DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE, ALIMENTARI E AMBIENTALI

Corso di Laurea Magistrale in: Scienze Agrarie e del Territorio

Curriculum: Produzione e Protezione delle Colture

EFFETTO DELLA GESTIONE DEL SUOLO E DELLA FERTILIZZAZIONE SULLA CONCENTRAZIONE DI AZOTO E CLOROFILLA IN TRITICUM TURGIDUM SUBSP. DURUM

Nitrogen and chlorophyll status determination in *Triticum turgidum* subsp. *durum* as influenced by soil management and fertilization

Tipo di tesi: Sperimentale

Studente:
Alessio Evangelista

Relatore:
Dott. Roberto Orsini

Anno accademico 2018/2019

INDICE

INTRODUZIONE **1**

1 PRECISION FARMING **3**

1.1 Introduzione ed evoluzione nel tempo 3

1.2 Diffusione in Italia e nel mondo 4

1.3 Gestione della variabilità nell'agricoltura di precisione 6

1.3.1 Data fusion 7

1.3.2 Management zones (mz) e variable rate technology (vrt) 8

1.4 Telerilevamento in agricoltura di precisione 8

1.4.1 Monitoraggio della vegetazione nel dominio ottico 10

1.5 Valutazione economica dell'agricoltura di precisione 11

1.5.1 La dimensione tecnico-economica per introdurre l'agricoltura di precisione 13

1.5.2 Processo di introduzione dell'agricoltura di precisione in un'azienda agraria 13

1.5.3 Politiche per incentivare l'agricoltura di precisione 13

1.6 Sato nutrizionale della coltura: ruolo dell'azoto e della clorofilla 15

1.6.1 Determinazione del contenuto di azoto 15

1.6.2 Determinazione del contenuto di clorofilla 17

1.6.3 Soil Plant Analysis Development (SPAD) 18

1.6.4 Nitrogen Nutrition Index (NNI) 20

1.7 Elaborazioni immagini da telerilevamento 20

1.7.1 Mappe di concimazione azotata a tasso variabile 20

1.7.2 Mappe di prescrizione 21

2 OBIETTIVI TESI **22**

3 MATERIALI E METODI **23**

3.1 Descrizione sito sperimentale 23

3.2 Variabili misurate 24

3.3 Determinazione del contenuto di clorofilla nel tessuto fogliare 27

3.4 Contenuto di azoto nella biomassa 28

3.5 Monitoraggio del Soil Plant Analysis Development (SPAD) su lamina fogliare 29

3.6 Statistica 29
4 RISULTATI E DISCUSSIONE 30
4.1 Andamento termo-pluviometrico 30
4.2 Risultati 33
4.2.1 Letture SPAD 33
4.2.2 Letture SPAD e concentrazione fogliare di clorofilla 33
4.2.3 Contenuto di azoto 34
4.2.4 Discussioni 34
5 CONCLUSIONI 39
6 BIBLIOGRAFIA 40

INDICE FIGURE

Figura 1: Pubblicazioni scientifiche inerenti alla Precision Farming nel periodo 1990-2005 suddivise per tipologia di coltura. Fonte: Casa (2016.) 5

Figura 2: Numero di pubblicazioni scientifiche nel periodo 1993-2015 in Italia e nel mondo. Fonte: Casa (2016) 5

Figura 3: Combinazione tra più strati informativi per ottenere zone a gestione omogenea per la concimazione. Per ciascuna zona verrà impostato un bilancio dell'azoto a sé stante. Fonte: Casa (2016) ... 7

Figura 4: Forma tipica della relazione tra NDVI e LAI. Fonte: Casa (2016) 11

Figura 5: Obiettivi ipotetici della futura CAP 2021-2027. Fonte: Agriregionieuropa 14

Figura 6: misuratore di clorofilla SPAD-502 19

Figura 7: Appezzamento destinato alla prova lavorazioni presso l'Azienda agraria didattico sperimentale Pasquale Rosati di Agugliano (AN). Annata 2017/2018. 24

Figura 8: Planimetria del sito sperimentale per l'annata agraria 2016/2017: NT = non lavorazione, MT = scarificatura (40 cm) + 1 affinamento, CT = aratura (40 cm) + 1 affinamento; N0 = 0 unità di azoto ad ha, N1 = 90 unità di azoto ad ha , N2 = 180 unità di azoto ad ha; in giallo: parcelle coltivate a frumento; in verde: parcelle coltivate a mais. D= presenza di Diviner per controllo umidità. 25

Figura 9: Provette dopo aver eseguito l'omogeneizzazione e centrifugazione 27

Figura 10: Spettrofotometro usato per determinare l'assorbanza a 645 nm e 663 nm. 28

Figura 11: LECO CHNS analyzer 29

Figura 12: Andamento termo-pluviometrico nell'annata agraria 2017-2018 in relazione alla serie storica di dati (1998-2016). Fonte dati: ASSAM. 32

Figura 13: Relazione tra le letture SPAD osservate nella porzione centrale della foglia (SPAD CP) ed in quella distale (SPAD DP) nel frumento duro durante l'annata agraria 2017/2018. Il simbolo ***identifica la significatività della relazione a livello P=0.1%, RMSE, radice dell'errore quadratico medio 36

Figura 14: Relazione tra concentrazione di clorofilla fogliare (mg/g) e letture SPAD durante l'annata agraria 2017-2018 nel trattamento non fertilizzato (N0, nessuna dose di N somministrata). NT, nessuna lavorazione; MT, minima lavorazione; CT, lavorazione convenzionale. Il simbolo *** identifica la significatività della relazione a livello P=0.1%, RMSE, radice dell'errore quadratico medio 36

Figura 15: Relazione tra concentrazione di clorofilla fogliare (mg/g) e letture SPAD durante l'annata agraria 2017-2018 nel trattamento N1 (90 kg N/ha). NT, nessuna lavorazione; MT, minima lavorazione; CT, lavorazione convenzionale. Il simbolo *** identifica la significatività della relazione a livello P=0.1%, RMSE, radice dell'errore quadratico medio 37

Figura 16: Relazione tra concentrazione di clorofilla fogliare (mg/g) e letture SPAD durante l'annata agraria 2017-2018 nel trattamento N2 (180 kg N/ha). NT, nessuna lavorazione; MT, minima lavorazione; CT, lavorazione convenzionale. Il simbolo *** identifica la significatività della relazione a livello P=0.1%, RMSE, radice dell'errore quadratico medio 37

INDICE TABELLE

Tabella 1: Innovazioni principali dell'agricoltura di precisione. 4

Tabella 2: Date e attività eseguite per l'acquisizione delle variabili misurate. 24

Tabella 3: Schematizzazione delle operazioni colturali previste per il frumento nell'annata agraria 2016/2017; CT = aratura a 40 cm + 1 affinamento; MT = ripuntatura a 40 cm + 1 affinamento; NT = non lavorazione. 26

Tabella 4: Letture SPAD (± dev.st.) e concentrazione di clorofilla fogliare (mg/g) (± dev.st.) rilevate nei diversi trattamenti di fertilizzazione e nelle diverse gestioni del suolo durante l'annata agraria 2017-2018. 35

Tabella 5: Proprietà del suolo (0-20 cm di profondità) (± dev.st.) nelle diverse aree del sito sperimentale 35

Tabella 6: Risultati della % N ottenuti per l'annata 2017-2018. 38

INTRODUZIONE

Attualmente l'obiettivo principale dell'agricoltura è quello di fornire una quantità sufficiente di cibo in modo da soddisfare la domanda mondiale della popolazione. Infatti, secondo un rapporto delle Nazioni unite (2017), nei prossimi 31 anni si stima una crescita di 2,6 milioni di persone e vi sarà una crescente domanda di cibo da dover soddisfare (Bodirsky et al., 2014), riducendo al contempo i costi di produzione e l'inquinamento. La riduzione dei costi e dell'inquinamento nei sistemi agrari dipende inevitabilmente da una buona gestione del suolo, esempio tramite pratiche di agricoltura conservativa (Stagnari et al., 2009), e da una migliore gestione degli input produttivi.

Adottare pratiche di agricoltura conservativa, come minima lavorazione e semina su sodo, apporta una serie benefici all'ambiente in termini di riduzione dell'erosione del suolo, lisciviazione dei nitrati, riduzione dell'uso di macchine agricole, riduzione delle emissioni di gas serra e dei costi del carburante (Iocola et al., 2017).

Inoltre, il basso disturbo del suolo e la presenza di residui colturali aumenta i livelli di umidità e sostanze nutritive negli orizzonti del suolo esplorati dalle radici e riduce il tasso di mineralizzazione della sostanza organica (López-Garrido et al., 2011).

Nell'area del Mediterraneo, dove i cereali sono la coltura dominante, la produzione agricola può essere migliorata con l'adozione di tecniche di agricoltura conservativa (López-Garrido et al., 2011) e con l'applicazione sito specifica del fertilizzante azotato (Hirel et al., 2011). La carenza di N, infatti, porta ad una riduzione della biomassa e ad una forte riduzione della resa, mentre l'eccessiva concimazione porta ad una serie di problemi ambientali (Xie et al., 2007).

L'efficienza dell'uso dell'azoto è di fondamentale importanza, ne sono testimonianza i numerosi studi della ricerca scientifica in merito che puntano a monitorare l'assorbimento dell'azoto da parte delle colture e a sviluppare soluzioni atte ad applicare i fertilizzanti azotati senza creare problemi di varia natura, in particolar modo ambientali. (Raun e Johnson, 1999; Duan et al., 2011; Lassaletta et al., 2014).

Poiché esiste una stretta relazione tra clorofilla e azoto nel tessuto fogliare (Evans, 1989), gli studi scientifici sono diretti verso la determinazione di un metodo che, in maniera non

distruttiva, riesca a fornire in maniera rapida i dati inerenti al contenuto di clorofilla nelle foglie (Zheng et al., 2015; Ravier et al., 2017).

Inoltre, è stata trovata una relazione tra le letture SPAD e lo stato azotato delle colture (Debaeke e Justes, 2006; Yuan et al., 2016; Zhao et al., 2016; Ravier et al., 2017). Tale relazione risulta utile per determinare un modello di diagnosi dell'azoto basato su degli indicatori e per valutare i loro campi di applicazione (Lin et al., 2010).

Ciononostante, regolare la somministrazione azotata sulla base delle letture SPAD è ancora sotto studio in quanto è stato dimostrato che tali relazioni dipendono molto da cultivar, pratiche culturali e fattori ambientali (Arregui e Quemada, 2006; Debaeke and Justes, 2006; Prost e Jeuffroy, 2007; Ziadi et al., 2010; Yuan et al., 2016).

1 PRECISION FARMING

1.1 Introduzione ed evoluzione nel tempo

Negli ultimi decenni sono state ipotizzate diverse definizioni di Agricoltura di Precisione ed una delle più note è quella data da Gebbers e Adamchuk (2010), questa riassume in maniera chiara ed efficace i principi e gli obiettivi dell'Agricoltura di Precisione: "Fare la cosa giusta, al momento giusto, al punto giusto".

L'agricoltura di precisione, a differenza delle buone pratiche agricole, tiene conto della forte dinamicità dei sistemi agricoli, in particolare della variabilità spaziale e temporale. La variabilità temporale fa sì che un medesimo intervento di natura agronomica causi effetti diversi nei vari anni mentre la variabilità spaziale tiene conto della variabilità presente all'interno dello stesso appezzamento.

