



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

## DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE AGRARIE E AMBIENTALI

CICLO XXVII

COORDINATORE Prof. Mancuso Stefano

“Applicazione di tecniche di agricoltura di precisione  
e indicatori ambientali per la valutazione della  
sostenibilità della produzione del frumento duro in  
Val d’Orcia”

Settore Scientifico Disciplinare AGR/02

**Dottorando**

Dott. Guasconi Federico

**Tutore**

Prof. Orlandini Simone

---

(firma)

---

(firma)

**Coordinatore**

Prof. Mancuso Stefano

---

(firma)

Anni 2012/2014

## **RIASSUNTO**

Lo studio ha analizzato e valutato la qualità e la sostenibilità del frumento duro (*Triticum durum* Desf., *Triticum turgidum* L. subsp. *Durum*) coltivato in Val d'Orcia, con l'utilizzo dell'integrazione di tecniche diverse, quali il telerilevamento, la modellistica e l'analisi del CF (Carbon Footprint) e altri indicatori ambientali attraverso la metodologia LCA (Life Cycle Assessment), i cui risultati sono stati confrontati con i dati rilevati tramite monitoraggio a terra ed analisi di laboratorio.

In particolare, per valutare la sostenibilità della produzione di frumento duro, il lavoro ha scelto di prendere in considerazione l'aspetto riguardante l'importanza della gestione della concimazione azotata. Questa risulta fondamentale nello svolgere un ruolo chiave sia per quanto riguarda l'aspetto qualitativo nella produzione di frumento duro, che, d'altro canto, per ciò che riguarda l'impatto ambientale all'interno dell'agroecosistema.

Per realizzare questa analisi, lo studio si è avvalso, inoltre, delle più moderne tecniche di agricoltura di precisione, che sono risultate di grande aiuto specialmente sotto l'aspetto tecnico, permettendo di effettuare analisi georeferenziate delle variabili biofisiche del frumento duro. Le tecniche utilizzate sono state il monitoraggio tramite telerilevamento da piattaforma satellitare, abbinato ad un modello di crescita. In un primo momento sono state analizzate le relazioni tra le informazioni da immagini telerilevate e i campionamenti effettuati in campo, trovando le correlazioni esistenti. Successivamente, lo studio ha realizzato un semplice modello di crescita colturale, mirato ad individuare la resa e la quantità di azoto totale al raccolto e durante tutto il periodo di crescita.

Infine, la ricerca ha valutato tramite l'utilizzo della metodologia LCA l'analisi della sostenibilità ambientale della produzione attraverso tre indicatori specifici, il CF, il consumo di risorse non rinnovabili e il consumo di acqua, riferendosi a tre differenti metodologie di gestione del fertilizzante azotato.

## **SUMMARY**

The study analyzed and evaluated the quality and sustainability of durum wheat (*Triticum durum* Desf., *Triticum turgidum* L. subsp. *Duro*) grown in Val d'Orcia, with the use of the different techniques integration, such as remote sensing, modeling and CF (Carbon Footprint) analysis and other environmental indicators through the LCA (Life Cycle Assessment), whose results were compared with the data collected by monitoring ground and laboratory analysis.

In particular, to assess the durum wheat production sustainability, the work has chosen to consider the aspect of the importance of the nitrogen fertilization management. This is crucial to play a key role both as regards the qualitative aspect in the production of durum wheat, that, on the other hand, to concerns the environmental impact into agroecosystem.

For this analysis, the study has used also the most modern techniques of precision agriculture, which were of great help especially in the technical aspect, allowing you to perform georeferenced analysis of durum wheat biophysical variables. The techniques used were monitoring through remote sensing satellite platform, combined with a growth model. At first were analyzed relationship between the information from remote sensing and sampling carried out in the field, finding existing correlations. Afterwards, the study has developed a crop growth simple model, aimed at identifying the yield and the total nitrogen amount to harvesting and during the entire period of growth.

Finally, research has assessed through the use of LCA analysis of the environmental sustainability of production through three specific indicators, the CF, the consumption of non-renewable resources and water consumption, referring to three different management methods of fertilizer nitrogen.

## Sommario

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 IL FRUMENTO DURO .....	9
1.1.1 Produzione di frumento .....	11
1.2 QUALITÀ DEL FRUMENTO DURO.....	17
1.2.1 Le Proteine .....	20
1.2.2 Influenza della concimazione azotata e gestione dell'azoto .....	22
1.2.3 Influenza del clima sulla qualità della produzione di frumento duro .....	24
1.3 L'AGRICOLTURA DI PRECISIONE.....	27
1.3.1 Applicazioni di agricoltura di precisione su frumento duro .....	30
1.4 IL TELERILEVAMENTO.....	31
1.4.1 Applicazioni di telerilevamento su frumento duro.....	37
1.5 LA SOSTENIBILITÀ .....	39
1.5.1 La sostenibilità: applicazioni su frumento duro .....	41
1.6 OBIETTIVI DELLA TESI .....	44
1.7 LA VAL D'ORCIA.....	46
CAPITOLO 2 Monitoraggio del Frumento Duro e previsione precoce della resa: valutazione del potenziale uso di immagini satellitari ad alta risoluzione in una zona collinare della Toscana, Centro Italia. ....	49
2 SINTESI.....	50
2.1 INTRODUZIONE .....	51
2.2 MATERIALI E METODI .....	54
2.3 RISULTATI .....	56
2.3.1 Le relazioni tra indici di vegetazione e i parametri colturali a GS30 e GS65 .....	56
2.3.2 Le relazioni tra indici di vegetazione a GS30 e GS65 e le caratteristiche del raccolto.....	57
2.3.3 Le relazioni tra i parametri delle colture a GS30 e GS65 e le caratteristiche finali del raccolto .....	57
2.4 DISCUSSIONE .....	60
2.4.1 Le relazioni tra indici di vegetazione e parametri della coltura a GS30 e GS65 .....	60
2.4.2 Le relazioni tra indici di vegetazione a GS30 e GS65 e le caratteristiche del raccolto.....	61
2.4.3 Le relazioni tra i parametri delle colture a GS30 e GS65 e le caratteristiche finali del raccolto .....	62
2.5 CONCLUSIONI .....	64
2.6 BIBLIOGRAFIA.....	66
CAPITOLO 3 Assimilazione tramite telerilevamento di variabili biofisiche del frumento duro e creazione di un semplice modello per la gestione dell'azoto. ....	70

3 SINTESI.....	71
3.1 INTRODUZIONE .....	72
3.2 MATERIALI E METODI .....	75
3.2.1 Dati .....	75
3.2.2 Modello .....	76
3.3 RISULTATI .....	82
3.4 CONCLUSIONI .....	91
3.5 BIBLIOGRAFIA .....	92
CAPITOLO 4 La valutazione del Carbon Footprint e altri indicatori ambientali attraverso metodologia del ciclo di vita (LCA, Life cycle assessment) del frumento duro coltivato in Val d’Orcia con agricoltura di precisione .....	
4 SINTESI.....	97
4.1 INTRODUZIONE .....	98
4.2 MATERIALI E METODI .....	101
4.2.1 Sistema studiato ed unità funzionale.....	101
4.2.2. Confini del sistema .....	102
4.2.3 Qualità dei dati, tipologie di impatti e metodologie .....	103
4.2.4 Inventario: raccolta dati e modelli .....	104
4.3 ANALISI DEGLI IMPATTI POTENZIALI ED INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI .....	107
4.4 CONCLUSIONI .....	112
4.5 BIBLIOGRAFIA .....	113
CAPITOLO 5 .....	116
5 CONCLUSIONI DELLA TESI.....	116
CAPITOLO 6 .....	121
6 BIBLIOGRAFIA GENERALE .....	121

## **CAPITOLO 1 INTRODUZIONE**

Sono molte le sfide che attendono il comparto agricolo nei prossimi decenni, la crescente domanda alimentare dovuta all'incremento della popolazione, le strategie contro i cambiamenti climatici, la crescente richiesta di una giusta remunerazione nell'attività agricola, etc. sono tutti problemi a cui vanno date risposte immediate tenendo conto delle esigenze di sostenibilità delle produzioni sia a livello ambientale che economico.

A questo proposito, l'Unione Europea (UE) è tra le istituzioni più attente ai cambiamenti a livello globale. Con la strategia Europa 2020, l'UE intende perseguire una crescita che sia: intelligente, grazie agli investimenti più efficaci in materia di istruzione, ricerca e innovazione; sostenibile, grazie alla decisa scelta a favore di un'economia a basse emissioni di gas serra; e solidale, ossia focalizzata sulla creazione di posti di lavoro e la riduzione della povertà.

Sullo sfondo di queste strategie è nata la nuova Politica Agricola Comunitaria (PAC) riguardante il periodo 2014-2020. La PAC mira a politiche che tengano conto dell'importanza e della valorizzazione della sostenibilità ambientale dei processi produttivi e dei prodotti, delle potenzialità offerte dallo sviluppo tecnologico, etc.

Uno degli aspetti più importanti della nuova PAC riguarda il 30% dei pagamenti diretti destinati al Greening. Questo è finalizzato a rafforzare gli aspetti ambientali della PAC, introduce nel primo pilastro una normativa rivolta a far sì che tutti gli agricoltori dell'Unione Europea che ricevono il sostegno vadano oltre gli attuali obblighi di condizionalità e svolgano quotidianamente un'azione benefica per il clima e per l'ambiente.

Nelle linee guida della PAC, oltre a questo aspetto, rimangono molto importanti tutti quelli che si rivolgono ad una produzione di qualità, con particolare riferimento alla certificazione dei prodotti agroalimentari (D.O.C.G., D.O.C., D.O.P., I.G.P., etc.) e alla loro tracciabilità, vale a dire il processo che segue il prodotto partendo dall'inizio fino alla fine della filiera in modo che, ad ogni passaggio, vengano lasciate opportune tracce (informazioni). Da tutto ciò, si deduce che particolare attenzione è rivolta verso la gestione sostenibile del territorio e dell'agro-ecosistema, che non può prescindere dalla conoscenza delle interrelazioni presenti all'interno del sistema suolo-pianta-atmosfera, nonché dei meccanismi che stanno alla base del processo produttivo e delle possibili ripercussioni di quest'ultimo sull'ecosistema naturale.

Per una migliore e precisa gestione del territorio agricolo, uno dei metodi innovativi adottato nell'ultimo decennio è stato l'utilizzo di tecniche di agricoltura di precisione, quest'ultime abbinata ed integrata da un monitoraggio effettuato attraverso immagini spettroscopiche da satellite.

L'agricoltura di precisione è una strategia di gestione che comprende un insieme di conoscenze e tecniche al fine di consentire interventi agronomici, razionali e tempestivi, modulati in funzione delle effettive esigenze della coltura in base alle variazioni nello spazio (e nel tempo) delle caratteristiche biochimiche e fisiche del suolo, delle condizioni microclimatiche e delle pratiche colturali. Questa tecnica di gestione in ambito agricolo utilizza moderne tecnologie come la Variable Rate Technology (VRT), che permettono di incidere in maniera precisa e puntuale sulla distribuzione di trattamenti (concimazione, irrigazione, applicazioni fitosanitarie, etc.) secondo le reali esigenze della coltura, riducendo in questo modo l'impatto ambientale e i costi aziendali (Pierce e Sadler, 1997).

Il telerilevamento può essere uno strumento utile per il monitoraggio delle colture, soprattutto, può essere in grado di fornire informazioni rapide e non distruttive sullo stato di quest'ultime a scala aziendale. Nella gestione agronomica, uno dei limiti all'utilizzo di immagini telerilevate è dovuto alla loro natura, in particolare riguardante la risoluzione spaziale e temporale dell'informazione. Caratteristica importante per rendere le informazioni telerilevate realmente operative, riguarda il tempo necessario dall'ordine all'acquisizione e da questa alla restituzione dell'immagine elaborata (Beerli e Peled, 2009). Con recenti satelliti commerciali (come ad es. RapidEye, Quickbird, WorldView) il tempo trascorso dall'acquisizione alla restituzione dei dati è breve, nell'ordine di pochi giorni, e inoltre, riescono a coniugare sensori ad alta risoluzione con alta frequenza di rivisitazione (Vuolo et al., 2010).

Nell'ambito del monitoraggio, l'uso delle immagini spettrali per la gestione operativa di molte attività agricole è reso possibile attraverso lo sviluppo di modelli specifici. In letteratura si possono trovare molti esempi sulle diverse esigenze e problematiche relative alla coltivazione delle colture: alcuni di questi prendono in considerazione lo stress idrico (Altenbach, 2011), altri l'azoto (Fitzgerald et al., 2010; Cammarano et al., 2011; Eitel et al., 2011), altri ancora, il vigore e la biomassa (Filella e Penuelas, 1994; Broge e Lebanche, 2001), la previsione della resa nelle produzioni finali (Labus et al., 2002), le malattie e la protezione delle colture (Nicolas, 2004; Williams et al., 2012), il controllo delle infestanti, del suolo e dei dati meteorologici (Dalla Marta et al., 2011; Moldestad et al., 2011). Inoltre, altri studi integrano i dati di telerilevamento con modelli colturali di simulazione per

la valutazione della resa delle colture a scala regionale (Moulin et al., 1998; Mkhabela et al., 2011).

Il frumento duro, in Italia, è sempre stata una coltura importante, soprattutto per quanto riguarda la nostra alimentazione, basti pensare al prodotto tipico nazionale: la pasta. Inoltre, secondo il nuovo regolamento relativo all'Organizzazione Comune del Mercato (OCM) all'interno dell'Unione Europea, anche il grano duro è stato incluso tra i beneficiari dei contributi pubblici. Pertanto, è molto importante garantire un adeguato livello di produzione sia quantitativamente che qualitativamente.

Un aspetto importante riguardo la sostenibilità e la qualità del frumento duro è rappresentato, quindi, dalla gestione dell'azoto (N) in ambiente agricolo. Questo elemento è spesso considerato il fattore limitante più importante, dopo il deficit idrico, per la produzione di biomassa negli ecosistemi naturali. In sistemi agricoli, pratiche di fertilizzazione di azoto sono in grado di fornire un sufficiente apporto di N alle piante in modo da ottenere le prestazioni potenziali consentite dal tempo. Tuttavia, a causa della variabilità del clima, e quindi della resa potenziale, gli agricoltori, al fine di garantire che tale rendimento potenziale sia raggiunto ogni anno, danno spesso una quantità di fertilizzanti azotati superiore alla quantità strettamente necessaria per ottenere la massima resa.

Al giorno d'oggi, la conservazione del suolo, la qualità dell'acqua e dell'aria diventa un vincolo necessario per l'agricoltura, e la strategia di fertilizzazione utilizzata dagli agricoltori fino ad ora (cioè, dare molto più fertilizzante di quello effettivamente richiesto dalle esigenze vegeto-produttive della coltura) non può essere più usata. Ipotizzando un continuo aumento del prezzo dell'energia, i fertilizzanti azotati saranno sempre più costosi. Inoltre, il costo del fertilizzante azotato deve essere considerato in termini di CO<sub>2</sub> equivalente rilasciate nell'atmosfera da fabbriche di fertilizzanti, e dovrebbero essere incluso anche le emissioni di N<sub>2</sub>O prodotte dall'utilizzo dei concimi nella coltivazione delle colture, questo anche in considerazione del riscaldamento globale. Come già affermato, in Europa, con la nuova PAC, la massima redditività degli agricoltori non sempre corrisponde alla massima resa e l'obiettivo di quest'ultimi in materia di produzione potrebbe essere inferiore al potenziale.

La corretta gestione dell'azoto è una delle principali sfide dell'agricoltura moderna sia in ambito di produzione agricola che di sostenibilità ambientale. Infatti, le applicazioni di fertilizzanti azotati in eccesso rispetto alle esigenze delle colture portano ad un inquinamento ambientale, come la lisciviazione dei nitrati (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e le emissioni di gas di azoto (N<sub>2</sub>O) (Basso e Ritchie, 2005; Robertson et al., 2000). Detto questo, è essenziale per determinare la risposta della pianta alla



fertilizzazione azotata conoscere l'effettiva richiesta di azoto per poter sviluppare pratiche razionali per un utilizzo più efficiente di N, al fine di migliorare la gestione delle applicazioni di azoto (tasso azoto e la sua tempistica) che possono portare alle massime prestazioni e minori rischi ambientali. Per ridurre queste perdite il modo migliore è quello di dare solamente la quantità di azoto necessaria per raggiungere l'obiettivo finale della produzione attesa. Oggi, dunque, la massimizzazione della fertilizzazione azotata minerale è volta ad aumentare l'efficienza dell'elemento azoto, che risulta essere una questione fondamentale e uno degli obiettivi della ricerca applicata nei sistemi agricoli. L'efficienza di utilizzo dell'azoto (NUE) nei cereali a livello mondiale è stata stimata essere vicino al 33% (Raun e Johnson, 1999), dal 14 al 59% quella riscontrata sul frumento (Melaj et al., 2003; López-Bellido et al., 2005), il che suggerisce che le attuali strategie di gestione dell'azoto sono estremamente inefficienti.

Alcuni studi dimostrano che la quantità ottimale di azoto varia sia attraverso la posizione del sito di controllo che tra gli anni (Mamo et al., 2003; Sambroski et al., 2009), nello stesso appezzamento e con la stessa cultivar la quantità di azoto ottimale non è costante in tutto il campo, e questo è dovuto alla variabilità spaziale e alle proprietà del suolo riferite alle condizioni di crescita della coltura (Pierce e Nowak, 1999). L'applicazione di tassi ottimali di azoto variabili spazialmente non è semplice e immediata, ma richiede l'adozione di pratiche sito-specifiche che mirano a massimizzare l'assorbimento di azoto, ridurre al minimo le sue perdite, e ottimizzarne la fornitura del suolo (Basso et al., 2011), al fine di ottenere una produzione di qualità e sostenibile a livello economico e ambientale.

Pertanto, per determinare la corretta concimazione azotata sia a livello produttivo, che economico, che ambientale si dovrebbe (Lemaire et al., 2008):

- 1) determinare la domanda d'azoto delle colture in base alle diverse rese di riferimento;
- 2) stimare la fornitura di azoto nel suolo;
- 3) determinare il tasso di applicazione di azoto e la sua tempistica.

In particolare, risulta molto utile l'uso del monitoraggio delle colture con il quale è possibile determinare il reale fabbisogno di azoto di quest'ultime, in base al periodo fenologico in cui esse si trovano, gestendo così in modo ottimale l'applicazione di N al fine di ottenere determinate caratteristiche nella produzione finale.

## 1.1 IL FRUMENTO DURO

Il frumento duro (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) è un cereale della famiglia botanica delle Graminacee, ed ha il suo areale d'origine nel bacino del Mediterraneo e in Medio Oriente, dove tuttora ha la massima diffusione. Nel corso dei secoli si sono evolute diverse specie di frumento. Capostipite dei frumenti sembra essere il *Triticum boeoticum*, diploide ( $2n = 14$ ; genomi AA), dal quale sarebbe derivato il piccolo farro (*Triticum monococcum*) coltivato. Da questi frumenti diploidi si sono originati, per incrocio e raddoppiamento dei cromosomi, i frumenti tetraploidi ( $2n = 28$ ; genomi AABB) tra i quali troviamo il *Triticum turgidum*, con le sottospecie *turgidum*, *dicoccum* (farro) e *durum* (frumento duro). Successivamente, sempre per incrocio e duplicazioni cromosomiche, si sono evolute specie esaploidi ( $2n = 42$ ; genomi AABBDD) come il frumento tenero (*Triticum aestivum* L.) e il gran farro (*Triticum spelta*).

Tra questi i più importanti e maggiormente coltivati sono il frumento tenero (*Triticum aestivum*) e il frumento duro (*Triticum turgidum* L. var. *durum*). Il primo si è diffuso principalmente in aree temperato/fresche, fertili e con buona piovosità. Il grano duro invece, grazie ad una maggiore tolleranza alla carenza idrica e un ciclo (periodo che intercorre tra la semina e il raccolto) più breve, si è sviluppato ed adattato a climi caldo/aridi quali quelli del Mediterraneo.

Il grano duro fa parte dei cereali microtermi, come orzo (*Hordeum vulgare*), avena (*Avena sativa*) e segale (*Secale cereale*), ed è prevalentemente una coltura di tipo autunno/vernino. In Italia generalmente viene seminato tra novembre e dicembre, per essere raccolto tra giugno e gli inizi di luglio. Diversa è la situazione in paesi come il Canada e il nord degli Usa dove, a causa del clima continentale caratterizzato da inverni lunghi e rigidi ed estati brevi e torride, la coltura è di tipo primaverile: la semina avviene normalmente verso aprile/maggio e la raccolta tra fine luglio e fine agosto. La coltivazione del grano, nella maggior parte dei casi non prevede irrigazioni, quindi la piovosità gioca un ruolo fondamentale per lo sviluppo delle piante e la produzione ottenibile.

Per quanto riguarda il ciclo colturale e lo sviluppo delle fasi fenologiche del frumento, possiamo affermare che il fotoperiodo e la temperatura sono i principali fattori ambientali che controllano direttamente la durata di ciascun stadio fenologico della coltura (Slafer e Rawson, 1994; Fischer, 2011). Ad esempio, la variazione della data di antesi rappresenta una risposta di adattamento del frumento all'ambiente, e solo pochi giorni di differenza nella sua insorgenza possono essere rilevanti per le prestazioni finali della coltura (Fischer, 2011). Inoltre, la tempistica con cui si susseguono le varie fasi fenologiche, come il periodo dell'emergenza, di

inizio e fine accostamento, di inizio levata, di antesi o inizio fioritura e di riempimento della granella, rivestono un ruolo significativo e fondamentale nel determinare le caratteristiche quali-quantitative del raccolto finale (Slafer et al., 2009; Fischer, 2011). La figura 1.1 mostra i principali stadi di sviluppo fenologico del frumento secondo la scala proposta da Zadoks (1974).

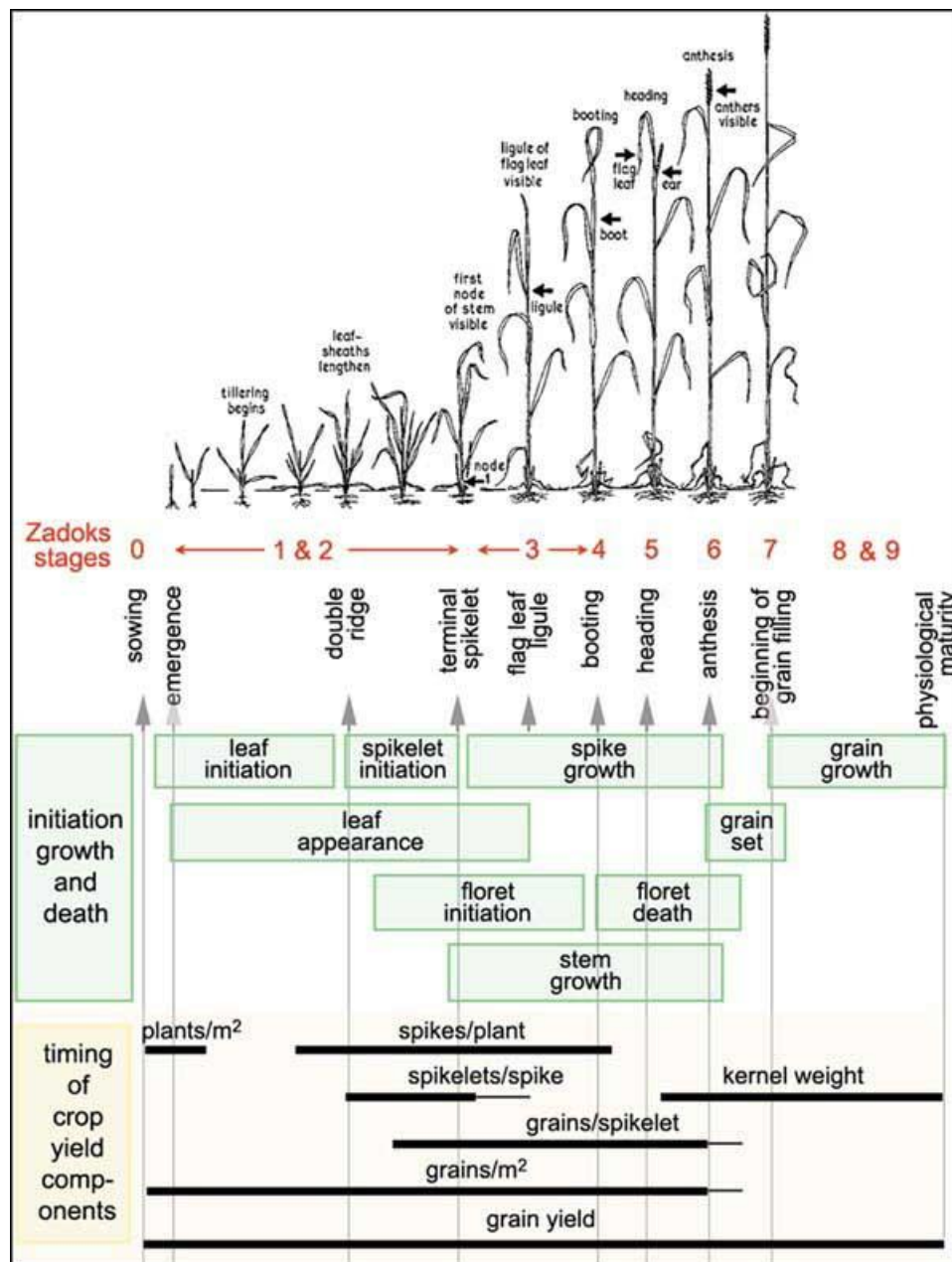


Figura 1.1 – Principali stadi di sviluppo fenologico del frumento (Fonte, FAO)

### 1.1.1 Produzione di frumento

La produzione cerealicola mondiale si aggira attorno alle 2800 milioni di tonnellate (Mt) e il frumento è tra i tre cereali con maggiore produzione, dopo mais e riso (FAOSTAT). A livello mondiale il frumento duro è coltivato su un'area meno estesa del frumento tenero, le statistiche ufficiali FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) riportano la coltura del "frumento" senza distinzione tra tenero e duro, tuttavia si stima che il duro sia esteso sul 9% della superficie totale (FAO, 2013).

Nel corso degli anni però l'andamento del frumento a livello mondiale (1961-2011, dati FAOSTAT) ha visto una costanza per quanto riguarda le terre investite da questa coltura, nel 1961 le terre a frumento risultavano essere 200 milioni di ettari (Mha), poi c'è stata una crescita costante fino ad un picco di 240 Mha negli anni fine '70 inizi '80 per decrescere fino agli attuali 220 Mha. Mentre la superficie a frumento è rimasta pressoché costante, le produzioni sono continuamente aumentate da 220 Mt annue di prodotto nel 1961 alle 700 Mt attuali, principalmente dovuto all'aumento delle rese, passate da 1 a 3 t ha<sup>-1</sup> (FAOSTAT).

L'Italia attualmente è il 20° produttore di frumento a livello mondiale, nel 1961 era il 6° (FAOSTAT).

Questo non deve trarre in inganno, perché la produzione di grano italiano è ancora relativamente consistente, in particolare tenendo conto delle terre arabili disponibili inferiori rispetto ad altri paesi; come si nota anche in figura 1.2 i principali produttori mondiali di frumento sono la Cina, l'India e gli U.S.A. (FAOSTAT).

In Europa la coltivazione di frumento ha visto un andamento simile a quello mondiale fino a inizi anni '90, con un costante decremento delle superfici da 90 a 75 Mha. Dal 1992 ad oggi le superfici investite dal frumento sono state costantemente 60 Mha e le produzioni si sono attestate sulle 200 Mt annue. Alla base di tale andamento sono gli effetti della politica agricola comunitaria volta a stabilizzare le produzioni e i prezzi all'interno del mercato europeo. Per quanto riguarda le rese, vediamo che queste in Europa, e quindi anche nel nostro Paese, presentano livelli sempre maggiori rispetto a quelli registrati a livello mondiale, attestandosi tra 3,5 e 4 t ha<sup>-1</sup> (EUROSTAT). Principalmente questo è dovuto all'impiego di fertilizzanti e fitosanitari e all'evoluzione delle tecniche agronomiche relative soprattutto alla possibilità di meccanizzare le fasi di coltivazione, in particolare le lavorazioni del terreno, migliorando la fertilità sia chimica che fisica del suolo, oltre che al miglioramento genetico della specie, rivolgendo l'attenzione a cultivar sempre più produttive e ricche di sostanze proteiche.

Il frumento duro in Italia ha sempre rappresentato una coltura importante, soprattutto per quanto riguarda la nostra alimentazione, basti solo pensare al prodotto tipico nazionale: la pasta. L'Italia è il principale produttore europeo di frumento duro seguito dai paesi mediterranei quali Francia, Grecia e Spagna (EUROSTAT, Fig. 1.3). Dal 1961 al 2013 questa coltura è stata tra le quattro colture principali della produzione agricola italiana, insieme alla vite, al mais e alla barbabietola da zucchero (ISTAT).

Infatti, la farina di frumento è la materia principale per la produzione di pane e di pasta. In particolare, il frumento duro gioca un ruolo fondamentale, sia in termini di consumo annuo nazionale sia per il mercato di esportazione, dal momento che è l'unica specie in grado di fornire la materia prima per la produzione di pasta. Il grano duro fornisce una farina granulata grossolana, chiamata "semola". Questa farina, comparata con quella di un normale frumento, contiene più proteine grezze molto importanti per la successiva fase di trasformazione per la produzione di pasta, sia riguardo alla successiva cottura del prodotto che per quanto riguarda le qualità nutrizionali dello stesso. I dati dell'Organizzazione Internazionale della Pasta (2013) mostrano una produzione di pasta di circa 13 milioni di tonnellate, che si sviluppa su 44 paesi. In questo contesto, l'industria italiana rappresenta quasi il 25%. Da ciò, si evince l'importanza di questa coltura nel panorama agroalimentare italiano.

Per quanto riguarda la superficie destinata alla coltivazione del frumento duro, possiamo affermare che questa è rimasta abbastanza costante negli ultimi 60 anni, attestandosi intorno ai 1,5 Mha, con alcuni periodi che sfiorano i 2 Mha. Il frumento tenero invece ha subito una forte contrazione, passando dai 3,5 Mha di fine anni '50 ai poco più dei 500 mila ha attuali, ed è stato superato in importanza dal frumento duro a partire dagli anni '80 (EUROSTAT, Fig 1.4).

Le superfici di grano duro si collocano prevalentemente nelle regioni del sud e nelle isole, dove la coltura trova un clima più idoneo, quello mediterraneo, che gli consente di raggiungere livelli qualitativi superiori, specialmente per ciò che riguarda il contenuto proteico, nonostante le rese restino inferiori agli areali del centro-nord Italia.

La produzione del frumento duro mediamente negli ultimi anni (2006-2011) si attesta intorno ai 4 Mt (Tab.1). Le maggiori produzioni si registrano al sud e isole (65%), legate alla più vasta superficie investita, seguono il centro (25%) e il nord (10%). Per quanto riguarda le rese, la media nazionale si aggira intorno alle 3 t ha<sup>-1</sup>, analoga a quella registrata al sud e nelle isole, di poco inferiore a quella delle regioni centrali (3,5 t ha<sup>-1</sup>) (ISTAT). Le rese maggiori si hanno nelle Regioni

setteentrionali del paese, con medie anche superiori a 5 t ha<sup>-1</sup>, dove però viene poco coltivato a favore di colture a maggiore reddito.

In particolare, in Toscana il frumento duro è considerato un'importante produzione di qualità. A livello italiano il grano duro toscano rappresenta l'8% della produzione totale (Tab. 1.1). La superficie regionale coltivata a frumento duro negli ultimi anni (1996-2011) si attesta attorno ai 100.000 ha, con dei picchi, in alcuni anni, attorno ai 200.000 ha (Fig. 1.5 ) (statistiche ISTAT). Mediamente, la produzione regionale è di 300.000-400.000 t, con anni di picco che superano le 600.000 t (Fig. 1.5); le rese si aggirano attorno alle 3-3,5 t ha<sup>-1</sup> ricalcando l'andamento della media italiana anche se su livelli leggermente superiori.

All'interno della Regione Toscana, le Province con maggiore vocazione alla coltivazione del frumento duro, risultano le province del sud della Toscana (Fig. 1.6), in particolare Siena (31% della produzione regionale) e Grosseto (28%).

Mediamente la produzione di frumento duro in Val d'Orcia si attesta intorno ai 35.000 t/anno con una media di 3,5 t ha<sup>-1</sup>, ed investe una superficie coltivata di circa 10.000 ha/anno (fonte Consorzio Agrario di Siena). Quindi la Val d'Orcia produce circa il 10-15% della produzione toscana complessiva di frumento duro. Prova del fatto che rappresenta una delle zone maggiormente vocate della regione e in cui la coltivazione di grano duro è entrata nella tradizione ed è alla base della produzione di prodotti tipici (es. i pici).

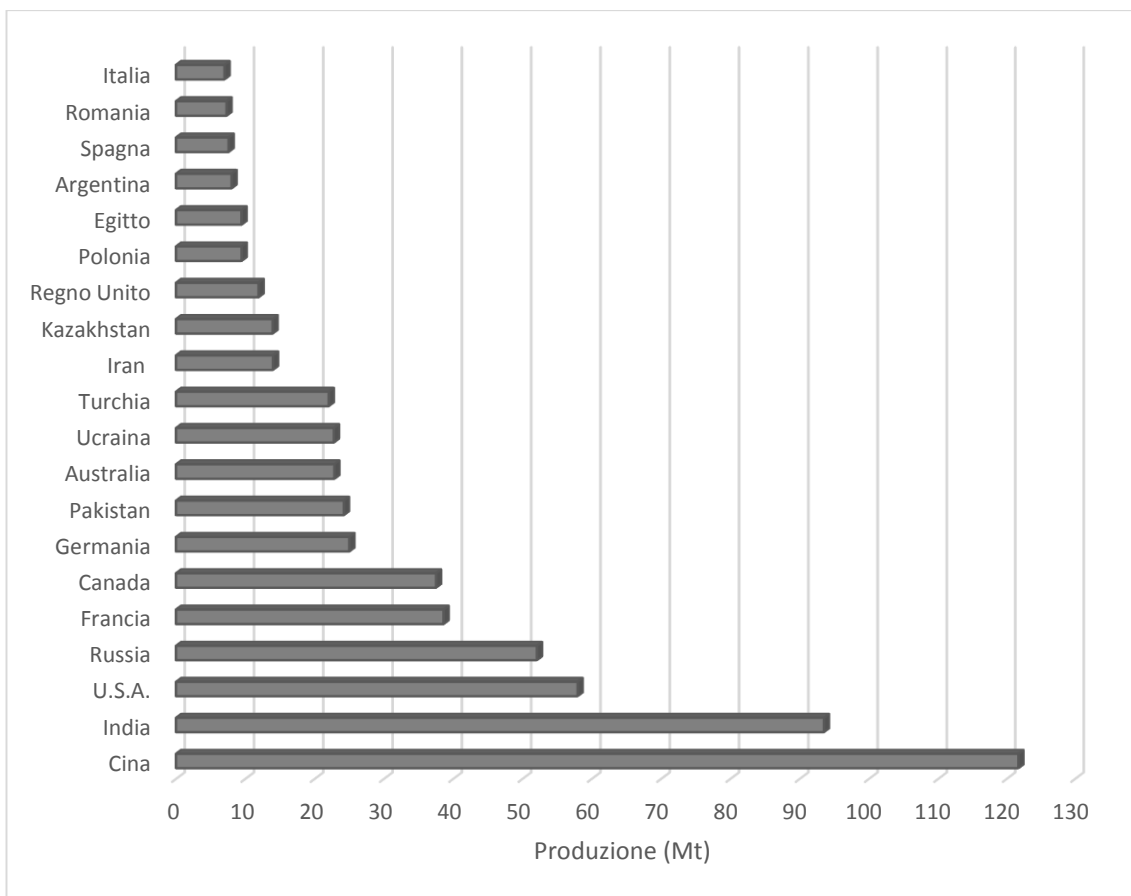


Figura 1.2 - Produzione mondiale di frumento suddiviso per nazioni, anno 2013 (FAOSTAT)

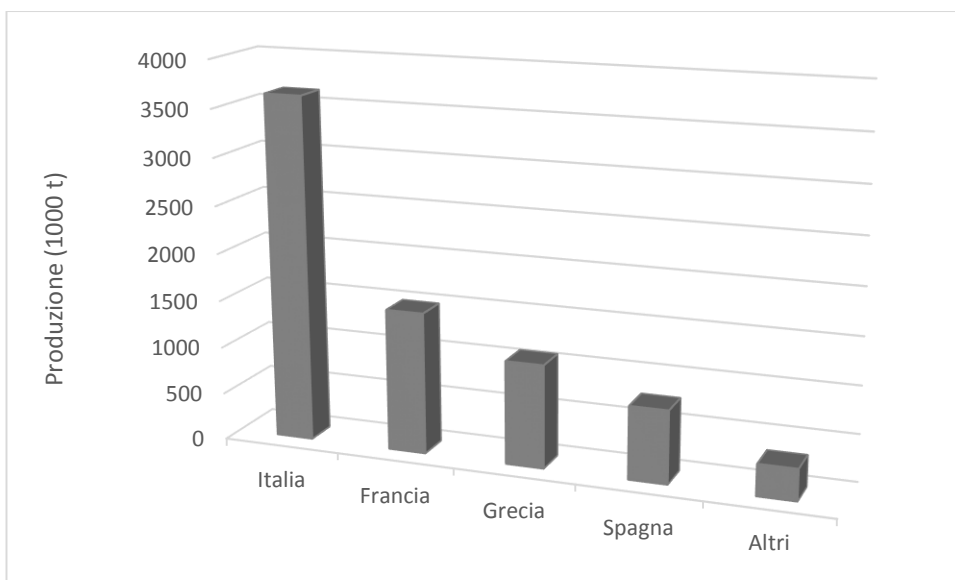


Figura 1.3 - Principali produttori di frumento duro in Europa, dati produzione anno 2013 (EUROSTAT)



Figura 1.4 - Italia superficie duro tenero (dati ISTAT)

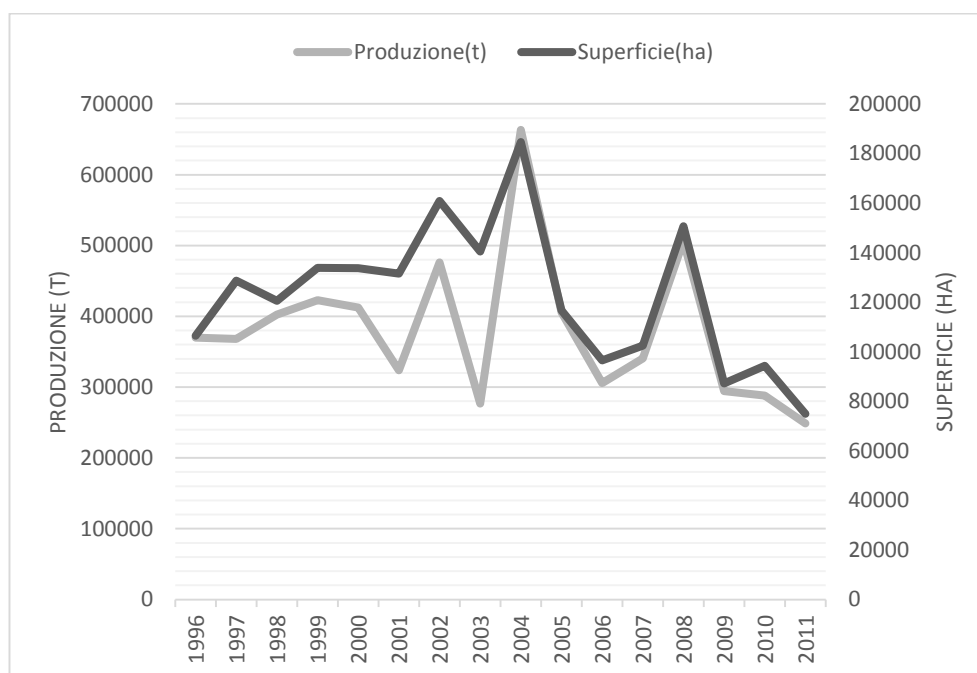


Figura 1.5 -Andamento produzione e superficie del frumento duro in toscana, anni 1996-2011 (ISTAT)



Regioni	Produzione (t)	(%)
Puglia	866548	20.9
Sicilia	807024	19.5
Marche	493374	11.9
Basilicata	366639	8.8
Toscana	330644	8.0
Emilia-Romagna	303451	7.3
Campania	158660	3.8
Lazio	154906	3.7
Molise	152374	3.7
Abruzzo	122545	3.0
Sardegna	102033	2.5
Lombardia	80546	1.9
Calabria	79319	1.9
Umbria	73228	1.8
Piemonte	13736	0.3
Friuli-Venezia Giulia	3702	0.1
Liguria	160	0.0
Valle d'Aosta	11	0.0
Trentino-Alto Adige		0.0
<b>ITALIA</b>	<b>4146380</b>	<b>100.0</b>
Nord	401607	9.7
Centro	1052151	25.4
Sud e Isole	2655140	64.0

Tabella 1.1 - Produzione di frumento duro in Italia , media anni 2006-2011 (elaborazione dati ISTAT)

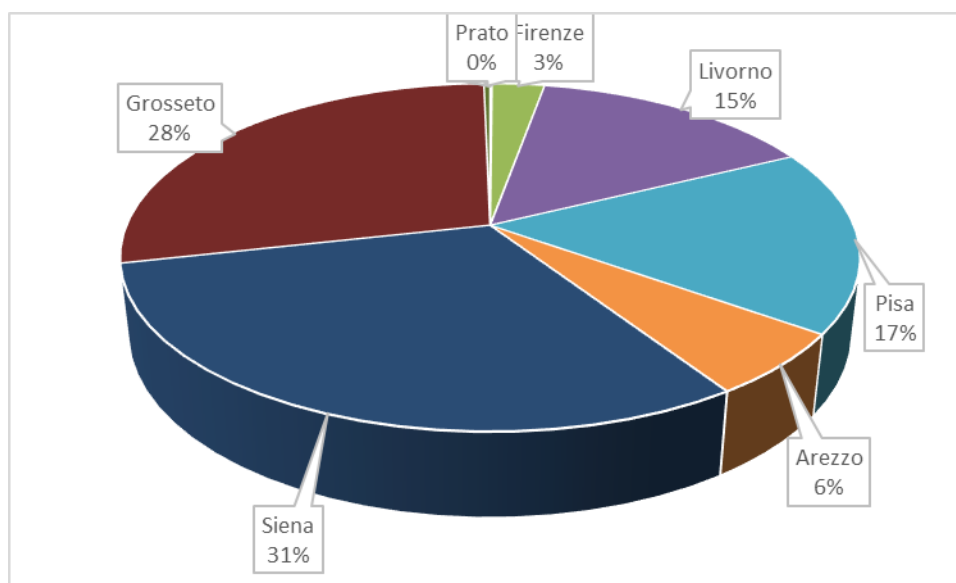


Figura 1.6 - Produzione frumento duro toscana, suddiviso in % tra le provincie, media anni 2011-2013 (ISTAT)

## 1.2 QUALITÀ DEL FRUMENTO DURO

I parametri di qualità relativi al frumento duro sono molteplici, i principali riguardano: la quantità e la qualità delle proteine, con particolare attenzione al glutine, la proteina fondamentale per le successive trasformazioni in prodotti, quali pasta e pane; il peso specifico (o peso ettolitrico); il tasso di umidità della granella; le impurità presenti nella partita; etc.

