto) e quantità distribuita in presemina</p> <p>Concime _____ dose _____ qli / ha Concime _____ dose _____ qli / ha</p>	<p>b. Concimazione di copertura numero interventi di concimazione azotata di copertura _____</p> <p>Specificare tipo di concime, quantità distribuita, data di intervento. Nel caso il concime sia a LENTA CESSIONE specificarlo! Nel caso ci siano APPLICAZIONI FOGLIARI di concime specificare!</p> <p>1° Data di applicazione o stadio di sviluppo _____ Tipo di concime _____ contenuto di azoto _____ % Dose di N distribuita _____ kg / ha In alternativa dose di concime distribuita _____ kg / ha</p> <p>2° Data di applicazione o stadio di sviluppo _____ Tipo di concime _____ contenuto di azoto _____ % Dose di N distribuita _____ kg / ha In alternativa dose di concime distribuita _____ kg / ha</p> <p>3° Data di applicazione o stadio di sviluppo _____ Tipo di concime _____ contenuto di azoto _____ % Dose di N distribuita _____ kg / ha In alternativa dose di concime distribuita _____ kg / ha</p>
--	--



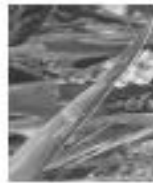
**8 PRINCIPALI AVVERSITA'
8a. SEGNALARE LE MALATTIE RICORRENTI**



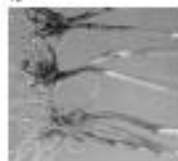
Oidio



Septoria



Mal del piede



Ruggini



Fusariosi



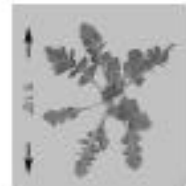
virosi



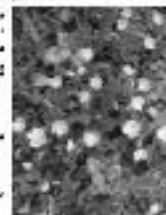
altro _____

8b. SEGNALARE LE INFESTANTI PIÙ COMUNI

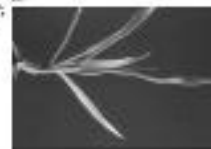
paparero



veronica
(occhi della Madonna)



avena
selvatica



capsella
(borsa del pastore)



canomilla



poa



stellaria
(centocchi)



altro (specificare)



8. SEGNALARE PRINCIPALI PARASSITI ANIMALI



afidi



cimice

altro _____

8d. Numero trattamenti diserbanti _____; fungicidi _____; erbicidi _____.

Data o periodo	TIPO ENG=enzimicida FUNG=fungicida ERB=erbicida	Principio attivo o nome commerciale. Specificare	Dose ad ettaro (kg o l/ha) Volume di applicazione (dl/ha)



9. RESE

a. Media umidità alla raccolta _____ %

b. resa in seme

Resa media ultima annata _____ q/ha con umidità _____ %

Resa media ultimi 5 anni _____ q/ha con umidità del _____ %

b. Contenuto in proteina del seme

Proteina ultima annata _____ % su base umidità _____ %

Proteina ultimi 5 anni _____ % su base umidità _____ %

Allegato 2: itinerario agronomico grano tenero MI.QU.CE. 2009-2010



Misura 124 “Cooperazione per lo sviluppo di nuovi prodotti processi e tecnologie nel settore agricolo, alimentare e forestale, attuata tramite il PIF Agroalimentare”.

Progetto Mi.Qu.Ce. (Miglioramento Qualità Cereali)

FRUMENTO TENERO: ITINERARIO TECNICO DI COLTIVAZIONE

- **LAVORAZIONI:**

Aratura (35-40 cm)
Erpicatura (10-15 cm)

oppure

Discatura (20-25 cm)
Estirpatura (10-15 cm)
Erpicatura (10-15 cm)

- **CONCIMAZIONE DI PRE-SEMINA**

Fornire N – P₂O₅ – K₂O in ragione di 30-90-90 kg ha⁻¹.
Esempio: 400 kg ha⁻¹ di concimi composto ternario 8-24-24.

Nel caso di apporto di ammendanti organici fornire con la distribuzione di fertilizzante chimico l'eventuale dose di nutriente mancante.

Si riportano i seguenti valori indicativi per stimare l'apporto di nutrienti minerali con diversi tipi di sostanza organica

1 tonnellata di let. bovino (tal quale).	N – P ₂ O ₅ – K ₂ O	5 - 2,5 - 7	kg ha ⁻¹
1 tonnellata di liq. bovino (tal quale)	N – P ₂ O ₅ – K ₂ O	4 - 3,5 - 4	kg ha ⁻¹
1 tonnellata di liq. suino (tal quale)	N – P ₂ O ₅ – K ₂ O	2,5 - 1,5 - 2,5	kg ha ⁻¹
1 tonnellata di pollina (tal quale)	N – P ₂ O ₅ – K ₂ O	3 - 2 - 1,5	kg ha ⁻¹



- **SEMINA**

Varietà:	AUBUSSON e KALANGO
Epoca di semina	Tra l'ultima decade di Ottobre e la prima decade di Novembre.
Interfila	12 cm
Dose di seme	Per le semine entro il periodo ottimale sopra indicato si suggeriscono 350 cariossidi m ⁻² . (per un peso dei mille semi pari a 45 g la dose equivale a 160 kg ha di semente). In caso di semine tardive (dalla seconda decade di Novembre in poi, si soffre di aumentare la densità a 450 cariossidi m ⁻² (equivalenti a 200 kg ha di semente).
Seminatrice	Pneumatica da frumento (preferibile)

- **DISERBO DI PRE-EMERGENZA**

Non è necessario effettuare un trattamento in tale fase della coltura. A seconda della competitività della coltura contro le infestanti, si può prevenire un intervento erbicida alla ripresa vegetativa.

In caso di precoci e forti infestazioni di graminacee microterme (alopecurus e avena spontanea) o brassicaceae, si può prevedere un **intervento erbicida autunnale** ad ampio spettro, allo scopo di contenere la flora infestante. Ricordando sempre che l'intervento precoce è da effettuarsi **solo in caso di infestazioni molto intense**, si suggerisce l'utilizzo della miscela dei prodotti LOGRAN (37 g ha⁻¹, specifico per le infestanti a foglia larga) e Topik 240 EC (0,25 l ha⁻¹) + Etravon (1 l ha⁻¹). Costo indicativo del trattamento 65 € per ha.

- **CONCIMAZIONE DI COPERTURA**

Due tesi a confronto:

Lenta cessione: 120 kg ha⁻¹ di azoto alla ripresa vegetativa (pieno accostamento) con ENTEC 46 (*K+S Nitrogen*); urea additivata con inibitore della nitrificazione (3,4-DMPP).

Pronta cessione: 45 kg ha⁻¹ di azoto alla ripresa vegetativa (pieno accostamento) in forma di nitrato ammonico, + 68 kg ha⁻¹ di azoto in piena levata, sottoforma di urea.

In **fioritura** è previsto un intervento di concimazione fogliare con soluzione liquida di urea e nitrato ammonico. Dose indicativa 7-8 kg ha⁻¹ di azoto.