Si evince che comprendere queste variabilità e modulare gli interventi agronomici in funzione di queste ultime risulti fondamentale per una gestione sito-specifica che punta ad ottimizzare i risultati del processo produttivo in termini sia economici che ambientali.

A partire dalla metà dagli anni '90 la necessità di gestire la variabilità spaziale del suolo e quella stagionale della coltura portò allo studio e alla realizzazione di sensori ottici in grado di fornire un indice di vegetazione (NDVI, Normalize Difference Vegetation Index) in maniera rapida ed economica.

Lo sviluppo della meccanizzazione e delle tecnologie a disposizione ha, a sua volta, favorito lo sviluppo dell'agricoltura di precisione nel mondo (tabella1). In particolare, l'uso a scopi civili dei sistemi di posizionamento satellitari, autorizzato negli USA a partire dal 1993 ha rappresentato una delle più grandi rivoluzioni. Le ultime innovazioni, invece, riguardano lo sviluppo di piattaforme di gestione delle grandi moli di dati tipicamente raccolti e prodotti in agricoltura di precisione, nonché, un grande sviluppo delle tecnologie di monitoraggio, soprattutto grazie alla diffusione dei droni con sensori multispettrali.

Ciononostante, già al primo convegno internazionale di Agricoltura di Precisione (1992), fu evidenziata una delle principali problematiche dell'agricoltura di precisione: le

tecnologie avanzano ad una velocità maggiore rispetto alla capacità di sfruttarle al meglio per la gestione agronomica (Casa; 2016).

Tabella 1: Innovazioni principali dell'agricoltura di precisione.

Data	Ente/Autore	Innovazione
1911	Mercer e Hall	Concetti di base della metodologia di sperimentazione agraria per l'eliminazione dell'effetto di variabilità spaziale del suolo
1920	Harris	Conoscenza dell'esistenza della variabilità spaziale dei fattori produttivi
1929	Linsley e Bauer	1° Esempio di campionamento del pH del suolo per ottenere una mappa di prescrizione per un'applicazione a dosi diverse del correttivo
1960	Matheron	Inizio sviluppo della geostatistica, messa a punto tecniche di quantificazione e analisi della variabilità spaziale
1980	Servizio militare USA	Messa a punto del GPS
1988	AgCherm Equipment Company	Introduzione nel mercato del 1° spandiconcime a rateo variabile
1992	ICPA	1° Conferenza Internazionale dell'agricoltura di precisione, Minnesota

Lo sviluppo tecnologico e la digitalizzazione rivestono un ruolo di primaria importanza nell'efficienza d'uso delle risorse, migliorando l'ambiente ed il clima. Avere a disposizione un'agricoltura intelligente, capace di ridurre l'impatto ambientale, aumenta la resilienza del suolo e riduce i costi per gli agricoltori. Tuttavia, l'adozione di nuove tecnologie in agricoltura rimane al di sotto delle aspettative e si diffonde in modo disomogeneo su tutto il territorio UE, inoltre, vi è una particolare necessità di affrontare l'accesso alla tecnologia da parte delle piccole e medie imprese. (Bucci, Bentivoglio e Finco; 2018)

1.2 Diffusione in Italia e nel mondo

Ad oggi i dati disponibili relativi alla diffusione dell'agricoltura di precisione sono ancora frammentari ma è possibile affermare come l'agricoltura di precisione trova sempre più impiego in sistemi agricoli avanzati. Il paese dove viene maggiormente impiegata risulta essere gli USA dove, secondo alcune stime, circa l'80% degli agricoltori usano sistemi di guida delle trattrici con GPS. Inoltre, sempre negli USA, gli agricoltori che usano sistemi

GPS per il controllo delle sezioni delle irroratrici sono il 33% e per la semina 24%, mentre circa il 40% delle mietitrebbiatrici sono equipaggiate con sistema di mappatura delle produzioni. L'agricoltura di precisione negli ultimi anni si sta diffondendo anche in Sud America (in particolare Brasile e Argentina) e Australia dove, in soli 6 anni (dal 2006 al 2012), i cerealicoltori che adottano questo tipo agricoltura sono passati dal 5% al 20%. Per quanto riguarda l'Europa il tasso di adozione è ancora contenuto e concentrato prevalentemente nelle grandi aziende cerealicole del Centro-Nord Europa, Germania, Francia e Inghilterra in primis. L'adozione maggiore è stata prevalentemente nei sistemi colturali erbacei, ed attualmente vi è un crescente uso in viticoltura, ne è testimonianza l'elevato numero di pubblicazioni in merito (Figura1).

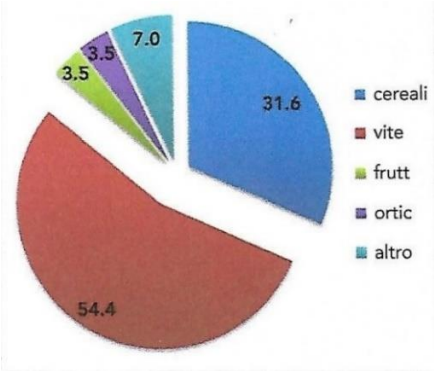

Figura 1: Pubblicazioni scientifiche inerenti alla Precision Farming nel periodo 1990-2005 suddivise per tipologia di coltura. Fonte: Casa (2016.)

Trattandosi di un settore ad elevata innovazione tecnologica la ricerca svolge un ruolo fondamentale nello sviluppo dell'agricoltura di precisione. Il numero delle pubblicazioni scientifiche prodotte è in costante aumento a livello internazionale e in Italia (Figura 2).

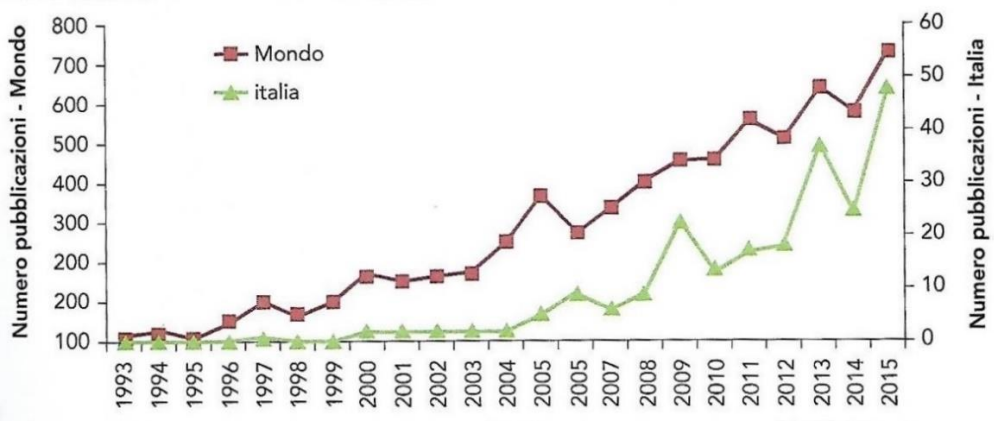

Figura 2: Numero di pubblicazioni scientifiche nel periodo 1993-2015 in Italia e nel mondo. Fonte: Casa (2016)

Per l'Italia non ci sono delle statistiche ufficiali ma è possibile affermare che la diffusione maggiore si ha per sistemi di guida satellitare con un trend in diminuzione per sistemi manuali. Inoltre, secondo alcune stime vi sono circa 1400 mietitrebbiatrici con sistema di mappatura della produzione, anche se talvolta non pienamente utilizzato (Casa,2016).

1.3 Gestione della variabilità nell'agricoltura di precisione

Come affermato da Oliver (2013) l'applicazione di tecniche di agricoltura di precisione prevede delle scelte gestionali basate sulla conoscenza della variabilità delle diverse proprietà del suolo (pH, umidità, concentrazione di nutrienti…) e delle colture.

L'efficacia delle decisioni è strettamente legata all'accuratezza delle stime della variabilità spaziale di tali proprietà, nonché, dalla capacità di gestire i fattori che possono influenzare queste ultime.

Conoscere la variabilità spaziale per poi riferire ad una determinata posizione geografica specifiche proprietà di uno o più domini (suolo, piante, clima) e prendere decisioni sulla base della loro variazione nello spazio è un concetto completamente nuovo in agricoltura. La realizzazione e interpretazione di mappe delle varie proprietà è uno strumento usato in agricoltura di precisione per poter sfruttare a proprio vantaggio le informazioni spaziali nella conduzione agronomica dell'azienda. Tuttavia, al fine di avere dei dati validi, non basta la semplice realizzazione di mappe, ma, va posta particolare attenzione ad una buona pianificazione del campionamento e al metodo con cui vengono raccolti i dati. Tutto ciò è indispensabile per ottenere una serie di dati affidabili su cui basare le proprie decisioni (Kitchen; 2002).

Molto spesso il numero di osservazioni eseguite per una data variabile non è esaustivo, ciò può causare delle problematiche per la costruzione di rappresentazioni spazio-temporali ad alta risoluzione della variabile in esame. Tuttavia, grazie alla geostatistica spazio-temporale, possiamo andare a stimare la variabile e l'errore di stima nei punti non campionati tramite un processo di interpolazione chiamato krigin. Essendo le proprietà del suolo, della coltura e del clima soggette a variazioni spazio-temporali, ne consegue che anche la biomassa o la concentrazione di azoto e carbonio nei vari organi vegetali dipendono dalla posizione nello spazio e nel tempo, lo stesso vale anche per la temperatura dell'aria ed altri fattori. Conoscere questa variabilità è importante per un

approccio sito specifico dell'appezzamento. L'approccio sito-specifico comporta l'uso di tecnologie, tecniche e metodi di lavoro che consentono la possibilità di trattare in modo differenziato singole aree omogenee di terreno delle quali si conoscano le effettive caratteristiche produttive. Il concetto di "precisione", infatti, indica la capacità di gestire in modo automatico porzioni di terreno su scala "sub-appezzamento" mediante un'adeguata interazione tra tecnologie informatiche e pratiche agronomiche (Casa; 2016).

1.3.1 Data fusion

Attualmente in Agricoltura di precisione si sta assistendo ad una grande rivoluzione nel campo dell'informazione, ciò è dovuto principalmente alla grande produzione di dati che vengono prodotti da un'ampia varietà di sensori sia a scala temporale che spaziale. In particolare, questi dati possono derivare da: telerilevamento, droni e sensori prossimali. Proprio per questo è cruciale andare a definire delle tecniche idonee di analisi e sintesi di questa grande mole di dati al fine di raggiungere una efficiente gestione dell'agricoltura di precisione.

Molto spesso fra i vari strumenti ci sono delle differenze per cui un approccio efficace consiste nell'integrazione dei dati (data fusion), cosi che il risultato sia statisticamente robusto (Figura 3). L'unico problema è determinare una procedura adatta capace di combinare i dati prodotti da più sensori, generalmente a tal riguardo si usa un approccio statistico (Casa; 2016).