Su queste basi è riportata la classificazione del frumento duro secondo le classi di qualità merceologica UNI 10709 e UNI 10940 (Tab. 1.2).

Il frumento duro viene utilizzato principale per la preparazione della pasta, definita come prodotto ottenuto dalla trafilazione, laminazione e conseguente essiccamento di impasti preparati rispettivamente ed esclusivamente: a) con semola di grano duro ed acqua; b) con semolato di grano duro ed acqua” (legge 4 luglio 1967, n. 580, D.P.R. 9 febbraio 2001, n.187). Inoltre come caratteristiche qualitative la pasta deve essere di colore giallo, trasparente, omogenea e dotata di buon comportamento alla cottura per quanto riguarda elasticità, collosità, resistenza.

Parametro qualitativo della granella	Classi di qualità del frumento duro		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Peso Ettolitrico (cariossidi, kg/hl)	≥ 80	≥ 78 e < 80	≥ 75 e < 78
Proteine (cariossidi) % s.s.	≥ 14,5	≥ 13 e < 14,5	≥ 11,5 e < 13
Proteine (semola) % s.s.	≥ 13,5	≥ 12 e < 13,5	≥ 10,5 e < 12
Glutine secco (semola) % s.s.	≥ 12	≥ 10,5 e < 12	≥ 9 e < 10,5
Indice di glutine (semola)	≥ 80	≥ 60 e < 80	≥ 30 e < 60
W alveografico (cariossidi e semola)	≥ 250	≥ 180 e < 250	≥ 100 e < 180
P/L alveografico (cariossidi e semola)	≥ 2	≥ 1 e < 2	≥ 0,5 e < 1

Tabella 1.2 – Classificazione dei frumenti duri secondo le classi di qualità merceologica UNI 10709 – UNI 10940

Un'azione importante sull'aspetto qualitativo del frumento duro è stata svolta negli ultimi decenni del secolo scorso dal miglioramento genetico, che è proceduto con maggiore lentezza rispetto a quello sul frumento tenero. Gli obiettivi principali che hanno guidato la selezione varietale sono stati la creazione di cultivar agronomicamente migliori per le zone tradizionalmente vocate (Meridione e Isole), e parallelamente di cultivar che permettessero l'estensione della coltura nell'Italia centro-settentrionale.

Gli aspetti principali su cui si è basato il miglioramento genetico del frumento duro sono: 1) la resistenza all'allettamento, che ha permesso maggiori rese e ha ampliato l'areale di coltivazione; 2) la precocità, poiché la tardività di fioritura e maturazione limita la produttività e soprattutto se la fase di granigione (riempimento della granella) si svolge in stagione avanzata, la coltura è più esposta alla siccità; 3) resistenza al freddo, in relazione all'estensione degli areali di

coltivazione verso nord; 4) resistenza alle malattie, in particolare, mal del piede e segale cornuta; 5) miglioramento qualitativo, in particolare delle caratteristiche richieste a livello merceologico riguardanti il processo di macinazione e pastificazione.

Negli ultimi anni, sotto l'impulso dell'industria di trasformazione (industria molitoria), si è cominciato a porre una maggiore attenzione non solo alle rese ma anche alle performance qualitative delle produzioni selezionando varietà in funzione dei caratteri correlati con l'attitudine alla pastificazione e panificazione.

Bisogna anche considerare che non è possibile proporre una semplice ed esaustiva definizione di qualità di frumento duro, infatti questa cambia a seconda degli utenti e dell'uso finale (Tab. 1.3).

<b>Utenti</b>	<b>Aspetti di Qualità Richiesti</b>
Compagnie sementiere	Purezza varietale Germinabilità
Rivenditori sementi grano	Fornitura/standard sicurezza e salute Contenuto in Proteine Peso ettolitrico Contenuto Umidità
Agricoltore	Resa Rapporto stabilità resa/qualità grano
Industria molitoria	Resa in Semola Contenuto in Ceneri Uniformità Cariossidi(grani) Peso ettolitrico Contenuto Umidità Impurità
Industria della pasta	Contenuto in Proteine Qualità del Glutine Granulazione e Dimensione particelle di Semola Indice di Giallo
Consumatori (utenti finali)	Qualità Cottura Standard qualitativi di produzione di pasta Buon rapporto qualità/prezzo Visual appeal

Tabella 1.3 – Aspetti di qualità del frumento duro, in base ai diversi attori della filiera (Fonte: Troccoli et al., 2000).

Il concetto di qualità è pertanto relativo e dipende molto dall'utilizzazione finale della granella e dei suoi prodotti derivati. Come afferma Troccoli et al. (2000), possiamo distinguere la qualità come:

- qualità merceologica: correlata ai requisiti che riguardano i processi di compravendita e fondamentale riferita alla granella. Le variabili che maggiormente concorrono a determinare la qualità merceologica sono peso ettolitrico, contenuto in proteine, colore, glutine e umidità.
- qualità tecnologica: strettamente correlata alla merceologica, considera la predisposizione delle materie prime (granella e sfarinati) a subire

processi di trasformazione ottimali e standardizzati. La qualità tecnologica focalizza l'attenzione su variabili come vitrosità, durezza, colore, quantità e qualità delle proteine, umidità, parametri reologici (che descrivono il comportamento viscoelastico degli impasti).

- qualità igienico-sanitaria: descrive gli aspetti correlati alla salubrità e ai livelli di contaminazione, quindi fa riferimento all'incidenza di infezioni e infestazioni nelle materie prime e nei prodotti derivati.
- qualità nutrizionale: è influenzata dalla qualità merceologica, tecnologica ed igienico-sanitaria e si riferisce soprattutto ai prodotti derivati; considera il valore apportato dai nutrienti presenti identificando la capacità dell'alimento di contribuire al buon funzionamento del nostro metabolismo e di soddisfare il fabbisogno energetico dell'organismo. La qualità nutrizionale comprende sia un aspetto quantitativo, cioè l'energia libera dell'alimento ed utilizzabile dal consumatore, che quello qualitativo cioè legato alla composizione dei suoi costituenti.

Non per ultimo è da prendere in considerazione che la filiera del frumento duro e una filiera "lunga", costituita da diverse componenti (sementieri, granicoltori, stoccatore, molini, panifici e pastifici) ognuna delle quali concorre a definire ed influenzare la "qualità" delle materie prime e dei prodotti finiti; dai fattori climatici alle scelte colturali, dalle operazioni di stoccaggio ai processi di trasformazione e confezionamento, sono numerosi i punti critici e le variabili che possono interferire con la qualità ed intervenire sul valore nutrizionale da associare al prodotto finito.

Inoltre è sempre più frequente che elementi che non si riferiscono al prodotto, ma al contesto di produzione influenzino la percezione della qualità da parte del consumatore (Peri, 1998). Per lo più i requisiti richiesti dai consumatori riguardano il prodotto (di sicurezza, nutrizionali e tecnologici), il contesto produttivo (origine territoriale e tradizione e il rispetto dell'ambiente) e la garanzia (certificazioni e rintracciabilità) (Tab. 1.4).

In Italia, per garantire una corretta gestione della qualità, sono state sviluppate procedure che includono il monitoraggio e la valutazione delle proprietà tecnologiche e strutturali della granella, in modo da garantire all'utilizzatore, orientato alla ricerca di un prodotto con caratteristiche qualitative costanti, quantitativi di materia prima qualificata sulla base dei requisiti richiesti (Sgrulletta et al., 2004).

Per ciò che riguarda il contenuto proteico del grano, possiamo affermare che è uno dei tratti più importanti nella valutazione della qualità e dell'allevamento di frumento duro e, nel commercio mondiale di grano, maggiore è la concentrazione di proteine del grano, più alto è il prezzo che sarà pagato agli agricoltori (Li et al.,

2012). Infatti, alcuni studi dimostrano come il contenuto proteico delle cariossidi è determinante sia per stabilire la qualità di cottura della pasta derivata (Wall, 1979) sia il suo valore nutrizionale. Altri, invece, indicano che la quantità di proteine nella cariosside esercita un effetto significativo sulle caratteristiche fisiche, quali il grado di durezza e l'aspetto vitreo del seme, l'indice di colore giallo e il miglioramento della qualità della pasta, anche nella tolleranza all'eccessiva cottura (Dexter e Matsuo, 1977).

<b>Requisiti del prodotto</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicurezza (assenza di residui, basso contenuto in metalli pesanti, etc.)</li> <li>• Nutrizionali (contenuto in macronutrienti, micronutrienti e composti bioattivi)</li> <li>• Tecnologici (contenuto proteico, indice di glutine, etc.)</li> </ul>
<b>Requisiti del contesto produttivo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Origine territoriale e tradizione</li> <li>• Rispetto per l'ambiente (produzione integrata e biologica)</li> </ul>
<b>Requisiti di garanzia</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Certificazione (prodotti D.O.P., I.G.P. e marchi collettivi)</li> <li>• Rintracciabilità (reg. UE n. 178/2002)</li> </ul>

Tabella 1.4 – Caratteristiche qualitative di frumento duro e derivati in relazione al prodotto, al contesto produttivo ed i requisiti di garanzia (Fonte: da Flagella, 2006).

### 1.2.1 Le Proteine

Le proteine sono l'elemento qualitativo di maggiore importanza quando si parla di frumento duro. Questo perché il loro contenuto e composizione si ritrovano nelle materie estratte dalla lavorazione della granella, e quindi, come affermato precedentemente, sono alla base della classificazione qualitativa sia della granella che della semola.

Le proteine delle farine o semole di grano vengono classificate in quattro gruppi di solubilità in base alla classica procedura messa a punto da Osborne (1948): albumine (solubili in acqua), globuline (solubili in soluzioni saline), gliadine (solubili in alcool) e glutenine (solubili in soluzioni debolmente acide o basiche). Gliadine e glutenine vanno a costituire la proteina complessa del glutine. Il contenuto in sostanze azotate è alquanto variabile e compreso tra il 10-15% dell'intera cariosside, in relazione alle varietà, alle condizioni pedoclimatiche e alle tecniche colturali adottate.

Il contenuto proteico del grano (GPC, Grain Protein Content) risulta essere un indicatore chiave della qualità del frumento, e gioca un ruolo critico nel determinare le caratteristiche fisiche e nutrizionali della farina e conseguentemente della qualità del prodotto derivato. Le proteine del glutine giocano un ruolo chiave nella qualità della cottura a causa del loro impatto sulla capacità di assorbimento dell'acqua, dell'elasticità ed dell'estensibilità della pasta, che può influenzare la qualità della

farina di frumento (Torbica et al., 2007). Da ciò si deduce che nel frumento duro, il contenuto proteico dipende dal genotipo, ma è anche chiaramente e sostanzialmente influenzato da variabili ambientali (Tab. 1.5).

Un primo importante fattore è il contenuto di azoto del frumento, che gioca un ruolo determinante sulla qualità, poiché i tassi dei fertilizzanti azotati e tempi di applicazione sono un fattore decisivo per l'ottenimento di rese elevate, di maggiore contenuto di proteine e di una migliore qualità della granella di frumento duro. Infatti, alcuni studi mettono in evidenza come la disponibilità di azoto nel suolo, la velocità di degradazione e la domanda di azoto supplementari sono tra i fattori che incidono maggiormente influenzando in larga misura il contenuto di proteine e la composizione dei grani di frumento (Wuest e Cassman, 1992; Gooding e Davies, 1997; Lopez-Bellido et al., 1998; Rharrabti et al., 2003b).

Oltre allo stato nutrizionale della pianta altri fattori che intervengono nel determinare la quantità e qualità delle proteine, sono quelli meteorologici come la temperatura (Benzian e Lane, 1986; Smith e Gooding, 1999; Daniel e Triboi, 2000; Dupont e Altenbach, 2003), la radiazione solare (Spiertz, 1977) e le precipitazioni (Hopkins, 1968; Faridi e Finley, 1989; Bassett et al., 1989; Powlson et al., 1992; Rharrabti et al., 2001) che influenzano lo stato di benessere della coltura e la lunghezza della fase di riempimento della cariosside. Tutti questi fattori influenzano il tasso e la durata dello sviluppo della granella, l'accumulo di proteine e di amido (Jamieson et al., 2001; Dupont e Altenbach, 2003).

L'importanza della gestione dell'azoto e della variabilità climatica, durante le fasi di crescita della coltura, per la produzione del frumento duro di qualità, sono trattati nei paragrafi che seguono.

<b>Variabili ambientali</b>	<b>Parametri tecnologici e composizione proteica</b>
Concimazione azotata	Aumento del contenuto proteico Aumento del W e diminuzione del P/L alveografico Incremento del contenuto in gliadine e glutenine Incremento nel rapporto gliadine/glutenine Variazione del rapporto HLW-GS/LMW-GS
Elevata temperatura	Aumento del tenore proteico Miglioramento delle caratteristiche tecnologiche ( $30^{\circ} \leq T \leq 35^{\circ}\text{C}$ ) Indebolimento della forza e tenacità del glutine ( $T > 35^{\circ}\text{C}$ ) Riduzione del rapporto glutenine/gliadine e dei polimeri a più elevato peso molecolare
Carenza idrica	Incremento del tenore proteico Miglioramento di alcuni indici tecnologici Anticipo nel processo di insolubilizzazione dei polimeri proteici

Tabella 1.5 – Influenza di alcune variabili ambientali su qualità tecnologica e composizione delle proteine di riserva del frumento duro (Fonte: modificato da Flagella, 2006).

### **1.2.2 Influenza della concimazione azotata e gestione dell'azoto**

Come detto in precedenza, un aspetto importante riguardo la sostenibilità e la qualità del frumento duro è rappresentato, quindi, dalla gestione dell'azoto, oggi giorno, argomento centrale e uno degli obiettivi di ricerca applicata nei sistemi agricoli.

L'efficienza di utilizzazione dell'azoto nei cereali a livello mondiale è stata stimata essere vicino al 33% (Raun e Johnson, 1999), dal 14 al 59% quella riscontrata sul frumento (Melaj et al., 2003; López-Bellido et al., 2005), il che suggerisce che le attuali strategie di gestione dell'azoto sono estremamente inefficienti.

Dal momento che i tassi di fertilizzazione azotata e i tempi di applicazione sono un fattore decisivo per l'ottenimento di rese elevate, di maggiore contenuto di proteine e, in generale, di un miglioramento della qualità del frumento, sono stati condotti diversi studi per determinare il tasso ottimale e il tempo di applicazione di azoto (Borghini, 2000; Wooding et al., 2000; López-Bellido et al., 2001; Blankenau et al., 2002; Garrido-Lestache et al., 2005; Marino et al., 2009).

Per riuscire ad applicare il fertilizzante azotato con precisione sia quantitativa che riguardo la tempistica, bisogna conoscere le esigenze della coltura in questione durante tutto l'arco del ciclo vegeto-produttivo. Il contenuto di azoto nelle piante è maggiore nelle prime fasi di crescita e diminuisce continuamente fino alla fase di senescenza, in generale, la riduzione del contenuto di N può essere interpretata come un effetto di diluizione dovuta alla crescita. Infatti, mentre i tessuti metabolici come la lamina fogliare sono noti per essere ricchi di N (6,5%), i tessuti strutturali, invece, risultano poveri di N (0,8%) (Lemaire e Gastal, 1997).

Durante la crescita della pianta, la proporzione di tessuto strutturale aumentata rispetto al tessuto metabolico, questo indica che il contenuto di azoto dipende dalla biomassa vegetale. Pertanto, se due piante differenti hanno lo stesso contenuto di N, ma differiscono nella biomassa, è possibile che l'impianto con maggiore biomassa risulti ben fornito di N, mentre quello con la biomassa inferiore possa soffrire di carenza di N (Lemaire et al., 1995).

In letteratura si possono trovare studi condotti sulle esigenze di azoto del frumento duro durante il ciclo vegetativo. Ad esempio, Abedi et al. (2011) hanno dimostrato che i fertilizzanti azotati applicati durante lo sviluppo vegetativo delle colture, dall'accestimento alla fase di levata, hanno permesso di raggiungere la resa più alta, con una particolare sensibilità della coltura all'applicazione di azoto durante l'accestimento. La crescita del frumento duro, dall'antesi alla maturità, dipende dalla quantità di azoto assimilato prima dell'antesi (Garabet et al., 1998). La maggior parte dell'assorbimento di azoto si verifica durante la fase fenologica che

va dall'accestimento all'antesi (Garabet et al., 1998). Altri studi confermano che la mancanza di apporto di azoto nella fase di accestimento ha portato a rese inferiori (Abedi et al., 2011). Lopez-Bellido et al. (2006), in un agro-ecosistema Mediterraneo, raccomandano l'applicazione del fertilizzante azotato nel frumento preferibilmente tra l'accestimento e la levata, che risulta essere considerata una buona strategia, sia per l'ambiente che per i ritorni economici degli agricoltori. Fuertes-Mendizábal et al. (2010) hanno trovato che il frazionamento dello stesso tasso di azoto in tre rate, alle fasi Ground Stage (GS) GS20, GS30 e GS37 (secondo la scala Zadoks et al., 1974) invece di due (fasi GS20 e GS30) non ha modificato la resa in granella, ma ha migliorato il tenore di proteine nel frumento, indicando che una domanda tardiva di azoto può avere più impatto sia sul metabolismo e la rimobilizzazione di azoto che sull'accumulo di biomassa e resa in granella. Anche Garrido-Lestache et al. (2004) hanno osservato che i tempi e la scissione del fertilizzante azotato ha influenzato il contenuto di proteine nel grano, che ha raggiunto il picco quando la metà o un terzo del tasso di azoto ( $150 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) è stata applicata alla levata, e in alcuni casi in cui è stata applicata solo all'accestimento.

Di contro, è stato dimostrato da alcune ricerche che applicazioni di azoto ritardate nella stagione vegetativa (primavera) e vicino all'antesi risultano più efficaci nel migliorare il contenuto di proteine nel frumento (Ottman et al., 2000; Bly e Woodard, 2003). Ciò è confermato sia da studi effettuati da Labuschagne et al. (2006), che hanno affermato come un'applicazione di azoto in una fase iniziale potrebbe aumentare la resa, ma la fornitura di concime in una fase successiva (fase di avvio emergenza della spiga) aumenterebbe significativamente la quantità di tutte le frazioni proteiche, sia da Abedi et al. (2011), che hanno dimostrato come una rimozione della fertilizzazione prima della fase di granigione ha portato ad una minore quantità di proteine nella granella finale.

Le incoerenze nei risultati possono essere dovuti alle proprietà del suolo e alle condizioni meteorologiche che influenzano sia i tassi di rilascio dei nutrienti dei fertilizzanti sia i processi che portano alla lisciviazione e alle perdite per denitrificazione e immobilizzazione del fertilizzante nel suolo (Ercoli et al., 2013). Le perdite di azoto per lisciviazione si verificano quando le precipitazioni superano l'evapotraspirazione delle colture, e quindi l'acqua si muove attraverso il profilo del terreno verso il basso, che corrisponde al periodo autunno-invernale in un clima umido mediterraneo (Arregui e Quemada, 2006). Le perdite di  $\text{N-NO}_3$  per lisciviazione da colture di frumento duro in centro Italia sono state stimate avere un valore di  $21\text{-}32 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ , pari al  $12\text{-}22\%$  del totale di azoto applicato (Ercoli et al., 2012). Infatti, il grano duro è coltivato in tutta la regione del Mediterraneo,



in cui di solito viene piantato nel mese di novembre e raccolto ai primi di luglio. Tra novembre e marzo, solitamente sono previste forti precipitazioni e basse evapotraspirazione delle colture, con conseguente aumento del rischio di perdite di lisciviazione dell'azoto. Per ridurre le perdite di lisciviazione, la concimazione azotata dovrebbe mirare a soddisfare le reali esigenze della domanda di azoto dell'impianto. Pertanto, l'applicazione deve essere effettuata all'ultimo stadio possibile compatibile con la fase di sviluppo che consente ancora un rapido assorbimento di azoto da parte della pianta, al fine di ridurre la possibilità di perdite di N (Raun et al., 2008).

Asseng et al. (2001) hanno analizzato l'influenza delle pratiche di gestione di azoto su colture di frumento in aree con terreno differente e acqua disponibile utilizzando modelli di simulazione a lungo termine. Essi hanno scoperto che l'efficienza d'uso dell'azoto (NUE) varia tra le diverse zone in funzione della capacità del suolo di trattenere l'acqua, della gestione dell'azoto e della quantità di precipitazioni durante la stagione di crescita.

In definitiva, le applicazioni di fertilizzanti azotati che superano i requisiti di richiesta di azoto delle colture portano ad un inquinamento ambientale dovuto ai nitrati causati dalla lisciviazione di azoto e alle emissioni gassose di N in atmosfera. Come risultato, è quindi indispensabile determinare la risposta della pianta alla fertilizzazione azotata e la sua richiesta di azoto reale, per poter sviluppare pratiche razionali e di maggiore efficienza di utilizzo di quest'ultimo nella pianta, al fine di migliorare la gestione delle applicazioni di azoto (tasso di N e la sua tempistica durante il ciclo) che può portare a ottenere il massimo rendimento con minori rischi ambientali. Inoltre, lo stato nutrizionale della coltura può essere stimato o per via diretta, mediante analisi chimica dei tessuti vegetali, o con metodi indiretti basati sul colore delle parti epigee della pianta, tenuto conto che l'intensità di verde rispecchia il contenuto di clorofilla e che quest'ultima incorpora gran parte dell'azoto presente nei tessuti (Filella et al., 1995; Moran et al., 2000).

### **1.2.3 Influenza del clima sulla qualità della produzione di frumento duro**

Naturalmente, un ruolo fondamentale nella produzione quali-quantitativa del frumento duro, specie se coltivato, come avviene, in clima mediterraneo, è svolto dalle condizioni climatiche durante tutto l'arco del periodo del suo ciclo colturale. Sono stati condotti molti studi che mettono in relazione il clima con la produzione e la qualità del frumento duro, in particolare, condizioni di scarsa piovosità e

temperature elevate durante la stagione di crescita sono generalmente associate ad un miglioramento della quantità di proteine e ad una diminuzione della resa (Orlandini et al., 2011). Analogamente, lo stress idrico e il caldo durante lo sviluppo del frumento abbreviano la fase di riempimento della granella, ma influenzano l'accumulo di amido più di quello delle proteine, causando un aumento del GPC (Rharrabti et al., 2001). La relazione inversa tra la resa e il GPC è sottolineata più nel frumento duro rispetto al frumento tenero (Cossani et al., 2011). Infatti, un aumento di peso della granella, nel duro, è accompagnato da una diminuzione marcata della percentuale di azoto nella stessa, determinando in ambiente mediterraneo minore stabilità del contenuto proteico della granella rispetto a quello trovato usualmente sul tenero (Cossani et al., 2011). Alcuni studi dimostrano come le condizioni climatiche che scoraggiano la resa del frumento sono in grado di migliorare il GPC, di conseguenza il GPC aumenta con l'aumento della temperatura e la riduzione della piovosità (Troccoli et al., 2000). Quest'ultimo aspetto è dimostrato anche da studi condotti da Garrido-Lestache et al. (2005) e Orlandini et al. (2011) che mettono in luce la correlazione negativa tra GPC e le precipitazioni nella stagione invernale-primaverile.

La correlazione inversa tra resa e proteine della granella è inoltre confermata da studi effettuati da Gooding e Davies (1997), nei quali affermano che nel nord Europa dove abbiamo lunghi periodi per il riempimento, i chicchi risultano ben riempiti ma con basse concentrazioni di proteine. Al contrario, ambienti di tipo mediterraneo (ad esempio, del sud Europa, Israele, e il sud dell'Australia) sono caratterizzati da un clima caldo-asciutto (Nahal, 1981; Palta et al., 1994; Acevedo et al., 1999), il periodo di riempimento della granella del frumento è più breve, con rendimenti di grano più bassi, ma concentrazioni di proteine più elevate (Borghi et al., 1997; Lopez-Bellido et al., 1998).

Molti studi si sono concentrati sullo stress nel periodo post-antesi, evidenziando che la siccità e temperature elevate durante il periodo di riempimento della granella hanno un ruolo chiave nella determinazione della qualità del frumento, dal momento che esse sono in grado di incidere negativamente sulla resa e, di conseguenza, di apportare un significativo aumento del GPC (Troccoli et al., 2000; Rharrabti et al., 2003 b). D'altro canto, anche gli studi che tengono conto delle condizioni di siccità sulle altre parti del ciclo del frumento mostrano conclusioni simili, dal momento che lo stress idrico tende a ridurre le dimensioni della granella e il peso della stessa, e che, quindi, porta ad un incremento del contenuto proteico nella granella (Troccoli et al., 2000, Rharrabti et al., 2003 a e b, Orlandini et al., 2011). Infatti la significativa interazione tra l'approvvigionamento idrico e la disponibilità di azoto può cambiare l'effetto sul GPC a causa della siccità che si

verifica durante il ciclo colturale. Condizioni di deficit idrico possono avere un impatto sull'apporto di azoto e quindi sul GPC come sulla resa, nonostante la relazione inversa tra la resa e il GPC (Garabet et al., 1998; Troccoli et al., 2000; Garrido-Lestache et al., 2005). Un'elevata disponibilità di acqua durante il ciclo colturale può aumentare il quantitativo finale del GPC, perché promuovere la crescita delle radici delle piante, il flusso di acqua e, quindi, l'azoto verso la pianta, la mineralizzazione dell'azoto dalla materia organica del suolo, il movimento di fertilizzanti azotati nella zona delle radici e, infine, la disponibilità totale di azoto per la coltura (Garabet et al., 1998; Troccoli et al., 2000). Garrido-Lestache et al. (2005), hanno condotto uno studio specifico su un campo di frumento duro, mettendo in evidenza la mancanza di una risposta chiara da parte del raccolto per i tempi e la divisione della fertilizzazione azotata, come risultato dell'interazione tra le variazioni annuali nella quantità e nella distribuzione delle precipitazioni e nell'adozione di azoto e dell'efficienza del fertilizzante azotato nelle varie fasi del raccolto.

Per quanto riguarda l'impatto della temperatura sulla fine del periodo del ciclo colturale, lo stress termico comporta una diminuzione generale dell'attività fotosintetica, del tasso di crescita del grano, e della durata del riempimento della granella, portando ad una diminuzione dell'accumulo di carboidrati più di quella di azoto nella granella (Troccoli et al., 2000). Uno studio a lungo termine (1999-2009) ha mostrato una relazione positiva tra il GPC del frumento duro e la temperatura registrata nel corso dei periodi mensili da febbraio a giugno, e in particolare nel periodo primaverile. Tuttavia, nessuna correlazione significativa è stata trovata tra il GPC e i singoli livelli di temperatura mensili (Dalla Marta et al., 2015). Allo stesso modo Garrido-Lestache et al. (2005) non hanno trovato alcuna correlazione tra il GPC e le temperature durante il ciclo colturale, tranne per la temperatura massima registrata nell'aprile durante le fasi di antesi e maturazione latte.

### **1.3 L'AGRICOLTURA DI PRECISIONE**

L'agricoltura di precisione (AP) è una strategia di gestione che comprende un insieme di conoscenze e tecniche al fine di consentire interventi agronomici, razionali e tempestivi, modulati in funzione delle effettive esigenze della coltura in base alle variazioni nello spazio, e nel tempo, delle caratteristiche biochimiche e fisiche del suolo, delle condizioni microclimatiche e delle pratiche culturali. Olson (1998) definisce l'AP come l'applicazione di una strategia di gestione olistica che utilizza le tecnologie dell'informazione per portare i dati provenienti da più fonti al fine di supportare le decisioni connesse con la produzione agricola, il marketing, la finanza, e il personale.

Lo scopo principale è quello di mettere in sintonia la gestione del terreno e delle colture con le specifiche esigenze di un campo eterogeneo al fine di migliorare la produzione, minimizzare i danni ambientali ed elevare gli standard qualitativi dei prodotti agricoli. Cioè, quello di esplorare, tra le possibili soluzioni, quella più indicata per qualsiasi tipo di produzione agricola promuovendo la capacità di imporre inputs al sistema per ottenere gli outputs desiderati, i quali sono controllati attraverso la capacità produttiva dell'intero sistema. Quindi, come affermato da Pierce e Sadler (1997), l'AP mira ad adattare i giusti apporti di prodotto, sia esso acqua, fertilizzante o fitosanitario, in maniera puntuale, tenendo conto della variabilità locale delle caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche del campo, nonché della tempistica di applicazione.

L'AP si basa su tre principali fasi:

- 1) acquisizione e registrazione dei dati ad una appropriata scala spaziale di riferimento e frequenza;
- 2) interpretazione ed analisi dei dati;
- 3) implementazione di una risposta gestionale ad una appropriata scala spaziale di riferimento e di tempo.

Robert et al. (1993) concludono che tale tecnica può essere finalizzata principalmente a tre obiettivi:

- 1) incrementare le rese a parità di input complessivi;
- 2) ridurre gli input a parità di resa;
- 3) incrementare le rese riducendo nel contempo gli input.

Negli ultimi due decenni, le opportunità per una precisa gestione delle operazioni in campo agricolo sono aumentati proprio grazie, in particolare, alla disponibilità di

nuove tecnologie geospaziali e di informazione come, i dispositivi GPS (Global Position System – Sistema di Posizione Globale), i sistemi GIS (Geographic Information System – Sistema Informativo Geografico), nuovi sensori specifici in ambito agrario e forestale, l'utilizzo sempre maggiore dell'elettronica, macchine agricole automatizzate e il monitoraggio tramite telerilevamento ad alta risoluzione. La figura 1.7 mostra uno schema sintetico di come l'AP utilizza le informazioni sulla variabilità nello spazio e nel tempo di fattori che influenzano la produzione agraria, per migliorare l'efficienza economica ed ambientale della gestione agronomica.

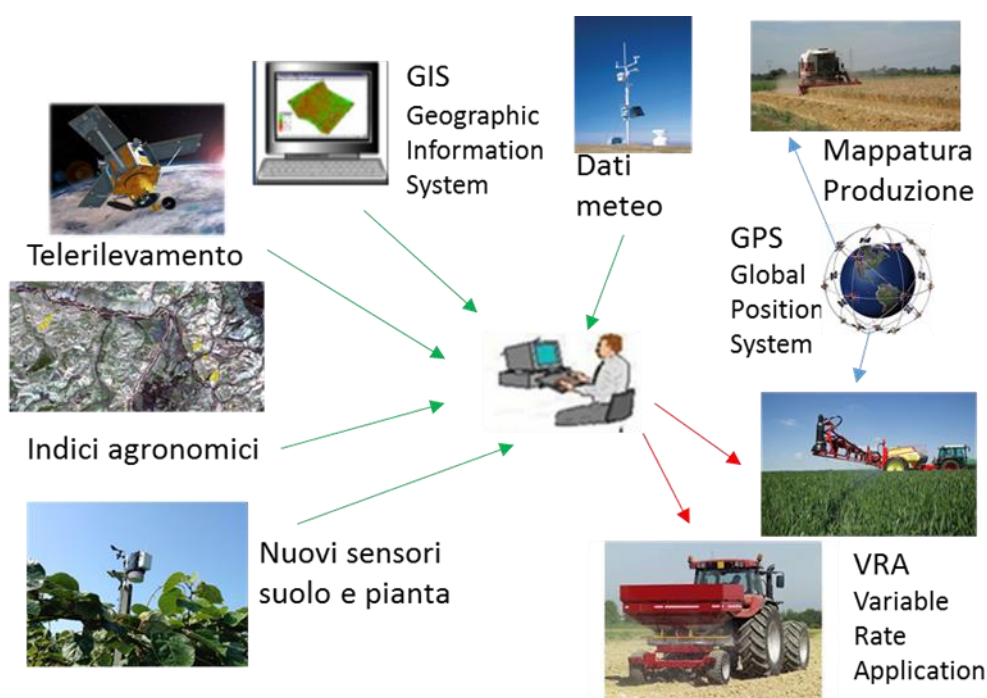


Figura 1.7 – Schema sintetico agricoltura di precisione

Si può notare, come, una notevole importanza nell'AP è sicuramente ricoperta dall'aspetto legato alla georeferenziazione dei punti di informazione, grazie al sistema GPS. La georeferenziazione si riferisce alla relazione esistente tra un'informazione territoriale e la sua posizione geografica, la posizione nello spazio definito dalla superficie terrestre nella quale il fenomeno si è verificato. Questo rende possibile il confronto tra i diversi dati spaziali rilevati in uno stesso campo come: proprietà fisiche del suolo, produzione, irrigazione, contenuto di fertilizzanti, applicazioni di prodotti chimici a volume variabile, etc.

Il GPS è un sistema di radio-navigazione satellitare in grado di fornire informazioni di posizione nelle tre direzioni spaziali (x; y; z), velocità e tempo. I ricevitori GPS

usano i segnali che provengono da quattro o più satelliti in vista per calcolare la posizione dell'utente, la sua velocità, il tempo ed altri dati necessari alle applicazioni agricole. Naturalmente la precisione di questi sistemi è ogni giorno più accurata, in particolare con l'utilizzo delle tecniche differenziali (DGPS) consente di calcolare in tempo reale le posizioni corrette (x.y.z) con una precisione elevata senza bisogno di correggere successivamente i dati dopo che questi sono stati registrati. Questo tipo di GPS è utile per svolgere operazioni come la mappatura dei raccolti con elevata risoluzione, la guida su traiettorie parallele, il campionamento del suolo e la distribuzione dei fertilizzanti e pesticidi a volume variabile nello spazio (VRT - Variable Rate Technology), o la guida in automatico dei veicoli agricoli.

Anche il telerilevamento (vedi Paragrafo 1.4) può essere utilizzato per l'agricoltura di precisione in diversi modi, fornendo input su condizioni del suolo e delle piante e la variabilità al sistema di supporto gestionale e decisionale globale. I dati da remoto forniscono informazioni, utilizzabili tramite GIS con altri strati di informazioni (ad es. DEM - Digital Elevation Model). Questa informazione spaziale può quindi essere utilizzata con altri sovrapposizioni georeferenziati all'interno del GIS per identificare unità di gestione stagionalmente stabili da altre, invece, variabili, su cui l'agricoltore può basare una strategia di gestione.

Lo sviluppo di nuovi tipi di macchine agricole automatizzati che possono aumentare la sostenibilità e la competitività della produzione agricola sono stati studiati da diversi ricercatori (ad esempio, Bakker et al., 2010; Griepentrog et al., 2004; Slaughter et al., 2008). A causa della mancanza di un'alta risoluzione (spaziale e temporale), un'elevata precisione e una tecnologia a basso costo per l'acquisizione dei dati ambientali e colturali a livello di campo, era difficile fornire supporto per avere informazioni tempestive per la produzione e la gestione agricola, infatti, questo ha bloccato fino al giorno d'oggi lo sviluppo e le applicazioni di agricoltura di precisione (Zhang et al., 2002). Tuttavia, oggi, il comparto agricolo è in grado di raccogliere dati più completi sulla variabilità della produzione sia nello spazio che nel tempo. Il desiderio di rispondere a tale variabilità su scala aziendale è diventato l'obiettivo dell'AP (Whelan et al., 1997). Alcuni studi dimostrano come ci siano modelli che consentono un processo decisionale basato sulla mappatura dei componenti del suolo (Engel et al., 1999; McCauley, 1999).

Quindi, l'AP non è solo l'aggiunta di nuove tecnologie, ma è piuttosto una rivoluzione dell'informazione, resa possibile dalle nuove tecnologie che si traducono in un sistema di gestione aziendale più preciso. Oltre alla maggiore redditività, come conseguenza di migliori pratiche di gestione e sviluppo di sistemi informativi agricole, l'AP può portare ulteriori vantaggi, quali:

- l'aumento della qualità delle colture,
- il miglioramento della sostenibilità,
- la sicurezza alimentare associata alla tracciabilità dei prodotti,
- la tutela dell'ambiente,
- lo sviluppo rurale attraverso nuove competenze trasferibili ad altre attività.

Da ciò si evince come l'AP può essere utile per riorganizzare l'intero sistema agricolo attraverso un'economia a bassi input, ad alta efficienza, e quindi rivolta ad un'agricoltura sostenibile (Shibusawa, 1998).

### **1.3.1 Applicazioni di agricoltura di precisione su frumento duro**

In letteratura si possono trovare alcuni studi specifici di agricoltura di precisione riferiti alla coltivazione e produzione di frumento duro.

Ad esempio, Mendas e Delali (2012) hanno utilizzato l'integrazione di decisioni con un approccio di analisi multicriteri (MCDA, MultiCriteria Decision Analysis Approaches) in un GIS per realizzare un sistema di supporto decisionale spaziale, utilizzabili attraverso tecniche di agricoltura di precisione, che ha offerto la possibilità di produrre in modo efficiente mappe di terreno idonee per la coltivazione del frumento duro, asserendo che la coerenza delle mappe ottenute conferma l'efficacia del sistema.

Altri autori, come Basso et al. (2009) hanno studiato la variabilità spaziale della resa di frumento duro in sud Italia all'interno del campo per descrivere zone omogenee di gestione. Lo studio ha dimostrato che il contenuto di acqua del suolo è stato il fattore principale che incide sulla variazione spaziale della resa per entrambi gli anni di indagine, inoltre le interazioni tra piogge, topografia e gli attributi del suolo aumentano le possibilità di osservare la variabilità dei rendimenti anche tra gli anni.

Infine, anche López-Lozano et al. (2010) hanno utilizzato congiuntamente immagini satellitari e mappe digitali del suolo derivate dal campionamento del terreno con l'obiettivo di proporre unità di gestione sito-specifiche. I collegamenti tra i dati di LAI e le proprietà del suolo derivati da immagini spettrali hanno reso possibile differenziare le unità all'interno dei campi, descrivendo quelle parti d'appezzamento suscettibili alla gestione a tasso variabile per fattori di produzione agricoli, come l'acqua o la concimazione. Ciò dimostra l'idoneità delle tecnologie di informazione spaziale, come il telerilevamento e la mappatura digitale del suolo, nel contesto dell'agricoltura di precisione.

## 1.4 IL TELERILEVAMENTO

Il Telerilevamento (Remote Sensing) è una disciplina tecnico-scientifica con la finalità di ricavare informazioni, qualitative e quantitative, sull'ambiente e su oggetti posti a distanza da un sensore mediante misure di radiazione elettromagnetica, emessa, riflessa o trasmessa, che interagisce con le superfici interessate. Infatti, ogni oggetto, o superficie, è caratterizzato da una propria impronta spettrale in funzione della sua interazione con la radiazione elettromagnetica. Proprio grazie alla misura dell'energia emessa o riflessa dalle superfici, registrata da appositi sensori nelle diverse lunghezze d'onda, è possibile distinguere in un territorio le differenti tipologie (ad es. un corpo idrico da un campo agricolo, da un affioramento roccioso, etc.) e lo stato delle superfici e degli oggetti che lo compongono (ad es. la qualità delle acque del corpo idrico, lo stato della vegetazione nei campi, la presenza di determinati minerali nelle rocce, etc.). Le peculiarità che rendono il telerilevamento una tecnica molto utilizzata per l'osservazione della terra sono principalmente due: 1) la possibilità di riprese multispettrali, infatti riesce ad osservare il comportamento delle superfici in varie porzioni dello spettro, riprese dalle bande dei sensori, riuscendo così a distinguere in un territorio tipologie e stato delle superfici e degli oggetti che lo compongono. 2) la possibilità di riprese multitemporali, infatti consente di riprendere la stessa zona ad intervalli di tempo diversi e regolari. Questo è particolarmente interessante se si è interessati a monitorare fenomeni naturali con un andamento dinamico, come l'evoluzione meteorologica, lo scioglimento dei ghiacciai, il ciclo vegetativo delle colture, o fenomeni devastanti connessi all'attività umana, come la deforestazione di alcune aree del pianeta.

Utilizzando le conoscenze dei fenomeni d'interazione tra energia elettromagnetica e superfici naturali, tale disciplina permette di abbracciare con un solo sguardo vaste aree di territorio e di rappresentarlo su piccola scala attraverso immagini e mappe estremamente dettagliate, che si rivelano utili per moltissimi scopi. Tutto ciò è possibile, in particolare, grazie all'uso di piattaforme, come aerei o satelliti, che consentono di riprendere a distanza più o meno ravvicinata il territorio, e di sensori che ne scrutano le caratteristiche e le condizioni. Tuttavia se la raccolta di dati utilizza tecniche di telerilevamento da satellite, questo avviene attraverso l'atmosfera terrestre, il risultato delle misure è influenzato dalle proprietà di trasmissione dell'atmosfera interposta fra superficie in osservazione e il sensore. Nella realtà operativa quindi le curve di riflettanza spettrale non sono così caratteristiche come quelle illustrate (Fig 1.9), bensì variano notevolmente a causa della variabilità delle condizioni ambientali degli strati di atmosfera attraversati



(temperatura, pressione, umidità, ecc.). Si deve tener conto, inoltre, del fatto che ai sensori che misurano le riflettanze spettrali giunge l'energia riflessa non da ciascun singolo punto di un campo osservato, ma dall'insieme dei punti che costituiscono l'area elementare di rilevazione, o "pixel" (contrazione di Picture-Element) nella direzione e nell'istante di osservazione.

Fino ad oggi, uno dei limiti all'utilizzo del telerilevamento nei sistemi agricoli, in particolare per il sostegno della gestione agronomica a livello di azienda, è stata la mancanza di una risoluzione spaziale e temporale delle immagini adeguata per seguire lo sviluppo delle colture in piccole aree. Infatti, fino a pochi anni fa, una risoluzione moderata-alta di immagini spaziali (10-30 m) aveva una bassa frequenza di rivisitazione (es. Landsat/Enhanced Thematic Mapper), mentre, d'altro canto, una più alta risoluzione temporale era spesso associata ad una bassa risoluzione spaziale (250-1000 m) (es. MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Recentemente, sono stati lanciati nuovi satelliti commerciali che combinano sensori ad alta risoluzione con elevata frequenza di rivisitazione (es. Quikbird, WorldView e RapidEye) (Vuolo et al., 2010). Un'altra caratteristica importante per rendere l'informazione telerilevamento veramente utile è il tempo che intercorre dalla messa in immagini per l'acquisizione satellitare, e dall'acquisizione satellitare alla consegna delle immagini elaborate (Beeri e Peled, 2009). Infatti, per integrare il monitoraggio tramite telerilevamento nel processo decisionale il tempo trascorso dalla raccolta dati alla decisione deve essere breve. Vari ricercatori sottolineano che questo lasso di tempo dovrebbe essere meno di 48 ore (Marsh e Gnauck, 1997; MacDonald et al., 1997). La lunghezza di questi tempi dipende anzitutto dalle condizioni atmosferiche e dalla frequenza di rivisitazione dei satelliti, e in secondo luogo dal fornitore di servizi.