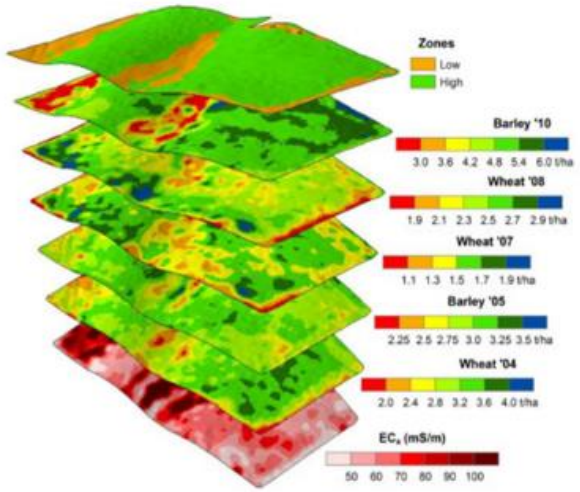

Figura 3: Combinazione tra più strati informativi per ottenere zone a gestione omogenea per la concimazione. Per ciascuna zona verrà impostato un bilancio dell'azoto a sé stante. Fonte: Casa (2016)

1.3.2. Management zones (mz) e variable rate technology (vrt)

Come già affermato, essendo la crescita della coltura influenzata dalle variazioni delle proprietà del suolo e delle condizioni meteo, se si vuole aumentare il reddito agricolo, cosi come la protezione ambientale, è essenziale considerare le specifiche condizioni locali e basare su queste le diverse tecniche agronomiche.

A tal fine sono state introdotte le cosi dette aree di gestione (Management Zones, MZ), queste non sono altro che sub-regioni dell'appezzamento dove al loro interno gli effetti sulla coltura indotti da differenze stagionali nel clima, nel suolo e nella gestione, sono più o meno uniformi (Lark et al., 1998). Tali aree di gestione sono la premessa per la realizzazione di mappe di prescrizione capaci di consentire un'applicazione variabile (VRT, Variable Rate Technology) dei diversi imput agronomici quali concimi e fitofarmaci (Moore et al., 1993).

Per identificare e delineare queste MZ si possono usare molti tipi di informazioni come ad esempio : mappe della resa delle colture (Blackmore, 2000; Basso et al., 2007; Carr et al., 1991; McCann et al., 1996; Lark et al., 1998; Nolan et al., 2000); immagini radiometriche da telerilevamento (Mulla D.J., 2013); sensori geofisici (Castrignanò et al 2015); immagini aeree da SAPR (Matese et al., 2015) e immagini fotografiche di suolo nudo (Fleming et al 2000);

Acquisite tali informazioni per generare le MZ non c'è una metodologia unica per cui possiamo avere:

- Analisi cluster (Lark *et al*., 1998);
- La tecnica "Interative self organizing data" (ISODATA) (Tou e Gonzalez, 1974);
- Factorial cokriging FKA (Buttafuoco *et al.,* 2010).

1.4 Telerilevamento in agricoltura di precisione

Il telerilevamento ("remote sensing") in agricoltura di precisione consente di rilevare ad una certa distanza, le proprietà fisiche e chimiche dei tessuti vegetali delle colture e del suolo, nonché della canopy. Questi sistemi sfruttano dei processi dove è presente

un’interazione tra la radiazione elettromagnetica e le superfici da cui si vogliono ottenere informazioni.

Il telerilevamento si basa sull’uso di sensori e la distanza tra questi e il materiale oggetto di rilievo può essere più o meno ampia a seconda della piattaforma dove verranno poi trasportati i dati. I sensori possono essere divisi in:

- Sensori prossimali (trasportati a bordo delle macchine agricole)
- Sensori aereotrasportati (trasportati a bordo di aerei o droni)
- Sensori satellitari (in orbita su piattaforme satellitari)

la necessità di monitorare in maniera costante le variazioni nello spazio e nel tempo della coltura ha portato allo sviluppo di tecniche di rilevamento da sensori remoti e prossimali, alternative rispetto ai metodi convenzionali distruttivi ed invasivi e che forniscono inoltre una copertura spaziale limitata.

Le varie tipologie di sensori consentono di decidere come e quando realizzare gli interventi agronomici consentendo il miglioramento qualitativo delle produzioni. In particolare, l’ottimizzazione nel tempo e nello spazio della concimazione azotata permette di avere benefici in termini di contenuto proteico delle produzioni cerealicole (Heege et al., 2013).

I sensori usati nel telerilevamento in agricoltura di precisione possono essere divisi in:

- Sensori multispettrali;
- Sensori iper-spettrali

I primi utilizzano 4-10 bande aventi un’ampiezza elevata (15 - 70 nm) mentre i secondi utilizzano centinaia di bande con ampiezza minore (5-10 nm).

La radiazione ricevuta dai sensori dipende da una serie di fattori quali ad esempio le caratteristiche fisiche della superficie, la radiazione solare incidente e dal passaggio della radiazione attraverso l’atmosfera terrestre. Per tale ragione al fine di ottenere dei dati precisi è necessario, tramite delle correzioni, eliminare l’influenza dell’irraggiamento solare e dell’atmosfera.

1.4.1 Monitoraggio della vegetazione nel dominio ottico

I corpi emettono una radiazione elettromagnetica in un intervallo di lunghezze d'onda (spettro); il dominio ottico comprende lo spettro con lunghezze d'onda comprese tra 0,4 e 0,7 micrometri., questa porzione viene detta VIS (visibile) od anche PAR (Photosynthetically Active Radiation).

La regione del visibile riveste un ruolo importantissimo in agricoltura di precisione in quanto nella banda del visibile molta della luce che colpisce la vegetazione è assorbita dalla clorofilla per la fotosintesi. Il comportamento spettrale della coltura è legato prevalentemente alla concentrazione di clorofilla per area fogliare e dal suo LAI (leaf area index); conoscere la concentrazione di clorofilla permette di poter monitorare lo stato di nutrizione azotata dato che si è visto esserci una stretta correlazione tra queste due variabili.

Per monitorare le variabili di interesse agronomico è possibile usare un approccio fisico (basato su modelli matematici capaci di descrivere i processi di interazione tra vegetazione e radiazione solare) o un approccio empirico. Quest'ultimo usa la correlazione tra i diversi indici di vegetazione e le variabili agronomiche delle colture.
Gli indici di vegetazione più usati dato la loro semplicità sono SR (Simple ratio o ratio vegetation index) e NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Il SR è il rapporto delle riflettanze NIR e nel rosso (rNIR/rRED) mentre il NIR deriva dalla seguente formula:

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho RED}{\rho NIR + \rho RED}$$

L'NDVI ha il grande vantaggio di avere il campo di variazione fra 0 (suolo nudo) e 1 (massima copertura vegetale).

Questo indice è correlato positivamente al LAI (figura 4), tuttavia, come è possibile osservare dalla figura 4 quando il LAI ha un valore sopra a 2 l'NDVI aumenta in maniera meno che proporzionale. Ne consegue che per poter stimare la variabilità spaziale della coltura l'uso dell'NDVI è più efficace per valori bassi e medi di LAI.

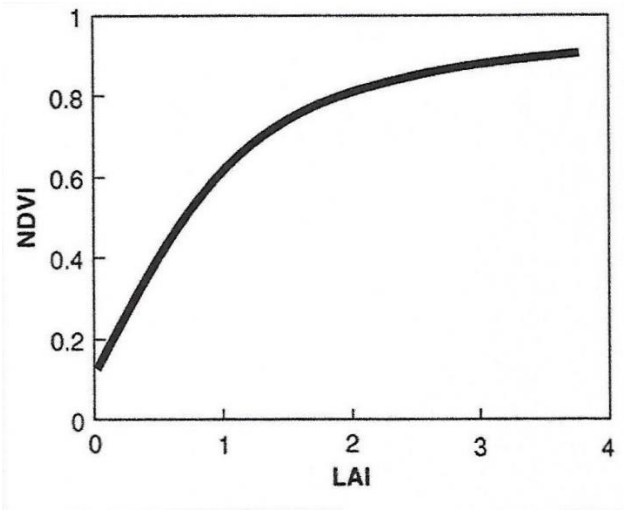

Figura 4: Forma tipica della relazione tra NDVI e LAI. Fonte: Casa (2016)

Ci sono numerosi altri indici che possono essere usati ma, ancora oggi, a livello di letteratura non vi è un accordo su quale indice abbia una relazione più robusta con il LAI o la concentrazione di clorofilla o con lo stato azotato della coltura. Sta di fatto che l'NDVI rimane quello più usato al livello applicativo.

1.5 Valutazione economica dell'agricoltura di precisione

Le tecnologie per poter introdurre tecniche di agricoltura di precisione nelle aziende agricole sono disponibili già da molti anni e sono ormai consolidati anche i benefici economici che questo tipo di agricoltura può fornire (Zhang et al., 2002; Lazzari et al., 2015; Lencés et al., 2014; Tey e Brindal, 2012), ciononostante, gli agricoltori stentano a adottare tali tecniche senza tenere effettivamente conto se queste possano fornire un profitto o meno.

Le tecniche di Agricoltura di precisione sono al momento molto relegate ad una fase sperimentale nonostante la loro importanza da un punto di vista di salvaguardia dei costi e delle risorse ambientali. In particolar modo i benefici ambientali sono attualmente sotto la spinta della collettività, la quale, pone sempre più attenzione alla sostenibilità dell'agricoltura (Commissione Europea, 2012; Casa 2016; Westhoek et al., 2013; Buckwell et al., 2014).

Se da un lato le tecnologie presenti in agricoltura di precisione richiedono un elevato investimento iniziale per macchine e software specifici (antenna, ricevitori, droni etc…), dall'altro l'adozione di tecniche di precisione permette una riduzione dei costi d'uso delle macchine a causa dell'aumento della loro efficienza d'uso e della maggior rapidità di esecuzione delle diverse operazioni colturali.

Oltre ai costi d'uso, in realtà, vengono ridotte anche altre voci di costo quali: costi variabili (sementi, fertilizzanti, agrofarmaci, carburanti etc…) e il costo di manodopera (data la maggior rapidità di esecuzione delle operazioni); il tutto accompagnato da un aumento delle rese.

Il miglioramento delle rese è dovuto sia ad effetti diretti che indiretti:

- Gli effetti diretti riguardano l'ottimizzazione dei processi produttivi (guida automanica, ottimizzazione distribuzione degli agrofarmaci e concimi etc...);
- Gli effetti indiretti derivano da una maggior conoscenza sullo stato della coltura e del suolo permettendo all'agricoltore di adottare decisioni più tempestive (Knight et al., 2009).

L'impiego di nuove tecnologie come ad esempio la guida assistita/automatica migliora notevolmente le prestazioni di lavoro, tuttavia, se da un lato queste generano una riduzione dell'impiego di manodopera, dall'altra richiedono una crescita della professionalità del lavoro interno all'azienda (Gualandi, 2015).

La valutazione dei costi/benefici dell'utilizzo di macchine e software per l'agricoltura di precisione è difficilmente generalizzabile. Ad esempio, i costi per l'uso di un drone possono variare tra i 30 e i 100 euro/ha (Marinello *et al.,* 2016). Oltre la difficoltà nel calcolo delle voci di costo risulta complessa anche la quantificazione dei benefici, questi ultimi possono variare in base a tipologia di colture; aree totali; capacità di intervento e numerosi altri fattori.

Secondo Marinello (2016) i benefici maggiori si ottengono in colture ad alto valore aggiunto richiedenti notevoli input come ad esempio le orticole, la vite, frutticoli e in alcuni casi colture estensive.

1.5.1 La dimensione tecnico-economica per introdurre l'agricoltura di precisione

Come affermato da Casa (2016) "la sostenibilità economica degli investimenti in agricoltura di precisione varia in funzione dell'entità dell'investimento, della coltura e della dimensione aziendale". La sostenibilità economica degli investimenti fatti per introdurre nuove tecnologie nell'azienda agricola dipende dai costi di investimento e dai benefici economici, che a loro volta variano in funzione delle colture e della dimensione aziendale.

1.5.2 Processo di introduzione dell'agricoltura di precisione in un'azienda agraria

Per introdurre tecniche di agricoltura di precisione è richiesto un aggiornamento delle conoscenze degli agricoltori, tuttavia, spesso, vi è un rifiuto da parte di molti operatori del settore nel seguire nuovi approcci inerenti alle pratiche agricole di precisione e ciò si ripercuote sulla diffusione di questa tecnica. Per tale ragione è richiesto un approccio graduale, iniziando dall'introduzione di tecnologie piuttosto semplici fino ad arrivare poi a quelle più complesse come l'uso di sistemi informatici agrari (SIA-agr). Come evidenziato da Lazzari (2015) spesso, chi adotta per primo innovazioni tecnologiche, viene monitorato dalla parte più conservatrice degli agricoltori e solo dopo un certo periodo questi ultimi si rivolgeranno al mercato per innovare le loro pratiche.

1.5.3 Politiche per incentivare l'agricoltura di precisione

L'agricoltura di precisione viene guardata sempre con un maggiore interesse da parte della commissione europee in quanto i benefici ambientali ed economici che essa è capace di offrire si sposano bene con le strategie della PAC (politica agricola comune) (Buckwell,2014). Nonostante tutti i benefici dell'agricoltura di precisione essa stenta ancora a diffondersi, ciò è imputabile alla necessità di elevati investimenti iniziali e al bisogno di favorire un trasferimento di conoscenze inerenti alle innovazioni tecnologiche. Da qui l'importanza di avere a disposizione incentivi di natura pubblica al fine di finanziare quanto detto. Il trasferimento delle conoscenze è finanziato da una specifica misura dei PSR 2014-2020, questa è articolata in tre tipi di interventi:

- Formazione professionale ed acquisizione di conoscenze;
- Attività dimostrative ed azioni di informazione;

- Scambi internazionali di breve durata e visite alle aziende agricole e forestali.

Nel PSR 2014-2020 è stata introdotta la cooperazione a supporto del trasferimento delle innovazioni, questa si concretizza in due strumenti: Il PEI (Partenariato Europeo per l'innovazione) e la Misura PSR 16.1 e 16.2.

La PAC 2014-2020 tiene in considerazione che, attualmente, vi è un aumento della domanda di prodotti alimentari accompagnata dalla necessità di accrescere la produzione agricola, ma, allo stesso tempo, vi è una forte richiesta, da parte dei cittadini membri dell'UE, a favore della sostenibilità ambientale (Commissione Europea, 2012). Anche i nuovi ipotetici obiettivi della PAC 2021-2027 (figura5) tengono conto di queste esigenze e tra i cosiddetti "Trasversal Objectives" compaiono tre parole chiavi che ben si collegano all'agricoltura di precisione: Sostenibilità, Semplificazione e Modernizzazione.

Al fine di poter garantire elevate produzioni e mantenere una elevata competitività dell'agricoltura è indispensabile un uso efficiente delle risorse (input) quali acqua, fertilizzanti e agrofarmaci. Tale obiettivo può essere raggiunto grazie al progresso tecnologico di cui l'agricoltura di precisione rappresenta l'innovazione più promettente. L'agricoltura di precisione è soggetta a un continuo processo evolutivo in cui è possibile sfruttare le esperienze annuali ed elaborare mappe che possono poi essere utilizzate nella razionalizzazione degli interventi agronomici futuri. Tutto questo si inserisce nella "Strategia Europa 2020" e "Horizon" dell'Unione Europea (Casa,2016).

General Objectives	Specific Objectives
Economic Challenges	to ensure a fair income to farmers
	to increase competiveness
	to rebalance the power in the food chain
Environment and climate related challenges	climate change action
	environmental care
	to preserve landscapes and biodiversity
Soci-economic challenges for agriculture and rural development	to support generational renewal
	vibrant rural areas
	to protect food and health quality

Transversal Objectives:
Sustainability
Simplification
Modernization

Figura 5: Obiettivi ipotetici della futura CAP 2021-2027. Fonte: Agriregionieuropa

1.6 Sato nutrizionale della coltura: ruolo dell'azoto e della clorofilla

1.6.1 Determinazione del contenuto di azoto

La coltivazione del frumento duro interessa aree molto vaste nelle quali, per raggiungere buone rese ed un buon quantitativo proteico, è necessario un adeguato apporto di fertilizzante azotato.

L'N influenza notevolmente lo sviluppo della coltura aumentando il LAI (leaf area index) e favorendo così un ampio apparato fogliare assimilatore capace di dare elevate rese produttive. Inoltre, esso favorisce un accumulo di sostanze azotate durante il periodo vegetativo, prime tra tutte le proteine (Ferrise et al., 2010).

A dimostrazione del ruolo chiave svolto dall'N, rispetto al passato, le dosi medie ad ettaro somministrate sono molto più elevate. (Gholizadeh et al., 2017) Ciò, se da un lato consente di soddisfare le esigenze di una popolazione mondiale in continua crescita, dall'altro si può ripercuotere negativamente sull'ambiente e sulla salute umana (Sutton et al.,2011). Una buona gestione dell'N risulta di primaria importanza per un'agricoltura sostenibile, la sua somministrazione deve essere bilanciata in modo da garantire buone rese, evitare una maggior incidenza di malattie parassitarie e ridurre i rischi di inquinamento ambientale (Yuan et al. , 2015).

Da quanto emerso da uno studio fatto da Mark A. Sutton e Hans van Grinsven (2011) in Europa, ogni anno, le perdite di N causano un costo ambientale stimato tra i 70 e i 320 miliardi di euro, molto più dei benefici apportati dall'N nei sistemi agricoli.

Secondo Giles (2005) l'inquinamento da N è la terza più grande minaccia per il pianeta dopo la perdita di biodiversità e il cambiamento climatico. Ciononostante, le concimazioni azotate sono essenziali per far fronte all'aumento del fabbisogno alimentare della popolazione mondiale unita alla riduzione dei suoli destinati all' agricoltura (Zavattaro et al. 2012)

La richiesta di azoto da parte della coltura nelle diverse annate non sempre risulta costante ma viene influenzata da alcuni fattori come la precessione colturale e l'obiettivo di resa. La disponibilità di N per la coltura dipende da fattori di tipo pedologico ed ambientale

come tessitura, pH del suolo, capacità di scambio cationico, livello di S.O., temperature, precipitazioni et cetera (Malhi et al., 2001).

Adottare pratiche di agricoltura conservativa, a lungo termine, permette un aumento all'interno del suolo di azoto ed allo stesso tempo un maggiore di rilascio di questo elemento rispetto ad un terreno sottoposto a sistemi tradizionali (Kassam et al., 2012). Oltre alle normali tecniche di lavorazione, i tempi in cui il fertilizzante viene somministrato, la forma ed il numero di interventi, giocano un ruolo chiave per permettere alla pianta un buon assorbimento dell'azoto (Grahmann et al., 2014).

Da quanto detto si può affermare che la conoscenza in tempo reale dell'azoto fogliare è molto importante poiché una corretta gestione degli apporti azotati può favorire una buona resa produttiva, ridurre le spese non necessarie, la contaminazione delle acque e le emissioni di gas serra contenenti N.

Stabilire una dose ottimale di N da somministrare ad ettaro non è facile e a tal fine è utile ricorrere alla curva di crescita della coltura a dosi crescenti, tuttavia, tale curva, come emerso da alcuni studi (Delin et al., 2005; Khosla et al., 2005), può variare sia nel tempo che nello spazio a causa di una forte interazione tra diversi fattori quali acqua e nutrienti.

A fronte di questa variabilità è possibile concludere che una uniforme distribuzione di concime azotato sull'appezzamento porta ad una bassa efficienza della concimazione.

Attualmente un metodo molto veloce e pratico per stabilire le dosi di concimazione rimane quello del bilancio dei nutrienti il quale, tra l'altro, è stato introdotto nei disciplinari di produzione integrata delle misure agroambientali (Reg. CE 1234/07). Questo metodo prevede di considerare tutti gli input somministrati e gli output all'interno del sistema produttivo durante l'anno e di restituire al suolo l'equivalente degli elementi che vengono persi (Grignani et al. 2003)

Il calcolo del bilancio dell'azoto presenta tuttavia delle criticità, tra cui:

- Si ignora la variabilità spaziale dell'appezzamento in quanto si fa riferimento esclusivamente all'intero appezzamento in esame
- Vi è una blanda considerazione delle variazioni temporali delle voci del bilancio, ciò fa si che la dose di azoto sia piuttosto costante negli anni

Quantificare e rilevare in maniera rapida la variabilità spaziale e temporale risulta però fondamentale se si vuol ottenere una distribuzione ottimale ed una buona efficienza della concimazione azotata.

Le metodologie adottabili per la concimazione di precisione sono diverse (Heege et al., 2013) e tra queste troviamo:

- Uso di mappe di produzione cosi da quantificare in maniera sito specifica le asportazioni e determinare la dose di elementi da restituire. Per usare tale metodo è tuttavia necessario che la coltura non sia stata sottoposta a stress nell'anno precedente e che le perdite per ruscellamento, lisciviazione ed erosione siano tralasciabili.
- Uso di mappe delle proprietà fisiche-chimiche del suolo;
- Uso di sensori remoti o prossimali durante tutto il corso della stagione produttiva per monitorare lo stato della coltura

Tali metodologie possono essere usate anche in combinazione tra loro in maniera simultanea.

Nello specifico per la gestione della concimazione azotata di precisione troviamo:

- Misuratori di clorofilla;
- Informazioni ottenute da fonti storiche di almeno cinque anni inerenti mappe delle rese e mappe inerenti le proprietà del suolo;
- Simulazioni con modelli di accrescimento delle colture (es. SALUS crop model) (Basso et al., 2016);
- Approcci on-the-go e immagini satellitari o SAPR.

1.6.2 Determinazione del contenuto di clorofilla

Negli ultimi decenni numerosi studi sono stati condotti su varie colture (erbacee ed orticole) al fine di dimostrare la correlazione tra le letture dei misuratori di clorofilla e la clorofilla fogliare estraibile, così come quella tra queste letture e lo stato azotato della

pianta. L'obiettivo è stato quello di sviluppare un modo per adattare i programmi di concimazione azotata alle diverse condizioni a cui vengono sottoposte le colture.

La teoria alla base dell'uso dei lettori di clorofilla prevede una stretta relazione tra N presente nella pianta e la concentrazione di clorofilla in quest'ultima, infatti, la stessa molecola di clorofilla contiene quattro atomi di N al suo interno (formula clorofilla: $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$). Ne consegue che la concentrazione azotata nella foglia aumenta proporzionalmente alla densità della clorofilla nei cloroplasti, dunque, la misurazione del verde fogliare fornisce un ottimo metodo per determinare lo stato azotato della pianta.

Da ciò si evince che la misurazione del verde delle foglie nei momenti appropriati offre una buona stima delle richieste azotate della coltura.

La concentrazione di clorofilla fogliare è spesso ben correlata all'attività metabolica e agli stress delle piante nonché alla concentrazione di N nella foglia. I metodi di laboratorio per la misurazione della clorofilla sono accurati ma, oltre ad essere distruttivi, richiedono tempo e apparecchiature specifiche. La misurazione in campo attraverso un misuratore di clorofilla portatile, invece, fornisce un'alternativa rapida e affidabile alle tecniche di laboratorio

Minolta Camera Co., Ltd., ha sviluppato un misuratore di clorofilla portatile a doppia lunghezza d'onda (645 e 790 nm), lo SPAD-501, che è stato successivamente migliorato con lo SPAD-502. Quest'ultimo utilizza la differenza di attenuazione della luce tra 650 e 940 nm per la determinazione del verde fogliare (Wood, Reeves and Himelrick; 1993).