In figura 1.9 si nota le differenze di percentuale di riflettanza sulle varie lunghezze d'onda dello spettro, in particolare si osserva i diversi andamenti di suolo, vegetazione e acqua (Fig. 1.9 a) e l'andamento classico di una copertura vegetale (Fig. 1.9 b).

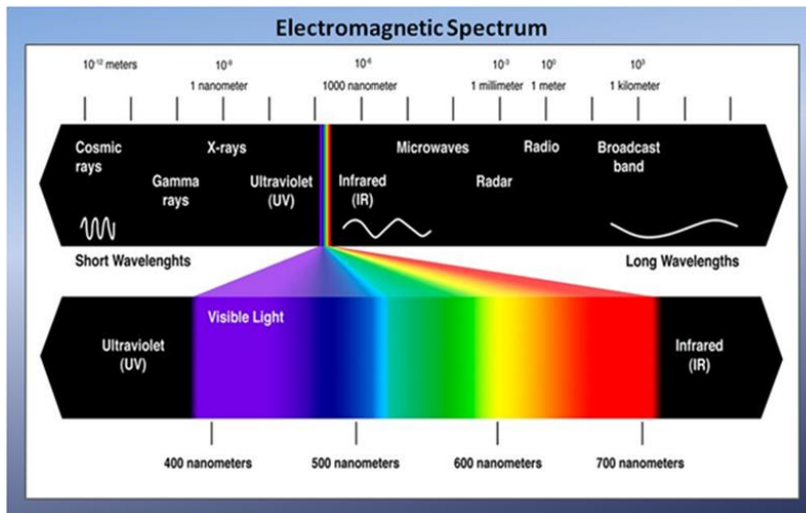


Figura 1.8 – Spettro elettromagnetico. Source: Zami Zuly, 2013. "The Electromagnetic Spectrum". da [www.zulyzami.com/The+Electromagnetic+Spectrum](http://www.zulyzami.com/The+Electromagnetic+Spectrum)

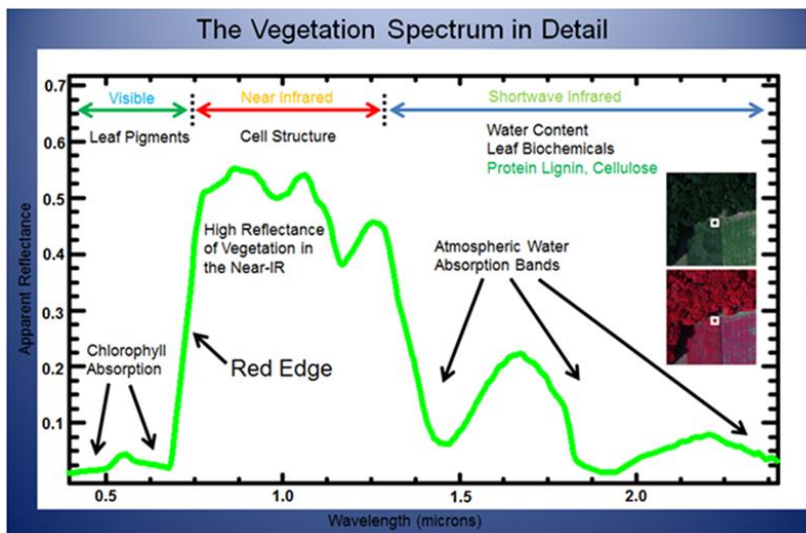
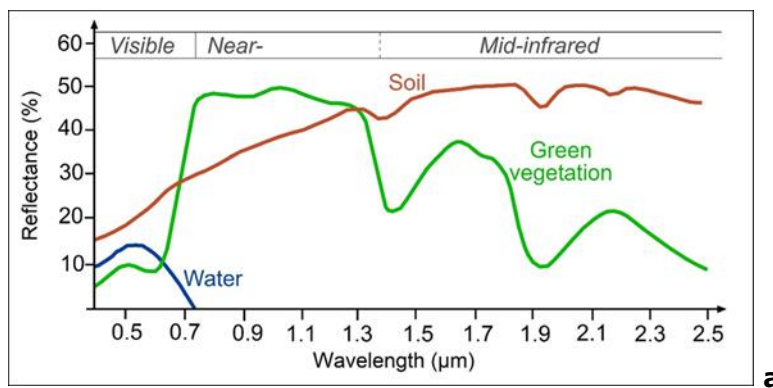


Figura 1.9 – Riflettanza spettrale. Differenze tra suolo, acqua e vegetazione verde (a) e particolare sulla vegetazione verde (b).

a) Fonte: <http://www.seos-project.eu/>

b) Fonte: Elowitz, Mark R., 2013. "What is Imaging Spectroscopy (Hyperspectral Imaging)?". da [www.markelowitz.com/Hyperspectral.html](http://www.markelowitz.com/Hyperspectral.html)

Nell'ambito del monitoraggio, l'uso delle immagini multispettrali per la gestione operativa di molte attività agricole è reso possibile attraverso lo sviluppo di modelli specifici. L'approccio convenzionale, ampiamente utilizzato fino ad oggi, mette in relazione uno specifico parametro di vegetazione con un indice di vegetazione derivato da dati telerilevati, tramite l'utilizzo di una varietà di tecniche di regressione statistica (Haboudane et al., 2004; Schjoerring e Hansen, 2003). Un altro approccio utilizza le informazioni, da immagini telerilevate, sulle variabili di stato della vegetazione (ad esempio, l'indice di area fogliare (LAI), la biomassa, il contenuto di acqua e il contenuto di clorofilla), per essere poi utilizzate come input per diversi modelli (es. Doraiswamy et al., 2003; Dorigo et al., 2007).

In letteratura si possono trovare una quantità rilevante di indici di vegetazione. In modo schematico gli indici si possono suddividere in tre categorie:

1. Indici intrinseci: basati solo sulla riflettanza spettrale misurata; ad esempio SR (Simple Ratio) (Jordan, 1969) e NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1974);
2. Indici in relazione con il suolo: che introducono l'uso di parametri legati al suolo, come ad esempio PVI (Perpendicular Vegetation Index) (Richardson, 1987), WDV (Weighted Difference Vegetation Index) (Clevers, 1989), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) (Huete, 1988), TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index) (Baret et al., 1989), MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) (Qi et al., 1994) e OSAVI (Optimum Soil Adjusted Vegetation Index) (Rondeaux et al., 1996);
3. Indici in relazione con la clorofilla: ad esempio CARI (Chlorophyll Absorption Ratio Index) (Kim et al., 1994), MCARI (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index) (Daughtry et al., 2000) e TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index) (Kim et al., 1994).

Questi indici di vegetazione possono fornire semplici strumenti di previsione basati su una piccola quantità di variabili esplicative. Dall'analisi dei comportamenti spettrali della vegetazione è possibile definire relazioni quantitative, per discriminare la vegetazione dalle altre tipologie di uso suolo, mediante l'utilizzo di algoritmi che si basano sul rapporto tra bande spettrali tipiche di assorbimento e di riflessione. Se prendiamo ad esempio la clorofilla, questa: 1) assorbe fortemente l'energia radiante tra 0,45  $\mu\text{m}$  (blu) e 0,65  $\mu\text{m}$  (rosso); 2) riflette la radiazione verde, in prossimità della lunghezza d'onda di 0,55  $\mu\text{m}$ , (colore delle foglie);

3)riflette fortemente la radiazione nella regione dell'infrarosso vicino da 0,8 a 1,3  $\mu\text{m}$  di lunghezza d'onda.

Sicuramente un indice di vegetazione ampiamente utilizzato è l'NDVI, questo è stato messo in relazione a differenti parametri di vegetazione, ad esempio: allo stato di nutrizione azotata nel frumento duro (Fitzgerald et al., 2010; Cammarano et al., 2011; Eitel et al., 2011); allo stress idrico (Altenbach, 2011); alle malattie e alla protezione delle colture (Nicolas, 2004; Williams et al., 2012); al controllo delle infestanti (Richardson e Wiegard, 1977), al vigore delle colture, alla biomassa e il LAI (Filella e Peñuelas, 1994; Broge e Lebanche, 2001) ed anche ad altri parametri che interagiscono con la vegetazione, come dati meteorologici e del suolo (Dalla Marta et al., 2011; Moldestad et al., 2011). Infine, gli indici di vegetazione sono utilizzati anche a carattere predittivo, sia sull'aspetto quantitativo, per prevedere la resa in granella nelle produzioni finali del frumento duro (Reynolds et al., 2000; Labus et al., 2002; Singh et al., 2002) e anche integrando i dati telerilevati con modelli colturali di simulazione per la valutazione della resa delle colture a scala regionale (Moulin et al., 1998; Mkhabela et al., 2011), che sull'aspetto qualitativo, cioè relativi alla previsione della qualità del grano, come il contenuto di proteine (Hansen et al., 2002, Basnet et al., 2003, Guasconi et al., 2011).

Uno dei problemi di questo indice di vegetazione risulta essere la banda larga spettrale, che satura oltre un certo livello di copertura del terreno (Mutanga e Skidmore, 2007) e, inoltre, è insensibile a piccole variazioni di concentrazione di azoto. Infatti, alcuni studi confermano che l'NDVI, e relativi indici simili, tendono a diventare saturi quando viene superato un LAI di 2-3 (Aparicio et al., 2000; Mistele et al., 2004).

Invece, dall'altro lato, indici di vegetazione calcolati dalle bande bordo rosso (Red Edge), noto anche come indice a banda stretta, ha fornito stime migliori rispetto ai tradizionali indici di vegetazione a banda larga (Hansen e Schjoerring, 2003; Mutanga e Skidmore, 2007). Alcuni risultati rilevati da Pinar e Curran (1996), e Filella e Peñuelas (1994) hanno dimostrato che la regione Red Edge è sensibile al contenuto di clorofilla (Chl) e allo stato di azoto. Schelling (2010) nel suo studio ha dimostrato che la combinazione del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e il Normalized Difference Vegetation Index Red Edge (NDVI-RE) è stato in grado di prevedere la concentrazione di Chl nel grano con un coefficiente di determinazione  $R^2 = 0,77$ . Inoltre, Schuster et al.(2012) hanno testato la banda Red Edge in un progetto di classificazione dell'uso del suolo.

Un ulteriore problema, essendo indici di natura empirica, riguarda la loro validità solo sul sito di indagine. Per minimizzare questo aspetto si possono utilizzare modelli che si fondano su principi fisici (Houborg et al., 2007), l'approccio fisico

implica l'uso di modelli di trasferimento radiativo (RTM – Radiative Transfer Model). Essi descrivono la variazione spettrale/direzionale della riflettanza della copertura vegetale in funzione delle caratteristiche della pianta, delle foglie e del suolo. L'RTM offre così un collegamento esplicito tra le variabili biofisiche e la riflettanza della vegetazione. Ciò consente l'analisi simultanea dello spettro completo (Schlerf e Atzberger, 2012). Un esempio di questi modelli per la valutazione di variabili biofisiche è l'utilizzo di due modelli combinati. Il modello di riflettanza della canopy SAIL (Scattering by Arbitrary Inclined Leaves; Verhoef, 1984) è stato accoppiato con un modello di proprietà ottiche della foglia PROSPECT (Jacquemoud e Baret, 1990) all'inizio del 1990 per ricavare un modello di trasferimento radiativo PROSAIL (Baret et al., 1992). L'utilizzo dei dati prodotti dalle reti neurali (NN), essendo derivati da modelli fisicamente basati, non richiede la calibrazione del modello, ma solamente la validazione di quest'ultimo, a differenza degli indici di vegetazione che richiedono sia calibrazione che validazione dei risultati ottenuti. Ci sono differenti studi su diverse colture agricole che utilizzano il modello PROSAIL (es. Jacquemoud et al., 1995; Atzberger, 2010; Richter et al., 2011), altri hanno studiato anche l'effettiva accuratezza del modello (Lemaire et al., 2004; Jacquemoud et al., 2009). Il Telerilevamento può rappresentare, attraverso il monitoraggio, una fonte ricca di informazioni sui parametri della vegetazione, che, inoltre, possono essere utilizzati come input nei modelli per la descrizione di processi eco-vegeto-produttivi delle colture (Cohen e Goward, 2004). Uno dei metodi più consolidati è l'utilizzo di modelli colturali che processano valori di LAI derivati da dati telerilevati (Maas, 1988; Barnes et al., 1997; Guérif e Duke, 2000; Dente et al., 2008; Fang et al., 2008). Diversi modelli colturali, come CERES (Ritchie e Otter, 1984; Barnes et al., 1997), EPIC (Williams et al., 1984), e STIC (Brisson et al., 1998, 2003), hanno la capacità di usare il LAI misurato o derivato dagli stessi come parametri di input. Ci sono altri studi, inoltre, che stimano la resa e le variabili biofisiche (es. LAI) del frumento tramite modelli come CERES-Wheat/DSSAT (Dente et al., 2008; Fang et al., 2008). Ed altri ancora hanno cercato di spiegare la distribuzione spaziale della resa di una coltura utilizzando immagini spettrali, la topografia, i dati di suolo e i dati meteorologici (Bouman, 1992; Senay et al., 2000; Reynolds et al., 2000). Questi modelli tentano di integrare i numerosi fattori che influenzano la crescita delle colture e lo sviluppo, come la disponibilità idrica del suolo, la temperatura, il vento, la genetica, le scelte di gestione, e le infestazioni parassitarie. La forza di questi ad essere utilizzati come strumenti di ricerca risiede nella loro capacità di catturare le interazioni suolo-ambiente-pianta, ma richiedono generalmente un numero di parametri fisiologici e pedologici che non sono facilmente acquisibili.

Infatti, questi modelli sono ampiamente utilizzati per simulare con successo la crescita delle colture e il loro sviluppo su scala locale.

	<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>
<b>Telerilevamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoraggio colture in continuo su scala territoriale;</li> <li>• Riprese multispettrali;</li> <li>• Riprese multitemporali;</li> <li>• Previsione rese.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dipendenza dalle condizioni atmosferiche per il monitoraggio;</li> <li>• Bassa risoluzione spaziale;</li> <li>• Tempo acquisizione-vendita immagine.</li> </ul>
<b>Indici di vegetazione</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Correlazione con variabili biofisiche;</li> <li>• Previsione rendimento finale;</li> <li>• Ancora da indagare previsione qualità produzione.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Saturano oltre una certa copertura del terreno;</li> <li>• Insensibili a piccole variazioni di azoto;</li> <li>• Natura empirica (validità solo nella zona d'indagine);</li> <li>• Richiedono calibrazione e validazione.</li> </ul>
<b>Modelli fisicamente basati</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possono utilizzare come input parametri calcolati dal modello stesso;</li> <li>• Analisi simultanea dello spettro;</li> <li>• Non richiede calibrazione, ma solo validazione;</li> <li>• Utilizzati per simulare crescita colture a scala locale.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Richiesta di parametri fisiologici e pedologici non facilmente acquisibili</li> </ul>

Tabella 1.6 – Schema dei vantaggi e svantaggi dell'utilizzo del telerilevamento, gli indici di vegetazione e i modelli fisicamente basati.

#### **1.4.1 Applicazioni di telerilevamento su frumento duro**

In letteratura si possono trovare alcuni studi specifici che mettono in relazione tecniche di telerilevamento con i dati riferiti alla coltivazione e alla produzione di frumento duro.

Ad esempio, Mistele e Schmidhalter (2010) utilizzano strumenti ottici montati su trattore per la misurazione della riflettanza spettrale della copertura vegetale del frumento duro. I risultati ottenuti indicano che esistono forti relazioni ( $R^2 = 0,90$ ) tra gli indici di riflessione e l'azoto totale contenuto nella parte aerea della pianta da fine accostamento fino alla fioritura, considerando, anche, che il peso secco della biomassa epigea è stato correlato con un  $R^2$  di 0,75. In particolare, l'utilizzo della configurazione ottica consente alle misurazioni di essere altamente indipendenti dal meteo e dalle condizioni del cielo giornaliero. Di conseguenza, concludono gli autori, il sistema promette di contribuire al miglioramento della gestione dell'azoto in appezzamenti eterogenei.

Un altro studio, effettuato da Eitel et al. (2011), utilizza una tecnologia di scansione laser che misura l'intensità della luce laser riflessa nella banda verde in modo accurato ( $R^2 = 0,68$ ), messa in relazione con lo stato di azoto nelle foglie di frumento nel periodo di inizio levata. Gli autori affermano che questa tecnologia può essere utile per misurare lo stato di azoto del grano durante prime fasi di crescita, suggerendo che ulteriori ricerche sono necessarie per valutare la praticità operativa di una scansione laser verde da una piattaforma mobile.

Dalla Marta et al. (2015), invece, hanno messo in relazione il frumento duro con il numero di giorni non piovosi di marzo e il LAI di aprile, che sono stati usati come variabili indipendenti in un modello multi-regressivo per la stima della resa finale. Il modello è stato convalidato con misurazioni a terra per testare la sua abilità come un indice di previsione semplificato. Le rese stimate risultano correlate con un'alta significatività a quelle osservate. I risultati hanno mostrato che l'indice di previsione è adatto per applicazioni agricole operative, essendo in grado di fornire, con alcuni dati di input, la prima previsione ad aprile, in anticipo rispetto alla maturità.

Altri autori, come Hansen et al. (2002), hanno valutato l'NDVI come indice predittivo dei raccolti di frumento ottenendo buone prestazioni per la resa, ma risultati insoddisfacenti rispetto al contenuto di proteine del grano. Analogamente, Freeman et al. (2003) riportarono che l'indice NDVI ha fornito una stima affidabile della produzione di frumento duro e dell'assorbimento di azoto dalla biomassa epigea, ma non sono state trovate correlazioni significative con il contenuto di proteine della granella.

## 1.5 LA SOSTENIBILITÀ

Verso la fine degli anni '80, con il rapporto della Commissione Brundtland (1987), si è iniziato a parlare di sviluppo sostenibile, come di uno sviluppo in grado di rispondere alle necessità del presente senza tuttavia compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie.

La sostenibilità in agricoltura è uno dei recenti obiettivi della Politica Agricola Comunitaria. In particolare, nell'ultima PAC 2014-2020, l'Unione Europea si è posta questi obiettivi:

1. "una produzione alimentare efficiente" in modo da contribuire al reddito agricolo limitandone le fluttuazioni, ma anche migliorare la competitività del settore permettendo così agli agricoltori di far fronte alla concorrenza dei mercati mondiali rispettando contemporaneamente le norme rigorose in materia ambientale e di sicurezza;
2. "una gestione sostenibile delle risorse naturali e un'azione per il clima" che garantisca non solo beni alimentari, ma anche una maggiore offerta di beni pubblici ambientali (paesaggi, biodiversità dei terreni, etc.); inoltre è necessario favorire una crescita verde attraverso l'innovazione tecnologica e produttiva e proseguire con gli interventi in modo da contribuire a ridurre gli impatti negativi del cambiamento climatico;
3. "uno sviluppo territoriale equilibrato" che riesca a sostenere l'occupazione rurale e che favorisca la diversità strutturale dei sistemi agricoli migliorando le condizioni per le piccole aziende e per i mercati locali.

Con il termine agricoltura sostenibile si intende la capacità dell'agricoltura di contribuire a lungo termine al benessere generale delle persone, producendo sufficiente cibo, merci e servizi, in modo economicamente efficiente e remunerativo, socialmente responsabile e rispettoso dell'ambiente (Nazioni Unite, 2009).

Infatti, un'agricoltura è sostenibile per l'ambiente (eco-sostenibile) quando consente la gestione permanente delle risorse agricole (evitando di danneggiare le risorse naturali di base), la gestione integrata del terreno, la lotta alla desertificazione e alla siccità e l'adattamento del settore ai cambiamenti climatici (OECD, 2008). Quindi, per sistemi agricoli sostenibili si intendono modelli produttivi che siano in grado di realizzare produzioni alimentari adeguate per qualità e quantità, garantire una giusta remunerazione economica per gli agricoltori e



favorire la salvaguardia dei suoli agricoli e delle risorse naturali (Meriggi et al., 2008). La sostenibilità è un concetto complesso definito e interpretato nei modi più diversi; lo sviluppo sostenibile non è un percorso semplice e richiede strumenti adeguati, per questo negli ultimi decenni la ricerca scientifica ha indicato degli indicatori di sostenibilità, che sono attributi quantificabili e misurabili di un sistema (Panell et al., 1999). Il più famoso è quello proposto da Rees (1992), cioè il "Carbon footprint", in cui è stato introdotto il concetto di "impronta ecologica". Più tardi, Wiedmann e Minx (2008) hanno evidenziato la prospettiva di utilizzare le emissioni di anidride carbonica come dato per quantificare l'impatto delle emissioni di gas a effetto serra sulla sostenibilità ambientale. Questi autori definiscono l'impronta di carbonio come "una misura della quantità totale di emissioni di anidride carbonica che è direttamente e indirettamente causata da un'attività o è accumulata durante le fasi di vita di un prodotto". Questa definizione, tuttavia, non tiene conto delle emissioni di gas serra diversi dal CO<sub>2</sub>. Il fatto è che una grande quantità di emissioni di gas serra associate alle attività agricole deriva principalmente dal protossido di azoto (N<sub>2</sub>O) (Janzen et al., 2006), un gas con potenziale di riscaldamento globale 300 volte superiore (Forster et al., 2007). In seguito, questo ed altri indici (come ad esempio il "Water footprint", Hoekstra, 2008), sono stati implementati in una tecnica di valutazione tra diversi sistemi, l'LCA (Life Cycle Assessment). La definizione secondo SETAC è che " LCA è un processo che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, di energia e delle emissioni nell'ambiente; e per identificare e valutare le opportunità di influenzare miglioramenti ambientali. La valutazione include l'intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività ("dalla culla alla tomba") , che comprende, l'estrazione e la lavorazione delle materie prime; la produzione, il trasporto e la distribuzione; l'uso, il riuso, la manutenzione; il riciclaggio e lo smaltimento finale" (Linee guida per Life-Cycle Assessment: A 'Code of Practice', SETAC, Bruxelles, 1993). La rilevanza di tale tecnica risiede principalmente nel suo approccio innovativo, che consiste nel valutare tutte le fasi di un processo produttivo come correlate e dipendenti (Baldo et al., 2008). All'interno della metodologia LCA (Fig. 1.10), il problema della quantificazione delle emissioni di gas serra (GHG, Greenhouse gas) è stato risolto attribuendo a ogni GHG un'equivalenza rispetto all'anidride carbonica, espresse in kg di CO<sub>2</sub> equivalente.

In letteratura, alcuni studi (FAO, 2002; Janzen et al., 2006; Rajaniemi et al., 2011) hanno concluso che le attività agricole e le pratiche agricole connesse hanno un impatto significativo, in molti paesi, sulle emissioni totali di gas a effetto serra a livello nazionale. La produzione agricola, infatti, contribuisce al riscaldamento

globale direttamente tramite il rilascio di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), di metano (CH<sub>4</sub>) e di protossido di azoto (N<sub>2</sub>O) dal suolo, e indirettamente tramite la richiesta di input, come carburante e fertilizzanti (Robertson e Grace, 2004; Smith et al., 2012, 2008). Lo sviluppo e l'implementazione di pratiche di mitigazione economicamente sostenibili, che riducono le emissioni di gas serra di origine agricola è quindi essenziale. Un aspetto molto importante per l'agricoltura sostenibile riguarda l'efficienza d'uso dell'azoto. Ciò è essenziale per la salute degli ecosistemi, dove l'uso intensivo di fertilizzanti azotati in agricoltura è la principale causa dell'eutrofizzazione di acqua fresca (London, 2005) e dell'inquinamento degli ecosistemi marini (Beman et al., 2005), come risultato di lisciviazione a causa dell'applicazione di alti tassi di fertilizzanti azotati (Tilman, 1999). Meisterling et al. (2009) hanno riferito che un adeguamento delle tecniche di coltivazione della produzione vegetale, compresa la rotazione delle colture (Halvorson et al., 2008), sono in grado di aumentare la qualità del suolo e ridurre le richieste di fertilizzanti azotati e, di conseguenza, ridurre gli impatti associati alla produzione e all'applicazione di fertilizzanti azotati. Infatti, gli impatti più rilevanti connessi con l'attività di coltivazione sono dovuti all'utilizzo di fertilizzanti azotati e alle operazioni meccaniche, in particolare alle lavorazioni del terreno (Ruini et al., 2010).

### **1.5.1 La sostenibilità: applicazioni su frumento duro**

Negli ultimi anni, anche in letteratura, si trovano studi riguardanti gli indicatori di sostenibilità ambientale applicati alla coltivazione del frumento duro. In realtà, molti di questi studi sono stati effettuati globalmente sull'intera filiera dell'industria della pasta (Fig. 1.11).

Un esempio di impiego degli indicatori ambientali di sostenibilità ambientale su scala più ampia è ben rappresentato dallo studio realizzato in collaborazione con Barilla G. E R. Fratelli Spa al fine di analizzare e valutare le caratteristiche dei principali sistemi colturali italiani nei quali è coltivato il frumento duro (Ruini et al., 2011). Infatti, Dyer et al. (2010) indicano come generatori di gas serra la produzione e la lavorazione di vari prodotti del frumento duro, e la commercializzazione di prodotti alimentari per i consumatori.

Altre ricerche, come quello di Rööös et al. (2011) hanno effettuato uno studio di CF calcolato per la produzione di pasta in Svezia. I risultati hanno mostrato che il CF medio per la pasta è stato di 0.50 kg CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> pasta (0.31 kg CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> frumento duro prima della processo di macinazione). Per una fattoria l'incertezza del CF è stata calcolata come compresa fra i valori di 0,22-,56 kg CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> grano.

Le variazioni medie, nei differenti anni, di CF sono comprese in un  $\pm 10-20\%$ . Inoltre, come risultato della ripartizione economica, il 92 % delle emissioni di gas serra derivanti dalla coltivazione di frumento duro e il trasporto dalla fattoria al mulino, sono stati assegnati alla farina usata per la cottura della pasta. Altri ancora come Gan et al. (2011) hanno effettuato uno studio sull'importanza della precessione colturale del frumento duro, riscontrato in un sistema con una impronta di carbonio media di  $0,42 \text{ kg di CO}_2\text{eq kg}^{-1}$  di grano. Gli autori hanno evidenziato che i sistemi in cui il frumento duro è stato preceduto da una coltura di semi oleosi (di colza o di senape) l'anno precedente ha abbassato l'impronta di carbonio del 19% rispetto al duro prodotto nel sistema di cereali-cereali ( $0,34 \text{ kg di CO}_2\text{eq kg}^{-1}$  di grano). Allo stesso modo, il frumento duro preceduto da una coltura proteica (ceci, lenticchie, piselli, etc.) l'anno precedente ha abbassato l'impronta di carbonio fino a  $0,30 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$  di grano, cioè il 28% in meno rispetto alla coltura di frumento duro preceduta da cereale.

Ulteriori studi effettuati da Fagnano et al. (2012) hanno riscontrato che su sistemi di coltivazione convenzionali, l'applicazione frazionata del fertilizzante azotato è obbligatoria per ottenere i migliori risultati in termini di qualità di pasta, concentrando la dose più alta alla fine della stagione delle piogge (nel mese di marzo, in ambienti mediterranei). Lo schema utilizzato nell'esperimento (25% del totale di azoto dato alla semina e il 75% a fine accettazione) è risultato appropriato allo scopo prefissato.

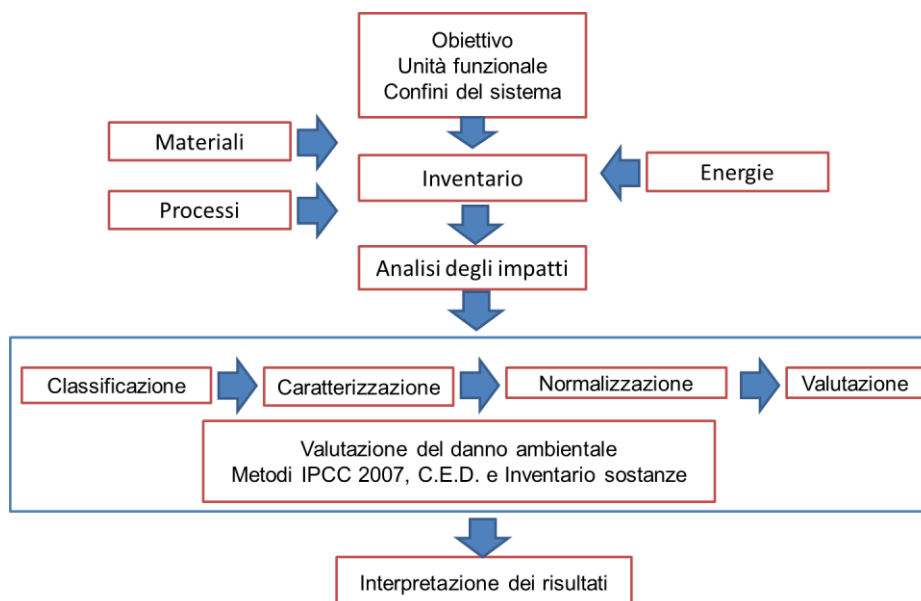


Figura 1.10 - Schema della metodologia LCA utilizzata nello studio.

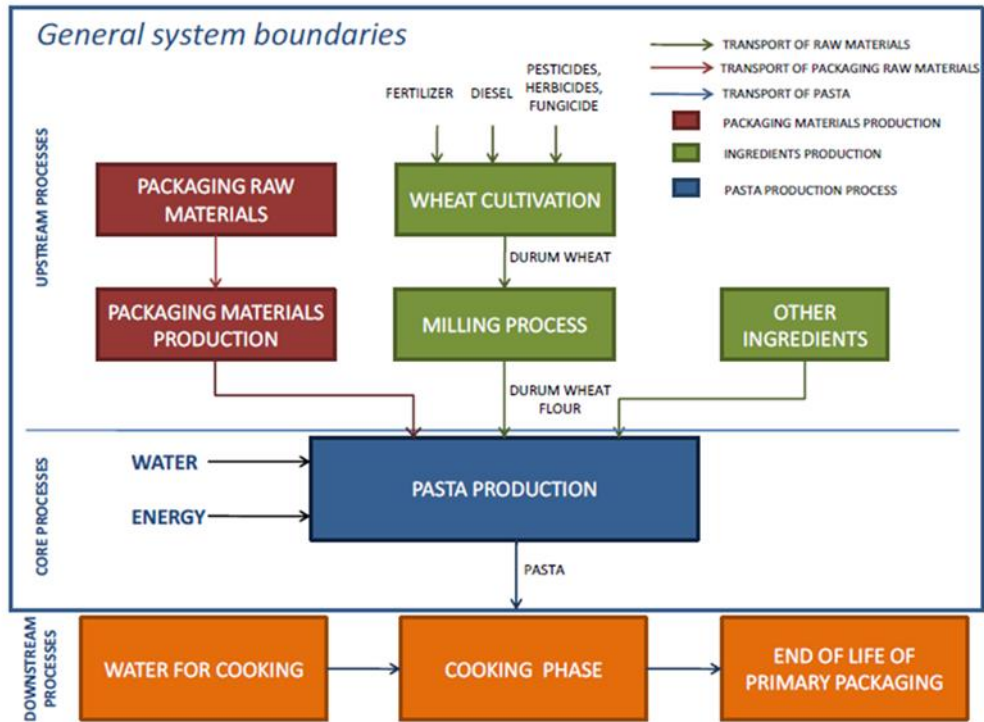


Figura 1.11 – Schema dei limiti generali del sistema per la produzione di pasta.

## 1.6 OBIETTIVI DELLA TESI

L'obiettivo generale dello studio è stato quello di analizzare e valutare la qualità e la sostenibilità del frumento duro (*Triticum durum* Desf., *Triticum turgidum* L. subsp. Duro) coltivato in Val d'Orcia, con l'utilizzo dell'integrazione di tecniche diverse, quali il telerilevamento, la modellistica e l'analisi del CF (Carbon Footprint) e altri indicatori ambientali attraverso la metodologia LCA (Life Cycle Assessment), i cui risultati sono stati confrontati con i dati rilevati tramite monitoraggio a terra ed analisi di laboratorio.

In particolare, per valutare la sostenibilità della produzione di frumento duro, lo studio ha scelto di prendere in considerazione l'aspetto riguardante l'importanza della gestione della concimazione azotata. Questa risulta fondamentale nello svolgere un ruolo chiave sia per quanto riguarda l'aspetto qualitativo nella produzione di frumento duro, che, d'altro canto, per ciò che riguarda l'impatto ambientale all'interno dell'agroecosistema.

Per realizzare questa analisi, lo studio si è avvalso, inoltre, delle più moderne tecniche di agricoltura di precisione, che sono risultate di grande aiuto specialmente sotto l'aspetto tecnico, permettendo di effettuare analisi georeferenziate delle variabili biofisiche del frumento duro. Le tecniche utilizzate sono state il monitoraggio tramite telerilevamento da piattaforma satellitare, abbinato ad un modello di crescita.

Infine, la ricerca ha valutato tramite l'utilizzo della metodologia LCA l'analisi della sostenibilità ambientale della produzione attraverso tre indicatori specifici, il CF, il consumo di risorse non rinnovabili e il consumo di acqua, riferendosi a tre differenti metodologie di gestione del fertilizzante azotato.

Per raggiungere tale scopo sono stati inoltre individuati una serie obiettivi specifici; in particolare:

- valutare il potenziale utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per monitorare la crescita e lo sviluppo del frumento duro, al fine di predire la resa in granella e il contenuto in proteine alla raccolta;
- analizzare il deficit nutrizionale di azoto durante il ciclo colturale, e intervenire con una fertilizzazione azotata tardiva mirata alla produzione quali-quantitativa attesa;
- elaborare un modello per la gestione della fertilizzazione azotata tardiva;
- valutare la sostenibilità ambientale attraverso il calcolo dell'impronta di carbonio della coltivazione di frumento duro tramite l'applicazione della metodologia LCA.

Infine, visto che il lavoro effettuato è stato svolto anche all'interno del progetto APPCoT (Agricoltura di Precisione per la Pasta dei Coltivatori Toscani, misura 124 - Piano di Sviluppo Rurale 2007-2013, Regione Toscana), un ulteriore obiettivo è stato quello di trasferire le competenze acquisite agli agricoltori locali.

## 1.7 LA VAL D'ORCIA

L'area oggetto di studio si colloca nella Val d'Orcia, nella parte sud della provincia di Siena, in Toscana. La Val d'Orcia prende il nome dall'omonimo fiume che l'attraversa e comprende i Comuni di Castiglion d'Orcia, Montalcino, Pienza, Radicofani e San Quirico d'Orcia (Fig. 1.12).

Il territorio delimitato a sud dal monte Amiata, un vulcano spento, ad est è separato dalla Valdichiana dai rilievi di Rapolano-Monte Cetona, mentre a nord e nordovest confina con le crete senesi.

Il territorio si presenta come un paesaggio collinare caratterizzato da profonde incisioni dovute all'azione erosiva dell'acqua (calanchi e biancane). L'importanza della cerealicoltura in questo territorio è espressa dalla figura 1.13 dove possiamo vedere la ripartizione della superficie della Val d'Orcia, e notare come i seminativi (escluse le foraggere avvicendate) includano il 30%, di cui la metà, cioè il 15 % del totale, coltivato a frumento duro.

Possiamo quindi affermare che questa coltura è una tra le più rappresentative del territorio, dove viene usata per produrre pasta di ottima qualità, e anche alcune paste tipiche locali, come i picci.

Per ciò che riguarda le altre destinazioni d'uso del terreno, importanti in questo territorio sono anche le colture foraggere avvicendate e permanenti (30 %) (Fig. 1.13), che, principalmente dal dopoguerra a oggi, hanno alimentato gli allevamenti di ovini dai quali si ricava il "pecorino di Pienza".

Questo territorio comprende anche una buona parte a vigneto (6 %), soprattutto nel comune di Montalcino, che produce un vino pregiato come il Brunello, ma anche nei restanti comuni che producono un vino denominato Orcia D.O.C.

Inoltre possiamo trovare anche una piccola produzione di olio di qualità, e, soprattutto a Montalcino e Castiglion d'Orcia, un'ampio territorio boscato, che fa parte del Monte Amiata (Fig 1.13).

La valle è anche un importante parco, naturale, artistico e culturale, dal 1999 ha ottenuto la protezione italiana come Area Naturale Protetta di Interesse Locale (ANPIL) "Val d'Orcia", e dal 2004, questo sito è stato riconosciuto patrimonio mondiale dell'Umanità dall'UNESCO, per lo stato di conservazione eccellente del panorama, così come prodotto da un'intelligente opera di antropizzazione, il quale ha avuto una notevole influenza su molti artisti del Rinascimento. La commissione ha così giustificato l'inserimento nella lista (UNESCO):

- « Criterio (iv): la Val d'Orcia è un eccezionale esempio di come il paesaggio naturale sia stato ridisegnato nel periodo Rinascimentale per rispecchiare gli ideali di buon governo e per creare un'immagine esteticamente gradevole;

- Criterio (vi): il paesaggio della Val d'Orcia è stato celebrato dai pittori della Scuola Senese, fiorita durante il Rinascimento. Le immagini della Val d'Orcia ed in particolar modo le riproduzioni dei suoi paesaggi, in cui si raffigura la gente vivere in armonia con la natura, sono diventate icone del Rinascimento ed hanno profondamente influenzato il modo di pensare il paesaggio negli anni futuri. »

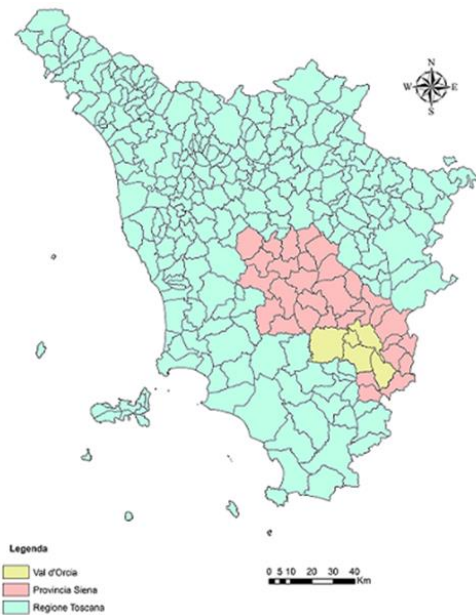


Figura 1.12 - Inquadramento della Val d’Orcia (colore giallo) nella Regione Toscana e nella Provincia di Siena (colore rosa).

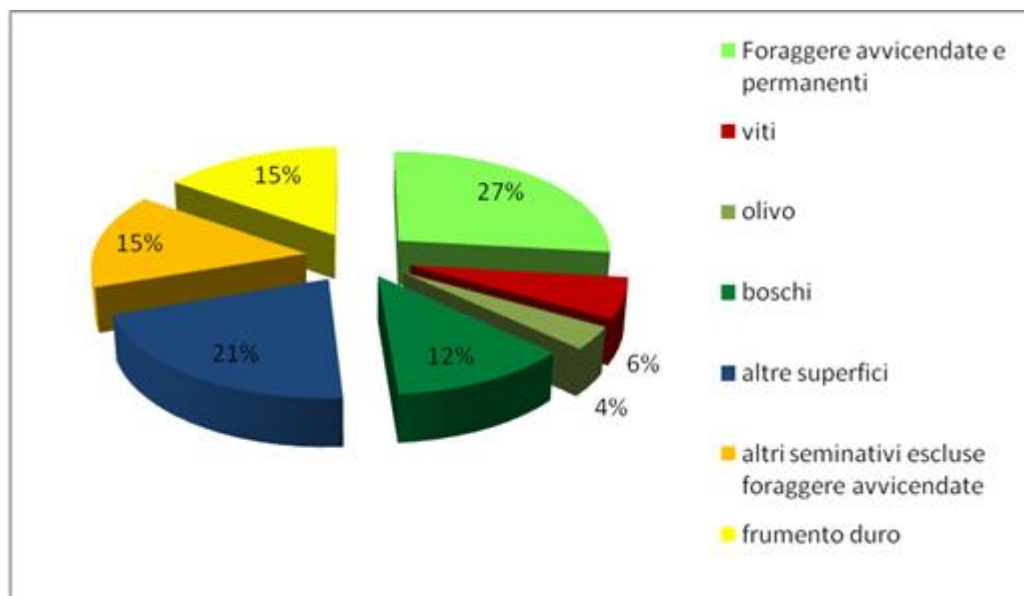


Figura 1.13 - Ripartizione delle superfici coltivate attivamente della Val d’Orcia nel 2010 (fonte ISTAT).



Il territorio della Val d’Orcia preso in oggetto come studio si trova prevalentemente tra i 250 m e i 350 m s.l.m. Il suolo è per lo più argilloso, ricco di calcare e frammisto a zone tufacee, composto da suoli derivati da argille plioceniche, che sono moderatamente profondi, non ghiaiosi, a tessitura da argilloso-limosa a franco-argillosa, molto calcarei e debolmente alcalini. La Val d’Orcia rientra, secondo la classificazione di Köppen, nella zona climatica temperata sublitoranea. Le temperature medie annue (1951-2011) ai 13,7 °C. La temperatura media del mese più freddo si riscontra a gennaio con 5,2 °C, mentre quella del mese più caldo, che si verifica nel mese di luglio, è di 23,4 °C (Fig. 1.14). Anche riguardo le medie delle temperature massime e minime, si confermano gli stessi mesi, con gennaio il mese più freddo ( con 8,5 °C la media delle massime e 1,9 °C quella delle minime) e luglio quello più caldo (con 8,5 °C la media delle massime e 1,9 °C quella delle minime). La media annua delle precipitazioni, calcolata sul periodo 1951-2011, è di 702,7 mm. con il picco in novembre, nel corso del quale cadono 94,7 mm. Nei mesi primaverili (marzo, aprile e maggio) cadono in media 60 mm di pioggia al mese, mentre nei mesi estivi (giugno, luglio e agosto) cadono in media meno di 50 mm al mese, con il valore minimo registrato nel mese di luglio, dove mediamente si hanno 30 mm di precipitazione (Fig. 1.14). Le precipitazioni annuali in questo territorio risultano sufficienti per le esigenze di acqua del frumento duro durante il ciclo colturale, di solito comprese tra i 450 e i 660 mm, a seconda delle condizioni che influenzano l’evapotraspirazione e la lunghezza del ciclo della pianta.