1.6.3 Soil Plant Analysis Development (SPAD)

Il misuratore di clorofilla SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development) permette una stima in situ rapida e non distruttiva del contenuto di N presente nel tessuto fogliare. Nello specifico tale strumento misura l'assorbanza di due distinte regioni di lunghezza d'onda in un'area di 2 × 3 mm della foglia e usa questi dati per generare fornisce un valore che rappresenta la quantità relativa di clorofilla (direttamente proporzionale) (Allen Dray Jr. et al. 2012). Le unità sono adimensionali e vengono chiamate SPADs.

Nello SPAD-502 le sorgenti di luce sono dei diodi (LED) tra cui un LED rosso (650 nm; picco della clorofilla) e un infrarosso (940 nm; assorbanza non assorbita dalla clorofilla).

Il misuratore possiede, inoltre, due rilevatori di fotodiodi al silicio, uno di questi è sensibile alla luce rossa mentre l'altro è sensibile alle radiazioni infrarosse. Le correnti elettriche convertite dalla luce ricevuta dai fotodiodi al silicio vengono ricevute da un microprocessore, che linearizza il segnale e calcola un valore SPAD. Il tutto avviene secondo l'equazione:

$$SPAD = A\ (\log (I_{or} / I_r) - \log (I_{of} / I_f) + B$$

Dove:

- A e B sono costanti;
- I_r e I_f sono le correnti del rosso e dell'infrarosso misurate da appositi rilevatori con il campione in posizione;
- I_{or} e I_{of} sono le correnti del rosso e dell'infrarosso misurate da appositi rilevatori senza il campione (Wood, Reeves and Himelrick; 1993).

Come affermato da Debaeke (2006) e Allen Dray Jr. (2012) Il contenuto di clorofilla può variare all'interno della stessa foglia, quindi è stata fatta una media tra le letture di SPAD prese in due diverse posizioni della lamina fogliare (porzione centrale e distale). I valori SPAD sono stati determinati durante il ciclo di crescita del frumento duro e per ogni sub-parcella le letture sono state prese sulla foglia più in alto completamente espansa da 30 piante, selezionate casualmente, rispettivamente 10 a monte, 10 al centro e 10 a valle della stessa. Per eseguire la normalizzazione della lettura è stata usata la seguente formula:

Normalizzazione lettura SPAD Units = log (lettura SPAD Units+1)

Figura 6: misuratore di clorofilla SPAD-502

1.6.4 Nitrogen Nutrition Index (NNI)

Il Nitrogen Nutrition Index (NNI) può essere utilizzato per migliorare l'efficienza della concimazione azotata in quanto permette di diagnosticare lo stato azotato della coltura. Questo indice fu sviluppato in Francia (Lemaire and Meynard, 1997) e può assumerre vari valori:

- NNI > 1 indica un eccesso di azoto
- NNI = 1 indica uno stato azotato ottimale per la coltura
- 0,2 < NNI < 1 indica un deficit dello stato azotato

Il valore di NNI deriva dalla seguente formula:

$$NNI = \frac{\%N}{N_C}$$

$$N_C = a * DM^{-b}$$

Dove:

- %N è il valore determinato dalla analisi con il Dumas Method;
- Nc è il contenuto critico di azoto;
- DM (dry matter), peso secco della parte epigea della coltura (t/ha);
- I due parametri, a e b sono determinati dalla curva di diluizione di Juestes et al., (1994) 5,35 e 0,442, rispettivamente per il frumento duro.

1.7 Elaborazioni immagini da telerilevamento

1.7.1 Mappe di concimazione azotata a tasso variabile

Per poter realizzare una concimazione a tasso variabile è necessario definire delle mappe di prescrizione. Queste mappe si basano su delle informazioni pregresse, raccolte nei vari anni, che tengono conto della variabilità spazio-temporale esistente all'interno dell'appezzamento in esame. In particolar modo le mappe di prescrizione utili per la concimazione azotata tengono in considerazione una serie di proprietà capaci di influenzare la biodisponibilità di N, come: topografia, tessitura, sostanza organica etc…

Tramite l'uso di software, nelle mappe vengono delineate delle zone omogenee e a questo punto si stabilisce la dose di concime variabile. Il metodo più semplice per realizzarlo è quello di impostare un bilancio dell'azoto semplificato considerando per ciascuna zona omogenea le asportazioni della coltura e i dati della sostanza organica e dell'azoto totale e/o nitrico (Koch *et al.,* 2004).

Esiste anche un altro metodo, anche se più complesso, per definire la dose di concime da somministrare alla coltura; questo si basa sull'uso del modello di simulazione SALUS (System Approach to Land Use Sustainability) crop model ideato da Basso (2011).
Inoltre, è possibile combinare l'uso di sensori ottici per il monitoraggio della coltura alla mappatura delle zone con diverse proprietà così da avere un risultato più preciso (Longchamps e Khosla,2015)

1.7.2 Mappe di prescrizione

Per poter realizzare una concimazione a tasso variabile è indispensabile avere a disposizione delle mappe di prescrizione. Queste si basano su informazioni pregresse che tengono conto della variabilità spaziale dell'appezzamento, nello specifico, per la concimazione azotata, si tiene conto delle proprietà del suolo che maggiormente influenzano la disponibilità di azoto come ad esempio tessitura, sostanza organica e topografia. Per raggiungere tale obiettivo oltre alle proprietà del suolo si possono considerare anche di una serie storica di immagini satellitari, foto aeree (Khosla et al,2005), mappe della resa ed il giudizio percettivo dell'agricoltore sulle zone a diversa produttività all'interno dell'appezzamento.

Tutte queste informazioni possono essere combinate tramite delle procedure di classificazione automatica usando ad esempio il software Management Zone Analyst (Fraisse *et al.,* 2004). Dopo aver delineato le zone omogenee si stabilisce la dose di concime variabile, a tal fine un metodo semplice e valido è quello di impostare il bilancio dell'azoto considerando, per ciascuna zona omogenea, le asportazioni della coltura e i dati medi delle proprietà del suolo che entrano nel calcolo del bilancio dell'azoto, quali la sostanza organica e l'azoto totale e/o nitrico (Koch *et al.,* 2004).

Un altro metodo, anche se più complesso, prevede l'uso del modello di simulazione SALUS (System Approach to Land Use Sustaunability) crop model (Basso *et al.,* 2011;

2016). Questo modello è usato per effettuare simulazioni della produzione della coltura per molti anni, separatamente per le zone a diversa produttività del campo, utilizzando serie storiche di dati meteorologici e dati di proprietà del suolo medi per ciascuna zona. Per definire la modalità di concimazione azotata a tasso variabile è possibile, inoltre, combinare la mappatura delle zone a diversa produttività con l'utilizzo di sensori ottici.

2 OBIETTIVI TESI

L'obiettivo generale della sperimentazione, nella quale rientra la presente tesi di laurea, è quello di valutare l'effetto di diversi livelli di intensificazione colturale sulla produttività e sulle caratteristiche della biomassa di frumento duro (*Triticum turgidum* subsp. *durum*) coltivato in ambiente Mediterraneo, al fine di implementare un database di informazioni "di campo" utile alla corretta interpretazione delle immagini da telerilevamento per applicazioni di Agricoltura di precisione.

Nello specifico, la presente tesi di laurea si pone l'obiettivo di valutare l'effetto della gestione del suolo e della fertilizzazione sulla concentrazione di azoto e clorofilla nel frumento duro.

3 MATERIALI E METODI

3.1 Descrizione sito sperimentale

La prova sperimentale è ubicata presso l'Azienda Agraria Didattico Sperimentale "Pasquale Rosati" dell'Università Politecnica delle Marche, sita nel comune di Agugliano (AN) (43° 32' N, 13° 22' E; altitudine: 88 m s.l.m.), e si riferisce all'annata agraria 2017/2018 (Figura 7).

La prova sperimentale consiste nel confrontare tre diverse gestioni di suolo (lavorazione di tipo tradizionale con aratura, lavorazione minima e non lavorazione) e tre diversi livelli di fertilizzazione azotata (0, 90 e 180 kg di N/ha in forma di urea 46%) in una rotazione biennale frumento-mais (Triticum durum Desf. cv. Grazia, ISEA e Zea mays L. ibrido DKC4316 Dekalb classe FAO 300).

Le operazioni di lavorazione tradizionale (CT) sono quelle rappresentative della zona nella quale è stata eseguita la prova, queste prevedono un'aratura a 40 cm seguita da uno o due passaggi di affinamento con erpice (rotante o a denti rigidi a seconda delle condizioni del terreno al momento dell'intervento). Per la lavorazione minima (MT) è stata prevista una scarificatura superficiale (10-12 cm) seguita da uno o due passaggi di affinamento. Per la non lavorazione, o semina su sodo (NT), è stato previsto di lasciare indisturbato il suolo tranne che per il passaggio di mezzi per il controllo dei patogeni ed infestanti e per la raccolta della coltura.

La prova sperimentale, che è stata avviata nel 1994, si svolge in un appezzamento di 1,8 ha circa diviso in due blocchi principali, uno a monte ed uno a valle (Figura 8). Ogni blocco a sua volta è ulteriormente ripartito in due sotto-blocchi di cui uno coltivato a mais ed uno a frumento duro. Sia il blocco a monte che il blocco a valle hanno ciascuno un totale di 6 macro-parcelle aventi superficie di 1500 m^2 ciascuna. Ognuna di queste, inoltre, risulta divisa ancora in 3 sub parcelle da 500 m^2, quindi, nell'intera prova abbiamo un totale di 12 macro-parcelle e 36 sub parcelle. In tabella 3 sono riportate le operazioni colturali previste per il frumento

Il terreno caratterizzante la prova sperimentale ha esposizione Nord-Sud con una pendenza media del 10% ed un pH pari a 8,3. La tessitura del suolo è di tipo limoso-argilloso e secondo la classificazione FAO può essere classificato "Calcaric Gleyic Cambisol".

Figura 7: Appezzamento destinato alla prova lavorazioni presso l'Azienda agraria didattico sperimentale Pasquale Rosati di Agugliano (AN). Annata 2017/2018.

3.2 Variabili misurate

In tabella è possibile osservare le date dei vari campionamenti e relative variabili che sono state misurate e analizzate.

Tabella 2: Date e attività eseguite per l'acquisizione delle variabili misurate.

Data	**28/03/2018**	**26/04/2018**	**28/05/2018**	**06/07/2018**
Variabili misurate	1° Campionamento	2° Campionamento	3° Campionamento	Trebbiatura
Fenologia	x	x	x	
N. spighe/m^2				x
N. cariossidi per spiga				x
Peso 1000 semi				x
Componenti della resa				x
Produzione osservata				x
Umidità				x
% Proteine				x
Letture SPAD Units	x	x	x	
Estrazione della clorofilla	x	x	x	
Contenuto di azoto	x	x	x	

Le variabili prese in considerazione nella seguente tesi di laurea sono state: Letture SPAD Units, Estrazione della clorofilla e Contenuto di azoto

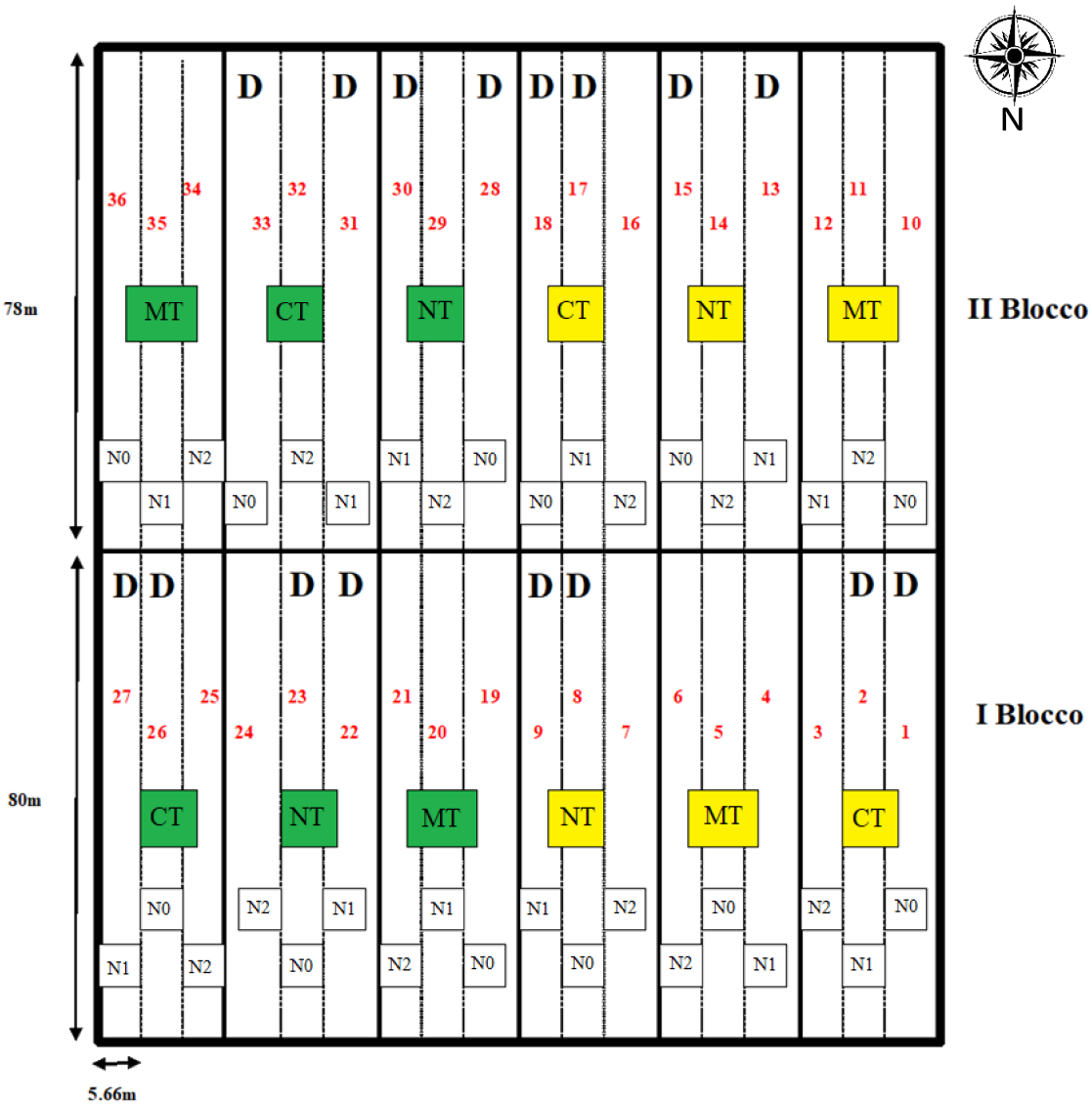

Figura 8: Planimetria del sito sperimentale per l'annata agraria 2016/2017: NT = non lavorazione, MT = scarificatura (40 cm) + 1 affinamento, CT = aratura (40 cm) + 1 affinamento; N0 = 0 unità di azoto ad ha, N1 = 90 unità di azoto ad ha , N2 = 180 unità di azoto ad ha; in giallo: parcelle coltivate a frumento; in verde: parcelle coltivate a mais. D= presenza di Diviner per controllo umidità.

Tabella 3: Schematizzazione delle operazioni colturali previste per il frumento nell'annata agraria 2016/2017; CT = aratura a 40 cm + 1 affinamento; MT = ripuntatura a 40 cm + 1 affinamento; NT = non lavorazione.

Trattamento	Aratura e lavorazioni complementari	Semina	Concimazione fosfatica	Concimazioni	Controllo flora infestante e patogeni fungini	Raccolta
CT	2/10/2017 Aratura; 20/11/2017 Affinamento con erpice rotante.	21/11/2017 Semina Cv. Grazia. 17/11/2017: Rullatura e passaggio scavafossi.	21/11/2017: 160 kg ha^{-1} di P_2O_5 come perfosfato triplo.	29/03/2018: N90: 45 kg ha^{-1} N180: 90 kg ha^{-1}. Sotto forma di urea. 30/04/2018: N90: 45 kg ha^{-1}. N180: 90 kg ha^{-1} sotto forma di urea.	24/04/2018: Controllo infestanti: -Mesosulfuron-Metile (0.015 kg ha^{-1}) -Iodosulfuron-Metil-Sodium (0.003 kg ha^{-1}) -Mefenpir-Dietile (0.036 kg ha^{-1}) -Fluroxipir (0.09 l ha -1) -Clopiralid (0.03 l ha^{-1}) -MCPA (0.40 l ha^{-1}). 24/04/2018: Trattamento fungicida: -Azoxystrobin (0.16 l ha^{-1}) -Cyproconazole (0.06 l ha^{-1}).	06/07/2018
MT	4/10/2017 Scarificatura; 20/11/2017 Affinamento con erpice rotante.	21/11/2017 Semina Cv Grazia. 17/11/2017: Rullatura e passaggio con scavafossi.				
NT	14/11/2017 Diserbo chimico in pre-semina, 2 l/ha di Glyphosate.	21/11/2017: Semina Cv. Grazia. La semina è avvenuta con una seminatrice da sodo.				

3.3 Determinazione del contenuto di clorofilla nel tessuto fogliare

Una volta eseguite le letture SPAD, le foglie sono state portate in laboratorio per poter determinare la loro concentrazione in clorofilla mediante il metodo Arnon *et al., (*1949). Dopo aver ridotto le foglie in piccoli pezzi e scartato le parti necrotiche, è stato prelevato un campione di circa 0,1 g e messo all'interno di una provetta con 10 ml di soluzione di acetone (80%). Il tutto è stato omogeneizzato e introdotto in una centrifuga per 5 minuti al fine di separare la fase solida e liquida. Il liquido è stato spostato in una provetta più grande e portato ad un volume di 25 ml tramite aggiunta della soluzione di acetone all'80% (Figura9). Da questa provetta è stata prelevata un'aliquota di campione dove è stata eseguita un'analisi tramite spettrofotometro (figura 10).

Acquisiti i valori di assorbanza (misurata a 663 nm e 645 nm), per determinare i milligrammi di clorofilla per gr di tessuto fogliare abbiamo usato la seguente equazione:

mg tot. di clorofilla per gr di tessuto = 20,2 (A645) +8,02 (A663) x V1000 x W

Dove:

- A=Valore assorbanza alla specifica lunghezza d'onda;
- V=Volume finale da dove viene estratta la clorofilla;
- W=Peso fresco del tessuto estratto.

Per eseguire la normalizzazione dei mg di clorofilla, invece, l'equazione usata è stata:

Normalizzazione mg clorofilla= log (mg clorofilla gr tessuto +1)

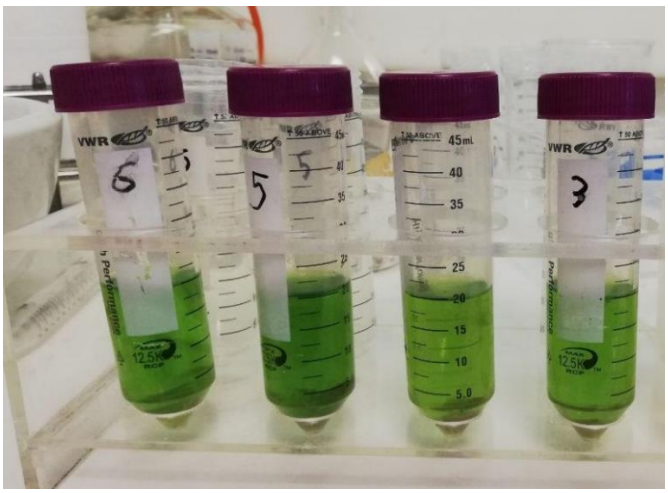

Figura 9: Provette dopo aver eseguito l'omogeneizzazione e centrifugazione

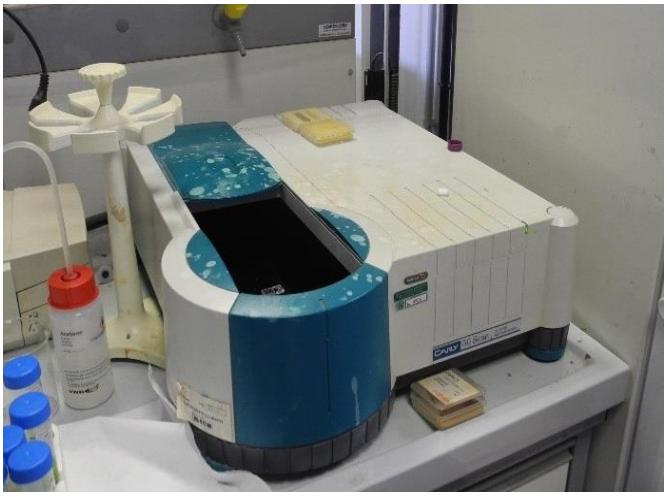

Figura 10: Spettrofotometro usato per determinare l'assorbanza a 645 nm e 663 nm.

3.4 Contenuto di azoto nella biomassa

La % di N nelle foglie è stata determinata mediante il Dumas Method. La biomassa epigea della coltura necessaria per le analisi è stata prelevata nei tre campionamenti in ogni sub-parcella, in tre aree di saggio (monte, centro, valle), lungo un transetto lineare di 1m. La biomassa, dopo essere stata messa in stufa a 105 °C per 48h, è stata pesata e macinata finemente. Dal macinato sono stati prelevati 3 mg per ogni combinazione fattoriale e, dopo essere stati introdotti ciascuno in capsule di alluminio, sono stati inseriti nella LECO CHNS analyzer (figura 11): questa macchina, tramite una combustione secca, è capace di determinare la % di azoto.

I grammi di azoto contenuti in un metro quadro di superficie sono stati ricavati dalla seguente formula:

$$g\ N/m^2 = \frac{\frac{\%N * Peso\ secco\ (g)}{100}}{0{,}085}$$

Figura 11: LECO CHNS analyzer

3.5 Monitoraggio del Soil Plant Analysis Development (SPAD) su lamina fogliare

Per determinare i valori di SPAD units è stato utilizzato lo SPAD Minolta 502 (Minolta camera Co., Ltd., Japan) (Figura 6). Per ogni sub-parcella del sito sperimentale sono state sottoposte a lettura un totale di 30 foglie (le più espanse), rispettivamente 10 nella zona a monte, 10 al centro e 10 a valle. Per ogni foglia è stata eseguita una lettura nella porzione distale ed una in quella centrale, facendo poi la media tra queste ultime. Per la normalizzazione della lettura abbiamo usato la seguente formula:

$$\text{Normalizzazione lettura SPAD Units} = \log(lettura\ SPAD\ Units + 1)$$

3.6 Statistica

Tutte le analisi statistiche sono state eseguite utilizzando il software di elaborazione statistica R. Prima di ogni analisi sono state effettuate delle prove al fine di determinare quale test statistico fosse il più adatto.