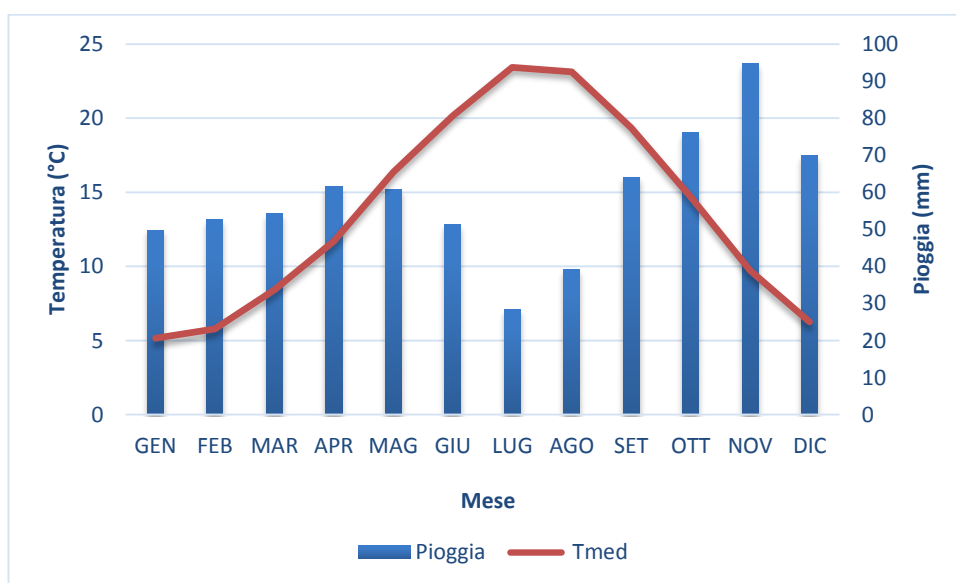


Figura 1.14 - Precipitazioni e temperature medie mensili registrate in Val d’Orcia nel periodo 1951-2011.

## **CAPITOLO 2**

Monitoraggio del Frumento Duro e previsione precoce della resa: valutazione del potenziale uso di immagini satellitari ad alta risoluzione in una zona collinare della Toscana, Centro Italia.

A. DALLA MARTA<sup>1\*</sup>, D. GRIFONI<sup>2</sup>, M. MANCINI<sup>3</sup>, F. ORLANDO<sup>1</sup>, F. GUASCONI<sup>1</sup> AND S. ORLANDINI<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell’Ambiente, Università di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze, Italia

<sup>2</sup> Istituto di Biometeorologia (CNR-IBIMET)/LaMMA, Via Madonna del Piano 10, Sesto Fiorentino, Italia

<sup>3</sup> Centro Interdipartimentale di Bioclimatologia, Università di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze, Italia

(Received 19 February 2013; revised 4 September 2013; accepted 24 October 2013)

Dalla Marta A., Grifoni D., Mancini M., Orlando F., Guasconi F., Orlandini S., 2015. Durum wheat in-field monitoring and early-yield prediction: assessment of potential use of high resolution satellite imagery in a hilly area of Tuscany, Central Italy. *Journal of Agricultural Science* 153, 68–77.

(vedi allegato)

## 2 SINTESI

L'agricoltura moderna si basa sul controllo della variabilità di campo, che è determinata dalle interazioni di numerosi fattori come il suolo, il clima e la coltura. Per questa ragione, l'utilizzo del telerilevamento sta diventando sempre più importante, grazie allo sviluppo tecnologico di satelliti in grado di fornire informazioni con elevata risoluzione spaziale e elevata frequenza di rivisitazione. Nonostante il gran numero di studi sull'uso del telerilevamento per il monitoraggio delle colture, molti pochi hanno affrontato il problema della variabilità spaziale a scala di campo o per la previsione anticipata sia della resa che della qualità della granella. Lo scopo della ricerca è stato quello di valutare il potenziale utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione spaziale per monitorare la crescita e lo sviluppo del frumento duro, indirizzato verso la previsione della resa in granella e del suo contenuto proteico, attraverso l'utilizzo di indici di vegetazione in due fasi fenologiche di sviluppo della coltura. Per rappresentare al meglio la variabilità naturale della produzione agricola, lo studio è stato condotto in campi di frumento gestiti da agricoltori locali. Per quanto riguarda il peso secco, l'indice della superficie fogliare e l'azoto (N), la possibilità di descrivere lo stato del raccolto è evidente nel periodo di levata, mentre all'antesi questo potenziale è completamente perso. Tuttavia, le immagini da satellite sembrano essere in grado di stimare la concentrazione di N. La biomassa epigea accumulata all'inizio della levata è strettamente collegata alla resa finale, mentre è stato confermato che i parametri osservati all'antesi sono meno informativi, nonostante sia più vicina al periodo di raccolta.

## 2.1 INTRODUZIONE

Con l'avvento della meccanizzazione a partire dalla metà del secolo scorso, l'agricoltura ha perso molta della sua capacità, di gestire la variabilità spaziale e temporale che caratterizza la coltura all'interno di singole unità produttive. L'analisi di razionalizzazione dei costi, insieme con la crescente consapevolezza ambientale, sta guidando la ricerca scientifica verso lo sviluppo di macchine agricole 'intelligenti' in grado di eseguire rapidamente la gestione sito-specifica delle colture. Questa svolta deve prendere in considerazione la conoscenza della variabilità di campo delle colture (Basso et al., 2012; Diacono et al., 2012). Per monitorare le caratteristiche qualitative e quantitative dei parametri delle colture che, fino ad oggi, erano svolte mediante indagini puntuali effettuate manualmente, le tecniche di telerilevamento possono essere applicate mediante lo sviluppo di una vasta gamma di indici di vegetazione specifici. Infatti, gli indici di vegetazione hanno dimostrato che sono strettamente collegati ad una serie di caratteristiche biofisiche e di processi vegetali, tra cui la produzione primaria, la percentuale di copertura vegetale, la biomassa fogliare e i flussi di anidride carbonica.

Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) è probabilmente l'indice di vegetazione più conosciuto e più utilizzato correlato direttamente alla capacità fotosintetica, e quindi all'assorbimento di energia della copertura vegetale (Inoue et al., 2008). L'NDVI è stato spesso applicato per comprendere le caratteristiche e la variabilità della vegetazione e le sue caratteristiche sia a scala globale che a quella locale. Quest'ultimo, infatti, mostra forti relazioni positive con i cambiamenti nella concentrazione dei pigmenti della foglia, con l'accumulo totale di sostanza secca epigea, con la biomassa fogliare, con l'indice di area fogliare (LAI), con il contenuto di acqua presente nella vegetazione (Ceccato et al., 2001; Aparicio et al., 2002; Sims e Gamon, 2003), con la risposta delle colture rispetto allo stato di azoto della coltura o della fornitura di N in concimazione (Tilling et al., 2007). Tuttavia, nel descrivere la copertura vegetale, l'adozione dell'NDVI e di altri indici del visibile-vicino infrarosso è limitato da effetti di rumore dovuti all'atmosfera, allo sfondo del suolo e alla saturazione dell'indice stesso causato da una densa copertura. Buoni risultati sono stati ottenuti anche con altri indici, in particolare il RedEdge (NDVI-RE) che è meno sensibile alla saturazione (Delegido et al., 2013). Rispetto all'NDVI, questo indice ha dimostrato correlazioni migliori con lo stato nutrizionale della coltura e con il contenuto di clorofilla nelle foglie (Perry e Roberts, 2008). Altri indici sono stati migliorati per ridurre la variazione a causa del fondo del terreno. Tra questi, l'Indice di Vegetazione Rettificato per il Suolo (SAVI, Soil Adjusted Index

Vegetazione) (Huete, 1988) e la versione 'Optimized' (OSAVI) sono stati utilizzati ampiamente (Rondeaux et al., 1996).

Attualmente, il telerilevamento viene utilizzato per fornire osservazioni sulle condizioni di coltivazione su vaste aree a intervalli di tempo regolari. Tuttavia, l'uso del telerilevamento come strumento operativo in sistemi di monitoraggio/previsione dei raccolti in agricoltura è stato principalmente legato alle politiche alimentari per valutare il loro impatto sulle economie rurali e l'ambiente a livello regionale/globale. Tali sistemi operativi sono basati sui rapporti tra gli indici telerilevati, la crescita delle colture e gli indicatori della produzione vegetale (Maselli e Rembold, 2001; Mkhabela et al., 2011).

Uno dei limiti all'utilizzo del telerilevamento in sistemi di supporto per la gestione agronomica a livello di azienda è stata la mancanza di una risoluzione spaziale e temporale adatta delle immagini, in grado di seguire lo sviluppo delle colture in piccole aree. Infatti, fino a pochi anni fa, l'alta-moderata risoluzione di immagini spaziali (10-30 m) ha avuto una bassa frequenza di rivisitazione (es., Landsat/Enhanced Thematic Mapper), considerando che una più alta risoluzione temporale è stata spesso caratterizzata da una bassa risoluzione spaziale (250-1000 m) (es., Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)). Recentemente, sono stati lanciati nuovi satelliti commerciali che combinano sensori ad alta risoluzione con elevata frequenza di rivisitazione (es., Quikbird, WorldView e RapidEye) (Vuolo et al., 2010).

Un'altra caratteristica importante per rendere l'informazione telerilevata veramente utile, è il tempo che intercorre dalla richiesta dell'immagine all'acquisizione satellitare, e dall'acquisizione satellitare alla consegna delle immagini elaborate (Beerli e Peled, 2009). La lunghezza di questi tempi dipende, anzitutto, dalle condizioni atmosferiche e dalla frequenza di rivisitazione dei satelliti, e in secondo luogo dal fornitore dei servizi. Con i recenti satelliti commerciali, come WorldView e RapidEye, il tempo trascorso dall'acquisizione dei dati alla restituzione di quest'ultimi è breve. Questo rende l'uso di immagini spettrali possibile nella gestione operativa di molte attività agricole basate su modelli specifici. Tali modelli tengono conto dei differenti bisogni e dei parametri relativi alla coltivazione, come lo stress idrico (Altenbach, 2012), lo stato di azoto (Cammarano et al., 2011; Eitel et al., 2011), il vigore delle piante e della crescita della biomassa (Filella e Peñuelas, 1994; Broge e Leblanc, 2001), della previsione della resa in granella (Labus et al., 2002), delle malattie (Nicolas, 2004), del controllo delle infestanti (Yan et al., 2012), delle condizioni del suolo e delle tendenze meteorologiche (Dalla Marta et al., 2011; Guasconi et al., 2011; Moldestad et al., 2011). Altri studi hanno, inoltre, integrato i dati di telerilevamento con modelli di simulazione delle

colture per valutare la resa di quest'ultime su scala regionale (Mkhabela et al., 2011).

Diversi studi sono stati sviluppati per analizzare la variabilità temporale della produzione di frumento duro, con lo scopo di prevedere la resa finale del grano e la sua qualità (Dalla Marta et al., 2011) e un gran numero di ricerche hanno anche affrontato il tema della variabilità spaziale a livello di campo. Tuttavia, alcuni di questi studi hanno valutato la possibilità del controllo a distanza delle colture e del suo ruolo potenziale di ottenere informazioni in anticipo sulle caratteristiche del raccolto di frumento (Cammarano et al., 2011; Basso et al., 2012). Sistemi di agricoltura di precisione commerciali basati sul telerilevamento, attuati in diversi paesi dal 1980 (Zhang et al., 2002), stanno migliorando grazie al continuo sviluppo tecnologico delle piattaforme satellitari e delle attrezzature tecniche utilizzate.

MODIS e Landsat sono stati utilizzati con successo per la stima della resa del frumento (Lobell et al., 2003). Più recentemente, i dati di Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar e Landsat Thematic Mapper sono stati applicati per monitorare le condizioni di campo e per prevedere la resa e il contenuto di proteine nella granella di frumento invernale (Liu et al., 2006).

Farmstar è un esempio di un servizio commerciale di telerilevamento per l'agricoltura di precisione, che utilizza una combinazione di immagini telerilevate da satelliti e aerei per la gestione della concimazione di N nel frumento, che è ampiamente adottato in Francia (Blondlot et al., 2005).

Tuttavia, in condizioni ambientali caratterizzate da elevata frammentazione e piccoli appezzamenti, la loro complessa morfologia e l'elevata variabilità conseguente richiede un'approfondita ricerca del significato biologico da attribuire alla risposta radiativa della copertura vegetale. In aggiunta, ci sono solo segnalazioni limitate riguardanti la possibilità di predire la qualità della granella di frumento da dati telerilevati (Hansen et al., 2002; Basnet et al., 2003).

Sulla base di queste considerazioni, l'obiettivo della ricerca è stato quello di valutare il potenziale utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per monitorare la crescita e lo sviluppo del frumento duro, rivolto alla previsione della resa e delle proteine nella granella. Per rappresentare al meglio la variabilità naturale della produzione agricola, lo studio è stato condotto sui campi di grano gestiti da agricoltori locali.

## 2.2 MATERIALI E METODI

La ricerca è stata condotta nel corso degli anni 2011/12 in Val d'Orcia (Toscana), una zona collinare del centro Italia caratterizzata da un clima tipicamente mediterraneo. In questa zona, il frumento duro (*Triticum durum* Desf., *Triticum turgidum* L. subsp. Duro) è la coltura principale, con una superficie media coltivata di circa 1000 ha/anno. Il principale tipo di terreno è franco-argilloso, secondo la classificazione USDA (Soil Survey Staff 1998). L'esperimento è stato progettato allo scopo di amplificare la variabilità spaziale naturale delle prestazioni della coltura nell'area di studio, già particolarmente elevata a causa della complessa morfologia collinare. A tal fine, tre diverse aziende sono state scelte in un'area di circa 50 km<sup>2</sup> (42°59'N, 11°45'E, 303m s.l.m.; 42°59'N, 11°45'E, 384m s.l.m.; 43°09'N, 11°52'E, 320m s.l.m.). In ogni azienda sono state seminate due varietà di frumento duro, Miradoux e Claudio, e sono stati eseguiti tre trattamenti di fertilizzazione azotata a seguito di un disegno a blocchi randomizzati con tre repliche, per un totale di 18 lotti, con una superficie di 3 ettari ciascuno. Un sottocampione di 15 × 15m è stato scelto a caso da ogni lotto. In ciascuna zona, sono stati raccolti da una superficie di 0,4 m<sup>2</sup> cinque campionamenti di piante, dove ciascuno a seguito uno schema a X. I campioni sono stati prelevati tre volte durante il ciclo colturale: all'inizio della fase di levata (12 aprile, fase di crescita (GS) 30), all'antesi (5 maggio, GS65) e alla maturità fisiologica (28 giugno, GS90) (Zadoks et al., 1974). I primi due campionamenti sono stati eseguiti nello stesso tempo dell'acquisizione dell'immagine satellitare. Durante i primi due campionamenti, misure non distruttive di LAI e SPAD sono state eseguite sui campioni tramite, rispettivamente, un ceptometro portatile (AccuPAR LP-80) e un palmare SPAD meter (Minolta Chlorophyll Meter SPAD-502). Le piante di frumento sono state poi raccolte per le misurazioni distruttive. Il peso secco della biomassa epigea (g/m<sup>2</sup>) è stato determinato mediante l'essiccazione dei campioni freschi in stufa a 105 °C per 24 h. La concentrazione di azoto (mg/g) nella coltura è stata misurata con l'analizzatore di elementi 'Flash EA 1112'. Il contenuto totale di N (g/m<sup>2</sup>) è stato ottenuto moltiplicando la concentrazione di N per il peso secco della biomassa. Durante l'ultimo campionamento, solo le misure distruttive sono state effettuate sulla biomassa e sulla granella. La resa (g/m<sup>2</sup>) è stata registrata con precisione mini-combine mediante la determinazione del peso secco del frumento dopo l'essiccamento (105 °C per 24 h). La concentrazione delle proteine nella granella (mg/g) è stata misurata con l'analizzatore di granella 'Infratec System 1241 Grain Analyser'. Il contenuto proteico totale (g/m<sup>2</sup>) è stato infine determinato moltiplicando la concentrazione proteica per la resa in granella. L'andamento dei

dati del raccolto è stato analizzato in ogni momento dell'indagine calcolando la media, i valori massimi e minimi osservati nell'area di studio e il calcolo della deviazione standard (SD) e del coefficiente di variazione (CV) tra i lotti. Ogni campionamento di campo è stato georeferenziato con un GPS portatile (palmare 'Juno™ST'). Nello stesso tempo dei campionamenti di campo, sono stati acquisiti dati di telerilevamento multispettrale dal satellite RapidEye, che porta un sensore multispettrale che registra la radianza in cinque ampie bande dello spettro elettromagnetico corrispondente al blu (440-510 nm), al verde (520-590 nm), al rosso (630-685 nm), al Red-Edge (690-730 nm) e al vicino infrarosso (NIR) (760-850 nm). I sensori forniscono una risoluzione spaziale di 5x5 metri e i satelliti hanno una rivisitazione giornaliera (off-nadir) e di 5 giorni (al nadir). Le bande spettrali utilizzate per lo studio erano quelle tra 630 e 850 nm e più precisamente il rosso, il red-edge e il NIR. Le immagini satellitari sono state elaborate attraverso georeferenziazione e ortorettifica. I prodotti consegnati da RapidEye sono già corretti radiometricamente: la correzione atmosferica è stata effettuata per mezzo del 'atmospheric and topographic correction ground reflectance workflow' della PCI Geomatica 2013 (PCI Geomatica Inc.). Sono stati calcolati e estratti i seguenti indici di vegetazione: NDVI, NDVIRE e OSAVI (Tabella 2.1). I valori degli indici di vegetazione telerilevati sono stati estratti da immagini satellitari nei punti corrispondenti alle osservazioni terrestri georeferenziate. In particolare, ciascun valore estratto deriva dalla media dei valori dei nove pixel attorno ad ogni punto di riferimento sul terreno. L'analisi statistica è stata effettuata sui dati misurati a terra e i dati telerilevati. L'analisi di regressione lineare è stata effettuata tra i parametri di vegetazione (peso secco, contenuto di N totale e concentrazione di N nella biomassa, LAI) e gli indici di vegetazione, registrati nelle stesse date (GS30 e GS65). La stessa analisi è stata condotta tra i parametri della raccolta (resa, contenuto di N totale e concentrazione di N nella granella) e gli indici di vegetazione registrati a GS30 e GS65 al fine di valutare la loro capacità di fornire informazioni sulla produzione delle colture in anticipo. Infine, sono state studiate le correlazioni anche tra i parametri osservati in colture GS30 e GS65 e i parametri del raccolto, tenendo conto dei valori medi delle singole tesi.

<b>Indice</b>	<b>Formula</b>	<b>Bibliografia</b>
NDVI	$(\text{NIR}-\text{Red})/(\text{NIR}+\text{Red})$	Rouse et al. (1974)
NDVIRE	$(\text{NIR}-\text{RedEdge})/(\text{NIR}+\text{RedEdge})$	Gitelson e Merzlyak (1997)
OSAVI	$(1+0.16) \times (\text{NIR}-\text{Red})/(\text{NIR}+\text{Red}+0.16)$	Rondeaux et al. (1996)

Tabella 2.1 – Indici di vegetazione utilizzati. NDVI (Indice di Vegetazione Normalizzato); NIR (Infrarosso vicino); NDVIRE (RedEdge Indice di Vegetazione Normalizzato); OSAVI (Indice di Vegetazione Rettificato per il Suolo versione 'Ottimizzato').



## 2.3 RISULTATI

In generale, l'andamento meteorologico ha mostrato alcune anomalie nei periodi autunnali e invernali (Fig. 2.1). In particolare, le precipitazioni nel periodo da novembre a marzo è stato quasi il 70% al di sotto della media del lungo termine (1961-1990), con una piovosità accumulata di 104,7 mm (misurata alla stazione di Castiglion d'Orcia, 4-15 km di distanza dai vari campi sperimentali). Nello stesso tempo, durante gennaio e febbraio, la temperatura è stata particolarmente bassa. Tuttavia, queste anomalie non hanno influenzato lo sviluppo regolare del raccolto a causa di una normalizzazione dei parametri climatici nel corso dei mesi successivi, che hanno un impatto maggiore sulla fenologia.

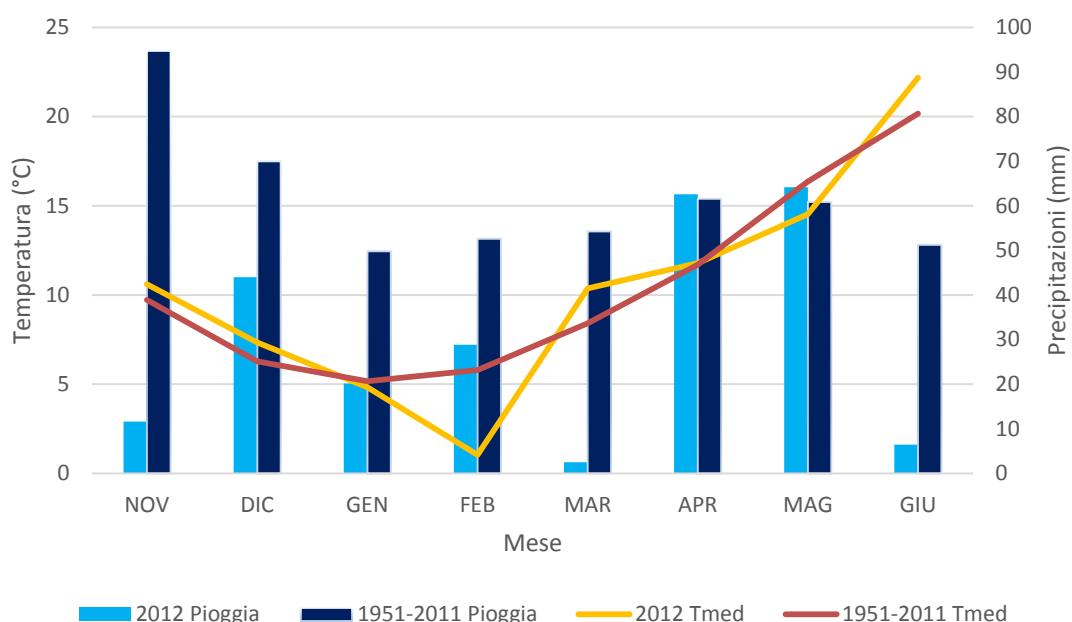


Figura 2.1 - Climogramma dell'area di studio durante il periodo di coltivazione del frumento duro (novembre-giugno). La barra blu scuro e la linea rossa rappresentano la media climatica (1961-1990), mentre la barra azzurra e la linea arancio rappresenta le precipitazioni e la temperatura della stagione 2011/12.

### 2.3.1 Le relazioni tra indici di vegetazione e i parametri culturali a GS30 e GS65

All'inizio della fase di levata (GS30), il peso secco medio della biomassa era 143,6 g/m<sup>2</sup>, la media di LAI era 1,44 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, mentre la concentrazione di N nella biomassa era 38 mg/g (Tabella 2.2). All'antesi (GS65), il peso secco della biomassa è aumentato fino a 628 g/m<sup>2</sup>, il valore medio di LAI è aumentato fino a 4,75 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>

e la concentrazione di N nelle piante è diminuita fino a 28,5 mg/g (Tabella 2.2). Alla raccolta, il rendimento medio è stato di circa 504 g/m<sup>2</sup>. La concentrazione di proteine del frumento, che è legato alla qualità del raccolto, ha mostrato un valore medio di 145 mg/g con estremi di 158 e 121 mg/g. Considerando la produzione di proteine totali, la media era 728 mg/g (Tabella 2.2). A GS30, tutti gli indici hanno mostrato un rapporto positivo e altamente significativo con il peso secco della biomassa. In particolare, per quanto riguarda gli indici telerilevati, la migliore correlazione è stata osservata con NDVIRE ( $r = 0,906$  e  $P \leq 0,001$ ) (Tabella 2.3), mentre nel caso del rapporto con la quantità di azoto nella pianta, nessuno degli indici era in grado di descrivere la concentrazione di N. Tuttavia, quando si considera la quantità totale di N, tutti gli indici sono stati altamente correlati. Tra gli indici di vegetazione telerilevati, il miglior coefficiente di correlazione è stato trovato con l'NDVIRE ( $r = 0,935$ ,  $P \leq 0,001$ ) (Tabella 2.3). Al GS65, i risultati erano completamente diversi, non si osservano correlazioni tra i parametri di vegetazione e gli indici (Tabella 2.3).

### **2.3.2 Le relazioni tra indici di vegetazione a GS30 e GS65 e le caratteristiche del raccolto**

A GS30, l'NDVIRE ha mostrato il coefficiente di correlazione più alto ( $r = 0,767$ ,  $P \leq 0,001$ ) e anche NDVI e OSAVI hanno ben descritto la produzione di proteine totali con cui sono stati positivamente correlati. Per quanto riguarda gli indici derivati da misurazioni a terra, lo SPAD non ha mostrato alcuna relazione con i parametri del raccolto. A GS65, non sono state osservate relazioni.

### **2.3.3 Le relazioni tra i parametri delle colture a GS30 e GS65 e le caratteristiche finali del raccolto**

Per spiegare le relazioni tra la produzione finale e gli indici misurati nelle due date, rispettivamente, 3 e 2 mesi prima del raccolto, è necessario studiare come i parametri di vegetazione osservati dalle misurazioni distruttive e da quelle non distruttive, e i parametri della produzione finale sono correlati l'un l'altro. Per quanto riguarda GS30, la biomassa epigea accumulata all'inizio levata era strettamente correlata alla resa finale (Tabella 2.4). Per quanto riguarda le caratteristiche qualitative del frumento, la concentrazione proteica aveva una correlazione debole con i parametri di vegetazione durante il periodo di crescita. La

migliore correlazione è stata trovata tra la concentrazione di proteine nella granella e la concentrazione di N nella pianta a GS30; tuttavia, quest'ultimo è il più difficile da determinare mediante l'uso di indici telerilevati. Una relazione negativa indica che l'incremento della biomassa corrisponde ad una diminuzione della qualità della granella. È interessante osservare che non vi era alcuna correlazione diretta del contenuto in proteine sia con la biomassa che con la concentrazione di N nella coltura, mentre la loro combinazione, cioè, la quantità di N/m<sup>2</sup>, ha dato la miglior correlazione ( $r = 0,580$  e  $P \leq 0,01$ ) con il contenuto proteico della granella di frumento duro. L'importante ruolo del LAI nel determinare la produzione finale è stata ancora una volta confermata. Quanto a GS65, è stato confermato come i parametri di vegetazione osservati forniscono meno informazioni circa le caratteristiche della produzione finale, pur avvicinandosi al tempo di raccolta. Per spiegare questo, è necessario confrontare i parametri di vegetazione in due fasi differenti. Esiste una correlazione positiva entro gli stessi parametri tra le due date, mostrando come i vantaggi acquisiti dalle piante nella fase iniziale sono state mantenute durante il resto del ciclo. Tuttavia, è stata osservata anche una diminuzione della loro variabilità. Infatti, il coefficiente di variabilità del contenuto di biomassa e di N sulla pianta è sceso rispettivamente da 0,29 a 0,16 e da 0,29 a 0,19 tra il GS30 e il GS65. Come risultato, durante l'antesi la maggior parte delle relazioni tra parametri della coltura e la produzione finale non erano significativi (Tabella 2.4).

Date	Sample	DW	LAI	N	N	Yield	PC	PC			
		(g/m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	(%)	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )	(%)			
DC30	mean	143.6	1.4	3.8	5.4						
	min	68.5	0.8	2.9	3.1						
	max	244.4	2.5	4.5	9.2						
	SD	41.17	0.41	0.35	1.55						
	CV	0.29	0.28	0.09	0.29						
DC65	mean	628.1	4.7	2.8	17.9						
	min	471.7	3.1	2.2	11.6						
	max	896.3	7.7	3.5	26.8						
	SD	102.96	1.28	0.31	3.38						
	CV	0.16	0.27	0.11	0.19						
DC90	mean								504.2	72.8	14.5
	min								384.9	56.1	12.1
	max								659.1	89.3	15.8
	SD								74.80	9.89	1.17
	CV								0.15	0.14	0.08

Tabella 2.2 - Parametri vegetativi e produttivi del frumento duro misurati a GS30, GS65 e GS90. DW (dry weight - peso secco); LAI (leaf area index - indice di area fogliare); N

(nitrogen - azoto); PC (protein content- contenuto di proteine); SD (standard deviation - deviazione standard); CV (coefficient of variation - coefficient di variazione).

Date	Index	DW	LAI	N	N	Yield	PC	PC
		(g/m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	(%)	(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )	(%)	(g/m <sup>2</sup> )
DC30	NDVI	0.806	0.848	-0.044	0.839	0.681	-0.381	0.516
	NDVI RE	0.906	0.942	-0.029	0.935	0.767	-0.383	0.598
	OSAVI	0.807	0.848	-0.044	0.840	0.681	-0.381	0.516
	SPAD	0.241	0.301	0.238	0.330	-0.198	0.389	-0.008
DC65	NDVI	-0.001	0.417	0.301	0.145	0.385	-0.192	0.327
	NDVI RE	0.008	0.330	0.260	0.135	0.293	-0.058	0.314
	OSAVI	-0.001	0.417	0.301	0.145	0.385	-0.192	0.327
	SPAD	0.076	0.117	0.246	0.210	-0.252	0.440	-0.016

Tabella 2.3 - Coefficienti di correlazione tra gli indici selezionati a GS30 e GS65 ed i parametri delle colture e della produzione finale. DW (peso secco); LAI (indice di area fogliare); N (azoto); PC (concentrazione di proteine); NDVI (Indice di vegetazione normalizzato); NDVI RE (RedEdge Normalized Difference Vegetation Index); OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index). Statistical significance: P≤0.05 con r≥0.4555, P≤0.01 con r≥0.571, P≤0.001 con r≥0.6932.

Date	Parameter	Yield	PC	PC
		(g/m <sup>2</sup> )	(g/m <sup>2</sup> )	(%)
DC30	DW (g/m <sup>2</sup> )	0.689	0.420	-0.513
	LAI	0.749	0.577	-0.365
	N (%)	0.080	0.451	0.636
	N (g/m <sup>2</sup> )	0.734	0.580	-0.323
DC65	DW (g/m <sup>2</sup> )	0.524	0.412	-0.295
	LAI	0.477	0.432	-0.155
	N (%)	0.017	0.121	0.173
	N (g/m <sup>2</sup> )	0.482	0.455	-0.146

Tabella 2.4 - Correlazioni tra i parametri delle colture a GS30 e GS65 e la produzione finale. DW (peso secco); LAI (indice dia area fogliare); N (azoto); PC (concentrazione proteine). Statistical significance: P≤0.05 con r≥0.4555, P≤0.01 con r≥0.571, P≤0.001 con r≥0.6932.

## **2.4 DISCUSSIONE**

### **2.4.1 Le relazioni tra indici di vegetazione e parametri della coltura a GS30 e GS65**

I risultati attuali hanno rivelato che la possibilità di descrivere e monitorare la crescita e la produzione delle colture mediante telerilevamento è stata evidente a GS30, mentre a GS65 gli indici hanno completamente perso questa capacità. Questi risultati possono essere parzialmente spiegati tenendo conto dell'effetto di saturazione degli indici, che si verifica nel corso del tempo nel monitoraggio dei parametri quantitativi (Fig. 2.2). La risposta radiometrica della copertura vegetale del frumento durante il periodo di crescita non è lineare: infatti, l'NDVI è molto sensibile alle variazioni della copertura quando il LAI è basso, quindi è utile per la stima di inizio stagione vegetativa, però, diventa saturo via via che aumenta la copertura del frumento (Aparicio et al., 2000; Dang et al., 2011). Sebbene le bande spettrali strette sono normalmente utilizzate per il monitoraggio dello stato del frumento, Li et al. (2010) hanno trovato che la banda Red-Edge è stata la più efficace quando ancora la copertura vegetale non era completamente chiusa (Diacono et al., 2013). L'alta risoluzione di immagini satellitari potrebbe avere effetto anche sulla correlazione tra gli indici di vegetazione, a causa di ombre e differenze strutturali a livello di chioma (Diacono et al., 2013). La combinazione di questi due effetti è stata probabilmente la causa della mancanza di correlazione tra le informazioni telerilevate e lo stato della coltura all'antesi. Quando si considera la concentrazione di N, gli indici hanno mostrato scarsa correlazione nel periodo pre-antesi. Ciò può essere spiegato dall'incapacità dei sensori satellitari di ricevere informazioni dagli strati più bassi della chioma, limitando la loro analisi al livello superiore, che nel caso del frumento è rappresentato prevalentemente da foglie. Tuttavia, nel frumento duro, l'azoto non si accumula solo nelle foglie, ma, una quota significativa, viene anche accumulata nello stelo (Dalling, 1985). Le riserve di N nello stelo sono stati presi correttamente in considerazione nella determinazione analitica dell'azoto totale al raccolto, mentre sono stati solo parzialmente considerati utilizzando gli indici basati su immagini telerilevate o misure da SPAD. In breve, i risultati suggeriscono che l'uso di indici di vegetazione telerilevati, come NDVI e NDVIRE, potrebbe essere un'opzione interessante per monitorare l'andamento delle colture. In particolare, la loro capacità di catturare la variabilità spaziale della crescita e della produzione delle colture risulta evidente durante la fase di levata, durante la quale la copertura della coltura è sufficiente per coprire il

suolo, ma al tempo stesso non provoca la saturazione degli indici, avvenuta in questo caso all'antesi con circa 200 g/m<sup>2</sup> di biomassa secca e con LAI di circa 3-4 (Fig. 2). Tuttavia, l'utilizzo delle tradizionali misure di campo come lo SPAD non hanno fornito le stesse informazioni delle immagini telerilevate. I risultati sono di particolare interesse perché GS30 è il periodo durante il quale si applica la seconda fertilizzazione. Di conseguenza, informazioni accurate sullo stato della vegetazione in quel momento sono importanti per ottimizzare la gestione della concimazione sulla base della crescita delle colture e dello stato di N in quest'ultime.

#### **2.4.2 Le relazioni tra indici di vegetazione a GS30 e GS65 e le caratteristiche del raccolto**

A GS30, tutti gli indici satellitari hanno mostrato una buona capacità di fornire informazioni predittive sulla quantità della raccolta finale, evidenziando correlazioni significative con la resa. Per quanto riguarda gli indici derivati dalle misure a terra, lo SPAD non era adatto come indice per prevedere la quantità e la qualità del raccolto. Probabilmente questo perché le unità SPAD sono difficili da interpretare, nonostante sia uno strumento portatile e adatto per l'uso in campo. Infatti, il valore di SPAD non dipende solo dal contenuto di clorofilla (con cui, tuttavia, vi è una relazione non lineare), ma anche su altri aspetti della foglia, che possono essere influenzati da vari fattori ambientali e biologici (Coste et al., 2010). Pertanto lo SPAD, come la maggior parte delle analisi basate su sensori di contatto, ha come limitazione il tempo e, quindi, possono essere campionate solo poche piante, e di conseguenza, una rappresentazione inesatta della variabilità spaziale e temporale dello stato di N nella coltura (Fitzgerald et al., 2010). A GS65, non sono state osservate relazioni, confermando l'ipotesi precedente sulla difficoltà degli indici di vegetazione di fornire informazioni utili sullo stato delle colture in fase di sviluppo avanzato. Inoltre, molti autori hanno riferito che lo stato di acqua nel raccolto ha un ruolo chiave nella creazione di relazioni empiriche tra indici di vegetazione e contenuto di N sulla coltura (Christensen et al., 2005; Rodriguez et al., 2006). In realtà, anche se una situazione di stress idrico potrebbe essere riconosciuto durante le prime fasi di sviluppo del frumento, nell'anno analizzato c'è stato un repentino cambiamento delle condizioni di pioggia da metà aprile a maggio (GS65) che potrebbe aver prodotto un grande cambiamento del contenuto di acqua al raccolto tale da essere percepito.

### **2.4.3 Le relazioni tra i parametri delle colture a GS30 e GS65 e le caratteristiche finali del raccolto**

Il rapporto tra biomassa epigea accumulata dall'emergenza alla levata e la resa finale può essere spiegato considerando come a GS30 la maggior parte della biomassa è rappresentata dalle foglie, che sono direttamente responsabili della crescita delle colture. La forte correlazione della resa con il LAI. Tuttavia, una buona resa è una conseguenza non solo della quantità di biomassa, ma anche dello stato nutrizionale della coltura, principalmente rappresentata dal suo contenuto di azoto. Questo viene confermato, inoltre, dalla correlazione positiva trovata tra la concentrazione di proteine della granella e la concentrazione di N a GS30, mostra che l'aumento della biomassa corrisponde ad una diminuzione della qualità del grano. In una fase iniziale, questo sembra già confermare l'effetto di diluizione che si verifica durante il riempimento della granella, associando un'alta resa ad una diluizione della concentrazione di proteine (Suprayogi et al., 2011). Infatti, un vigoroso stato vegetativo della pianta assicura un'elevata produzione di carboidrati. Questo spiega anche la correlazione negativa tra il contenuto di N ( $\text{g/m}^2$ ) e la concentrazione di proteine della granella ( $\text{mg/g}$ ), infatti, il contenuto di N aumenta con l'aumento della resa, mentre la concentrazione di proteine diminuisce. Quanto a GS65, è stato confermato che i parametri colturali osservati forniscono meno informazioni circa le caratteristiche della produzione finale, pur avvicinandosi al periodo della raccolta. In sintesi, i risultati della ricerca hanno dimostrato l'idoneità del satellite RapidEye per monitorare lo sviluppo delle colture su vaste aree del territorio. Gli indici spettrali derivanti dalla sua alta risoluzione di immagini, e in particolare gli indici NDVI e NDVIRE, rappresentano indicatori ottimali dei principali parametri quantitativi di crescita e sviluppo delle colture. Questa capacità di descrivere lo stato del raccolto è risultato particolarmente efficace a GS30, per due ragioni principali: in primo luogo, la variabilità della vegetazione è abbastanza alta per essere catturata e descritta da indici telerilevati, e in secondo luogo, la fase GS30 rappresenta il tempo ottimale in cui il terreno è completamente coperto mentre la quantità di biomassa non è ancora sufficiente per saturare gli indici.

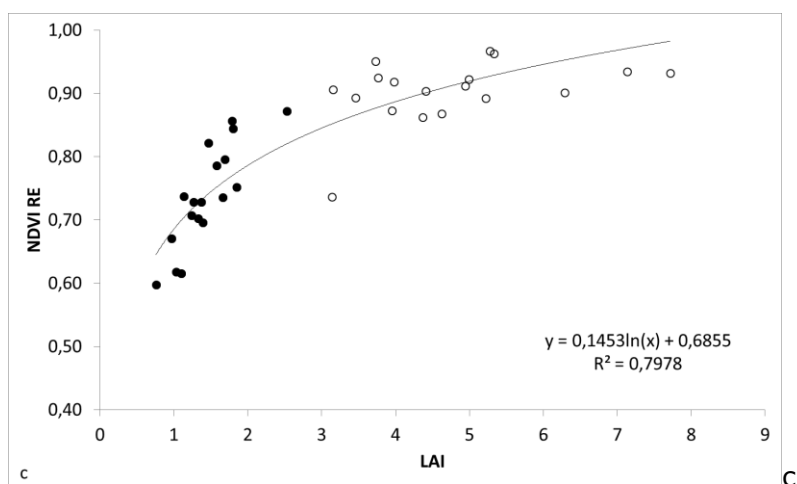
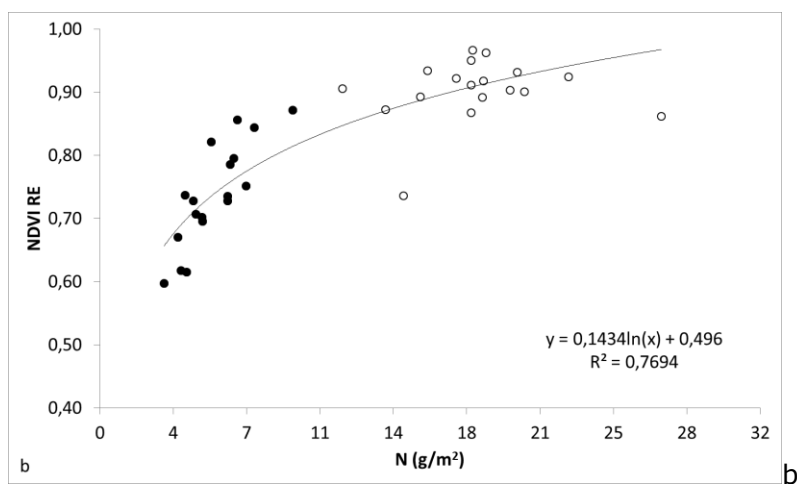
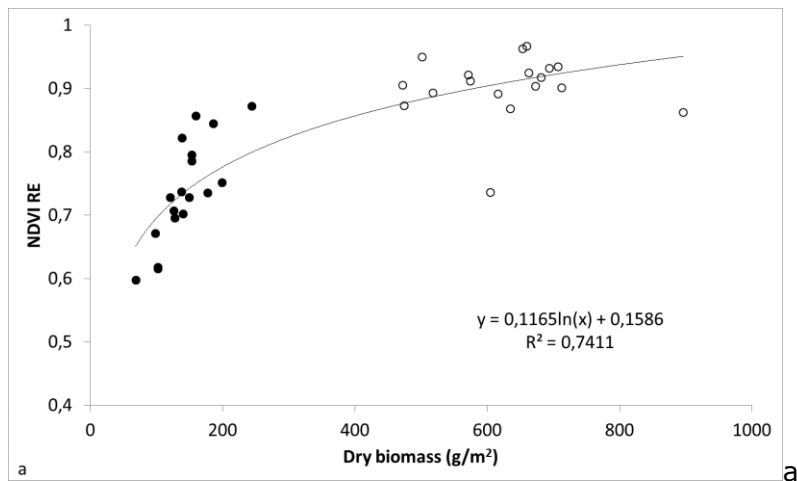


Figura 2.2 - Relazione tra indice NDVI RE e (a) biomassa secca, (b) contenuto di azoto e (c) LAI. I punti pieni rappresentano valori al GS30, i punti aperti rappresentano valori al GS65.