Quando i dati avevano una distribuzione normale è stata effettuata un'ANOVA (analisi della varianza) seguita da un test post-hoc di Tukey; invece, quando non avevano una distribuzione normale è stato applicato un test Kruskal-Wallis seguito da un test post-hoc di Dunn (livello di significatività P value =5%)

Per valutare quale tipo di regressione (lineare/non lineare) si adattasse meglio ai dati è stata fatta un'analisi sulle curve di interpolazione. Una regressione (a livello di significatività P=0.1%) è stata condotta per valutare la relazione tra le letture SPAD e la concentrazione di clorofilla fogliare.

Si è fatto riferimento al coefficente di determinazione (R^2) e alla relativa radice dell'errore quadratic medio (RMSE) per valutare la capacità dello SPAD Minolta 502 di stimare le variabili dipendenti.

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Andamento termo-pluviometrico

I dati meteo riportati nella presente tesi di laurea si riferiscono alla stazione agrometeorologica di Agugliano (43°32'N, 13°22'E ad una altitudine di 140 m s.l.m) e sono stati gentilmente forniti dall'Agenzia Servizi al Settore Agroalimentare delle Marche (ASSAM). In figura 12 è stato confrontato l'andamento termo-pluviometrico dell'annata agraria 2017-2018 con quello della serie storica 1998-2016.

Nel periodo compreso tra novembre e luglio (durante il quale si svolge il ciclo del frumento duro), a partire dal 1998 (anno di installazione della stazione di rilevamento agrometeorologico) la piovosità media riscontrata è stata pari a 583 mm mentre, per quanto riguarda l'andamento delle temperature, si è assistito ad una temperatura media di 13,7°C. Per quanto concerne le temperature massime queste hanno raggiunto i 30,9°C nel mese di luglio mentre le minime 2,6°C nel mese di gennaio.

Entrando nel merito del periodo a cui si riferisce la presente tesi di laurea (annata agraria 2017-2018), nel periodo novembre 2017 – luglio 2018 sono state registrate altezze di pioggia pari a 801 mm, dunque il 27,22% in più rispetto alla media storica. Il mese più piovoso è stato febbraio con 172,6 mm di pioggia caduta, mentre il più secco è risultato gennaio con soli 29 mm. Dalla figura 12 si evince che la distribuzione delle piogge è stata piuttosto regolare rispetto allo storico, fatta eccezione per alcune decadi meno piovose come la 3° decade di gennaio, la 3° decade di aprile e la 1° decade di luglio. Inoltre, si può notare che nella prima decade di maggio, periodo in cui è stata fatta la seconda

concimazione, la piovosità è stata maggiore alla media storica. Ciò ha favorito un dilavamento dell'azoto andando a comportare una differenza dei risultati di produzione tra i tre livelli di fertilizzazione meno accentuata rispetto a quella registrata in passato (Seddaiu *et al.*, 2016).

Per quanto riguarda l'andamento termico, la temperatura media registrata nell'annata 2017-2018 è stata leggermente più alta rispetto alla media storica (14,2°C contro i 13,7°C, +0,5°C). La media delle temperature minime è stata di 9,9° (+0,3°C) mentre quella delle massime 18,4°C (+0,7°C). Da questi dati si può affermare che l'annata 2017-2018 è stata più piovosa e più calda rispetto allo storico.

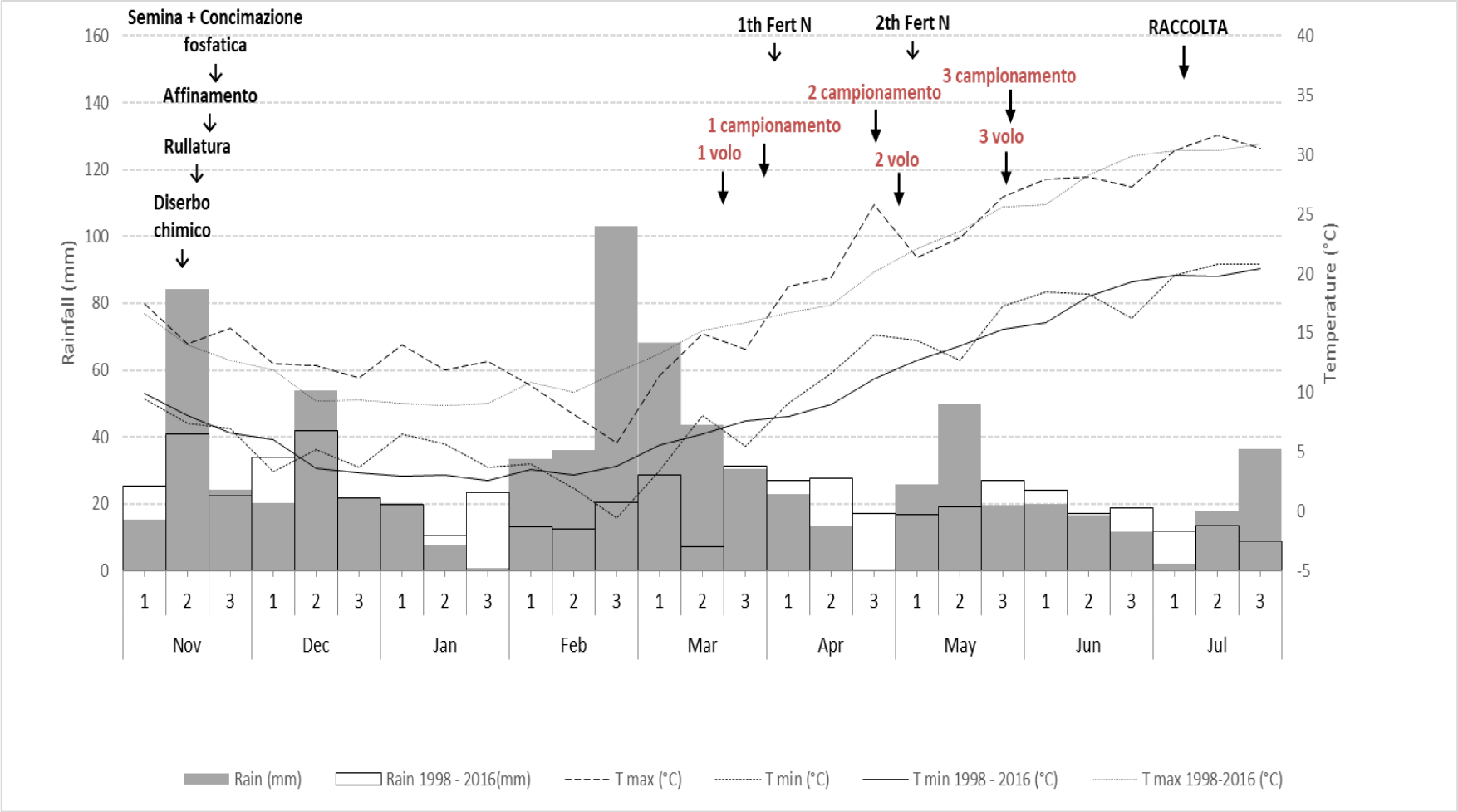

Figura 12: Andamento termo-pluviometrico nell'annata agraria 2017-2018 in relazione alla serie storica di dati (1998-2016). Fonte dati: ASSAM.

4.2 Risultati

4.2.1 Letture SPAD

La relazione tra letture SPAD eseguite nella porzione centrale (SPAD CP) e distale (SPAD DP) delle foglie è risultata lineare, con un coefficiente di determinazione (R^2) di 0,996 e una radice dell'errore quadratico medio (RMSE) di 2,30 (figura 13)

La regressione ha mostrato la seguente relazione tra le letture SPAD CP e SPAD DP:

$$\text{SPAD CP} = 1{,}0033 * \text{SPAD DP} + 0{,}1566$$

Come evidenziato in figura 13, l'equazione suggerisce che le letture SPAD DP sono state generalmente più basse delle letture SPAD CP.

4.2.2 Letture SPAD e concentrazione fogliare di clorofilla

Osservando la Figura 14, si nota una relazione esponenziale positiva tra le letture SPAD e il contenuto fogliare di clorofilla per la combinazione fattoriale NTxN0 (R^2=0.74), mentre non vi è nessuna relazione significativa sia per la combinazione fattoriale MTxN0 (R^2 = 0,08) che per la combinazione CTxN0 (R^2 = 0,05) che, tuttavia, mostra una tendenza negativa (CTxN0: $y = 1.6783e^{-0.007x}$).

Inoltre, se si considerano le letture SPAD e la concentrazione di clorofilla fogliare, osservando la Tabella 4 è possibile vedere una differenza significativa tra la combinazione fattoriale NTxN0 e CTxN0. Per la combinazione fattoriale MTxN0, invece, non si sono riscontrate differenze significative con CTxN0 per quanto riguarda le letture SPAD e con NTxN0 rispetto alla concentrazione di clorofilla fogliare.

La stessa tabella mostra che non vi è una differenza significativa tra la gestione del suolo nei due trattamenti fertilizzati per i valori delle letture SPAD e la concentrazione di clorofilla fogliare. La maggiore differenza per le letture SPAD è stata riscontrata fra la dose N0 e N1 rispetto a N1 e N2 per qualsiasi tipologia di gestione del suolo.

Si notano anche delle relazioni esponenziali positive tra le letture SPAD e la concentrazione di clorofilla nei due trattamenti fertilizzati (N1 e N2) indipendentemente dalla gestione del suolo, con un valore R^2 medio di 0,85 e un RSME medio di 0,50 circa. (Figura 15 e 16).

4.2.3 Contenuto di azoto

Nella tabella 6 si può notare che, per i dati ottenuti dal primo campionamento (28/03/2018), non vi sono differenze significative fra le varie combinazioni di fattori per i valori della %N e g N/m^2. Ciò si spiega in quanto la prima dose di fertilizzazione è stata applicata in data 29/03/2018.

Considerando i valori ottenuti in seguito alla concimazione azotata, effettuata in data 26/04/2018 e 28/05/2018, si evince che, indipendentemente dal primo fattore, all'aumentare della dose di N aumentano i valori di %N e g N/m^2. Come per la quantità di clorofilla e letture SPAD, la maggior differenza è possibile riscontrarla fra il trattamento N0 e N1.

In tabella 6, inoltre, si può notare che, non considerando il secondo fattore, in data 26/04/2018 e 28/05/2018 la semina su sodo ha dato dei valori medi di %N superiori di 0,22 e 0,24 rispetto alla minima lavorazione invece di 0,46 e 0,26 rispetto alla lavorazione tradizionale.

4.2.4 Discussioni

Considerando il trattamento non fertilizzato il sodo ha mostrato una relazione positiva tra letture SPAD e la concentrazione fogliare di clorofilla. Questa dinamica è probabilmente dovuta alla maggiore disponibilità di azoto (1,50 vs 1,16 vs 1,02 g kg-1 di azoto totale rispettivamente nello strato di terreno 0-20 cm per NT, MT e CT) derivante dal migliore ritmo di mineralizzazione della sostanza organica presente nel sistema sodo rispetto alla minima lavorazione e alla tradizionale (22,5 vs 16,8 vs 13,3 g kg-1 di sostanza organica del suolo nello strato del suolo 0-20 cm rispettivamente) (Tabella 5).