## 2.5 CONCLUSIONI

L'uso di immagini ad alta risoluzione da satelliti commerciali rappresenta un potente strumento per il monitoraggio dei terreni agricoli, fornendo informazioni che possono essere utilizzate direttamente dalle singole aziende. La stima da remoto consente di smarcarsi da misurazioni a terra che sono molto costose e richiedono molto tempo. Nel presente studio, la grande variabilità spaziale del suolo e le condizioni climatiche nelle zone collinari della Toscana hanno interessato la risposta vegeto-produttiva delle colture, risultando quindi molto eterogenea. In queste condizioni, mentre le misurazioni puntuali rappresentano in modo efficiente il dato nella immediate vicinanze del punto di misura, quest'ultime sono suscettibili di essere una fonte di errore quando utilizzate per descrivere aree più grandi. Viceversa, le immagini satellitari forniscono informazioni continue che meglio rappresentano lo stato reale del raccolto nel suo complesso. Inoltre, il tempo di attesa per ottenere le immagini elaborate si riduce a qualche giorno, anche se sono ancora influenzate dalle condizioni atmosferiche, che in primavera possono causare ritardi nell'acquisizione di immagini da satellite. L'uso delle informazioni via satellite da singole aziende non è ancora molto fattibile a causa di vincoli legati sia ai costi che alle competenze richieste. Invece, il loro utilizzo diventa più efficiente quando vengono condivise da forme organizzate di consorzi o cooperative agricole che le possono fornire come servizio con un costo di solo pochi €/ha. Le informazioni in corso a livello di campo possono essere utilizzate in modo più razionale per le applicazioni operative, come la fertilizzazione e la protezione delle piante durante la levata, e potrebbero essere gestite in linea con i principi dell'agricoltura sito-specifica. Complicazioni sorgono quando queste informazioni devono essere utilizzate per scopi predittivi, e quando le decisioni agronomiche sono fatte sulla base degli aspetti qualitativi e quantitativi della produzione finale previsti. Infatti, le prestazioni di produzione è in parte determinata dallo stato del frumento duro durante la prima fase di sviluppo, e in seguito, principalmente dalle condizioni climatiche durante il riempimento del grano. Per ottenere informazioni operative che coprano anche questo aspetto previsionale, sono necessarie ulteriori ricerche per analizzare i rapporti tra gli indici utilizzati e la variabilità del clima tra gli anni. Inoltre, l'integrazione dei dati telerilevati durante la fase di levata con la previsione stagionale sarebbe un aspetto interessante che merita ulteriori indagini.

Gli autori desiderano ringraziare il progetto APPCoT (misura 124 - Piano di Sviluppo Rurale 2007-2013, Regione Toscana), il Consorzio Agrario di Siena, e le aziende agricole Di Donato, Nardi e Rappuoli. Un ringraziamento speciale va anche al Dr. Pagliuca e il Dr. Ceccuzzi per il loro continuo supporto e la loro disponibilità.

## 2.6 BIBLIOGRAFIA

- Altenbach S.B., 2012. New insights into the effects of high temperature, drought and post-anthesis fertilizer on wheat grain development. *Journal of Cereal Science* 56, 39-50.
- Aparicio N., Villegas D., Casadesus J., Araus J. L., Royo C., 2000. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal* 92, 83-91.
- Aparicio N., Villegas D., Araus J.L., Casadesus J., Royo C., 2002. Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Sci.* 42, 1547-1555.
- Basnet B., Apan A., Kelly R., Jensen T., Strong W., Butler D., 2003. Relating satellite imagery with grain protein content of grain crops. In *Spatial Knowledge without Boundaries. Proceedings of the Inaugural Conference of the Spatial Sciences Institute, 22-26 September 2003* (Ed. B. Lees), pp. 22-27. Canberra: Australasian Urban & Regional Information Systems Association.
- Basso B., Fiorentino C., Cammarano D., Cafiero G., Dardanelli J., 2012. Analysis of rainfall distribution on spatial and temporal patterns of wheat yield in Mediterranean environment. *Europ. J. Agronomy* 41, 52- 65.
- Beeri O., Peled A., 2009. Geographical model for precise agriculture monitoring with real-time remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, 47-54.
- Blondot A., Gate P., Poilvé H., 2005. Providing operational nitrogen recommendations to farmers using satellite imagery. In *Precision Agriculture '05* (Ed. J. V. Stafford), pp. 345-352. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers.
- Broge N.H., Leblanc E., 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment* 76, 156-172.
- Cammarano D., Fitzgerald G.J., Basso B., Chen D., Grace P., O'Leary G.J., 2011. Remote estimation of chlorophyll on two wheat cultivars in two rainfed environments. *Crop & Pasture Science* 62, 269-275.
- Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., Jacquemoud S., Grégoire J.M., 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment* 77, 22-23.
- Christensen L.K., Rodriguez D., Belford R., Sadras V., Rampant P., Fisher P., 2005. Temporal prediction of nitrogen status in winter wheat under the influence of water deficiency using spectral and thermal information. In *Precision Agriculture '05* (Ed. J. V. Stafford), pp. 209-216. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers.
- Coste S., Baraloto C., Leroy C., Marcon E., Renaud A., Richardson A.D., Roggy J.C., Chimann H., Uddling J., Herault B., 2010. Assessing foliar chlorophyll contents with the SPAD-502 chlorophyll meter: a calibration test with thirteen tree species of tropical rainforest in French Guiana. *Annals of Forest Science* 67, 607.

- Dalla Marta A., Grifoni D., Mancini M., Zipoli G., Orlandini S., 2011. The influence of climate on durum wheat quality in Tuscany, Central Italy. *Int J Biometeorol* 55, 87–96.
- Dalling M. J., 1985. The physiological basis of nitrogen redistribution during grain filling in cereals. In *Exploitation of Physiological and Genetic Variability to Enhance Crop Productivity* (Eds J. E. Harper, L. E. Schrader & R.W. Howell), pp. 55–71. Rockville, MD, USA: American Society of Plant Physiologists.
- Dang Y. P., Pringle M. J., Schmidt M., Dalal R.C., Apan A., 2011. Identifying the spatial variability of soil constraints using multi-year remote sensing. *Field Crop Research* 123, 248–258.
- Delegido J., Verrelst J., Meza C. M., Rivera J. P., Alonso L., Moreno J., 2013. A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems. *European Journal of Agronomy* 46, 42–52.
- Diacono M., Castrignanò A., Troccoli A., De Benedetto D., Basso B., Rubino P., 2012. Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. *Field Crops Research* 131, 49–62.
- Diacono M., Rubino P., Montemurro F., 2013. Precision nitrogen management of wheat. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 219–241.
- Eitel J.U.H., Vierling L.A., Long D.S., Hunt E.R., 2011. Early season remote sensing of wheat nitrogen status using a green scanning laser. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 1338–1345.
- Filella I., Peñuelas J., 1994. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing* 15, 1459–1470.
- Fitzgerald G., Rodriguez D., O’Leary G., 2010. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index – the canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crops Research* 116, 318–324.
- Gitelson A.A., Merzlyak M.N., 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Int. J. Remote Sens.* 18, 2691–2697.
- Guasconi F., Dalla Marta A., Grifoni D., Mancini M., Orlando F., Orlandini S., 2011. Influence of climate on durum wheat production and use of remote sensing and weather data to predict quality and quantity of harvests. *Italian Journal of Agrometeorology* 3, 21–28.
- Hansen P.M., Jorgensen J.R., Thomsen A., 2002. Predicting grain yield and protein content in winter wheat and spring barley using repeated canopy reflectance measurements and partial least squares regression. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 139, 307–318.
- Huete A.R., 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Rem. Sens. Environ.* 25, 295–309.
- Inoue Y., Peñuelas J., Miyata A., Mano M., 2008. Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO<sub>2</sub> flux measurements in rice. *Remote Sens. Environ.* 112, 156–172.

- Labus M.P., Nielsen G.A., Lawrence R.L., Engel R., Long D.S., 2002. Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 4169-4180.
- Li F., Miao Y., Hennig S.D., Gnyp M.L., Chen X., Jia L., Bareth G., 2010. Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. *Precision Agriculture* 11, 335–357.
- Liu L., Wang J., Bao Y., Huang W., Ma Z., Zhao C., 2006. Predicting winter wheat condition, grain yield and protein content using multi-temporal EnviSat-ASAR and Landsat TM satellite images. *International Journal of Remote Sensing* 27, 737–753.
- Lobell D.B., Asner G.P., Ortiz-Monasterio J.I., Benning T.L., 2003. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 94, 205–220.
- Maselli F., Rembold F., 2001. Analysis of GAC NDVI data for cropland identification and yield forecasting in Mediterranean African countries. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 67, 593-602.
- Mkhabela M.S., Bullock P., Raj S., Wang S., Yang Y., 2011. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 385–393.
- Moldestad A., Fergestad E.M., Hoel B., Skjelvag A.O., Uhlen A.K., 2011. Effect of temperature variation during grain filling on wheat gluten resistance. *Journal of Cereal Science* 53, 347-354.
- Nicolas H., 2004. Using remote sensing to determine of the date of a fungicide application on winter wheat. *Crop Protection* 23, 853–863.
- Perry E.M., Roberts D.A., 2008. Sensitivity of Narrow-Band and Broad-Band Indices for Assessing Nitrogen Availability and Water Stress in an Annual Crop. *Agron. J.* 100, 1211–1219.
- Rodriguez D., Fitzgerald G.J., Belford R., Christensen L.K., 2006. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. *Australian Journal of Agricultural Research* 57, 781–789.
- Rondeaux G., Steven M., Baret F., 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 55, 95–107.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C., 1974. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. In: NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA, pp. 1–137.
- Sims D.A., Gamon J.A., 2003. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: A comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment* 84, 526–537.
- Soil Survey Staff (1998). *Keys to Soil Taxonomy*, 8th edn. Washington, DC: USDA & NRCS.
- Suprayogi Y., Clarke J.M., Bueckert R., Clarke F.R., Pozniak C.J., 2011. Nitrogen remobilization and post-anthesis nitrogen uptake in relation to elevated grain protein concentration in durum wheat. *Canadian Journal of Plant Science* 91, 273–282.

- Tilling A.K., O'Leary G.J., Ferwerda J.G., Jones S.D., Fitzgerald G.J., Rodriguez D., Belford R., 2007. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. *Field Crop Res.* 104, 77–85.
- Vuolo F., Atzberger C., Richter K., D'Urso G., Dash J., 2010. Retrieval of biophysical vegetation products from rapideye imagery. In: Wagner W., Székely, B. (eds.): *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5–7, 2010, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7A.*
- Yan L.; Jones G.; Villette S.; Paoli J.N., Gée C., 2012. Combining spatial and spectral information to improve crop/weed discrimination algorithms. *Proc. SPIE 8300, Image Processing: Machine Vision Applications V, 83000E.*
- Zadoks J.C., Chang T.T., Konzak C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14, 415-421.
- Zhang N., Wang M., Wang N., 2002. Precision agriculture: a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture* 36, 113–132.

## **CAPITOLO 3**

Assimilazione tramite telerilevamento di variabili biofisiche del frumento duro e creazione di un semplice modello per la gestione dell'azoto.

F. GUASCONI<sup>1</sup>, R. CASA<sup>2</sup>, A. DALLA MARTA<sup>1</sup>, M. MANCINI<sup>3</sup> e S. ORLANDINI<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente, Università di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze, Italia

<sup>2</sup>Dipartimento di scienze e tecnologie per l'Agricoltura, le Foreste, la Natura e l'Energia, Università della Tuscia, via San Camillo de Lellis, 01100 Viterbo, Italia

<sup>3</sup> Centro Interdipartimentale di Bioclimatologia, Università di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze, Italia

Guasconi F., Casa R., Dalla Marta A., Mancini M., Orlandini S., (da sottomettere).  
Assimilation of remotely sensed crop variables into a simple crop nitrogen stress model.

### **3 SINTESI**

Il frumento duro (*Triticum durum* Desf., *Triticum turgidum* L. subsp. Duro) svolge un ruolo fondamentale per l'agricoltura italiana e per la produzione di pasta mondiale. L'azoto (N) è considerato un elemento fondamentale al fine della produzione di qualità della granella e quindi della qualità della semola. Lo scopo di questo studio è quello di sviluppare un modello semplificato per la gestione dell'azoto al fine nella produzione di granella finale di frumento duro. Questo allo scopo di simulare la crescita della coltura ed, in particolare, la biomassa e la quantità di azoto durante tutto il periodo vegetativo.

Una prima analisi è stata effettuata con l'utilizzo di immagini multi spettrali telerilevate dal satellite RapidEye. In particolare, in prima battuta, sono stati messi a confronto due indici di vegetazione creati nello studio, il ChINDI e il CI RedEdge, e un modello semplificato di reti neurali (BVNET) al fine di individuare la migliore relazione con la variabile biofisica del LAI (Leaf Area Index). Il modello BVNET è stato quello che ha mostrato un minore valore di errore quadratico medio (RMSE) rispetto agli indici di vegetazione calcolati tramite l'uso di immagini spettrali da satellite. Quindi, l'utilizzo di modelli di reti neurali ha portato ad un miglioramento nella descrizione della situazione di campo rilevata dall'immagine multi spettrale tele rilevata.

Lo studio, in seconda battuta, ha permesso la creazione di un modello di crescita delle colture (AZOSAFYE), con particolare attenzione alla simulazione di azoto. In questo modo si possono avere dei dati, il più coerenti possibili, riguardo la situazione sull'effettiva disponibilità di azoto, durante tutto il ciclo vegetativo, e anche l'effettivo livello alla raccolta. I risultati hanno mostrato che il modello AZOSAFYE è un ottimo strumento per la simulazione giornaliera della crescita della biomassa e della quantità di azoto che quest'ultima possiede. Inoltre, è stato riscontrato che il margine di errore delle simulazioni di quest'ultimo, calcolato come errore medio percentuale (M%E), risulta essere estremamente basso, sia rispetto ai valori osservati della resa (1,69%) sia per quelli della quantità di azoto finale nella granella (-0,86%).



### 3.1 INTRODUZIONE

L'azoto (N) è spesso considerato il fattore limitante più importante, dopo il deficit idrico, per la produzione di biomassa negli ecosistemi naturali. In sistemi agricoli, pratiche di fertilizzazione di azoto sono in grado di fornire un sufficiente apporto di quest'ultimo alle piante, in modo da ottenere le prestazioni potenziali consentite dal tempo. Quindi, per determinare la risposta della pianta alla fertilizzazione azotata, risulta essenziale conoscere l'effettiva richiesta di azoto per poter sviluppare pratiche razionali per un utilizzo più efficiente di N, al fine di migliorare la gestione delle applicazioni di azoto (tasso azoto e la sua tempistica) che possono portare alle massime prestazioni e a minori rischi ambientali. Per determinare la corretta concimazione azotata sia a livello produttivo, che economico, che ambientale si dovrebbe: (i) determinare la domanda d'azoto delle colture in base alle diverse rese di riferimento, (ii) stimare la fornitura di azoto nel suolo, e (iii) determinare il tasso di applicazione di azoto e la sua tempistica (Lemaire et al., 2008).

Dal momento che i tassi di fertilizzazione azotata e i tempi di applicazione sono un fattore decisivo per l'ottenimento di rese elevate, di maggiore contenuto di proteine e, in generale, di un miglioramento della qualità del frumento, sono stati condotti diversi studi per determinare il tasso ottimale e il tempo di applicazione di azoto (Borghi, 2000; Wooding et al., 2000; López-Bellido et al., 2001; Blankenau et al., 2002; Garrido-Lestache et al., 2005; Marino et al., 2009). Infatti, in letteratura si incontrano molti studi che si occupano della tempistica della fertilizzazione azotata. Ad esempio, Lopez-Bellido et al. (2006), in un agro-ecosistema Mediterraneo, raccomandano l'applicazione del fertilizzante azotato nel frumento preferibilmente tra l'accestimento e la levata, che risulta essere considerata una buona strategia, sia per l'ambiente che per i ritorni economici degli agricoltori. Fuertes-Mendizábal et al. (2010) hanno trovato che il frazionamento dello stesso tasso di azoto in tre rate, alle fasi Ground Stage (GS) GS20, GS30 e GS37 (secondo la scala Zadoks et al., 1974) invece di due (fasi GS20 e GS30) non ha modificato la resa in granella, ma ha migliorato il tenore di proteine nel frumento, indicando che una domanda tardiva di azoto può avere più impatto sia sul metabolismo e la rimobilizzazione di azoto che sull'accumulo di biomassa e resa in granella. Anche Garrido-Lestache et al. (2004) hanno osservato che i tempi e la scissione del fertilizzante azotato di azoto ha influenzato il contenuto di proteine nel grano, che ha raggiunto il picco quando la metà o un terzo del tasso di azoto (150 kg N ha<sup>-1</sup>) è stata applicata alla levata, e in alcuni casi in cui è stata applicata solo all'accestimento.

La maggior parte di questi studi utilizzano metodologie che forniscono regolarmente variabili biofisiche basandosi sulle caratteristiche spettrali delle osservazioni

attraverso un rapporto semi-empirico che collega le variabili di interesse ad una combinazione di misurazioni radiometriche (ovvero indice di vegetazione) (Buermann et al., 2002; Chen et al., 2002; Gobron et al., 1999). Questi risultano efficienti per operare su grandi quantità di dati, ma non sfruttano le informazioni complete dello spettro. Per minimizzare questo aspetto si possono utilizzare modelli che si fondano su principi fisici (Houborg et al., 2007), l'approccio fisico implica l'uso di modelli di trasferimento radiativo (RTM – Radiative Transfer Model). Essi descrivono la variazione spettrale/direzionale della riflettanza della copertura vegetale in funzione delle caratteristiche della pianta, delle foglie e del suolo. L'RTM offre così un collegamento esplicito tra le variabili biofisiche e la riflettanza della vegetazione. Ciò consente l'analisi simultanea dello spettro completo (Schlerf e Atzberger, 2012). Un esempio di questi modelli per la valutazione di variabili biofisiche è l'utilizzo di due modelli combinati. Il modello di riflettanza della canopy SAIL (Scattering by Arbitrary Inclined Leaves; Verhoef, 1984) è stato accoppiato con un modello di proprietà ottiche della foglia PROSPECT (Jacquemoud e Baret, 1990) all'inizio del 1990 per ricavare un modello di trasferimento radiativo PROSAIL (Baret et al., 1992). L'utilizzo dei dati prodotti dalle reti neurali (NN), essendo derivati da modelli fisicamente basati, non richiede la calibrazione del modello, ma solamente la validazione di quest'ultimo, a differenza degli indici di vegetazione che richiedono sia calibrazione che validazione dei risultati ottenuti. Ci sono differenti studi su diverse colture agricole che utilizzano il modello PROSAIL (es. Jacquemoud et al., 1995; Atzberger, 2010; Richter et al., 2011), altri hanno studiato anche l'effettiva accuratezza del modello (Lemaire et al., 2004; Jacquemoud et al., 2009). Diversi scienziati hanno trovato un interesse crescente rispetto ad approcci basati su modelli e osservazioni da telerilevamento (Moulin et al., 1998; Pellenq e Boulet, 2004; Olioso et al., 2005). I modelli simulano in continuo lo sviluppo e la crescita delle colture, mentre le immagini satellitari offrono osservazioni regolari, spaziali e temporali, di alcune variabili biofisiche della copertura vegetale, come, ad esempio, l'indice di superficie fogliare verde o la frazione di radiazione assorbente fotosinteticamente attiva (fAPAR) (Bastiaanssen et al., 2000; Scotford e Miller, 2005). Altri autori hanno utilizzato un indicatore della carenza di azoto di una coltura (NNI, Nitrogen Nutrition Index) (Lemaire e Gastal, 1997; Lemaire e Meynard, 1997) per determinare la quantità di applicazione e la tempistica del fertilizzante azotato. Valori di questo indice inferiori a 1,0 indicano che il raccolto è carente in azoto, mentre un NNI pari o superiore a tale soglia indica che il raccolto non è carente in azoto. L'NNI di una coltura può essere previsto utilizzando modelli colturali quali AZODYN (Jeuffroy e Recous, 1999) o STIC (Brisson et al., 2002), prima della data di applicazione N. Quindi il valore predetto può essere utilizzato

per identificare settori di campo in cui il concime azotato va applicato. Naud et al. (2007, 2008) hanno dimostrato che la previsione della NNI dal modello AZODYN può essere fortemente migliorata con l'assimilazione dei dati forniti da misurazioni precedenti o stime di alcune variabili di colture come il LAI, la biomassa o la quantità di clorofilla. Così l'accoppiamento di modelli colturali con i parametri biofisici delle colture, stimati o misurati, potrebbero consentire una migliore stima dello stato di azoto al raccolto. Infatti, il telerilevamento rappresenta una fonte ricca di informazioni sui parametri della vegetazione, che, inoltre, possono essere utilizzate come input nei modelli per la descrizione di processi eco-vegeto-produttivi delle colture (Cohen e Goward, 2004). Uno dei metodi più consolidati è l'utilizzo di modelli colturali che processano valori di LAI derivati da dati telerilevati (Maas, 1988; Barnes et al., 1997; Guérif e Duke, 2000; Dente et al., 2008; Fang et al., 2008). Diversi modelli colturali, come CERES (Ritchie e Otter, 1984; Barnes et al., 1997), EPIC (Williams et al., 1984), e STIC (Brisson et al., 1998, 2003), hanno la capacità di usare il LAI misurato o derivato dagli stessi come parametri di input. Ci sono altri studi, inoltre, che stimano la resa e le variabili biofisiche (es. LAI) del frumento tramite modelli come CERES-Wheat/DSSAT (Dente et al., 2008; Fang et al., 2008). Approcci basati sulla combinazione di modellazione e telerilevamento offrono quindi notevoli opportunità per il monitoraggio su scala regionale (Clevers et al., 2002; Lobell et al., 2003; Verhoef e Bach, 2003; de Wit et al., 2004; Mo et al., 2005).

L'obiettivo dello studio è stato quello di valutare il possibile utilizzo di immagini tele rilevate abbinate a modelli di crescita colturale con il fine di creare uno strumento per la gestione azotata nella produzione di frumento duro. In particolare, la prima analisi è stata effettuata per valutare l'utilità di metodi spettrali per la stima di parametri (LAI, fCOVER, fAPAR) attraverso la relazione dei valori di riflettanza spettrale tramite l'utilizzo del modello semplificato di reti neurali (BVNET, Baret et al., 2007) creato tramite l'uso del modello di trasferimento radiativo PROSAIL (Baret et al., 1992). Altro obiettivo è stato quello, tramite l'utilizzo dei parametri stimati, di cercare di ridurre attraverso calibrazione gli errori di previsione del modello (AZOSAFYE) per la stima del contenuto di azoto durante l'intero ciclo vegetativo e della resa e del contenuto proteico nella granella riscontrate nella produzione finale del frumento duro.

## 3.2 MATERIALI E METODI

La ricerca è stata condotta nel corso di 3 stagioni di produzione del frumento duro, 2011-12, 2012-13 e 2013-14, in Val d'Orcia (Toscana), una zona collinare del centro Italia caratterizzata da un clima tipicamente mediterraneo. In questa zona, il grano duro (*Triticum durum* Desf., *Triticum turgidum* L. subsp. Duro) è la coltura principale, con una superficie media coltivata di circa 1000 ha/anno. A tal fine, tre diverse aziende sono state scelte in un'area di circa 50 km<sup>2</sup> (42°59'N, 11°45'E, 303m s.l.m.; 42°59'N, 11°45'E, 384m s.l.m.; 43°09'N, 11°52'E, 320m s.l.m.).

### 3.2.1 Dati

I campionamenti, svolti all'interno delle aziende analizzate, sono stati prelevati tre volte durante il ciclo colturale: all'inizio della fase di levata (fase di crescita (GS) 30), all'antesi (GS65) e alla maturità fisiologica (GS90) (Zadoks et al., 1974). Durante i primi due rilievi in campo sono state acquisite, nello stesso tempo, immagini telerilevate. Inoltre, sono state effettuate misure non distruttive di LAI tramite un ceptometro portatile (AccuPAR LP-80). Le piante di frumento sono state poi raccolte per le misurazioni distruttive. Il peso secco della biomassa epigea (Mg/ha) è stato determinato mediante l'essiccazione dei campioni freschi in stufa a 105 °C per 24 h. La concentrazione di azoto (mg/g) nella coltura è stata misurata con l'analizzatore di elementi 'Flash EA 1112'. Il contenuto totale di N (kg/ha) è stato ottenuto moltiplicando la concentrazione di N per il peso secco della biomassa. Durante l'ultimo campionamento, solo le misure distruttive state effettuate sulla biomassa e sulla granella. La concentrazione delle proteine nella granella (mg/g) è stata misurata con l'analizzatore di granella 'Infratec System 1241 Grain Analyser'. Il contenuto di azoto totale (kg/ha) è stato infine determinato prima dividendo il contenuto proteico per 6,25 determinando così la concentrazione di azoto all'interno delle proteine, successivamente moltiplicando la concentrazione di azoto trovata per la resa in granella. Infine la biomassa epigea totale (Mg/ha) è stata calcolata come la somma della resa in granella e la paglia. Ogni campionamento effettuato in campo è stato georeferenziato con un GPS portatile (palmare 'Juno™ST'). Nello stesso tempo dei campionamenti di campo, sono stati acquisiti dati di telerilevamento multispettrale dal satellite RapidEye, che porta un sensore multispettrale che registra la radianza in cinque ampie bande dello spettro elettromagnetico corrispondente al blu (440-510 nm), al verde (520-590 nm), al rosso (630-685 nm), al Red-Edge (690-730 nm) e al vicino infrarosso (NIR) (760-

850 nm). I sensori forniscono una risoluzione spaziale di 5×5 metri e i satelliti hanno una rivisitazione giornaliera (off-nadir) e di 5 giorni (al nadir). Le bande spettrali utilizzate per lo studio erano quelle tra 630 e 850 nm e più precisamente il rosso, il red-edge e il NIR. Le immagini satellitari sono state elaborate attraverso georeferenziazione e ortorettifica e utilizzate nel modello.

Lo studio ha effettuato anche analisi del terreno sulle tre aziende coinvolte e i dati di interesse per le simulazioni del modello sono riportate in tabella 3.1.

	unità	DiDonato	Nardi	Rappuoli
<b>sabbia</b>	%	11,1	32,9	20,4
<b>limo</b>	%	45,3	40,2	45,8
<b>argilla</b>	%	43,6	26,9	33,8
<b>punto di appassimento</b>	%Vol	26,2	16,8	20,7
<b>capacità di campo</b>	%Vol	40,6	31,1	36
<b>max profondità radici</b>	cm	100	100	100
<b>CaCO3</b>	g/kg	44,72	47,73	63,37
<b>Da</b>	g/cm3	1,32	1,49	1,42
<b>ep (spessore strato lavorato)</b>	m	0,4	0,4	0,4
<b>Norg</b>	g/kg	1,585	1,32	1,34
<b>h_max (coltura in stadio Mid)</b>	m	0,8	0,8	0,8

Tabella 3.1 – Parametri del suolo utilizzati nel modello riferiti alle tre aziende campione

### 3.2.2 Modello

Lo studio, in una prima analisi, ha confrontato la migliore relazione per la stima di alcune variabili biofisiche, in particolare il LAI, attraverso immagini telerilevate, prendendo in considerazione due indici di vegetazione e utilizzando l'algoritmo del modello semplificato di reti neurali (BVNET), sviluppato da Fred Baret e Marie Weiss et al. (2007).

Gli indici utilizzati sono stati il ChINDI (NIR-RedEdge/NIR+RedEdge), che equivale all'indice di vegetazione NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Rouse et al., 1974) utilizzando la banda RedEdge al posto della banda Red, e il CI RedEdge (NIR/RedEdge), che equivale all'indice SR (Simple Ratio, Jordan, 1969), anche in questo caso è stata utilizzata la banda RedEdge al posto della banda Red. Per entrambi gli indici appena descritti la calibrazione è stata effettuata con i dati delle annate di produzione del frumento duro 2011/12 e 2012/13, mentre la validazione è stata effettuata con i dati del 2013-14. L'algoritmo è descritto principalmente in Baret et al. (2007) e Bacour et al. (2006). I passaggi necessari per l'uso dell'algoritmo sono: 1) la generazione di un database training set utilizzando il

modello SAIL+PROSPECT; 2) uso di parte (2/3) del database generato per addestrare le reti neurali (ANN), mentre un'altra parte (1/3) è tenuto da parte per scopi di "validazione"; 3) esame dei risultati della "validazione" della NN; 4) l'applicazione della NN per la produzione di mappe di variabili biofisiche da immagini satellitari. Anche per quest'ultimo la validazione è stata effettuata solo sui risultati degli anni 2013-14. In figura 3.1 si può notare lo schema del diagramma di flusso che mostra come i prodotti (V) vengono generati operativamente.

Per generare il database training set, sono stati individuati una serie di variabili, successivamente simulate attraverso il modello. In particolare il modello SAIL (Verhoef, 1984) ha permesso di simulare la struttura della copertura vegetale (canopy). La struttura canopy è caratterizzata dal LAI e dall'inclinazione dell'angolo medio della foglia (ALA) assumendo una distribuzione ellissoidale (Campbell, 1990). Per tenere conto dell'aggregazione a scala territoriale, ogni pixel doveva avere un valore di vCover (frazione di copertura di vegetazione) e 1-vCover (frazione di terreno nudo). In questo modo sono state calcolate le variabili biofisiche di interesse (LAI, fAPAR, fCover) e la riflettanza (Tab 3.2).

Dall'altro lato, le proprietà ottiche della foglia sono stati simulati con il modello PROSPECT (Jacquemoud e Baret, 1990) utilizzando i coefficienti di assorbimento specifiche calibrati da Fourty e Baret (1997). Il modello ha richiesto 5 variabili di input: il parametro della struttura del mesofillo (N), la clorofilla (Cab), la sostanza secca (Cdm), l'acqua (Cw) e il contenuto di pigmento bruno (Cbp). Il contenuto di acqua era legato al contenuto di sostanza secca, supponendo che le foglie verdi hanno un contenuto di acqua relativa (H) che può variare entro un intervallo relativamente piccolo (Tab. 3.2).

Nella tabella 3.2 inoltre possiamo notare come per il LAI venga utilizzata la legge di distribuzione uniforme, al fine di porre maggiormente l'accento sui valori più grandi di LAI che sono più difficili da recuperare. Invece per le altre variabili sono state utilizzate la distribuzione gaussiana o uniforme, al fine di descrivere l'effettiva distribuzione. Un completo piano sperimentale ortogonale è stato usato per combinare le variabili di input (14) suddividendo l'intera gamma di variazione di ogni variabile in un piccolo numero di classi. Ciò ha portato a 41472 casi simulati (Tab. 3.2).

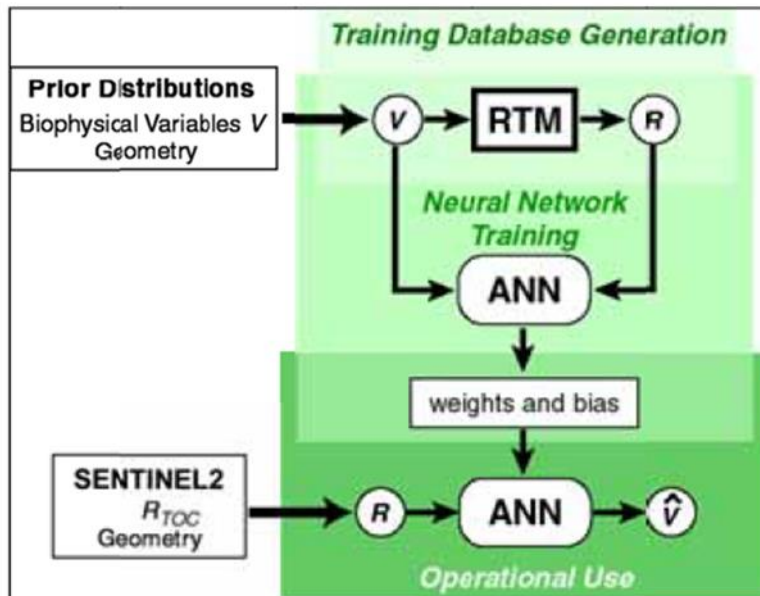


Figura 3.1 - Diagramma di flusso che mostra come i prodotti (V) vengono generati operativamente.

	Variable	Minimum	Maximum	Mode	Std	Nb_Class	Law
Canopy	LAI	0	8	3	2	6	log_normale
	ALA (°)	40	85	70	20	3	gauss
	Crown_Cover	0,95	1	0,8	0,4	1	uni
	HsD	0,1	0,5	0,2	0,5	1	gauss
Leaf	N	1,2	1,8	1,5	0,3	3	gauss
	Cab (µg.m-2)	40	80	60	30	4	gauss
	Cdm (g.m-2)	0,003	0,011	0,005	0,005	4	gauss
	Cw_Rel	0,6	0,85	0,75	0,075	4	uni
	Cbp	0	2	0	0,3	3	gauss
Soil	Bs	0,5	3,5	1,2	2	4	gauss
Atmosphere	P (mbar)	950	1080	1013	15	1	uni
	t550	0	0,8	0,35	0,3	1	uni
	H2O (cm)	1	6,5	3,825353	1,5	1	uni
	O3 (dbs)	0,2	0,5	0,35	0,1	1	uni
<b>Nb_Sims</b>						<b>41472</b>	

Tabella 3.2 - La distribuzione delle variabili di input con il corrispondente numero di classi del piano sperimentale utilizzato per simulare l'insieme di dati di formazione con il modello di trasferimento radiativo PROSPECT + SAIL.

Un'ulteriore analisi è stata effettuata attraverso la creazione del modello chiamato AZOSAFYE. L'approccio modellistico, si basa sull'applicazione del modello di crescita SAFY (Simple Algorithm for Yield Estimation), sviluppato per simulare le dinamiche del LAI e la produzione della granella di frumento duro. Questo modello è ottimo per simulare la resa, ma non tiene conto né del bilancio idrico né del bilancio dell'azoto della pianta. Per quanto riguarda l'aspetto produttivo lo studio ha utilizzato la struttura del modello SAFY, aggiungendo fattori di stress, idrico e di azoto, visto che il modello tiene conto dello stress termico. Per determinare il

coefficiente di stress idrico ( $K_s$ , Eq. 3.5), il bilancio idrico del suolo è stato effettuato come riportato dalle equazioni del Quaderno FAO 56. Lo studio ha effettuato in prima battuta il bilancio idrico dello strato delle radici (TAW, Eq. 3.1), successivamente prendendo in considerazione una profondità costante (ProfHum) su cui è stato effettuato un secondo bilancio idrico (TAWr, Eq. 3.2), quest'ultimo servirà per determinare lo stress di azoto, che per il calcolo necessita di una profondità delimitata al fine di individuare il contenuto di azoto nel terreno. Il secondo passaggio è stato individuare la riserva facilmente disponibile di acqua nel terreno (RAW, Eq. 3.3), ed infine calcolando il deficit idrico ( $D_r$ , Eq. 3.4) espresso in mm, perso a fine giornata ( $I$ ) (Eq. 3.6). Il  $D_r$  può variare da 0, quando si trova alla capacità di campo, al punto di appassimento che è uguale a TAW.

L'altro aspetto affrontato all'interno del modello riguarda il sistema utilizzato per calcolare la quantità di azoto in forma nitrica (prontamente disponibile per le piante), in cui sono stati associati due differenti modelli, PAPRAN (Seligman e van Keulen, 1981) ed EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator, Williams et al., 1984). Lo schema utilizzato per il calcolo della mineralizzazione dell'azoto e dell'umificazione dei residui di sostanza organica è mostrato in figura 3.2. In particolare la quantità di azoto nei residui colturali freschi (FON) può essere suddivisa attraverso la decomposizione in una parte (circa 80%) che per umificazione si trasforma in azoto nitrico ( $WNO_3$ ), mentre il restante 20% viene trasformato in humus attivo (ONa). L'ONa a sua volta può subire un'ulteriore mineralizzazione (HMN, tasso di mineralizzazione) che attraverso il fattore temperatura e il fattore umidità, che rivestono un ruolo fondamentale per l'attivazione della mineralizzazione dell'humus attivo, diventa azoto nitrico ( $WNO_3$ ), il residuo di humus che non viene mineralizzato si trasforma in humus stabile (ONs).

L'ulteriore passaggio del modello riguarda la determinazione della concentrazione di azoto nell'acqua (ConcN), all'interno dello strato ProfHum in  $kg\ di\ N\ ha^{-1}\ mm^{-1}$  (Eq. 3.7). Dopodichè, il valore della concentrazione di azoto viene moltiplicato per il valore di percolazione profonda dell'acqua (DP), trovando il valore di lisciviazione dell'azoto (Lisc, Eq. 3.8). Per trovare la quantità totale di azoto nitrico ( $TWNO_3$ ) disponibile nello strato di suolo interessato (ProfHum), dobbiamo sottrarre alla quantità di azoto nitrico trovata il valore della lisciviazione (Eq. 3.9).

Per la valutazione delle prestazioni del modello, il presente lavoro ha utilizzato degli indici di accuratezza, l'errore medio (ME, Mean Error, Eq. 3.10) e l'errore medio percentuale (M%E, Eq. 3.11), e degli indici di precisione del modello, in particolare, l'errore quadratico medio (RMSE, Root Mean Square Error, Eq. 3.12), l'errore



quadratico medio percentuale (RMS%E, Eq. 3.13) e l'efficienza del modello (EF, Eq. 3.14).

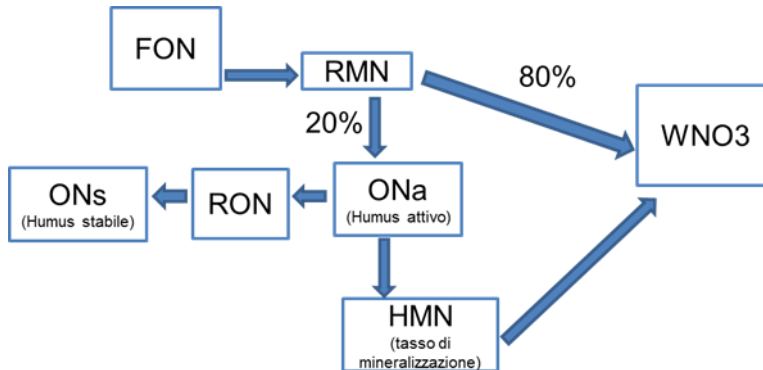


Figura 3.2 – Schema utilizzato nello studio per il calcolo della mineralizzazione dell'azoto e dell'umificazione dei residui di sostanza organica.

$$TAW = 1000 * (FC-WP) * Rd \quad \text{(Equazione 3.1)}$$

dove,

FC è il contenuto idrico del suolo alla capacità di campo ( $m^3 m^{-3}$ ), WP è il contenuto idrico del suolo al punto di appassimento ( $m^3 m^{-3}$ ), Rd è la profondità delle radici (m)

$$TAWr = 100 * (FC-WP) * ProfHum \quad \text{(Equazione 3.2)}$$

$$RAW = p * TAW \quad \text{(Equazione 3.3)}$$

dove,

p è la frazione media del totale di acqua disponibile del suolo (TAW) che può essere esaurita dalla radici prima dello stress di umidità (riduzione ET), con valore (0-1).

$$Dr(I) = Dr(I-1) - P + Etc(I) \quad \text{(Equazione 3.4)}$$

dove,

Dr (I-1) è il contenuto d'acqua (mm) nella zona delle radici alla fine del giorno precedente (I-1), P(I) precipitazioni del giorno (I) (mm), ETC è l'evapotraspirazione della coltura senza stress idrico (mm).

$$Ks(I) = (TAW(I) - Dr(I)) / (TAW(I) - RAW(I)); \quad \text{(Equazione 3.5)}$$

$$Dr(I) = \max(Dr(I-1) - P + ETa(I) + DP(I), 0) \quad \text{(Equazione 3.6)}$$

dove,

$ETa(I) = ETc * Ks$  è l' evapotraspirazione effettiva della coltura; e  $DP(I) = \max(P - ETa(I) - Dr(I-1), 0)$  la percolazione profonda (mm)

$$ConcN(I) = WNO3(I) / TAWr(I) \quad (\text{Equazione 3.7})$$

$$Lisc(I) = DP(I) * ConcN(I) \quad (\text{Equazione 3.8})$$

$$TWNO3(I) = WNO3(I) - Lisc(I) \quad (\text{Equazione 3.9})$$

$$ME = \Sigma(Si - Oi) / n \quad (\text{Equazione 3.10})$$

dove,

$Si$  sono i valori simulati,  $Oi$  sono i valori osservati ed  $n$  il numero delle osservazioni.

$$M\%E = ME / \Sigma Oi * 100 \quad (\text{Equazione 3.11})$$

$$RMSE = \sqrt{\Sigma(Si - Oi)^2 / n} \quad (\text{Equazione 3.12})$$

$$RMS\%E = RMSE / \Sigma Oi * 100 \quad (\text{Equazione 3.13})$$

$$EF = 1 - \frac{\Sigma(Si - Oi)^2}{\Sigma(Oi - \bar{O})^2} \quad (\text{Equazione 3.14})$$

dove,

$\bar{O}$  rappresenta la media dei valori osservati.

### 3.3 RISULTATI

In generale, l'andamento meteorologico ha mostrato alcune anomalie tra le annate vegetative, sia nei periodi autunnali che primaverili (Fig. 3.3).

In particolare, riguardo alle precipitazioni del periodo da novembre a giugno rispetto alla media del lungo periodo (1951-2011), si può notare come la piovosità media accumulata nel periodo di riferimento risulti molto discordante tra le tre annate. Per quanto riguarda infatti l'annata 2011/12 le precipitazioni sono state di 240 mm rispetto ai 495 mm riscontrati nella media di lungo periodo, quindi circa la metà. L'anno successivo 2012/13 ha riscontrato precipitazioni pari a 950 mm, circa il doppio della media, mentre l'ultimo anno preso in esame 2013/14 è rimasto poco sopra media, con un valore di 538 mm. Le anomalie maggiori si sono verificate nell'annata 2012/13 nei mesi di novembre, ed in particolare nel mese di maggio, quest'ultimo molto importante perchè riguarda il periodo della fioritura e del riempimento della granella (Fig. 3.3).

Nello stesso periodo, i valori riscontrati rispetto la temperatura media sono stati abbastanza in linea con le media climatica (1951-2011). In particolare, le anomalie più evidenti si sono avute nell'annata 2012/13 in febbraio con valori al di sotto della media di oltre 4°C, e nell'annata 2013/14 dove si sono riscontrate temperature superiori alla media nel periodo invernale e temperature inferiori alla media nel periodo primaverile. Un dato interessante riguarda le temperature del mese di maggio, che per tutte e tre gli anni analizzati hanno riscontrato dei valori inferiori alla media (Fig. 3.3). Queste anomalie climatiche, come vedremo successivamente, hanno comportato una variabilità maggiore sui risultati.

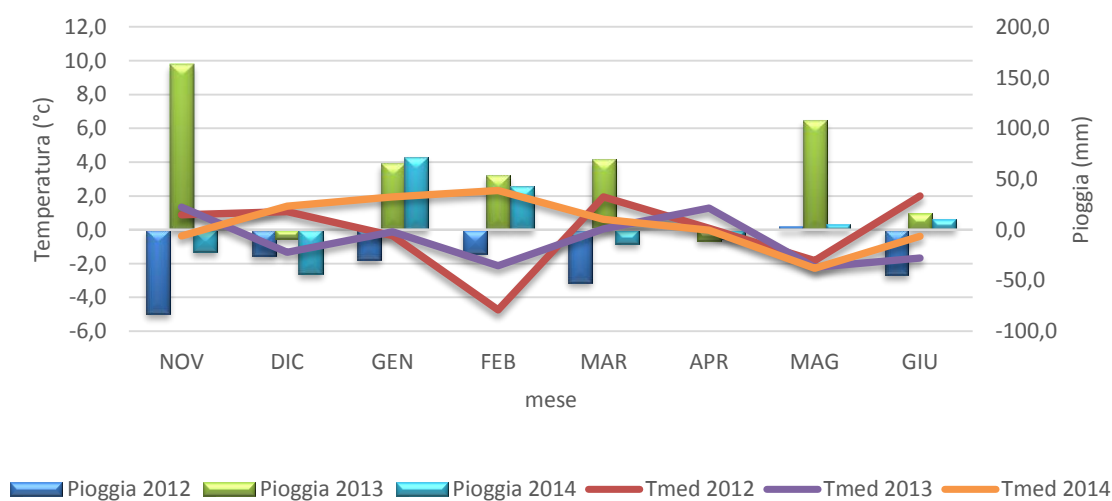


Figura 3.3 – Differenze climatiche riguardo le temperature e la pioggia, rispetto alla media climatica (1951-2011), dell'area di studio durante il periodo di coltivazione del frumento duro (novembre-giugno). Le linee rappresentano le temperature mentre gli istogrammi rappresentano le precipitazioni degli anni 2012-2014.

I dati ottenuti dai campionamenti a terra hanno dimostrato la grande variabilità che esiste sia all'interno dell'anno che tra gli anni (Tab. 3.3).

La biomassa epigea, all'inizio della fase di levata (GS30), ha mostrato valori medi di 1,4 Mg/ha per l'annata 2011/12, 1,2 ed 1,6 Mg/ha rispettivamente nel 2012/13 e 2013/14, con CV rispettivamente di 0,36 il primo anno e 0,46 negli altri due. Questi risultati si riscontrano anche sul valore di LAI, 1,4 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> il primo anno, 0,9 ed 1,5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, con CV nell'annata 2013/14 che risulta 1, cioè con variabilità di oltre il 100%. Anche riguardo la quantità di azoto la variabilità tra gli anni è risultata elevata con medie negli anni rispettivamente di 50,8 kg/ha, 24,7 kg/ha e 71,3 kg/ha. La variabilità che si riscontra a GS 30 viene in parte persa nel periodo di antesi (GS 65), riscontrando valori di CV inferiori, anche se rimane immutata la variabilità tra gli anni.

I risultati della produzione effettuati dopo la raccolta (GS 90) mostrano una resa media negli anni rispettivamente di 4,9 Mg/ha nell'annata 2011/12, 3,6 e 4 Mg/ha nel 2012/13 e 2013/14. La variabilità riscontrata nell'anno 2011/12 è stata del 16%, mentre il CV del 2012/13 e 2013/14 è stata rispettivamente 0,29 e 0,30. Queste variabilità si sono riscontrate anche per quanto riguarda la quantità di azoto nella granella e la biomassa epigea totale. Interessante notare come la quantità di azoto nella granella riscontrata nel 2011/12 pari a 117,3 kg/ha è maggiore di quella riscontrata nel 2013/14 pari a 71,6 kg/ha. Questo nonostante nel periodo GS 65, la quantità riscontrata nel 2013/14 era maggiore di quella del 2011/12, rispettivamente 225,8 kg/ha rispetto a 177,4 kg/ha, dovuto principalmente alla variabilità climatica riscontrata nel periodo di riempimento della granella nell'annata vegetativa 2013/14.

I risultati ottenuti, quindi, mostrano che l'annata 2011/12 è stata quella con i dati rilevati più omogenei, mentre nelle altre due annate la variabilità è stata maggiore, soprattutto a causa dell'aspetto meteorologico.

Date	Sample	Lai (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )			N (kg/ha)			biomassa (Mg/ha)		
		2011-12	2012-13	2013-14	2011-12	2012-13	2013-14	2011-12	2012-13	2013-14
GS30	min	0,8	0,3	0,1	30,6	7,0	8,7	0,7	0,4	0,4
	mean	1,4	0,9	1,5	50,8	24,7	71,3	1,4	1,2	1,6
	max	2,8	2,5	5,7	113,4	66,2	164,0	2,7	2,5	5,7
	SD	0,45	0,59	1,50	19,05	14,98	39,13	0,44	0,56	1,26
	CV	0,33	0,64	1,00	0,37	0,61	0,55	0,32	0,46	0,46
GS65	min	3,1	1,6	1,0	115,7	65,5	92,1	4,7	2,8	2,7
	mean	4,5	3,8	3,1	177,4	103,7	225,8	6,4	5,5	7,5
	max	7,7	5,9	6,8	267,7	173,6	398,8	9,0	8,1	11,7
	SD	1,27	1,23	1,18	32,89	24,47	77,40	1,01	1,55	2,18
	CV	0,28	0,33	0,38	0,19	0,24	0,34	0,16	0,28	0,28
		Resa (Mg/ha)			N (kg/ha)			biomassa totale (Mg/ha)		
		2011-12	2012-13	2013-14	2011-12	2012-13	2013-14	2011-12	2012-13	2013-14
GS90	min	3,3	1,6	1,3	83,5	28,2	24,3	9,5	5,3	4,0
	mean	4,9	3,6	4,0	117,3	69,2	71,6	12,5	10,8	12,9
	max	6,6	5,1	6,0	142,9	97,8	108,5	17,0	13,1	19,9
	SD	0,77	1,03	1,19	16,55	20,24	20,32	1,81	2,56	3,64
	CV	0,16	0,29	0,30	0,14	0,29	0,28	0,14	0,24	0,28

Tabella 3.3 - Parametri vegetativi e produttivi del frumento duro misurati a GS30, GS65 e GS90. LAI (indice di area fogliare); N (azoto); SD (deviazione standard); CV (coefficiente di variazione).

In figura 3.4 sono mostrati i risultati ottenuti attraverso le simulazioni del modello semplificato di reti neurali (BVNET) sviluppato da Fred Baret e Marie Weiss et al. (2007). Quest'ultimo mostra ottime capacità di simulazione per la stima dei parametri biofisici, come LAI (RMSE di 1,35), fCOVER (RMSE di 0,075) ed fAPAR (RMSE di 0,087).

I risultati relativi alla capacità di determinare il LAI attraverso l'utilizzo di due indici, ChINDI e CI RedEdge, e del modello BVNET hanno dimostrato la bontà di quest'ultimo. Infatti, come viene mostrato in figura 3.5, la validazione ottenuta rispetto ai risultati campionati nell'annata 2013/14 ha mostrato un RMSE pari a 1,411 per il ChINDI (Fig. 3.5 a) e un RMSE di 1,424 per il CI RedEdge (Fig. 3.5 b), indicando l'indice ChINDI come leggermente migliore tra i due. Invece, il migliore risultato con un RMSE di 1,222 è stato individuato attraverso l'utilizzo del modello BVNET (Fig. 3.5 c). Questa prima analisi dimostra come le immagini telerilevate possano essere utilizzate in maniera più efficiente attraverso l'uso di tecniche di processamento di dati tramite reti neurali per lo sviluppo di variabili biofisiche, nello studio riferite al LAI.

I risultati riscontrati attraverso l'utilizzo del modello AZOSAFY sono stati soddisfacenti. In particolare, come si può vedere in figura 3.6, gli output del modello hanno dimostrato una buona capacità per la simulazione della biomassa e il LAI, nel periodo di vegetazione, e della resa in granella e del suo contenuto in azoto alla raccolta. In particolare, in figura 3.6, possiamo notare anche il valore dei dati utilizzati per la calibrazione (raccolti a GS 30, GS 65 e GS 90), e come quest'ultimi risultino omogenei rispetto ai dati di crescita simulati dal modello.

Il modello è stato calibrato sulle annate produttive del frumento duro 2012/13 e 2013/14, in particolare possiamo vedere la calibrazione rispetto ai dati di azoto totale riscontrato nella granella (Fig. 3.7 a) e quella rispetto alla resa finale (Fig. 3.7 b). Da questi risultati possiamo notare come in entrambi i casi il rapporto tra dati simulati e osservati abbia un andamento esponenziale, con coefficienti di determinazione superiori a 0,8 per entrambi le variabili indagate.

La validazione del modello, invece, è stata effettuata rispetto all'annata di produzione del frumento duro 2011/12, dalla figura 3.8 possiamo notare la simulazione del modello, con i dati di validazione, sia della quantità di azoto nella granella (Fig. 3.8 a), espressa in kg/ha, che della resa in granella finale (Fig. 3.8 b), quest'ultima espressa in Mg/ha.

I risultati della validazione del modello (Tab. 3.4) hanno mostrato ottime performance sia per quanto riguarda la simulazione dell'azoto, che rispetto alla resa. In particolare possiamo notare come l'errore percentuale medio (M%E) risulti negativo per l'azoto, con un valore pari a -0,86 quindi il modello sottostima di pochissimo, mentre l'M%E nella resa è uguale a 1,69. Anche per quanto riguarda l'errore percentuale dello scarto quadratico medio (RMS%E) si nota come la percentuale più bassa si abbia con la simulazione di azoto (8,09%) rispetto a quella delle rese (13,1%). Infine, dalla tabella 3.4, possiamo notare come l'efficienza del modello (EF) sia di 0,99 per quanto riguarda la simulazione delle rese, questo dato, anche se può essere fuorviante e risultare falsato, era quello che lo studio si aspettava visto che il modello AZOSAFY è basato sull'applicazione del modello di crescita SAFY (Simple Algorithm for Yield Estimation), ottimo per la simulazione della resa, come descritto in precedenza. Per quanto riguarda la simulazione della quantità di azoto totale sulla granella, il modello ha mostrato un'efficienza di 0,68 quindi comunque molto buona.

Inoltre, nonostante la media dei valori osservati tra la calibrazione e la validazione sia molto diversa, con medie di azoto in calibrazione di 65,66 kg/ha e in validazione di 116,51 kg/ha, confermate anche dai valori medi di resa che in calibrazione sono stati di 3,45 Mg/ha e in validazione di 5,04 Mg/ha, il modello è riuscito a cogliere in maniera più che soddisfacente la variabilità dei dati riscontrati in campo durante le differenti stagioni vegeto-produttive.

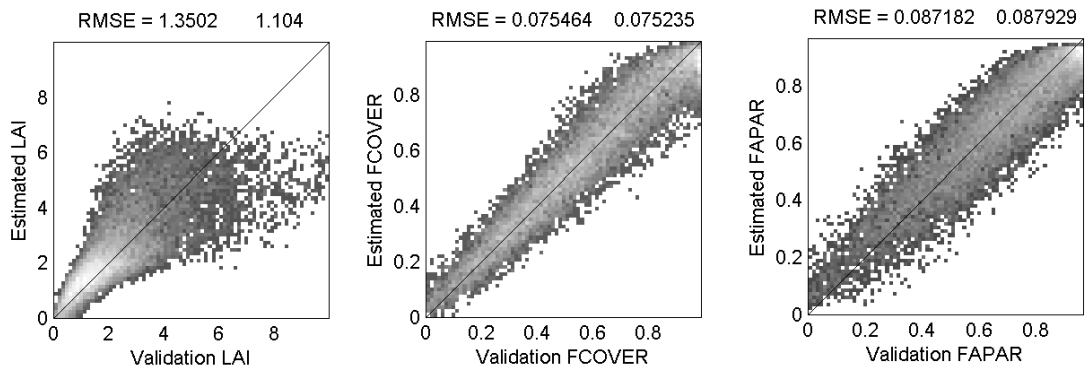
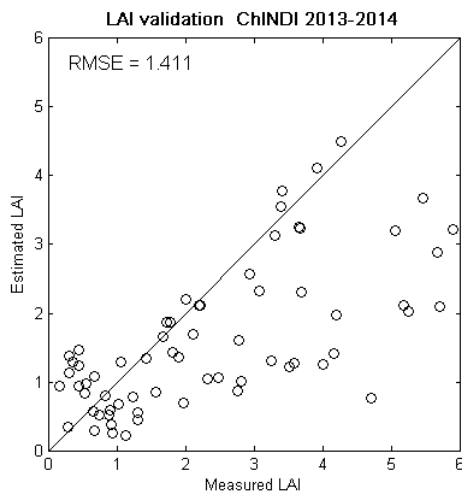
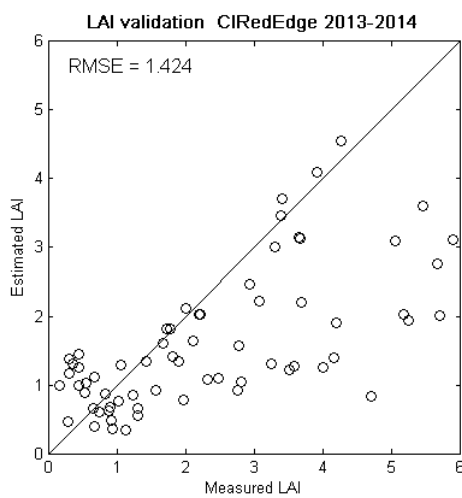


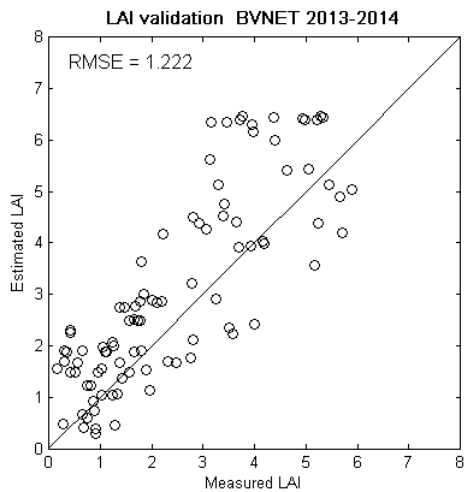
Figura 3.4 –Risultati output di simulazione in data aprile 2012. La densità dei valori mostrano le prestazioni teoriche valutate nel set di dati di validazione. RMSE = errore quadratico medio; FCOVER = frazione di copertura vegetale verde; FAPAR = frazione di radiazione fotosinteticamente attiva assorbita; LAI = indice di area fogliare.



a



b



C

Figura 3.5 – Validazione del LAI attraverso gli indici ChINDI e CI RedEdge e il modello BVNET, anno 2013-14.

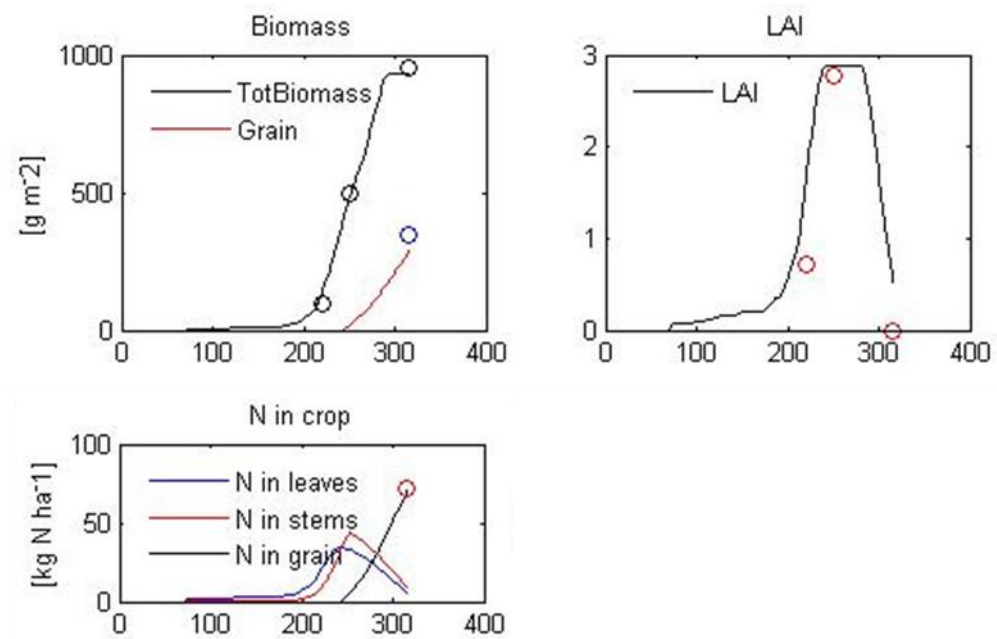
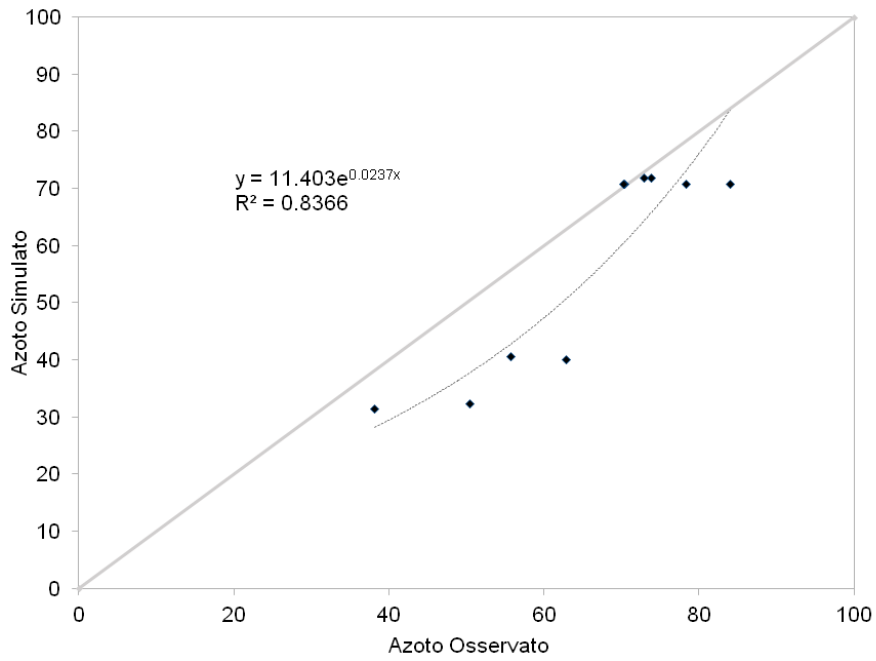
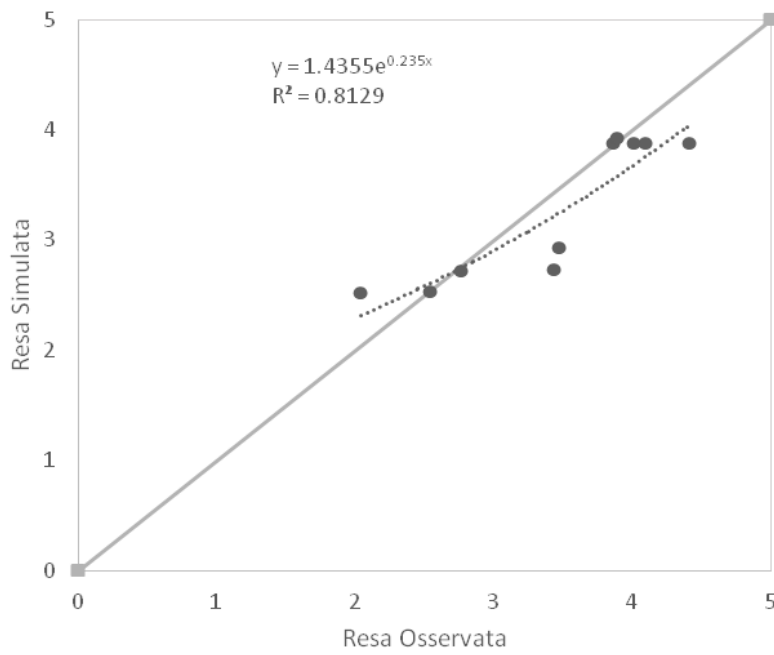


Figura 3.6 – Output grafici del modello AZOSAFY. I cerchi indicano il dato campionato e la corrispettiva data, utilizzati come dati per la calibrazione del modello. L'asse orizzontale corrisponde al periodo di simulazione (giorni)





a

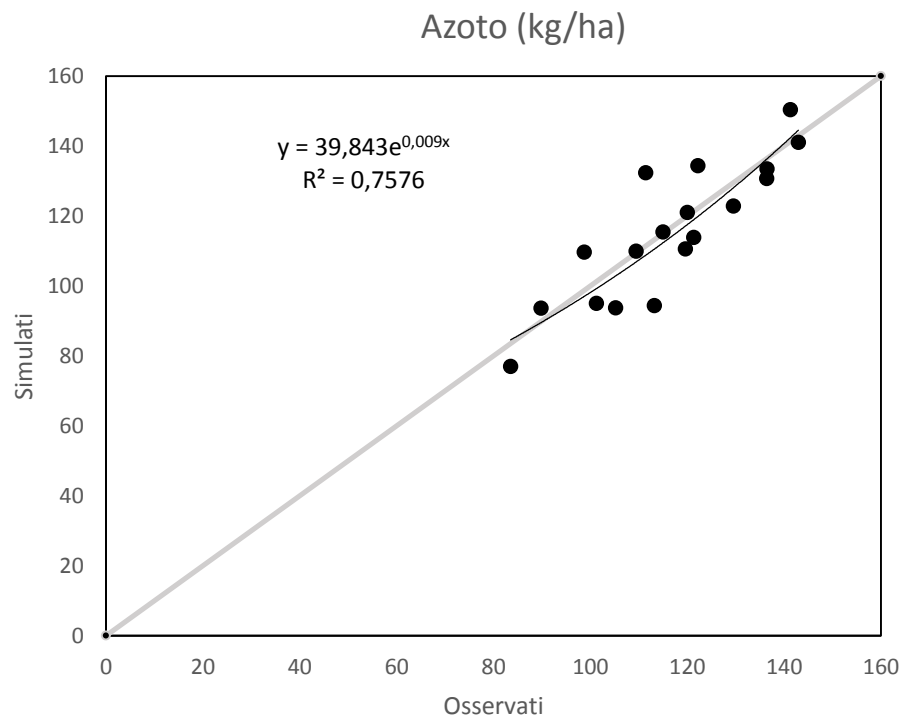


b

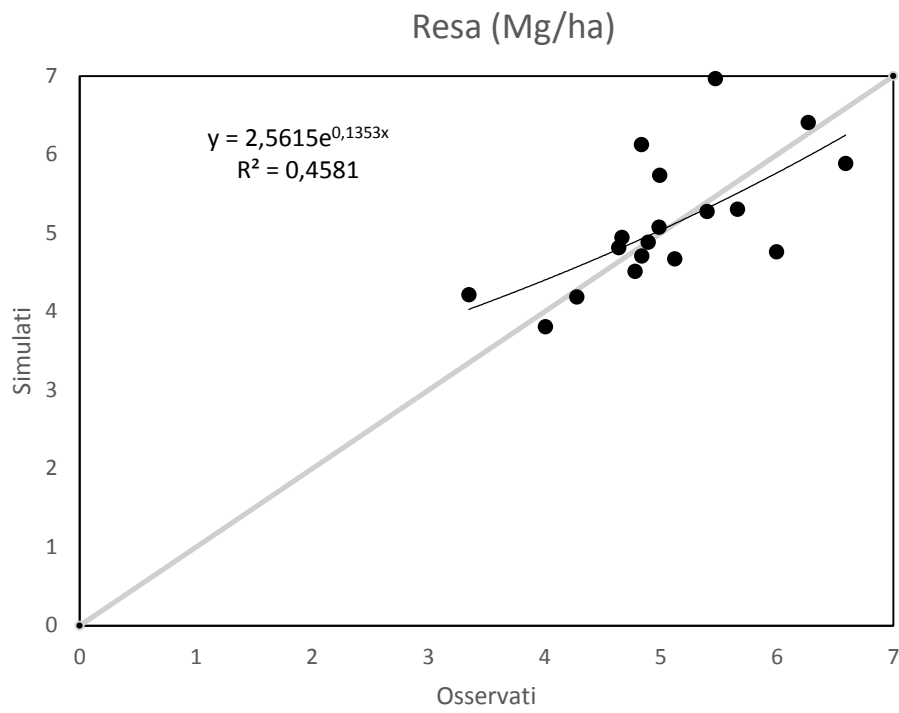
Figura 3.7 – Calibrazione del modello AZOSAFYE con i dati degli anni 2013 e 2014.

	<b>Azoto</b>	<b>Resa</b>
<b>Media Oss</b>	116.51	5.04
<b>M%E</b>	-0.86	1.69
<b>RMS%E</b>	8.09	13.10
<b>EF</b>	0.68	0.99

Tabella 3.4 – Risultati statistici validazione del modello (anno 2011/12). M%E = errore percentuale medio; RMS%E = errore percentuale medio relativo; EF = efficienza del modello



a



b

Figura 3.8 – Validazione del modello AZOSAFYE nell’anno 2012.

### **3.4 CONCLUSIONI**

L'utilizzo di modelli che simulano la crescita delle colture possono rappresentare un potente strumento per una migliore gestione dei terreni agricoli, fornendo informazioni che possono essere utilizzate anche a livello di singole aziende.

Inoltre l'uso combinato di modelli e della stima di dati da remoto consente di smarcarsi da misurazioni a terra che sono molto costose e richiedono molto tempo. Nel presente studio, la variabilità spaziale del suolo e la variabilità climatica, tra gli anni oggetto di analisi, nella zona collinare della Val d'Orcia hanno interessato la risposta vegeto-produttiva del frumento duro, risultando quindi molto eterogeneo.

In particolare, il modello ha dimostrato essere uno strumento molto utile per simulare l'andamento del frumento duro durante l'intera stagione vegetativa, dando buoni risultati riguardo la quantità della biomassa e la resa in granella finale, ma soprattutto è riuscito a simulare in modo molto soddisfacente la quantità di azoto totale riscontrata all'interno della granella. Le informazioni che possiamo ricavare dal modello, riferite a livello di campo, possono essere utilizzate in modo più razionale per le applicazioni operative, come la fertilizzazione e la protezione delle piante durante il periodo che va dall'inizio levata alla fioritura, e potrebbero essere gestite in linea con i principi dell'agricoltura sito-specifica.

Infatti, nonostante la media dei valori osservati tra la calibrazione e la validazione sia molto diversa, il modello riesce a cogliere in maniera più che soddisfacente la variabilità dei dati riscontrati in campo. Questo, perché le prestazioni della produzione finale sono in parte determinate dallo stato del frumento duro durante la prima fase di sviluppo, e in seguito, principalmente dalle condizioni climatiche durante il riempimento della granella. Per ottenere delle informazioni operative che coprano anche questo aspetto previsionale, sono necessarie ulteriori ricerche. Un ulteriore sviluppo del modello può essere quello di utilizzare i dati biofisici (LAI, fCOVER, fAPAR) ottenuti attraverso l'acquisizioni di immagini telerilevate e processate tramite il modello BVNET, utilizzato nello studio, come parametri di input delle rispettive variabili biofisiche, da poter inserire all'interno del modello AZOSAFY per riuscire a migliorarne le capacità di simulazione.

### 3.5 BIBLIOGRAFIA

- Zhang N., Wang M., Wang N., 2002. Precision agriculture: a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture* 36, 113–132.
- Atzberger C., 2010, Inverting the PROSAIL canopy reflectance model using neural nets trained on streamlined databases. *Journal of Spectral Imaging* 1, 1–13.
- Bacour C., Baret F., Béal D., Weiss M., Pavageau K., 2006. Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAI x Cab, from top of canopy MERIS reflectance data: principles and validation. *Remote Sensing of Environment* 105, 313–325.
- Baret F., Jacquemoud S., Guyot G., Leprieur C., 1992. Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands. *Remote Sensing of Environment* 41, 133–142.
- Baret F., Hagolle O., Geiger B., Bicheron P., Miras B., Huc M., Berthelot B., Niño F., Weiss M., Samain O., Roujean J.L., Leroy M., 2007. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION Part 1: Principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment* 110, 275–286.
- Barnes E.M., Pinter P.J., Kimball B.A., Wall G.W., La Morte R.L., Husaker D.J., et al., 1997. Modification of CERES-Wheat to accept Leaf Area Index as an input variable. ASAE Paper No. 973016, 1997 ASAE Annual International Meeting, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Bastiaanssen W.G.M., Molden D.J., Makin I.W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management* 46, 137-155.
- Blankenau K., Olf 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.
- Borghetti B., 2000. Nitrogen as determinant of wheat growth and yield. In: Satorre, E.H., Slafer, G.A. (Eds.), *Wheat Ecology and Physiology of Yield Determination*. Food Products Press, New York, pp. 67–84.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plénet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 8, 311–346.
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plénet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II-Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69–92.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debacque P., Gaudillère J.P., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332.

- Buermann W., Wang Y., Dong J., Zhou L., Zeng X., Dickinson R. E., et al., 2002. Analysis of multiyear global vegetation index data set. *Journal of Geophysical Research* 107(D22), 4646.
- Chen J.M., Pavlic G., Brown L., Cihlar J., Leblanc S.G., White H.P., et al., 2002. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote Sensing of Environment* 80, 165–184.
- Clevers J.G.P.W., Vonder O.W., Jonschaap R.E., Desprats J.F., King C., Prévot L., Bruguier N., 2002. Using Spot data for calibrating a wheat growth model under Mediterranean conditions. *Agronomie* 22, 687-694.
- Dente L., Satalino G., Mattia F., Rinaldi M., 2008. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield. *Remote Sens. Environ.* 112, 1395–1407.
- de Wit A.J.W., Boogaard H.L., van Diepen C.A., 2004. Using NOAA-AVHRR estimates of land surface temperature for regional agrometeorological modelling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5, 187-204.
- Fang H., Liang S., Hoogenboom G., Teasdale J., Cavigelli M., 2008. Corn-yield estimation through assimilation of remotely sensed data into the CSM-CERES-Maize model. *Int. J. Remote Sens.* 29, 3011–3032.
- Fuertes-Mendizábal T., Aizpurua A., González-Moro M.B., Estavillo J.M., 2010. Improving wheat breadmaking quality by splitting the N fertilizer rate. *European Journal of Agronomy* 33, 52–61.
- Garrido-Lestache E., López-Bellido R.J., López-Bellido L., 2004. Effect of N rate, timing and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 85, 213–236.
- Garrido-Lestache E., López-Bellido R.J., López-Bellido L., 2005. Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *European Journal of Agronomy* 23, 265–278.
- Gobron N., Pinty B., Verstraete M., Govaerts Y., 1999. The MERIS global vegetation index (MGVI): Description and preliminary application. *International Journal of Remote Sensing* 20, 9:1917–1927.
- Guérif M., Duke C.L., 2000. Adjustment procedures of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81, 57–69.
- Houborg R., Soegaard H., Boegh E., 2007. Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. *Remote Sensing of Environment* 106, 39–58.
- Jacquemoud S., Baret F., 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34, 75–91.
- Jacquemoud S., Baret F., Andrieu B., Danson F.N., Jaggard K., 1995. Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT + SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors. *Remote Sensing of Environment* 52, 163–172.

- Jacquemoud S., Verhoef W., Baret F., Bacour C., Zarco-Tejada P.J., Asner G.P., Francois C., Ustin S.L., 2009. PROSPECT + SAIL models: a review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113, 556–566.
- Jeuffroy M.H., Bouchard C., 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Sci.* 39, 1385–1393.
- Jeuffroy M.H., Recous S., 1999. AZODYN: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *Eur. J. Agron.* 10, 129–144.
- Jeuffroy M.H., Colnenne C., Reau R., 2003. Nitrogen nutrition and rapeseed seed number. Towards Enhanced value of cruciferous oilseed crops by optimal production and use of the high quality seed components. In: *Proceedings 11th International Rapeseed Congress, Copenhagen, Denmark*, pp. 6–10.
- Jordan C.F., 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the floor. *Ecology* 50, 663–666.
- Lemaire G., Gastal F., 1997. On the critical N concentration in agricultural crops. N uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire, G. (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 3–44.
- Lemaire G., Meynard J.M., 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. In: Lemaire, G. (Ed.), *Diagnosis of N Status in Crops*. Springer, Berlin, 45–55.
- Lemaire G., Jeuffroy M.H., Gastal F., 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *Eur. J. Agron.* 28, 614–624.
- Lobell D.B., Asner G.P., Ortiz-Monasterio J.I., Benning T.L., 2003. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 94, 205–220.
- López-Bellido L., López-Bellido R.J., Castill J.E., López-Bellido F.J., 2001. Effects of long-term tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on bread-making quality of hard red spring wheat. *Field Crops Res* 72, 197–210.
- López-Bellido L., López-Bellido R.J., López-Bellido F.J., 2006. Fertilizer nitrogen efficiency in durum wheat under rainfed Mediterranean conditions: effect of split application. *Agron. J.* 98, 55–62.
- Maas S.J., 1988. Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth models. *Ecol. Model.* 41, 247–268.
- Marino S., Tognetti R., Alvino A., 2009. Crop yield and grain quality of emmer populations grown in central Italy, as affected by nitrogen fertilization. *Eur. J. Agron.* 31, 233–240.
- Mo X., Liu S., Lin Z., Xu Y., Xiang Y., McVicar T.R., 2005. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling* 183, 301–322.
- Moulin S., Bondeau A., Delécolle R., 1998. Combining agricultural crop models and satellite observations from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing* 19, 1021–1036.

- Naud C., Makowski D., Jeuffroy M.H., 2007. Application of an interacting particle filter to improve nitrogen nutrition index predictions for winter wheat. *Ecol. Model.* 207, 251–263.
- Naud C., Makowski D., Jeuffroy M.H., 2008. Is it useful to combine measurements taken during growing season with a dynamic model to predict the nitrogen status of winter wheat. *Eur. J. Agron.* 28, 3:291–300.
- Olioso A., Inoue Y., Ortega-Farias S., Demarty J., Wigneron J.P., Braud I., Jacob F., Lecharpentier P., Ottlé C., Calvet J.C., Brisson N., 2005. Future directions for advanced evapotranspiration modeling: assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *Irrigation and Drainage Systems* 19, 377-412.
- Pellenq J., Boulet G., 2004. A methodology to test the pertinence of remote sensing data assimilation into vegetation models for water and energy exchange at the land surface. *Agronomie* 24, 197-204.
- Richter K., Atzberger C., Vuolo F., D’Urso G., 2011, Evaluation of Sentinel-2 spectral sampling for radiative transfer model based LAI estimation of wheat, sugar beet and maize. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing* 4, 458–464.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C., 1974. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. In: NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA, pp. 1–137.
- Schlerf M., Atzberger C., 2012. Vegetation structure retrieval in Beech and Spruce forests using spectrodirectional satellite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing* 5, 8–17.
- Scotford I.M., Miller P.C.H., 2005. Applications of spectral reflectance techniques in northern European cereal production: a review. *Biosystems Engineering* 90, 235-250, doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.11.010.
- Verhoef W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 125–141.
- Verhoef W., Bach H., 2003. Remote sensing data assimilation using coupled radiative transfer models. *Physics and Chemistry of the Earth* 28, 3-13.
- Wooding A.R., Kavale S., MacRitchie F., Stoddard F.L., Wallace A., 2000. Effects of nitrogen and sulfur fertilizer on protein composition, mixing requirements, and dough strength of four wheat cultivars. *Cereal Chem.* 77, 798–807.



## **CAPITOLO 4**

La valutazione del Carbon Footprint e altri indicatori ambientali attraverso metodologia del ciclo di vita (LCA, Life cycle assessment) del frumento duro coltivato in Val d'Orcia con agricoltura di precisione

F. GUASCONI<sup>1</sup>, F. FALCONI<sup>2</sup>, G. OLIVIERI<sup>2</sup>, A. DALLA MARTA<sup>1</sup>, M. MANCINI<sup>3</sup> e S. ORLANDINI<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente, Università di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze, Italia

<sup>2</sup> LCA-lab –Laboratorio di ricerca e consulenza ambientale, via martiri di Monte Sole 4, 40129 Bologna, Italia

<sup>3</sup> Centro Interdipartimentale di Bioclimatologia, Università di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze, Italia

Guasconi F., Falconi F., Olivieri G., Dalla Marta A., Mancini M., Orlandini S., (da sottomettere). Life cycle assessment of durum wheat cultivated under precision farming.

## 4 SINTESI

Lo scopo di calcolare l'impronta di carbonio (Carbon Footprint (CF)) delle produzioni agroalimentari è diventando sempre più importante nella lotta contro il cambiamento climatico.

Questo studio ha come obiettivo principale quello di calcolare l'impronta di carbonio della coltivazione di frumento duro in Val D'Orcia (Toscana) per la produzione di pasta. La coltivazione del frumento avviene secondo una tecnica di agricoltura di precisione in grado di dosare la fertilizzazione azotata e verificare le rese associate, lo studio è finalizzato anche all'analisi degli scenari di tre differenti dosi di fertilizzante azotato somministrato. Oltre alla Carbon Footprint (CF) si determinano anche i risultati di impatto per il consumo di risorse non rinnovabili e il consumo di acqua della stessa coltivazione.

Metodologia: Il metodo CF "dalla culla alla tomba" è stato applicato su pasta italiana con frumento duro coltivato nella regione della Val d'Orcia su suoli minerali. Nello specifico lo studio si è arrestato alla produzione di granella di frumento duro e al suo trasporto al centro di stoccaggio.

Risultati e discussione: Il CF medio per la produzione di granella di frumento duro è stato di 0,474 kg di CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> pasta (variando da 0,449 kg di CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> grano con coltivazione a basso contenuto di N a 0,506 kg di CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> grano con coltivazione ad alto contenuto di N). La produzione media del territorio, prendendo come riferimento il passaggio dalla coltivazione a basso contenuto di N a quella ad alto contenuto di N, ha riscontrato un aumento del 15% a fronte di una richiesta maggiore di quantitativo di fertilizzante azotato del 50%. Passando dalla coltivazione di frumento duro a basso contenuto di N a quella ad alto contenuto di N abbiamo riscontrato, inoltre, un aumento del 13% per il riscaldamento globale, del 7% per il consumo di risorse non rinnovabili e del 4% per il consumo di acqua.

Conclusioni: La variazione CF nei tre differenti sistemi di fertilizzazione azotata del frumento duro, presi in considerazione, mostra un aumento di emissioni via via maggiore, dovuto principalmente alla quantità di azoto data alla fertilizzazione. Nel complesso, quindi, i dati più sensibili dal punto di vista ambientale sono la produzione dei fertilizzanti impiegati e le relative emissioni. Quindi, soprattutto per l'indicatore legato alla CF, tenere sotto controllo il contributo dell'azoto nella fase di concimazione ha conseguenze importanti dal punto di vista ambientale.

## 4.1 INTRODUZIONE

In Italia, il frumento duro (*Triticum durum* Desf., *Triticum turgidum* L. subsp. Duro) è una delle coltivazioni più importanti per l'economia agroalimentare, infatti, esso fornisce la semola per la produzione di pasta, di cui, l'Italia, viene considerata una dei produttori più importanti del mondo (Tedone et al., 2012). Per mantenere questo livello di produzione, in Italia è aumentato, negli ultimi decenni, il consumo di materie prime, di energia e di risorse naturali. In questo contesto, i responsabili politici, i produttori e i ricercatori stanno cercando di sviluppare pratiche agricole efficaci per ridurre gli impatti ambientali, comprese le emissioni di gas serra, e massimizzare il potenziale ritorno economico in agricoltura (Janzen et al., 2006; Gan et al., 2011).

Infatti, al giorno d'oggi, produrre cibo di alta qualità con il minimo impatto ambientale sta diventando il vero obiettivo di un'agricoltura sostenibile (Parlamento Europeo, 2013). Ciò può in parte essere ottenuto utilizzando delle pratiche agricole alternative, come la riduzione dell'intensità di coltivazione, la riduzione dell'uso di prodotti chimici e un sufficiente utilizzo di fertilizzanti azotati.

Gli agro-ecosistemi nel corso degli anni hanno aumentato la produzione colturale, grazie al lavoro svolto dagli agricoltori per massimizzare la resa. Questi rendimenti più elevati, tuttavia, hanno dei costi ambientali che non possono più essere trascurati. In effetti, i metodi agricoli tradizionali hanno conseguenze profonde sull'ambiente e sono considerati come la principale fonte di contaminazione dell'acqua, dell'aria e del suolo, che ha portato il degrado ambientale (FAO, 2007). Ad esempio, diversi studi (FAO, 2002; Janzen et al., 2006; Rajaniemi et al., 2011) hanno concluso che le attività agricole e le pratiche agricole connesse hanno un impatto significativo, in molti paesi, sulle emissioni totali di gas a effetto serra.

La produzione agricola, infatti, contribuisce al riscaldamento globale direttamente tramite il rilascio di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), di metano (CH<sub>4</sub>) e di protossido di azoto (N<sub>2</sub>O) dagli ambienti di allevamento e coltivazione, e indirettamente tramite la richiesta di input, come carburante e fertilizzanti (Robertson e Grace, 2004; Smith et al., 2012, 2008). La maggior parte dell'N<sub>2</sub>O si sviluppa durante il processo di denitrificazione in ambiente anaerobico, cioè nell'acqua. Sviluppo e implementazione di pratiche di mitigazione economicamente sostenibili che riducono le emissioni di gas serra di origine agricola è quindi essenziale.

Infatti, studi dimostrano che la produzione di fertilizzanti azotati e la sua applicazione ai terreni contribuisce in modo significativo alle emissioni di gas serra nel settore agricolo (Biswas et al., 2008; Gascol et al., 2007; Robertson et al., 2000). Un altro aspetto molto importante per l'agricoltura sostenibile riguarda

l'efficienza d'uso dell'azoto (NUE-Nitrogen Use Efficiency). Ciò è essenziale per la salute degli ecosistemi, dove l'uso intensivo di fertilizzanti azotati in agricoltura è la principale causa di eutrofizzazione di acqua fresca (London, 2005) e dell'inquinamento degli ecosistemi marini (Beman et al., 2005), come risultato di lisciviazione a causa dell'applicazione di alti tassi di fertilizzanti azotati (Tilman, 1999).

Meisterling et al. (2009) hanno riferito che un adeguamento delle tecniche di coltivazione della produzione vegetale, compresa la rotazione delle colture (Halvorson et al., 2008), sono in grado di aumentare la qualità del suolo e ridurre le richieste di fertilizzanti azotati e, di conseguenza, ridurre gli impatti associati alla produzione e all'applicazione di fertilizzanti azotati.

L'utilizzo della metodologia LCA (Life-Cycle Assessment, SETAC, Bruxelles, 1993) permette la valutazione oggettiva degli impatti ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, di energia e delle emissioni nell'ambiente; inoltre identifica e valuta le opportunità di influenzare miglioramenti ambientali. La rilevanza di tale tecnica risiede principalmente nel suo approccio innovativo, che consiste nel valutare tutte le fasi di un processo produttivo come correlate e dipendenti (Baldo et al., 2008). Ad oggi la LCA va diventando uno strumento quasi indispensabile nel supporto alla decisione a fini programmatori (Hunkeler, 2005). Infatti, a causa della crescente preoccupazione degli impatti ambientali del nostro cibo sono stati effettuati, negli ultimi anni, diversi studi di LCA nel settore agro-alimentare per la valutazione ambientale dei diversi prodotti e/o scenari di produzione (Cellura et al., 2012; Borrion et al., 2012; Fedele et al., 2014; Mohamad et al., 2014).

In letteratura gli studi di LCA effettuati sulla produzione di frumento duro rientrano nell'ambito dello studio di LCA sulla pasta (Dyer et al., 2010; Rööös et al., 2011). Un esempio di impiego dell'LCA su scala più ampia è ben rappresentato dallo studio realizzato in collaborazione con Barilla G. e R. Fratelli Spa al fine di analizzare e valutare le caratteristiche dei principali sistemi colturali italiani nei quali è coltivato il frumento duro (Ruini et al., 2011). Anche Dyer et al. (2010) hanno studiato, la produzione, la lavorazione e la commercializzazione di una gamma di prodotti del frumento duro, come l'insieme di tutte le operazioni che generano gas ad effetto serra. Altre ricerche, come quello di Rööös et al. (2011) hanno effettuato uno studio di CF calcolato per la produzione di pasta in Svezia. I risultati hanno mostrato che il CF medio per la pasta è stato di 0,50 kg di CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> pasta (0,31 kg di CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> frumento duro prima della processo di macinazione). Altri ancora come Gan et al. (2011) hanno effettuato uno studio sull'importanza della precessione colturale del frumento duro, riscontrato in un sistema con una impronta di carbonio media di

0,42 kg di CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> di grano. Gli autori hanno evidenziato che i sistemi in cui il frumento duro è stato preceduto da una coltura di semi oleosi (di colza o di senape) l'anno precedente ha abbassato l'impronta di carbonio del 19% rispetto al duro prodotto nel sistema di cereali-cereali (0,34 kg di CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> di grano). Allo stesso modo, il frumento duro preceduto da una coltura proteica (ceci, lenticchie, piselli, etc.) ha abbassato l'impronta di carbonio fino a 0,30 kg di CO<sub>2</sub>eq kg<sup>-1</sup> di grano, cioè il 28% in meno rispetto alla coltura di frumento duro preceduta da cereale.

L'obiettivo principale dello studio è stato quello di calcolare l'impronta di carbonio della coltivazione di frumento duro in Val D'Orcia (Toscana) per la produzione di pasta. La coltivazione del frumento avviene secondo una tecnica di agricoltura di precisione in grado di dosare la fertilizzazione azotata e verificare le rese associate, lo studio è stato finalizzato anche all'analisi degli scenari di tre differenti dosi di fertilizzante azotato somministrato. Gli indici di sostenibilità ambientali analizzati nel presente studio, oltre la Carbon Footprint (CF), sono stati l'impatto per il consumo di risorse non rinnovabili e il consumo di acqua della stessa coltivazione.

## **4.2 MATERIALI E METODI**

Seguendo le indicazioni delle norme ISO della serie 14040 (ISO, 2006), di seguito illustreremo le fasi dello studio LCA. La prima fase consiste nella descrizione dettagliata del sistema in esame, comprendente la rappresentazione del diagramma di flusso del ciclo produttivo, dove sono stati definiti i confini del sistema. La seconda fase LCA è l'Analisi di Inventario in cui è stato realizzato un modello analogico della realtà che rappresenta gli scambi tra le diverse operazioni unitarie del processo in esame nel modo più fedele possibile, fornendo dati oggettivi, senza alcun tipo di valutazione o giudizio. Le informazioni ricavate dalla seconda fase sono state la base di partenza della fase successiva, l'analisi degli impatti. Lo scopo di questa analisi è mostrare da un lato quanto le emissioni e i reflui derivanti dal processo in esame impattano l'ambiente, dall'altro quantificare il consumo di risorse. Nel presente studio sono considerati principalmente tre impatti sull'ambiente:

- 1) riscaldamento globale (GWP, Global Warming Potential): i quantitativi di gas serra sono standardizzati basandosi sui potenziali di riscaldamento globale ed espressi in kg di CO<sub>2</sub> equivalenti;
- 2) consumi di risorse non rinnovabili: energia totale estratta dall'ambiente in MJ;
- 3) consumi idrici: quantità di acqua consumata nel processo considerato espressa in kg.

L'ultima fase LCA (UNI-ISO 14043), interpretazione e miglioramento, si esplica aumentando il livello conoscitivo relativamente agli impatti ambientali ed energetici della produzione di frumento duro in Val d'Orcia, rendendo possibile l'individuazione del miglior sistema di fertilizzazione.

### **4.2.1 Sistema studiato ed unità funzionale**

Il sistema studiato è la produzione di frumento duro nella zona della Val d'Orcia in Toscana, tramite l'utilizzo, per un corretto studio, di tecniche di agricoltura di precisione. In particolare vengono analizzati tre sistemi di coltivazione ciascuno con una propria specifica concimazione azotata, tali sistemi vengono indicati come:

- 1) Coltivazione con concimazione a basso contenuto di N (100 unità di N);
- 2) Coltivazione con concimazione a medio contenuto di N (125 unità di N);
- 3) Coltivazione con concimazione ad alto contenuto di N (150 unità di N).

L'unità funzionale (UF) del processo di coltivazione del frumento duro è la resa ad ettaro (kg/ha) calcolata come media di produzione dell'ultimo triennio (2009-2013) per un campione di tre aziende. Le unità funzionali relative ad ogni sistema di coltivazione sono state rispettivamente, 4420 kg/ha per il sistema di concimazione ad alto contenuto di N, 4220 kg/ha a medio contenuto di N e 3830 kg/ha a basso contenuto di N (Tab. 4.1). I risultati della CF di ciascuno dei tre sistemi e degli altri indicatori saranno riferiti ad 1 kg di granella di frumento duro prodotta.

<b>SISTEMA</b>	<b>UF</b>
Coltivazione con concimazione ad alto contenuto di N	4420 kg/ha
Coltivazione con concimazione a medio contenuto di N	4220 kg/ha
Coltivazione con concimazione a basso contenuto di N	3830 kg/ha

Tabella 4.1 – Unità funzionali di ogni sistema studiato.

#### **4.2.2. Confini del sistema**

I confini del sistema dello studio hanno riguardato tutte le operazioni, e tutto ciò che ne è connesso, dalla preparazione del terreno per permettere la semina e la coltivazione fino alla raccolta del prodotto e al suo trasporto al centro di stoccaggio. In particolare le inclusioni hanno riguardato: i semi di frumento e il loro relativo imballaggio; i consumi di gasolio per le attività agricole: pratiche di coltivazione (aratura, erpicatura, concimazione di fondo, semina, ecc.), raccolta del frumento e pressatura della paglia; la produzione di fertilizzanti per la coltivazione nonché la produzione dei relativi imballaggi; le emissioni da uso di fertilizzanti, quali: il protossido di azoto ( $N_2O$ ) e l'ammoniaca ( $NH_3$ ) in aria, ed i nitrati ( $NO_3$ ) in acqua; la produzione di fitofarmaci per la coltivazione e la produzione dei loro relativi imballaggi; il consumo idrico per la diluzione dei fitofarmaci; il trasporto delle sementi, dei fertilizzanti e dei fitofarmaci dal fornitore all'azienda che coltiva il frumento; gli scenari di fine vita degli imballaggi di semi, fertilizzanti e fitofarmaci; il trasporto del frumento raccolto dall'azienda di coltivazione al centro di stoccaggio. Per quanto riguarda i consumi idrici il frumento non viene irrigato e i consumi sono legati alla distribuzione di fitofarmaci, e produzione di materie prime quali fertilizzanti, sementi, etc. Nello studio effettuato, le esclusioni hanno, invece, riguardato: i macchinari e le trattrici per le operazioni agricole, le strutture ed i depositi per le rimesse dei mezzi agricoli, ed infine le emissioni da uso di fitofarmaci. In figura 4.1 sono riportati schematicamente il diagramma di flusso ed i confini del sistema oggetto di studio.

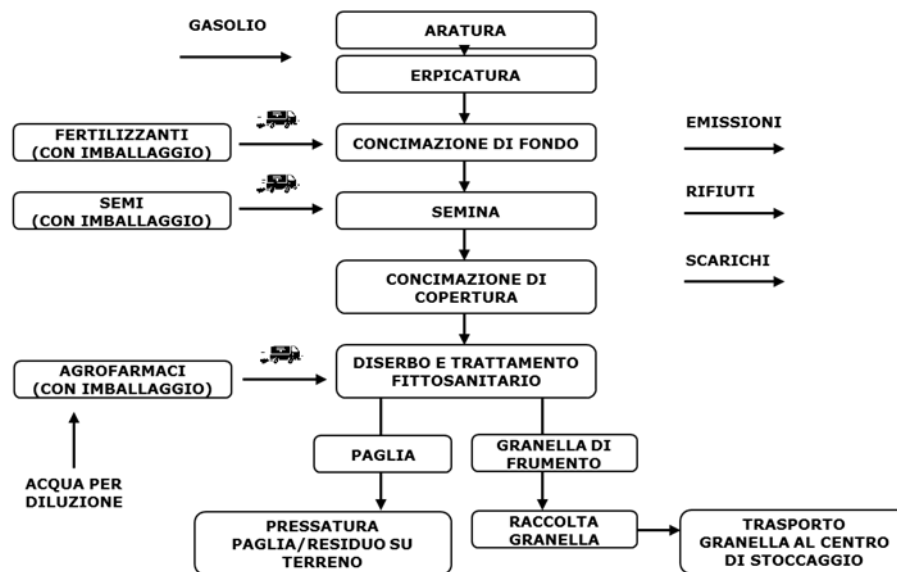


Figura 4.1 - Diagramma di flusso, confini del sistema e schema input/output del ciclo di vita della coltivazione del frumento.

#### 4.2.3 Qualità dei dati, tipologie di impatti e metodologie

I requisiti di qualità dei dati rispecchiano generalmente le caratteristiche delle di quelli necessari per lo studio. In questo caso sono stati utilizzate le informazioni raccolte sul campo (primarie) presso un campione formato da quattro aziende agricole. La copertura temporale del rilevamento dei dati di coltivazione si riferisce alla media ottenuta su 4 anni di campagne di produzione: dal 2009 al 2013.

La zona in cui è stata effettuato lo studio è il territorio della Val D’Orcia, una zona collinare della Toscana (Italia) caratterizzata da un clima tipicamente mediterraneo, con una temperatura media annua di quasi 14 °C ed una piovosità annua media di circa 700 mm. In questa zona, il grano duro (*Triticum durum* Desf., *Triticum turgidum* L. subsp. Duro) è la coltura principale, con una superficie media coltivata di circa 1000 ha/anno. Ci troviamo in una zona dove il tipo di terreno è, principalmente, franco-argilloso, secondo la classificazione USDA (Soil Survey Staff 1998).

Le informazioni utilizzate sono state acquisite tramite campionamenti fatti a mano in più punti, all’interno dell’appezzamento, con dosi di N differenti. La banca dati LCA utilizzata è Ecoinvent v.2.2 ([www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch)), mentre per l’elaborazione di quest’ultimi é stato utilizzato il software SimaPro (versione 7.3.3.), con metodo ReCiPe, che permette di analizzare 18 categorie di impatti che coinfuiscono in 3



macrocategorie di danni. Inoltre l'impiego della metodologia IPCC 2007 GWP100 consente il calcolo del CF. Gli indicatori di impatto potenziale e le fonti delle metodologie utilizzate per il calcolo sono indicati in tabella 4.2.

<b>INDICATORE D'IMPATTO</b>	<b>UNITÀ DI MISURA</b>	<b>METODO DI RIFERIMENTO</b>
RISCALDAMENTO GLOBALE	kg CO2 eq.	Fattori di caratterizzazione dell'IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change – 2007
CONSUMO RISORSE NON RINNOVABILI	MJ	CED – Cumulative Energy Demand
CONSUMO ACQUA	Litri (l)	Inventario delle sostanze. Comprende consumi diretti e indiretti

Tabella 4.2 – Elenco degli indicatori di impatto ambientale e dei relativi metodi utilizzati per lo studio.

#### **4.2.4 Inventario: raccolta dati e modelli**

La raccolta delle informazioni è stata effettuata mediante apposite check-list elaborate ad hoc, per lo studio in questione, e riempite con i dati raccolti su 4 aziende sperimentali in cui sono state acquisite tutte le indicazioni e gli input necessari per la coltivazione. In tabella 4.3 viene indicata la sintesi dei dati raccolti.

L'inventario fa riferimento ai tre scenari di coltivazione di frumento duro, ciascuno dei quali con le proprie dosi di fertilizzazione e le rispettive rese associate. Il resto delle informazioni sono comuni ai tre scenari, utilizzando lo stesso sistema di coltivazione per le tre aziende, eccezion fatta per il contenuto di fertilizzante azotato. I dati che risultano essere diversi, quindi, sono la quantità di concime di copertura e la resa. Da notare che nello studio quando si parla di fertilizzazione azotata differente non viene considerata la fertilizzazione pre-semina, che per le tre aziende è stata sempre uguale negli anni dello studio, cioè un quantitativo di 250 kg/ha di fosfato biammonico (18-46).

Successivamente, in base ai dati raccolti, è stato realizzato il modello LCI (Life Cycle Inventory), ovvero il modello di inventario che rappresenta la coltivazione del frumento duro per la produzione di pasta di qualità. L'inventario contiene i dati primari raccolti sul campo e descritti dai processi della banca dati Ecoinvent v.2.2 rappresentativi per analogia geografica e tecnologica. Poiché l'unico dato di input che cambia per i 3 scenari è la quantità di concime impiegata, la variazione dei dati riguarda solo tale quantità (Tab. 4.3) e le relative emissioni (Tab. 4.4).

	Coltivazione FRUMENTO con concimazione basso contenuto N	Coltivazione FRUMENTO con concimazione medio contenuto N	Coltivazione FRUMENTO con concimazione alto contenuto N
FRUMENTO IN GRANELLA (kg/ha)	3830	4220	4420
PAGLIA (kg/ha)	2553	2813	2947
<b>DATI DI INPUT</b>			
SEMI (kg/ha)	300	300	300
M BALLAGGIO PER SEMI (kg)	Big-bag in PP/PET	Big-bag in PP/PET	Big-bag in PP/PET
PESO VUOTO M BALLAGGIO PER SEMI (kg)	1305	1305	1305
CAPACITÀ M BALLAGGIO SEMI (kg)	500	500	500
DISTANZA FORNITORE SEMI (km)	8	8	8
GASOLIO PER OPERAZIONI COLTURA LI (l/ha)	80,3	80,3	80,3
FERTILIZZANTE PER CONCIMAZIONE DIFONDO	FOSFATO BIAMMONICO	FOSFATO BIAMMONICO	FOSFATO BIAMMONICO
COMPOSIZIONE FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DIFONDO	18% N, 48% P	18% N, 48% P	18% N, 48% P
QUANTITÀ FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DIFONDO (kg/ha)	250	250	250
M BALLAGGIO PER FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DIFONDO (kg)	Big-bag in PP	Big-bag in PP	Big-bag in PP
PESO VUOTO M BALLAGGIO PER FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DIFONDO (kg)	109	109	109
CAPACITÀ M BALLAGGIO FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DIFONDO (kg)	500	500	500
DISTANZA FORNITORE FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DIFONDO (km)	8	8	8
FERTILIZZANTE PER CONCIMAZIONE DIFONDO	NITRATO AMMONICO	NITRATO AMMONICO	NITRATO AMMONICO
COMPOSIZIONE FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DIFONDO	28% N	28% N	28% N
QUANTITÀ FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DI COPERTURA (kg/ha)	350	440	530
M BALLAGGIO PER FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DI COPERTURA (kg)	Big-bag in PP	Big-bag in PP	Big-bag in PP
PESO VUOTO M BALLAGGIO PER FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DI COPERTURA (kg)	109	109	109
CAPACITÀ M BALLAGGIO FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DI COPERTURA (kg)	500	500	500
DISTANZA FORNITORE FERTILIZZANTE CONCIMAZIONE DI COPERTURA (km)	8	8	8
PRINCIPIO ATTIVO DISERBANTE PRE-LAVORAZIONE	GLYPHOSATE: 30%	GLYPHOSATE: 30%	GLYPHOSATE: 30%
QUANTITÀ DISERBANTE PRE-LAVORAZIONE (l/ha)	0,875 kg	0,875 kg	0,875 kg
M BALLAGGIO PER DISERBANTE PRE-LAVORAZIONE (kg)	Contenitore PP	Contenitore PP	Contenitore PP
PESO VUOTO M BALLAGGIO PER DISERBANTE PRE-LAVORAZIONE (kg)	1,38	1,38	1,38
CAPACITÀ M BALLAGGIO DISERBANTE PRE-LAVORAZIONE (l)	20	20	20
DISTANZA FORNITORE DISERBANTE PRE-LAVORAZIONE (km)	8	8	8
PRINCIPIO ATTIVO DISERBANTE IN COPERTURA GRAMINICIDA	Pinoxaden: 5,05% Cloquinto cet-mesyl: 12,6%	Pinoxaden: 5,05% Cloquinto cet-mesyl: 12,6%	Pinoxaden: 5,05% Cloquinto cet-mesyl: 12,6%
QUANTITÀ DISERBANTE IN COPERTURA GRAMINICIDA (l/ha)	1	1	1
M BALLAGGIO PER DISERBANTE IN COPERTURA GRAMINICIDA (kg)	Contenitore PP	Contenitore PP	Contenitore PP
PESO VUOTO M BALLAGGIO PER DISERBANTE IN COPERTURA GRAMINICIDA (kg)	0,6	0,6	0,6
CAPACITÀ M BALLAGGIO DISERBANTE IN COPERTURA GRAMINICIDA (l)	5	5	5
DISTANZA FORNITORE DISERBANTE IN COPERTURA FOGLIA LARGA (km)	8	8	8
PRINCIPIO ATTIVO DISERBANTE IN COPERTURA FOGLIA LARGA	Tifensulfuron metile: 33,3% Tribenuron metile puro: 16,7%	Tifensulfuron metile: 33,3% Tribenuron metile puro: 16,7%	Tifensulfuron metile: 33,3% Tribenuron metile puro: 16,7%
QUANTITÀ DISERBANTE IN COPERTURA FOGLIA LARGA (l/ha)	0,05	0,05	0,05
DISTANZA FORNITORE FUNGICIDA (km)	8	8	8
PRINCIPIO ATTIVO FUNGICIDA	Procloraz puro: 34,8% Propiconazolo puro: 7,8%	Procloraz puro: 34,8% Propiconazolo puro: 7,8%	Procloraz puro: 34,8% Propiconazolo puro: 7,8%
QUANTITÀ FUNGICIDA (l/ha)	1,1	1,1	1,1
M BALLAGGIO PER FUNGICIDA (kg)	Contenitore PP	Contenitore PP	Contenitore PP
PESO VUOTO M BALLAGGIO PER FUNGICIDA (kg)	0,88	0,88	0,88
CAPACITÀ M BALLAGGIO FUNGICIDA (l)	10	10	10
DISTANZA FORNITORE FUNGICIDA (km)	8	8	8
ACQUA PER DILUZIONE DISERBANTI VARI E FUNGICIDA	416	416	416
GASOLIO PER RACCOLTA FRUMENTO (dato medio fra due carri elevatori da 25q e 50 q)	20	20	20
DISTANZA MEDIA FRA AZIENDE E CENTRO STOCCAGGIO	8	8	8
GASOLIO PER PRESSATURA PAGLIA (kg/ha)	7	7	7
RIFIUTI GENERATI	M BALLAGGI VARI FILO PER PAGLIA	M BALLAGGI VARI FILO PER PAGLIA	M BALLAGGI VARI FILO PER PAGLIA
QUANTITÀ RIFIUTI GENERATI (kg)	4,7	4,7	4,7
MODALITÀ DI SMALTIMENTO	RICICLO	RICICLO	RICICLO

Tabella 4.3 – Dati raccolti per lo studio LCA della coltivazione di frumento: 3 scenari di coltivazione.

	<b>Unità di misura</b>	<b>Coltivazione FRUMENTO con concimazione e basso contenuto N</b>	<b>Coltivazione FRUMENTO con concimazione e medio contenuto N</b>	<b>Coltivazione FRUMENTO con concimazione e alto contenuto N</b>
N <sub>2</sub> O emessa in aria	kg	4,6	5,3	6,1
NH <sub>3</sub> emessa in aria	kg	4,1	4,5	5,0
NO <sub>3</sub> emessa in acqua	kg	180,8	211,8	242,9

Tabella 4.4 - Emissioni da uso di fertilizzanti: calcolo per i 3 scenari di coltivazione del frumento duro

### **4.3 ANALISI DEGLI IMPATTI POTENZIALI ED INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI**

Prendendo a riferimento gli indicatori della tabella 4.2, si è proceduto all'analisi degli impatti dei 3 scenari di coltivazione del frumento duro (Tabella 4.5 e Figure 4.2 a, b, c). Dai risultati mostrati in tabella 4.5 si nota come l'andamento dell'entità degli impatti sia allineato con la maggiore quantità di concime adottato: gli impatti maggiori, riferiti ad 1 kg di prodotto, infatti sono quelli dello scenario con concimazione ad alto contenuto di N.

Riferendoci all'indicatore del riscaldamento globale (Figura 4.2a) troviamo valori di 0,449 kg CO<sub>2</sub>eq per la coltivazione a basso contenuto di N, 0,468 per quella a medio contenuto di N e 0,506 ad alto contenuto di N. Questi dati sono riferibili in letteratura ad altri studi, ad esempio Rööös et al. (2011) hanno mostrato che il CF medio per la pasta prodotta in Svezia è stato di 0.50 kg CO<sub>2</sub>eq/kg pasta (0.31 kg CO<sub>2</sub>eq/kg frumento duro prima della processo di macinazione), inoltre hanno calcolato l'incertezza del CF compresa fra i valori di 0,22-0,56 kg CO<sub>2</sub>eq/kg grano. Se si considera che la coltivazione del frumento in Svezia è sicuramente differente in alcune operazioni, i dati ottenuti con questo studio, rientrano all'interno dell'incertezza del CF trovato dagli autori. Altri studi, effettuati da Gan et al. (2011) hanno messo l'accento sull'importanza della precessione colturale del frumento duro, riscontrato in un sistema con una impronta di carbonio media di 0,42 kg di CO<sub>2</sub>eq/kg di grano con rotazione cereale-cereale. Gli autori hanno riscontrato una diminuzione se il frumento duro è preceduto da una coltura di semi oleosi (di colza o di senape) con valori di 0,34 kg di CO<sub>2</sub>eq/kg di grano, e allo stesso modo, se preceduto da una coltura proteica (ceci, lenticchie, piselli, etc.) con valori di 0,30 kg CO<sub>2</sub>eq/kg di grano. Anche altri studi hanno utilizzato la metodologia LCA per calcolare gli impatti della coltivazione del frumento, in particolare Knudsen et al. (2014) hanno riscontrato valori di 0,385 kg CO<sub>2</sub>eq con rotazione frumento-fava, Charles et al. (2006) valori di 0,381 kg CO<sub>2</sub>eq in frumento coltivato con buone pratiche agricole ed infine Ruini et al. (2013) hanno riscontrato valori di 0,38 kg CO<sub>2</sub>eq su frumento duro dopo precessione di leguminose, che è la stessa precessione che troviamo nel nostro studio. I valori di questi studi riscontrano un impatto, rispetto alle emissioni di gas ad effetto serra, minore a quello rilevato nel presente lavoro. Questo risultato può essere spiegato facendo riferimento al territorio in cui è stata svolta l'analisi, cioè la Val d'Orcia, e di conseguenza riferendoci al diverso tipo di LCI utilizzata.

Anche per quanto riguarda l'indicatore sul consumo delle risorse non rinnovabili (Figura 4.2b), con 1,93 MJ per Kg di granella prodotto, la coltivazione con alto contenuto di N risulta quella che impatta maggiormente, mentre quella a basso

contenuto di N ha un valore di 1,79 MJ risulta la meno impattante. Gli stessi risultati si riscontrano sul consumo di acqua (Figura 4.2c), con il maggiore consumo, 288 litri, riscontrati nella coltivazione ad alto contenuto di N e il minore, 277 litri, con quella a basso contenuto di N.

In particolare, si calcola che, passando dallo scenario a basso contenuto di N a quello ad alto contenuto di N, ad un incremento della resa del 15% si ha un'aumento del quantitativo di azoto del 50%, e viene riscontrato un aumento degli impatti pari a:

- 13% per il riscaldamento globale;
- 7% per il consumo di risorse non rinnovabili;
- 4% per il consumo di acqua.

L'aumento degli impatti legati al riscaldamento globale è dovuto sia alle emissioni di CO<sub>2</sub> fossile per la produzione di quantità maggiori di fertilizzanti utilizzati, e sia all'aumento di protossido di azoto emesso in aria in fase di uso dei fertilizzanti, questo è principalmente dovuto a fenomeni di denitrificazione legati allo spandimento del concime sul suolo. Il consumo di risorse rinnovabili e di acqua aumentano poiché aumenta la quantità di fertilizzante azotato per la concimazione di copertura e quindi aumentano i consumi in fase di produzione di questi fertilizzanti.

Inoltre lo studio ha messo in evidenza che, per ciascuno degli scenari, la distribuzione del contributo degli impatti si ripete in maniera molto simile, quindi, viene analizzato nello specifico soltanto lo scenario a basso contenuto di N (Tabella 4.6 e Figura 4.3 a, b, c) che risulta essere il migliore.

Per quanto riguarda l'analisi della distribuzione dei contributi delle singole operazioni o prodotti, riferito allo scenario a basso contenuto di N, per l'indicatore del riscaldamento globale (Figura 4.3a), si nota come l'impatto maggiore sia dovuto all'emissioni da uso di fertilizzanti (48%) e in secondo luogo dalla produzione dei fertilizzanti (39%), quindi tra produzione e utilizzo i fertilizzanti producono l'87% delle emissioni di gas a effetto serra. La rimanente percentuale di emissioni è da attribuire al consumo di gasolio per le varie operazioni (12%) e l'1% è riferibile agli agrofarmaci.

Riferendoci al consumo di risorse non rinnovabili (Figura 4.3b) il 92% di queste risorse viene perso per la produzione dei fertilizzanti, praticamente tutto, mentre il restante 8% viene suddiviso tra la produzione degli agrofarmaci (5%), imballaggi vari (2%) e trasporti di fornitura (1%).

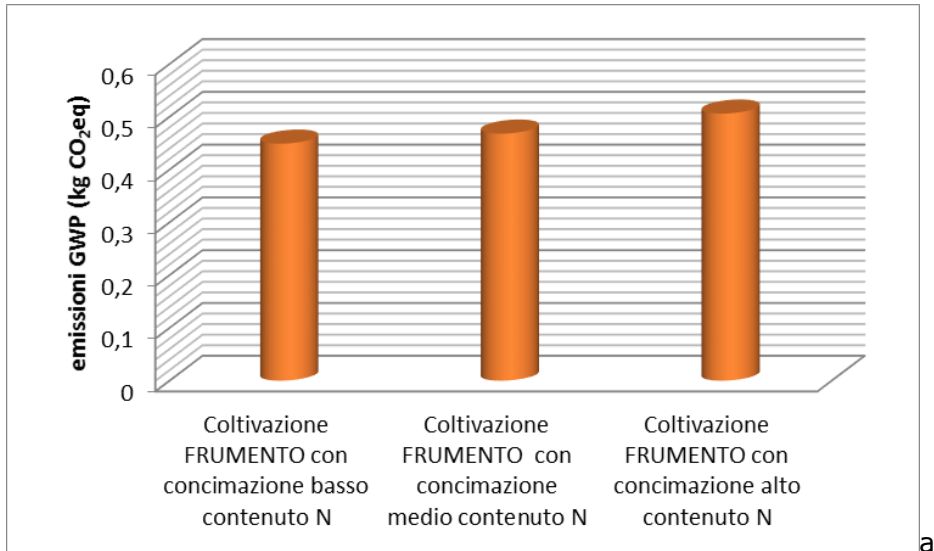
Per quanto riguarda l'indicatore sul consumo di acqua (Figura 4.3c), vediamo come il 59% del consumo totale di acqua serve alla produzione dei fertilizzanti, che sono il prodotto di maggiore impatto, il 18% si riferisce alla produzione di agrofarmaci ed il 17% a quella dei semi.

<b>Indicatore di impatto</b>	<b>Unità di misura</b>	<b>Coltivazione FRUMENTO con concimazione basso contenuto N</b>	<b>Coltivazione FRUMENTO con concimazione medio contenuto N</b>	<b>Coltivazione FRUMENTO con concimazione alto contenuto N</b>
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2eq</sub>	0,449	0,468	0,506
Consumo risorse non rinnovabili	MJ	1,79	1,82	1,93
Consumo acqua	litri	276,81	279,05	288,17

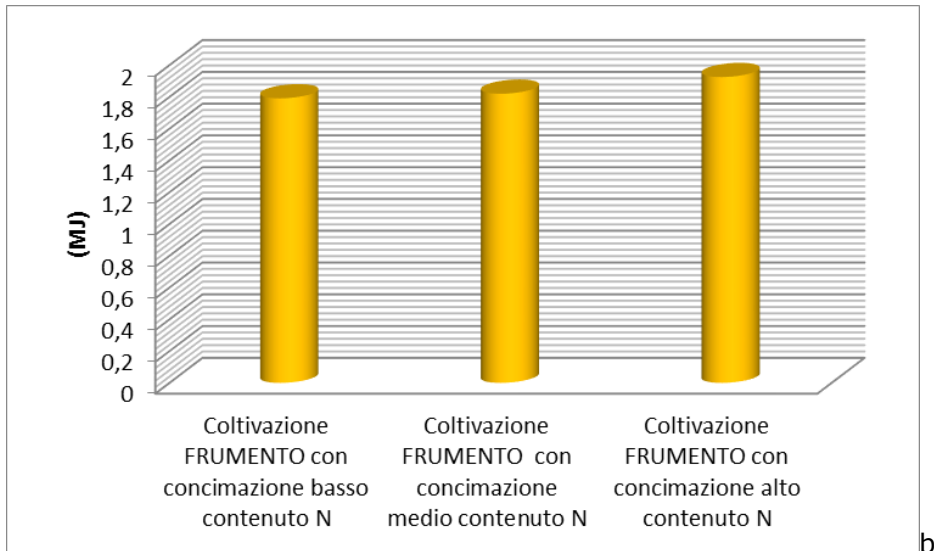
Tabella 4.5 - Potenziali impatti ambientali dei 3 scenari di coltivazione e della raccolta di frumento (UF=1kg).

	<b>SEMI</b>	<b>IMBALLAGGI VARI</b>	<b>TRASPORTI DI FORNITURA</b>	<b>FERTILIZZANTI</b>	<b>AGROFARMACI</b>	<b>EMISSIONI DA USO FERTILIZZANTI</b>	<b>CONSUMO GASOLIO</b>
Riscaldamento globale	0,001722	0,001539	0,001525	0,170389	0,004948	0,213441	0,055829
Consumo risorse non rinnovabili	0,000079	0,040147	0,026024	1,627290	0,096454	0,000000	0,000128
Consumo acqua	48,21	2,42	2,95	162,37	50,41	0,00	10,86

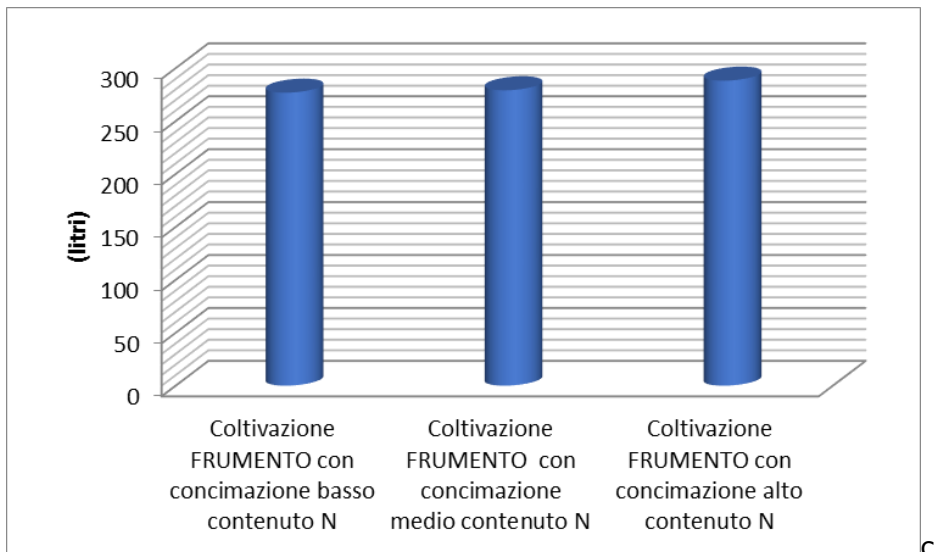
Tabella 4.6 - Distribuzione dei potenziali impatti ambientali per lo scenario di coltivazione del frumento duro con concimazione a basso contenuto di N (UF=1kg).



a



b



c

Figura 4.2 - Confronto impatti su riscaldamento globale (a), consumo di risorse non rinnovabili (b) e consumo acqua (c) per i 3 scenari di coltivazione (UF:1kg).

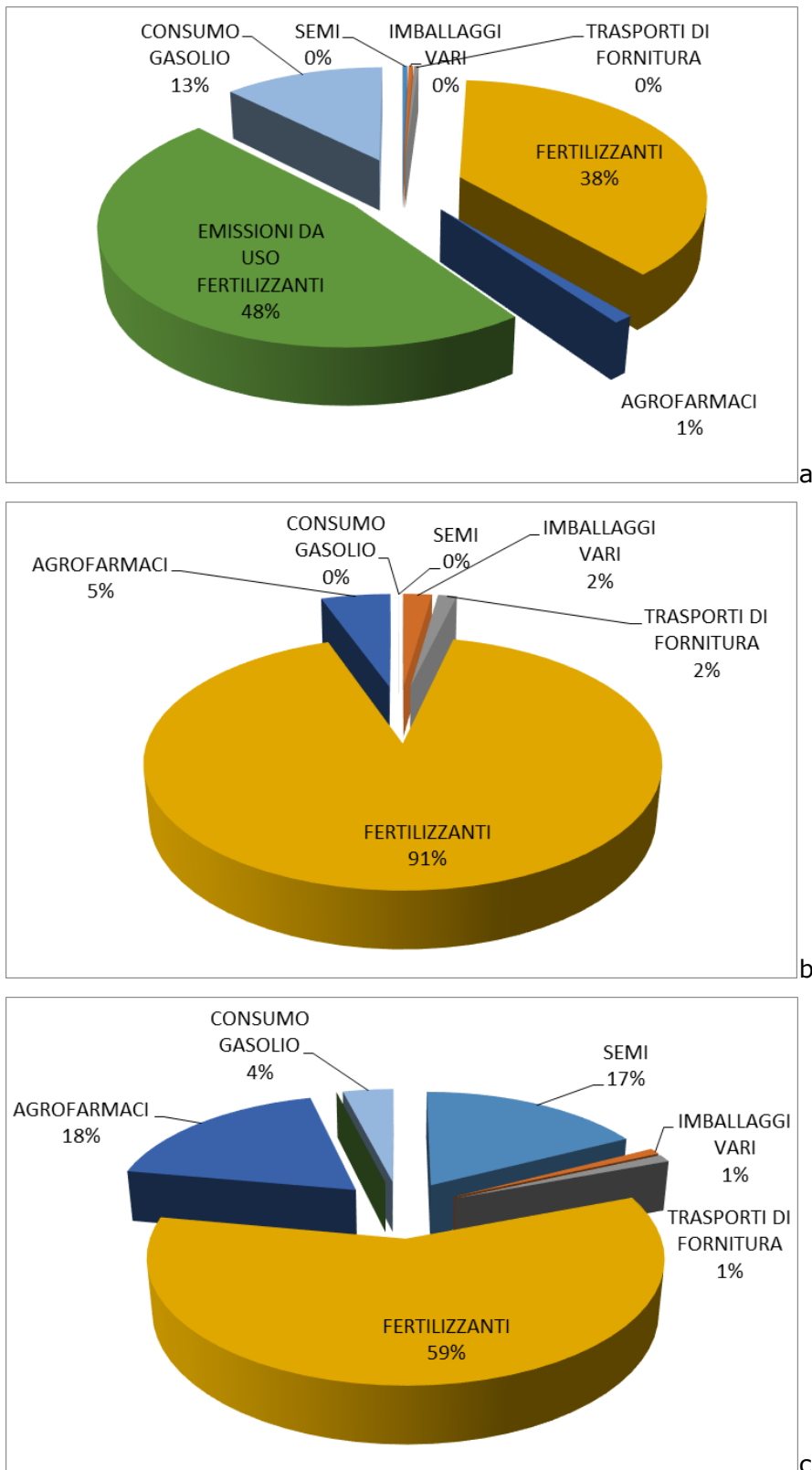


Figura 4.3 - Distribuzione impatti per lo scenario di coltivazione del frumento duro con concimazione a basso contenuto di N. Gli impatti si riferiscono al riscaldamento globale (a), al consumo di risorse non rinnovabili (b) e al consumo di acqua (c).



## 4.4 CONCLUSIONI

La metodologia LCA è risultata estremamente indicata per confrontare le tre differenti tipologie di gestione azotata. Per quanto riguarda le conclusioni finali, i risultati dimostrano che, nel complesso, i dati più sensibili dal punto di vista ambientale sono la produzione dei fertilizzanti impiegati e le relative emissioni e il consumo di gasolio, nel caso del consumo di acqua anche la produzione del seme e degli agro farmaci impiegati hanno un contributo significativo.

In definitiva, soprattutto per l'indicatore legato alla carbon footprint, quindi, risulta utile tenere sotto controllo il contributo dell'azoto nella fase di concimazione poiché crea conseguenze importanti dal punto di vista ambientale.

Inoltre, questo studio conferma che le caratteristiche di una specie, in questo caso il frumento duro, sono fortemente legate al contesto (sistema o modello) nel quale quest'ultima è coltivata. Infatti, la ricerca si è avvalsa dell'utilizzo di pratiche agricole definite secondo le tecniche di agricoltura di precisione, in particolar modo per la fertilizzazione azotata. Questo ha reso possibile l'utilizzo di dati precisi e puntuali sulla coltivazione e produzione del frumento duro ed in particolare sull'effettiva quantità di fertilizzante azotato somministrato, permettendo di acquisire conoscenze per guidare gli operatori del settore attraverso un'agricoltura sito-specifica.

Le ragioni che spingono al calcolo dei valori di CF per i prodotti agro-alimentari sono diversi. Una delle principali è quella di consentire la differenziazione tra i produttori di frumento duro, per esempio di premiare economicamente produzioni a basse emissioni di GHG (Greenhouse Gas). Non risulta improbabile, nei prossimi anni, che i valori bassi di CF sul cibo possano diventare un importante strumento di concorrenza, soprattutto riguardo ai produttori di prodotti agro-alimentari, che saranno esigenti con i loro fornitori per avere, ad esempio, la granella di frumento prodotta con basse emissioni di GHG.

Infatti, diventa sempre più necessaria una collaborazione con gli imprenditori agricoli affinché i concetti di sostenibilità e produttività diventino parte delle strategie aziendali, come due aspetti della produzione agricola assolutamente conciliabili.

## 4.5 BIBLIOGRAFIA

- Beman J.M., Arrigo K.R. Matson P.A., 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature* 434, 7030:211-214.
- Biswas W.K., Barton L., Carter D., 2008. Global warming potential of wheat production in Western Australia: a life cycle assessment. *Water Environ. J.* 22, 206-216.
- Borrion L.A., McManus M.C., Hammond G.P., 2012. Environmental life cycle assessment of bioethanol production from wheat straw. *Biomass Bioenergy* 47, 9-19.
- Cellura M., Longo S., Mistretta M., 2012. Life Cycle Assessment (LCA) of protected crops: an Italian case study. *J. Clean. Prod.* 28, 56-62.
- Charles R., Jolliet O., Gaillard G., Pellet D., 2006. Environmental analysis of intensity level in wheat crop production using life cycle assessment. *Agric Ecosyst Environ* 113, 1-4:216-225
- Commission of the European communities, 1999. White Paper on Food Safety. Brussels, 2000 COM (1999) 719 final.
- Cumulative Energy Demand (CED), method published by ecoinvent version 2.0 and expanded by PRé Consultants.
- De Backer E., Aertsens J., Vergucht S., Steurbaut W., 2009. Assessing the ecological soundness of organic and conventional agriculture by means of life cycle assessment (LCA): a case study of leek production. *Br. Food J.* 111, 10:1028-1061.
- Dyer J.A., Vergé X.P.C., Desjardins R.L., Worth D.E., McConkey B.G., 2010. The impact of increased biodiesel production on the greenhouse gas emissions from field crops in Canada. *Energy Sust. Dev.* 14, 73-82.
- Ecoinvent: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2007. The State of Food and Agriculture: Paying Farmers for Environmental Services. FAO Agriculture Series No. 38. Available: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1200e/a1200e00.pdf>.
- FAO, 2002. Report World Agriculture: towards 2015/2030. Summary report. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, 97 pp.
- Fedele A., Mazzi A., Niero M., Zuliani F., Scipioni A., 2014. Can the Life Cycle Assessment methodology be adopted to support a single farm on its environmental impacts forecast evaluation between conventional and organic production? An Italian case study. *J. Clean. Prod.* 69, 49-59.
- Gan Y., Liang C., Wang X., McConkey B., 2011. Lowering carbon footprint of durum wheat through diversifying cropping systems. *Field Crops Res.* 122, 3:199-206.
- Gascol C.M., Gabarell X., Anton A., Rigola M., Carrasco J., Ciria P., Solano M.L., Rieradevall J., 2007. Life cycle assessment of brassica carinata cropping systems in southern Europe. *Biomass Bioener.* 31, 543-555.
- Halvorson A.D., Del Grosso S.J., Reule C.A., 2008. Nitrogen, tillage and crop rotation effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems. *J. Environ. Qual.* 37, 4:1337-1344.

- Hunkeler D., Rebitzer G., 2005. The future of Life Cycle Assessment. *Int. J LCA* 10, 5:305-308.
- IPCC –International Panel of Climate Change, 2007.
- ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. "Emissioni Nazionali in atmosfera dal 1990 al 2009. Agricoltura", Rapporti 140/2011.
- Janzen H.H., Angers D.A., Boehm M., Bolinder M., Desjardins R.L., Dyer J., Ellert B.H., Gibb D.J., Gregorich E.G., Helgason B.L., Lemke R., Masse D., McGinn S.M., McAllister T.A., Newlands N., Pattey E., Rochette P., Smith W., Van den Bygaart A.J., Wang H., 2006. A proposed approach to estimate and reduce net greenhouse gas emissions from whole farms. *Can. J. Soil Sci.* 86, 3:401-418.
- Knudsen M.T., Meyer-Aurich A., Olesen J.E., Chirinda N., Hermansen J.E., 2014. Carbon footprints of crops from organic and conventional arable crop rotations e using a life cycle assessment approach. *J. Clean. Prod.* 64, 609-618.
- London J.G., 2005. Nitrogen study fertilizes fears of pollution. *Nature* 433, 791.
- Meisterling K., Samaras C., Schweizer V., 2009. Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat. *J. Clean. Prod.* 17, 222-230.
- Mohamad R.S., Verrastro V., Cardone G., Bteich M.R., Favia M., Moretti M., Roma R., 2014. Optimization of organic and conventional olive agricultural practices from a Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing perspectives. *J. Clean. Prod.* 70, 78-89.
- OECD, 2008. OECD Contribution to the United Nations Commission on Sustainable Development, towards sustainable agriculture.
- Panell D.J., Schilizzi S., 1999. Sustainable agriculture: a matter of ecology, equity, economic efficiency or expedience. *J. Sustain. Agric.*, 13, 57–66.
- Parlamento Europeo, 2013. Regulation (EU) No 1305/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 december 2013 on support for rural development by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD) and repealing Council Regulation (EC) No 1698/2005.
- Pré (Product Ecology), "SimaPro 7.1 – Reference Manual", 2007.
- Rajaniemi M., Mikkola H., Ahokas J., 2011. Greenhouse gas emissions from oats, barley, wheat and rye production. *Biosyst. Eng.* 1, 189-195. Special Issue.
- Robertson C.P., Paul E.A., Harwood R.R., 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289, 1922-1925.
- Robertson G.P., Grace P.G., 2004. Greenhouse gas fluxes in tropical and temperate agriculture: the need for a full-cost accounting of global warming potentials. *Environ. Dev. Sustain* 6, 51-63.
- Röös E., Sundberg C., Hansson P.A., 2011. Uncertainties in the carbon footprint of refined wheat products: a case study on Swedish pasta. *Int J Life Cycle Assess* 16, 338–350.
- Ruini L., Sessa F., Marino M., Meriggi P., Ruggeri M., 2013. Increasing the sustainability of durum wheat cultivation through a life cycle assessment approach. In: The 6th International Conference on Life Cycle Management in Gothenburg.

- Smith K.A., Mosier A.R., Crutzen P.J., Winiwarter W., 2012. The role of N<sub>2</sub>O derived from crop-based biofuels, and from agriculture in general, in Earth's climate. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 367, 1169-1174.
- Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O., Howden M., McAllister T., Pan G., Romanenkov V., Schneider U., Towprayoon S., Wattenbach M., Smith J., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 363, 789-813.
- Tedone L., Verdini L., Grassano N., De Mastro G., 2012. Valutazione dell'efficienza della concimazione azotata sulle componenti eco-fisiologiche, produttive e qualitative del frumento. In: *Procedere della XLI convegno nazionale della società Italiana di agronomia*, vol. 103.
- Tilman D., Cassman K.G., Matson P., Naylor R., Polasky S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Science* 418, 671-676.
- UNI EN ISO 14040:2006, Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento.
- UNI EN ISO 14044:2006, Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida.
- [http://www.apat.gov.it/site/itIT/Servizi\\_per\\_l%27Ambiente/Prodotti\\_fitosanitari/Archivio\\_prodotti\\_fitosanitari/](http://www.apat.gov.it/site/itIT/Servizi_per_l%27Ambiente/Prodotti_fitosanitari/Archivio_prodotti_fitosanitari/)

## CAPITOLO 5

### 5 CONCLUSIONI DELLA TESI

Lo studio ha preso in considerazione l'importanza della gestione della concimazione azotata per valutare la sostenibilità della produzione di frumento duro (*Triticum durum* Desf., *Triticum turgidum* L. subsp. Duro) coltivato in Val d'Orcia. Questa risulta fondamentale sia per quanto riguarda l'aspetto qualitativo nella produzione della coltura, d'altro canto, per ciò che riguarda l'impatto ambientale all'interno dell'agroecosistema. Questo è stato svolto con l'utilizzo dell'integrazione di tecniche diverse, quali il telerilevamento, la modellistica e l'analisi del CF (Carbon Footprint) e altri indicatori ambientali attraverso la metodologia LCA (Life Cycle Assessment), i cui risultati sono stati confrontati con i dati rilevati tramite monitoraggio a terra ed analisi di laboratorio.

Con la presente ricerca si può concludere che, sia l'utilizzo di immagini ad alta risoluzione da satelliti commerciali, sia l'impiego di modelli che simulano la crescita delle colture, rappresentano un potente strumento per il monitoraggio e la gestione dei terreni agricoli. La ricerca conferma, inoltre, che l'utilizzo combinato di modelli e del telerilevamento, per la stima di dati di campo, consente di smarcarsi da misurazioni a terra che sono molto costose e richiedono molto tempo.

In queste condizioni, mentre le misurazioni puntuali rappresentano in modo efficiente il dato nella immediate vicinanze del punto di misura, quest'ultime sono suscettibili di essere una fonte di errore quando utilizzate per descrivere aree più grandi. Viceversa, le immagini satellitari forniscono informazioni continue che meglio rappresentano lo stato reale del raccolto nel suo complesso.

Negli ultimi anni, il problema dell'uso di immagini satellitari consisteva nella tempistica di acquisizione ed elaborazione, superato attraverso l'impiego di satelliti commerciali (ad es., Quikbird, WorldView e RapidEye). Il problema principale per il loro utilizzo rimane, da una parte l'influenza delle condizioni atmosferiche, e dall'altra i vincoli legati sia ai costi che alle competenze richieste alle singole aziende per l'acquisizione dell'immagini stesse. Invece, il loro utilizzo diventa più efficiente quando vengono condivise da forme organizzate di consorzi o cooperative agricole, che le possono fornire come servizio con un costo di solo pochi €/ha.

Le informazioni raccolte a livello di campo possono essere utilizzate in modo più razionale per le applicazioni operative, come, ad esempio, la fertilizzazione e la protezione delle piante durante il periodo fenologico della levata, e potrebbero, e

dovrebbero essere gestite in linea con i principi dell'agricoltura sito-specifica. Infatti, la risposta radiometrica della copertura vegetale del frumento durante il periodo di crescita non è lineare. Nello studio si evidenzia come l'NDVI è molto sensibile alle variazioni della copertura quando il LAI è basso, quindi è utile per la stima di inizio stagione vegetativa, però, diventa saturo via via che aumenta la copertura del frumento (Aparicio et al., 2000; Dang et al., 2011). L'utilizzo della banda Red-Edge è stata la più efficace quando ancora la copertura vegetale non era completamente chiusa (Diacono et al., 2013, Li et al., 2010).

Maggiori difficoltà si sono riscontrate quando queste informazioni devono essere utilizzate per scopi predittivi, e quando le decisioni agronomiche sono fatte sulla base degli aspetti qualitativi e quantitativi della produzione finale previsti. Al fine di ottenere delle informazioni operative che coprano anche questo aspetto previsionale dello sviluppo vegetativo, sono necessarie ulteriori ricerche.

Per quanto riguarda invece l'applicazione della modellistica, la simulazione dei dati ottenuti attraverso il modello AZOSAFYE sono risultati molto positivi ed incoraggianti. La simulazione ha riscontrato un errore percentuale dello scarto quadratico medio (RMS%E) dell'8 % per l'azoto rispetto al 13 % delle rese. L'efficienza del modello (EF) ha riscontrato un valore di 0,99 per quanto riguarda la simulazione delle rese, questo dato, anche se può sembrare fuorviante e risultare falsato, era quello che in parte il lavoro si aspettava, visto che il modello AZOSAFY è basato sull'applicazione del modello di crescita SAFY (Simple Algorithm for Yield Estimation), che risulta essere ottimo per la simulazione della resa, come descritto in precedenza. Invece, per quanto riguarda la simulazione della quantità di azoto totale sulla granella, il modello ha mostrato un'efficienza di 0,68 quindi comunque molto buona.

Un'altro aspetto positivo riscontrato è che nonostante la media dei valori osservati tra la calibrazione e la validazione sia molto diversa, con medie di azoto in calibrazione di 65,66 kg/ha e in validazione di 116,51 kg/ha, confermate anche dai valori medi di resa che in calibrazione sono stati di 3,45 Mg/ha e in validazione di 5,04 Mg/ha, il modello è riuscito a cogliere in maniera più che soddisfacente la variabilità dei dati riscontrati in campo durante le differenti stagioni vegeto-produttive.

Questo fatto è stato riscontrato a causa della grande variabilità climatica avuta nelle annate di analisi. Infatti, le prestazioni della produzione finale sono in parte determinate dallo stato del frumento duro durante la prima fase di sviluppo, e in seguito, principalmente dalle condizioni climatiche durante il riempimento della granella. Un ulteriore sviluppo del modello può essere quello di utilizzare i dati biofisici (LAI, fCOVER, fAPAR) ottenuti attraverso l'acquisizioni di immagini

telerilevate e processate tramite il modello BVNET, utilizzato nello studio, come parametri di input delle rispettive variabili biofisiche, da poter inserire all'interno del modello AZOSAFYE per riuscire a migliorarne le capacità di simulazione, escludendo definitivamente l'uso di misure in campo.

Un ulteriore aspetto affrontato nella ricerca è stato quello della valutazione della sostenibilità ambientale della produzione del frumento duro in Val d'Orcia tramite l'analisi di alcuni indicatori, attraverso la metodologia LCA.

I risultati hanno dimostrato che, i dati più sensibili dal punto di vista ambientale per l'indicatore legato alla Carbon Footprint risultano essere quelli derivati dal contributo dell'azoto nella fase di concimazione. Infatti, riferendoci all'indicatore del riscaldamento globale troviamo valori di 0,449 kg CO<sub>2</sub>eq per la coltivazione a basso contenuto di N, 0,468 per quella a medio contenuto di N e 0,506 ad alto contenuto di N. Questi dati sono riferibili in letteratura ad altri studi, ad esempio Rööös et al. (2011) hanno mostrato che il CF medio per la pasta prodotta in Svezia è stato di 0,50 kg CO<sub>2</sub>eq/kg pasta (0,31 kg CO<sub>2</sub>eq/kg frumento duro prima della processo di macinazione), inoltre hanno calcolato l'incertezza del CF compresa fra i valori di 0,22-0,56 kg CO<sub>2</sub>eq/kg granella. Se si considera che la coltivazione del frumento in Svezia è sicuramente differente in alcune operazioni, i dati ottenuti con questo studio, rientrano all'interno dell'incertezza del CF trovato dagli autori.

Altri studi hanno messo l'accento sull'importanza della precessione colturale del frumento duro, in particolare Knudsen et al. (2014) hanno riscontrato valori di 0,385 kg CO<sub>2</sub>eq con rotazione frumento-fava, Charles et al. (2006) valori di 0,381 kg CO<sub>2</sub>eq in frumento coltivato con buone pratiche agricole ed infine Ruini et al. (2013) hanno riscontrato valori di 0,38 kg CO<sub>2</sub>eq su frumento duro dopo precessione di leguminose, che è la stessa precessione che troviamo nel nostro studio. I valori di questi studi riscontrano un impatto, rispetto alle emissioni di gas ad effetto serra, minore a quello rilevato nel presente lavoro. Questo risultato può essere spiegato facendo riferimento al territorio in cui è stata svolta l'analisi, cioè la Val d'Orcia, e di conseguenza riferendoci al diverso tipo di LCI utilizzata.

Prendendo in considerazione, invece, le differenze riscontrate tra i tre scenari di differente concimazione analizzate, si calcola che, passando dallo scenario a basso contenuto di N a quello ad alto contenuto di N, ad un incremento della resa del 15% si ha un'aumento del quantitativo di azoto del 50%, e viene riscontrato un aumento degli impatti pari a il 13% per il riscaldamento globale, il 7% per il consumo di risorse non rinnovabili ed il 4% per il consumo di acqua.

L'aumento degli impatti legati al riscaldamento globale è dovuto sia alle emissioni di CO<sub>2</sub> fossile per la produzione di quantità maggiori di fertilizzanti utilizzati, e sia all'aumento di protossido di azoto emesso in aria in fase di uso dei fertilizzanti,

questo è principalmente dovuto a fenomeni di denitrificazione legati allo spandimento del concime sul suolo. Il consumo di risorse rinnovabili e di acqua aumentano poiché aumenta la quantità di fertilizzante azotato per la concimazione di copertura e quindi aumentano i consumi in fase di produzione di questi fertilizzanti.

Lo studio conferma, inoltre, che le caratteristiche di una specie, in questo caso il frumento duro, sono fortemente legate al contesto (sistema o modello) nel quale quest'ultima è coltivata. Uno sviluppo positivo dell'analisi degli indicatori ambientali tramite l'utilizzo della metodologia LCA può risultare quella di consentire la differenziazione tra i produttori di frumento duro, per esempio di premiare economicamente produzioni a basse emissioni di GHG. Non risulta improbabile che, nei prossimi anni, bassi valori di CF sul cibo possano diventare un importante strumento di concorrenza, soprattutto riguardo ai produttori di prodotti agro-alimentari, che saranno esigenti, a loro volta, con i loro fornitori per avere, ad esempio, la granella di frumento prodotta con basse emissioni di GHG.

Infine, visto che il lavoro effettuato è stato svolto anche all'interno del progetto APPCoT (Agricoltura di Precisione per la Pasta dei Coltivatori Toscani, misura 124 - Piano di Sviluppo Rurale 2007-2013, Regione Toscana), un ulteriore aspetto analizzato è stato quello di trasferire le competenze acquisite agli agricoltori locali. Infatti, la ricerca ha permesso di valutare gli effetti dell'introduzione in azienda di tecniche innovative di agricoltura di precisione, e inoltre, come le macchine operatrici dotate delle più avanzate innovazioni meccaniche ed elettroniche per l'agricoltura convenzionale e conservativa consentano l'ottimale gestione del terreno e possano quindi svolgere un ruolo importante in termini di riduzione dei gas ad effetto serra e di conservazione del suolo. Questo aspetto risulta molto importante a livello di sostenibilità ambientale, in quanto può essere uno strumento per diminuire le emissioni di carbonio nell'atmosfera, come chiedono le direttive europee.

Concludendo, la sostenibilità della produzione di frumento duro in Val d'Orcia è strettamente legata alla gestione dell'azoto durante tutto il periodo di coltivazione. Come è stato confermato dallo studio, l'azoto è l'elemento che ha maggiore impatto a livello ambientale, ma è anche quello più importante per le caratteristiche qualitative della produzione finale. Le nuove tecniche utilizzate attraverso la gestione agricola, tramite l'uso dell'agricoltura di precisione, possono portare ad un migliore utilizzo delle risorse. In particolare, il telerilevamento da piattaforme satellitari può portare ad un monitoraggio continuo sia a livello spaziale



(territoriale) che temporale, migliorando di fatto la conoscenza dell'effettivo stato vegetativo della coltura.

Inoltre, si può affermare che diventa sempre più necessaria una collaborazione con gli imprenditori agricoli affinché i concetti di sostenibilità e produttività diventino parte delle strategie aziendali, come due aspetti della produzione agricola assolutamente conciliabili.

## CAPITOLO 6

### 6 BIBLIOGRAFIA GENERALE

- Abedi T., Alemzadeh A., Kazemeini S.A., 2011. Wheat yield and grain protein response to nitrogen amount and timing. *Aust. J. Crop Sci.* 5, 3:330-336.
- Acevedo E., Silva P., Silva H., Solar B., 1999. Wheat production in Mediterranean environments. In: Satorre E.H., Slafer G.A. (Eds.), *Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination*. Food Products Press, New York, pp. 295-331.
- Altenbach S.B., 2012. New insights into the effects of high temperature, drought and post-anthesis fertilizer on wheat grain development. *Journal of Cereal Science* 56, 39-50.
- Aparicio N., Villegas D., Casadesus J., Araus J.L., Royo C., 2000. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agron. J.* 92, 1547-1555.
- Arregui L.M., Quemada M., 2006. Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes. *Plant and Soil* 288, 57-69.
- Asseng S., van Keulen H., Stol W., 2000. Performance and application of the APSIM-N-wheat model in the Netherlands. *Eur. J. Agron.* 12, 37-54.
- Asseng S., Turner N.C., Keating B.A., 2001. Analysis of water- and nitrogen-use efficiency of wheat in a Mediterranean climate. *Plant Soil* 233, 127-143.
- Atzberger C., 2010. Inverting the PROSAIL canopy reflectance model using neural nets trained on streamlined databases. *Journal of Spectral Imaging* 1, 1-13.
- Bacour C., Baret F., Béal D., Weiss M., Pavageau K., 2006. Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAI x Cab, from top of canopy MERIS reflectance data: principles and validation. *Remote Sensing of Environment*, 105, 313-325.
- Bakker T., Van K.A., Bontsema J., Muller J., Van G.S., 2010. Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding. *Journal of Terra mechanics*, 47, 63-73.
- Baldo G.L., Marino M., Rossi S., 2008. *Analisi del ciclo di vita LCA*. 272pp. Milano: EdizioniAmbiente.
- Baret F., Jacquemoud S., Guyot G., Leprieur C., 1992. Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands. *Remote Sensing of Environment* 41, 133-142.
- Baret F., Hagolle O., Geiger B., Bicheron P., Miras B., Huc M., Berthelot B., Niño F., Weiss M., Samain O., Roujean J.L., Leroy M., 2007. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION Part 1: Principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment* 110, 275-286.
- Barnes E.M., Pinter P.J., Kimball B.A., Wall G.W., La Morte R.L., Husaker D.J., et al., 1997. Modification of CERES-Wheat to accept Leaf Area Index as an input variable. *ASAE*

- Paper No. 973016, 1997 ASAE Annual International Meeting, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Bassett L.M., Allen R.E., Rubenthaler G.L., 1989. Genotype x environment interactions on soft white winter wheat quality. *Agron. J.* 81, 955-960.
- Basso B., Ritchie J.T., 2005. Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan. *Agric. Ecosyst. Environ.* 108, 241-329.
- 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. *Journal of Agronomy and Crop Science* 195, 301-312.
- Beeri O., Peled A., 2009. Geographical model for precise agriculture monitoring with real-time remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, 47-54.
- Benzian B., Lane P.W., 1986. Protein concentration of grain in relation to some weather and soil factors during 17 years of english winter-wheat experiments. *J. Cereal Sci.* 24, 2:91-100.
- Beman J.M., Arrigo K.R. Matson P.A., 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature* 434, 7030:211-214.
- Blankenau K., Olf 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.
- Bly A.G., Woodard H.J., 2003. Foliar nitrogen application timing influence on grain yield and protein concentration of hard red winter and spring wheat. *Agron J* 95, 335-338.
- Borghi B., Corbellino M., Minoia C., Palombo M., Di Fonzo N., Perezin M., 1997. Effects of Mediterranean climate on wheat bread-making quality of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Eur. J. Agron.* 4, 37-45.
- Borghi B., 2000. Nitrogen as determinant of wheat growth and yield. In: Satorre E.H., Slafer G.A. (Eds.), *Wheat Ecology and Physiology of Yield Determination*. Food Products Press, New York, pp. 67-84.
- Bouman B.A.M., 1992. Linking physical remote sensing models with crop growth simulation models, applied to sugar beet. *International Journal of Remote Sensing* 13, 14:2565-2581.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussi re F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudill re J.P., H nault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309-332.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.

- Broge N.H., Leblanc E., 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment* 76, 156-172.
- Cammarano D., Fitzgerald G.J., Basso B., Chen D., Grace P., O'Leary G.J., 2011. Remote estimation of chlorophyll on two wheat cultivars in two rainfed environments. *Crop & Pasture Science* 62, 269-275.
- Chancellor W.J., 1981. Substituting information for energy in agriculture. *Transactions of the ASAE*, 24, 802-807, 813.
- Chancellor W.J., Goronea M.A., 1993. Effects of spatial variability of nitrogen, moisture, and weeds on the advantages of site-specific applications for wheat. *Transactions of the ASAE*, 37, 717-724.
- Commissione Europea. La Pac verso il 2020: rispondere alle future sfide dell'alimentazione, delle risorse naturali e del territorio. Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni, Com (2010) 672 definitivo, 18 novembre 2010. [http://ec.europa.eu/agriculture/cap-post-2013/communication/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/cap-post-2013/communication/index_en.htm), Bruxelles.
- Cossani C.M., Slafer G.A., Savin R., 2011. Do barley and wheat (bread and durum) differ in grain weight stability through seasons and water-nitrogen treatments in a Mediterranean location?. *Field Crop Res.* 121, 240-247.
- Dalla Marta A., Grifoni D., Mancini M., Zipoli G., Orlandini S., 2011. The influence of climate on durum wheat quality in Tuscany, Central Italy. *Int J Biometeorol* 55, 87-96.
- Dalla Marta A., Orlando F., Mancini M., Guasconi F., Motha R., Qu J., Orlandini S., 2015. A simplified index for an early estimation of durum wheat yield in Tuscany (Central Italy). *Field Crops Research* 170, 1-6.
- Daniel C., Triboni E.J., 2000. Effect of temperature and nitrogen nutrition on the grain composition of winter wheat: effects on gliadin content and composition. *J. Cereal Sci.* 32 (1), 45-56.
- Daughtry C.S.T., Walthall C.L., Kim M.S., Brown de Colstoun E., McMurtrey III J.E., 2000. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sens. Environ.* 74, 229-239.
- Dente L., Satalino G., Mattia F., Rinaldi M., 2008. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield. *Remote Sens. Environ.* 112, 1395-1407.
- Dexter J.E., Matsuo R.R. 1980. Relationship between durum wheat protein properties and pasta dough rheology and spaghetti contents quality. *J. Agric. Food Chem.*, 28, 899-902
- Doraiswamy P.C., Moulin S., Cook P.W., Stern A., 2003. Crop yield assessment from remote sensing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69, 665-674.
- Dorigo W.A., Zurita-Milla R., de Wit A.J.W., Brazile J., Singh R., Schaepman M.E., 2007. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9, 165-193.

- Dorigo W., 2008. Retrieving canopy variables by radiative transfer model inversion—a regional approach for imaging spectrometer data. Ph.D. Thesis, Faculty of Life Sciences, TU München Germany.
- Dupont F.M., Altenbach S.B., 2003. Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *J Cereal Sci.* 38, 133–146.
- Dyer J.A., Vergé X.P.C., Desjardins R.L., Worth D.E., McConkey B.G., 2010. The impact of increased biodiesel production on the greenhouse gas emissions from field crops in Canada. *Energy Sust. Dev.* 14, 73–82.
- Eitel J.U.H., Vierling L.A., Long D.S., Hunt E.R., 2011. Early season remote sensing of wheat nitrogen status using a green scanning laser. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 1338–1345.
- Elowitz M.R., 2013. "What is Imaging Spectroscopy (Hyperspectral Imaging)?" Retrieved November 27, 2013, from [www.markelowitz.com/Hyperspectral.html](http://www.markelowitz.com/Hyperspectral.html)
- Engel R.E., Meier C., Long D.S., Carlson G.R., 1999. Method for precision nitrogen management in spring wheat: Fundamental relationships. *Precision Agriculture* 1, 3:327-338.
- Ercoli L., Arduini I., Mariotti M., Lulli L., Masoni A., 2012. Management of sulphur fertiliser to improve durum wheat production and minimize S leaching. *European Journal of Agronomy* 38, 74–82.
- Faridi H., Finley J.W., 1989. Improved wheat for baking. *CRC Critical Reviews of Food Science and Nutrition* 28, 175-209.
- Fang H., Liang S., Hoogenboom G., Teasdale J., Cavigelli M., 2008. Corn-yield estimation through assimilation of remotely sensed data into the CSM-CERES-Maize model. *Int. J. Remote Sens.* 29, 3011–3032.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2002. Report World Agriculture: towards 2015/2030. Summary report. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, 97 pp.
- FAO, 2013. Summary food and agriculture statistics. FAOSTAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAOSTAT, 2010. Statistical Database: Food and Agricultural commodities production. Food and Agriculture Organization of the United Nations, [www.faostat.fao.org](http://www.faostat.fao.org).
- Filella I., Peñuelas J., 1994. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing* 15, 1459-1470.
- Filella I., Serrano L., Serra J., Peñuelas J., 1995. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Sci.* 35, 1400–1405.
- Fitzgerald G., Rodriguez D., O’Leary G., 2010. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index – the canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crops Research* 116, 318–324.
- Flagella Z., 2006. Qualità nutrizionale e tecnologica del frumento duro. *Ital. J. Agron. / Riv. Agron.*, 2006, 1:203-239.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative

- forcing. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York, pp. 129–234.
- Fuertes-Mendizábal T., Aizpurua A., González-Moro M.B., Estavillo J.M., 2010. Improving wheat bread making quality by splitting the N fertilizer rate. *European Journal of Agronomy* 33, 52–61.
- Gan Y., Liang C., Wang X., McConkey B., 2011. Lowering carbon footprint of durum wheat through diversifying cropping systems. *Field Crops Res.* 122, 3:199-206.
- Garabet S., Wood M., Ryan J., 1998. Nitrogen and water effects on wheat yield in a Mediterranean-type climate I. Growth, water-use and nitrogen accumulation. *Field Crops Research* 57, 309–318.
- Garrido-Lestache E., López-Bellido R.J., López-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 Crops Res.* 85, 213–236.
- Garrido-Lestache E., López-Bellido R.J., López-Bellido L., 2005. Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *European Journal of Agronomy* 23, 265–278.
- Gooding M.J., Davies W.P., 1997. *Wheat Production and Utilization*. CAB International, Wallingford, UK.
- Griepentrog H.W., Christensen S., Søgaard H.T., Nørremark M., Lund I., Graglia E., 2004. Robotic weeding. In *Proceedings of AgEng 2004 engineering the future*, Leuven, Belgium.
- Guasconi F., Dalla Marta A., Grifoni D., Mancini M., Orlando F., Orlandini S., 2011. Influence of climate on durum wheat production and use of remote sensing and weather data to predict quality and quantity of harvests. *Italian Journal of Agrometeorology* 3, 21–28.
- Guérif M., Duke C.L., 2000. Adjustment procedures of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81, 57–69.
- Haboudane D., Miller J.R., Pattey E., Zarco-Tejada P.J., Strachan I., 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sens. Environ.* 90, 337-352.
- Halvorson A.D., Del Grosso S.J., Reule C.A., 2008. Nitrogen, tillage and crop rotation effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems. *J. Environ. Qual.* 37, 4:1337-1344.
- Hansen P., Schjoerring J., 2003. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least square regression. *Remote Sensing of Environment* 86, 542–553.
- Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., 2008. *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. Blackwell Publishing, Oxford (UK).
- Hopkins J.W., 1968. Protein content of western Canadian hard red spring wheat in relation to some environmental factors. *Agric. Meteorol.* 5, 411-431.

- Huete A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 295–309.
- ISTAT, 2011. Statistical Database: Agriculture and Zootechny. Italian National Institute of Statistics, [www.istat.it](http://www.istat.it).
- Jacquemou, S., Baret F., 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.* 34, 75–91.
- Jacquemoud S., Baret F., Andrieu B., Danson F.M., Jaggard K., 1995. Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT+SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors. *Remote Sensing of Environment* 52, 163–172.
- Jacquemoud S., Verhoef W., Baret F., Bacour C., Zarco-Tejada P.J., Asner G.P., Francois C., Ustin S.L., 2009. PROSPECT + SAIL models: a review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113, S56–S66.
- Jamieson P.D., Stone P.J., Semenov M.A., 2001. Towards modelling quality in wheat: from grain nitrogen concentration to protein composition. *Asp Appl. Biol.* 64, 111–126.
- Janzen H.H., Angers D.A., Boehm M., Bolinder M., Desjardins R.L., Dyer J., Ellert B.H., Gibb D.J., Gregorich E.G., Helgason B.L., Lemke R., Masse D., McGinn S.M., McAllister T.A., Newlands N., Pattey E., Rochette P., Smith W., Van den Bygaart A.J., Wang H., 2006. A proposed approach to estimate and reduce net greenhouse gas emissions from whole farms. *Can. J. Soil Sci.* 86, 3:401-418.
- Jeuffroy M.H., Recous S., 1999. AZODYN: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *Eur. J. Agron.* 10, 129–144.
- Jordan C.F., 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the floor. *Ecology* 50, 663–666.
- Kalman, R.E., 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Trans. ASME—J. Basic Eng.*, 35–45.
- Kim M.S., 1994. The Use of Narrow Spectral Bands for Improving Remote Sensing Estimation of Fractionally Absorbed Photosynthetically Active Radiation (fAPAR). Masters Thesis. Department of Geography, University of Maryland, College Park, MD.
- Köppen W., 1930. *Das geographische System der Klimate*. Vol.3, Berlin.
- Labus M.P., Nielsen G.A., Lawrence R.L., Engel R., Long D.S., 2002. Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 4169-4180.
- Labuschagne M.T., Meintjes G., Groenewald G., 2006. The influence of different nitrogen treatments on the size distribution of protein fractions in hard and soft wheat. *J. Cereal Sci.* 43, 315–321.
- Lemaire G., Gastal F., 1997. On the critical N concentration in agricultural crops. N uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire, G. (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 3–44.
- Lemaire G., Jeuffroy M.H., Gastal F., 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *Eur. J. Agron.* 28, 614–624.

- Li C., Wang J., Wang Q., Wang D., Song X., Wang Y., Huang W., 2012. Estimating wheat grain protein content using multi-temporal remote sensing data based on partial least squares regression. *Journal of Integrative Agriculture* 11, 1445–1452.
- London J.G., 2005. Nitrogen study fertilizes fears of pollution. *Nature* 433, 791.
- Lopez-Bellido L., Fuentes M., Castillo J.E., Lopez-Garrido F.J., 1998. Effects of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on wheat-grain quality grown under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crops Res.* 57, 265–276.
- López-Bellido L., López-Bellido R.J., Castell J.E., López-Bellido F.J., 2001. Effects of long-term tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on bread-making quality of hard red spring wheat. *Field Crops Res* 72, 197–210.
- López-Bellido L., López-Bellido R.J., Redondo R., 2005. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crops Research* 94, 86–97.
- Lòpez-Bellido L., Lòpez-Bellido R.J., Lòpez-Bellido F.J., 2006. Fertilizer nitrogen efficiency in durum wheat under rainfed Mediterranean conditions: effect of split application. *Agron. J.* 98, 55–62.
- López-Bellido L., Muñoz-Romero V., Benítez-Vega J., Fernández-García P., Redondo R., López-Bellido R.J., 2012. Wheat response to nitrogen splitting applied to a vertisols in different tillage systems and cropping rotations under typical Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 43, 24–32.
- Maas S.J., 1988. Use of remotely-sensed information in agricultural crop growth models. *Ecol. Model.* 41, 247–268.
- Mamo M., Malzer G.L., Mulla D.J., Huggins D.R., Strock J., 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agron. J.* 95, 958–964.
- Marino S., Tognetti R., Alvino A., 2009. Crop yield and grain quality of emmer populations grown in central Italy, as affected by nitrogen fertilization. *Eur. J. Agron.* 31, 233–240.
- Marsh D.J., Gnauck G.E., 1997. Technical Issues Surrounding an Airborne Direct Digital Imaging Program for Agriculture. In: *International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 7-10 July.* pp. 458-467.
- McCauley J.D., 1999. Simulation of cotton production for precision farming. *Precision Agriculture* 1, 1:81-94.
- MacDonald M.C., Peterson J.R., Prokop R., Stampley R., Weinhaus F., 1997. TRW AG resource mapping: A commercial airborne agricultural remote sensing system. In: *International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 7-10 July.* pp. 421-425.
- Meisterling K., Samaras C., Schweizer V., 2009. Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat. *J. Clean. Prod.* 17, 222-230.
- Melaj M.A., Echeverría H.E., López S.C., Studdert G., Andrade F., Bárbaro N.O., 2003. Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and no-tillage system. *Agronomy Journal* 95, 1525–1531.



- Mendas A., Delali A., 2012. Integration of MultiCriteria Decision Analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleeta in Algeria. *Computers and Electronics in Agriculture* 83, 117–126.
- Meriggi P., Poggiolini S., Vicari A., 2007. Valutazione della qualità delle acque di drenaggio in sistemi agricoli sostenibili. Atti Convegno SIRFI "Uso sostenibile degli agrofarmaci: la nuova direttiva comunitaria, problematiche applicative e ruolo della ricerca", Bologna, pp. 159-169.
- Mistele B., Gutser R., Schmidhalter U., 2004. Validation of Field-Scaled Spectral Measurements of the Nitrogen Status in Winter Wheat. Program book of the joint conference ICPA, Minneapolis, 1187-1195.
- Mkhabela M.S., Bullock P., Raj S., Wang S., Yang Y., 2011. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 385–393.
- Moldestad A., Fergestad E.M., Hoel B., Skjelvag A.O., Uhlen A.K., 2011. Effect of temperature variation during grain filling on wheat gluten resistance. *Journal of Cereal Science* 53, 347-354.
- Moran J.A., Mitchell A.K., Goodmanson G., Stockburger K.A., 2000. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison of methods. *Tree Physiol.* 20, 1113–1120.
- Moulin, S., Bondeau, A., Delecolle, R., 1998. Combining agricultural crop models and satellite observations: From field to regional scales, *International Journal of Remote Sensing* 19, 1021-1036.
- Mutanga O., Skidmore A.K., 2007. Red edge shift and biochemical content in grass canopies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 62, 34–42.
- Nicolas H., 2004. Using remote sensing to determine of the date of a fungicide application on winter wheat. *Crop Protection* 23, 853–863.
- OECD, 2008. OECD Contribution to the United Nations Commission on Sustainable Development, towards sustainable agriculture.
- Orlandini S., Mancini M., Grifoni D., Orlando F., Dalla Marta A., Capecchi V., 2011. Integration of meteo-climatic and remote sensing information for the analysis of durum wheat quality in Val d'Orcia (Tuscany, Italy). *Időjárás Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 115, 233-245.
- Osborne T.B., 1948. Academic Press, London, p 154.
- Ottman M.J., Doerge T.A., Martin E.C., 2000. Durum grain quality as affected by nitrogen fertilization near anthesis and irrigation during grain fill. *Agron J* 92, 1035–1041.
- Palta J.A., Kobata T., Turner N.C., Fillerg I.R., 1994. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by post-anthesis water deficits. *Crop Sci.* 34, 118–124.
- Panell D.J., Schilizzi S., 1999. Sustainable agriculture: a matter of ecology, equity, economic efficiency or expedience. *J. Sustain. Agric.*, 13, 57–66.
- Parlamento Europeo, 2013. Regulation (EU) No 1305/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 december 2013 on support for rural development by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD) and repealing Council Regulation (EC) No 1698/2005.

- Pierce F.J., Sadler E.J. (ed), 1997. The state of site specific management for agriculture, ASA Publ., ASA, CSSA e SSSA, Madison, WI, USA.
- Pierce F.J., Nowak P., 1999. Aspects of precision agriculture. *Adv. Agron.* 67, 1–85.
- Powelson D.S., Hart P.B.S., Poulton P.R., Johnston A.E., Jenkinson D.S., 1992. Influence of soil type, crop management and weather on the recovery of <sup>15</sup>N-labelled fertilizer applied to winter wheat in spring. *J. Agric. Sci (Cambridge)*. 118, 83-100.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Keer Y.H., Sorooshian S., 1994. A modified soil vegetation adjusted index. *Remote Sens. Environ.* 48, 119–126.
- Rajaniemi M., Mikkola H., Ahokas J., 2011. Greenhouse gas emissions from oats, barley, wheat and rye production. *Biosyst. Eng.* 1, 189-195. Special Issue.
- Raun W.R., Solie J.B., Taylor R.K., Arnall D.B., Mack C.J., Edmonds D.E., 2008. Ramp calibration strip technology for determining midseason nitrogen rates in corn and wheat. *Agronomy Journal* 100, 1088–1093.
- Raun W.R., Johnson G.V., 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal* 91, 357–363.
- Rees W.E., 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out? *Environ. Urbanis* 4, 121–130.
- Reynolds P.E., Thevathasan N.V., Simpson J.A., Gordon A.M., Lautenschlager R.A., Bell W.F., Gresch D.A., Buckley D.A., 2000. Alternative conifer release treatments affect microclimate and soil nitrogen mineralization. *Forest Ecology and Management* 133, 115-125.
- Rharrabti Y., Elhani S., Martos-Nunez V., Garcia del Moral L.F., 2001. Protein and lysine content, grain yield, and other technological traits in Durum Wheat under Mediterranean conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49, 3802-3807.
- Rharrabti Y., Royo C., Villegas D., Aparicio N., García del Moral L.F., 2003a. Durum wheat quality in Mediterranean environments. I. Quality expression under different zones, latitudes and water regimes across Spain. *Field Crops Res.* 80, 123–131.
- Rharrabti Y., Villegas D., Royo C., Martos-Núñez V., García del Moral L.F., 2003b. Durum wheat quality in Mediterranean environments. II. Influence of climatic variables and relationships between quality parameters. *Field Crops Res.* 80, 133–140.
- Richardson A.J., Wiegard C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 43, 12:1541-1552.
- Ritchie J.T., Otter S., 1984. Description and Performance of CERES-Wheat: A User-Oriented Wheat Yield Model. USDA-ARS-SR Grassland Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX, pp. 159–175.
- Richter K., Atzberger C., Vuolo F., D’Urso G., 2011. Evaluation of Sentinel-2 spectral sampling for radiative transfer model based LAI estimation of wheat, sugar beet and maize. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing* 4, 458–464.
- Robert P.C., Rust R.H., Larson W.E., 1993. Proceedings of soil specific crop management: a workshop on research and development issues. SSSA Spec. Publ., SSSA, Madison, WI, USA.

- Robertson G.P., Paul E.A., Harwood R.R., 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289, 1922–1925.
- Robertson G.P., Grace P.G., 2004. Greenhouse gas fluxes in tropical and temperate agriculture: the need for a full-cost accounting of global warming potentials. *Environ. Dev. Sustain* 6, 51-63.
- Rondeaux G., Steven M., Baret F., 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 55, 95–107.
- Röös E., Sundberg C., Hansson P.A., 2011. Uncertainties in the carbon footprint of refined wheat products: a case study on Swedish pasta. *Int J Life Cycle Assess* 16, 338–350.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C., 1974. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. In: NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA, pp. 1–137.
- Ruini L., Marino M., 2008. LCA of Semolina Dry Pasta Produced by Barilla.
- Ruini L., Cabrini P., Ranieri R., Meriggi P., Boeri F., Montani M., 2010. Economic, Agronomic and Environmental integrated analysis of Durum wheat cultivation cropping system. 7th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector, Bari.
- Ruini L., Ferrari E., Meriggi P., Marino M., Boeri F., Ruggeri M., 2011. Sostenibilità dei sistemi colturali con frumento duro. *Filiera Grano duro news* 18, 3-5.
- Sambroski S.M., Tremblay N., Fallon E., 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agron. J.* 101, 800–816.
- Schlerf M., Atzberger C., 2012. Vegetation structure retrieval in Beech and Spruce forests using spectrodirectional satellite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing* 5, 8–17.
- Senay G.B., Lyon J.G., Ward A.D., Nokes S.E., 2000. Using high spatial resolution multispectral data to classify corn and soybean crops. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 66, 3:319-327.
- Shibusawa S., 1998. Precision farming and terra-mechanics. In: The fifth ISTVS Asia-Pacific regional conference in Korea, October 20-22
- Singh B., Singh Y., Ladha J.K., Bronson K.F., Balasubramanian V., Singh J., Khind C.S., 2002. Chlorophyll meter-and leaf color chart-based nitrogen management for rice and wheat in Northwestern India. *Agron. J.* 94, 821–829.
- Slafer G.A., Rawson H.M., 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a reexamination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Australian Journal of Plant Physiology* 21, 393-426.
- Slaughter D.C., Giles D.K., Downey D., 2008. Autonomous robotic weed control systems: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 63-78.
- Smith G.P., Gooding M.J., 1999. Models of wheat grain quality considering climate, cultivar and nitrogen effects. *Agric. For. Meteorol.* 94, 159-170.
- Smith K.A., Mosier A.R., Crutzen P.J., Winiwarter W., 2012. The role of N<sub>2</sub>O derived from crop-based biofuels, and from agriculture in general, in Earth's climate. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 367, 1169-1174.

- Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O., Howden M., McAllister T., Pan G., Romanenkov V., Schneider U., Towprayoon S., Wattenbach M., Smith J., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 363, 789-813.
- Spiertz J.H.J., 1977. The influence of temperature and light intensity on grain growth in relation to the carbohydrate and nitrogen economy of the wheat plant. *Neth. J. Agric. Sci.* 25, 182-197.
- Tedone L., Verdini L., Grassano N., De Mastro G., 2012. Valutazione dell'efficienza della concimazione azotata sulle componenti eco-fisiologiche, produttive e qualitative del frumento. In: *Procedere della XLI convegno nazionale della società Italiana di agronomia*, vol. 103.
- Tilman D., 1999. Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 96, 5995-6000 (Colloquium Paper).
- Torbica A., Antov M., Mastilović J., Knežević D., 2007. The influence of changes in gluten complex structure on technological quality of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Food Res Int.* 40: 1038-1045.
- Trocconi A., Borrelli G.M., De Vita P., Fares C., Di Fonzo N. 2000. Durum wheat quality: A Multidisciplinary Concept. *J.Cereal Sci.*, 32:99-113.
- Verhagen J., Bouma J., 1997. Modeling soil variability. In Pierce F.J., Sadler E.J. (ed), *The state of site specific management for agriculture*, ASA Publ., ASA, CSSA e SSSA, Madison, WI, USA.
- Verhoef W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment* 16, 125-141.
- Vuolo F., Atzberger C., Richter K., D'Urso G., Dash J., 2010. Retrieval of biophysical vegetation products from rapideye imagery. In: Wagner W., Székely, B. (eds.): *ISPRS TC VII Symposium - 100 Years ISPRS*, Vienna, Austria, July 5-7, 2010, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7A.
- Wall J.S., 1979. The role of wheat proteins in determining baking quality. In: Laidman D.L., Wyn Jones R.G. (Eds.), *Recent Advances in the Biochemistry of Cereals*. Academic Press, London, pp. 275-311
- Whelan B.M., McBratney A.B., Boyde B.C., 1997. The Impact of Precision Agriculture. *Proceedings of the ABARE Outlook Conference, 'The Future of Cropping in NW NSW'*, Moree, UK, July 1997, p. 5.
- Wiedmann T., Minx J., 2008. A definition of 'carbon footprint'. In: Pertsova, C.C. (Ed.), *Ecological Economics Research Trends: Chapter 1*, pp.1-11. Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA, p. 348.
- Wooding A.R., Kavale S., MacRitchie F., Stoddard F.L., Wallace A., 2000. Effects of nitrogen and sulfur fertilizer on protein composition, mixing requirements, and dough strength of four wheat cultivars. *Cereal Chem.* 77, 798-807.
- Wuest S.B., Cassman K.G., 1992. Fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated wheat. I. Uptake efficiency of preplant versus late-season application. *Agron. J.* 84, 682-688.

- Zadoks J.C., Chang T.T., Konzak C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14, 415-421.
- Zami Z., 2013. "The Electromagnetic Spectrum". Retrieved December 3, 2013, from [www.zulyzami.com/The+Electromagnetic+Spectrum](http://www.zulyzami.com/The+Electromagnetic+Spectrum)
- Zhang N., Wang M., Wang N., 2002. Precision agriculture: a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture* 36, 113-132.
- <http://www.seos-project.eu/>