La maggiore disponibilità di azoto che ha caratterizzato la combinazione fattoriale NTxN0, come dimostrato anche da Wood et al., 1993 e Richardson et al., 2002, ha assicurato una maggiore concentrazione di clorofilla nei tessuti fogliari che, a sua volta, ha determinato un aumento del "greenness" della foglia (Li et al ., 2007; Heyneke et al., 2017). La relazione positiva tra letture SPAD e concentrazione di clorofilla risulta significativa in entrambi i trattamenti di fertilizzazione (N1 e N2). Ciò conferma che il rilascio dell'azoto nel terreno e dell'azoto fornito con la fertilizzazione determina una

maggior accuratezza delle letture SPAD nello stimare la concentrazione della clorofilla fogliare (Prost e Jeuffroy, 2007).

Come dimostrato anche in letteratura (Debaeke e Justes, 2006), il contenuto azotato della coltura viene maggiormente influenzato dal secondo fattore (concimazione) rispetto al primo (lavorazione). Tuttavia, è possibile riscontrare che la semina su sodo fornisce dei valori medi di contenuto di N nella biomassa fogliare superiori rispetto alla minima lavorazione e alla lavorazione tradizionale. Questo può essere dovuto ad una maggiore presenza di sostanza organica e una migliore attività microbica nelle parcelle destinate alla semina su sodo rispetto alle parcelle che hanno subito una lavorazione.

Tabella 4: Letture SPAD (± dev.st.) e concentrazione di clorofilla fogliare (mg/g) (± dev.st.) rilevate nei diversi trattamenti di fertilizzazione e nelle diverse gestioni del suolo durante l'annata agraria 2017-2018.

Gestione del suolo	Input azotato (kg ha^{-1} N)	Letture SPAD	Concentrazione di clorofilla $_{a+b}$ (mg/g)
NT	0	32.89 (±4.88) a	2.00 (±0.71) a
MT	0	24.29 (±5.28) b	1.71 (±0.33) ab
CT	0	20.89 (±6.05) b	1.47 (±0.28) b
Media		26.02 (±7.36)	1.73 (±0.52)
NT	90	39.45 (±9.62) a	2.38 (±0.99) a
MT	90	39.75 (±9.42) a	2.40 (±0.87) a
CT	90	41.23 (±9.06) a	2.56 (±0.88) a
Media		40.14 (±9.23)	2.45 (±0.91)
NT	180	43.33 (±10.85) a	2.53 (±1.11) a
MT	180	46.02 (±12.36) a	3.11 (±1.39) a
CT	180	43.57 (±9.99) a	2.88 (±1.35) a
Media		44.31 (±10.97)	2.85 (±1.29)

Tabella 5: Proprietà del suolo (0-20 cm di profondità) (± dev.st.) nelle diverse aree del sito sperimentale

Parametri	**NT**	**MT**	**CT**
Sabbia (g kg^{-1})	127 (±21) a	125 (±18) a	120 (±19) a
Limo (g kg^{-1})	410 (±30) a	388 (±11) a	397 (±19) a
Argilla (g kg^{-1})	463 (±36) a	487 (±10) a	483 (±22) a
Sostanza Organica (g kg^{-1})	22.5 (±4.4) a	16.8 (±0.9) b	13.3 (±1.5) b
N totale (g kg^{-1})	1.50 (±0.20) a	1.16 (±0.04) b	1.02 (±0.07) b

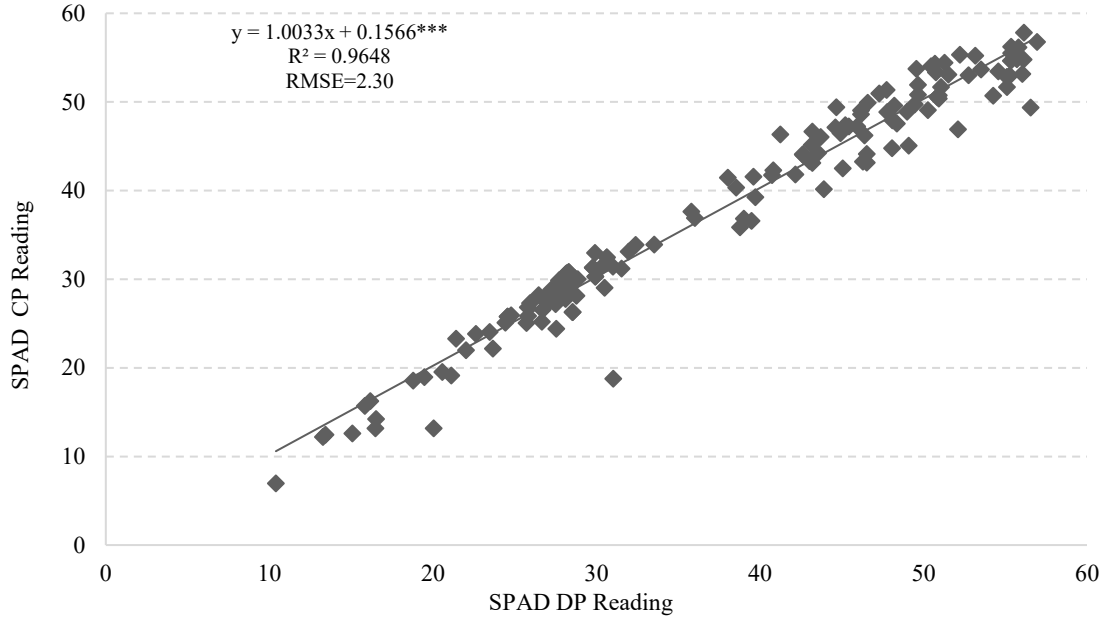

*Figura 13: Relazione tra le letture SPAD osservate nella porzione centrale della foglia (SPAD CP) ed in quella distale (SPAD DP) nel frumento duro durante l'annata agraria 2017/2018. Il simbolo *** identifica la significatività della relazione a livello P=0.1%, RMSE, radice dell'errore quadratico medio*

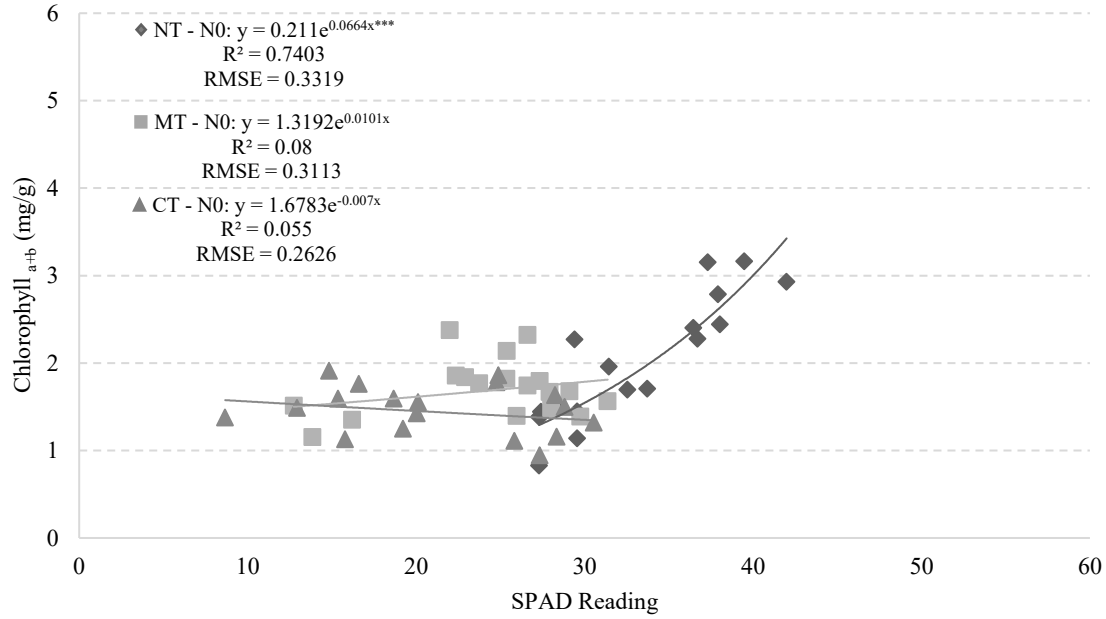

*Figura 14: Relazione tra concentrazione di clorofilla fogliare (mg/g) e letture SPAD durante l'annata agraria 2017-2018 nel trattamento non fertilizzato (N0, nessuna dose di N somministrata). NT, nessuna lavorazione; MT, minima lavorazione; CT, lavorazione convenzionale. Il simbolo *** identifica la significatività della relazione a livello P=0.1%, RMSE, radice dell'errore quadratico medio*

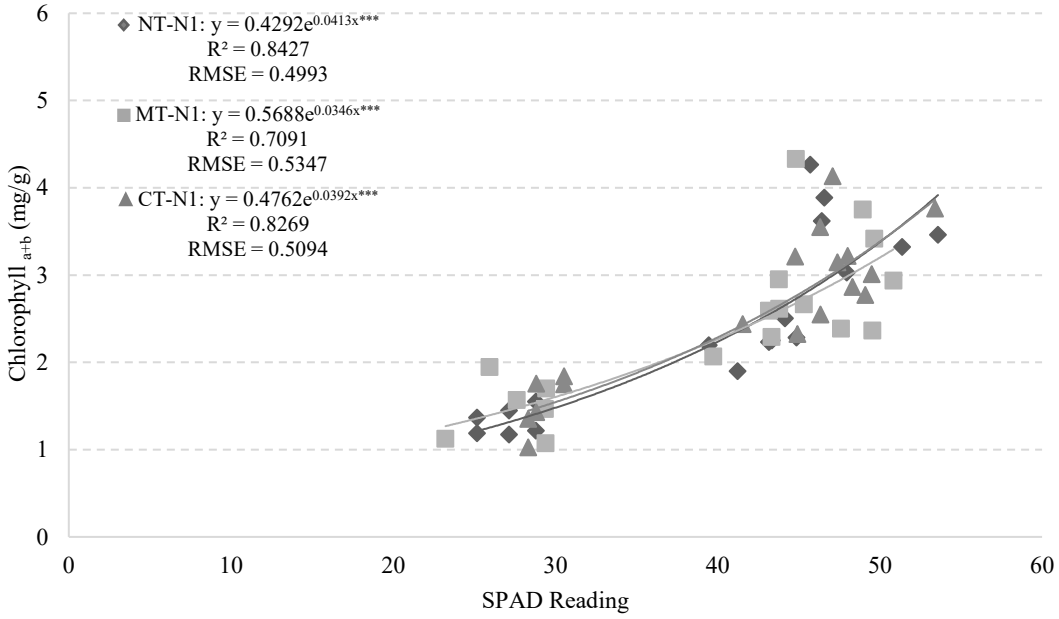

*Figura 15: Relazione tra concentrazione di clorofilla fogliare (mg/g) e letture SPAD durante l'annata agraria 2017-2018 nel trattamento N1 (90 kg N/ha). NT, nessuna lavorazione; MT, minima lavorazione; CT, lavorazione convenzionale. Il simbolo *** identifica la significatività della relazione a livello P=0.1%, RMSE, radice dell'errore quadratico medio*

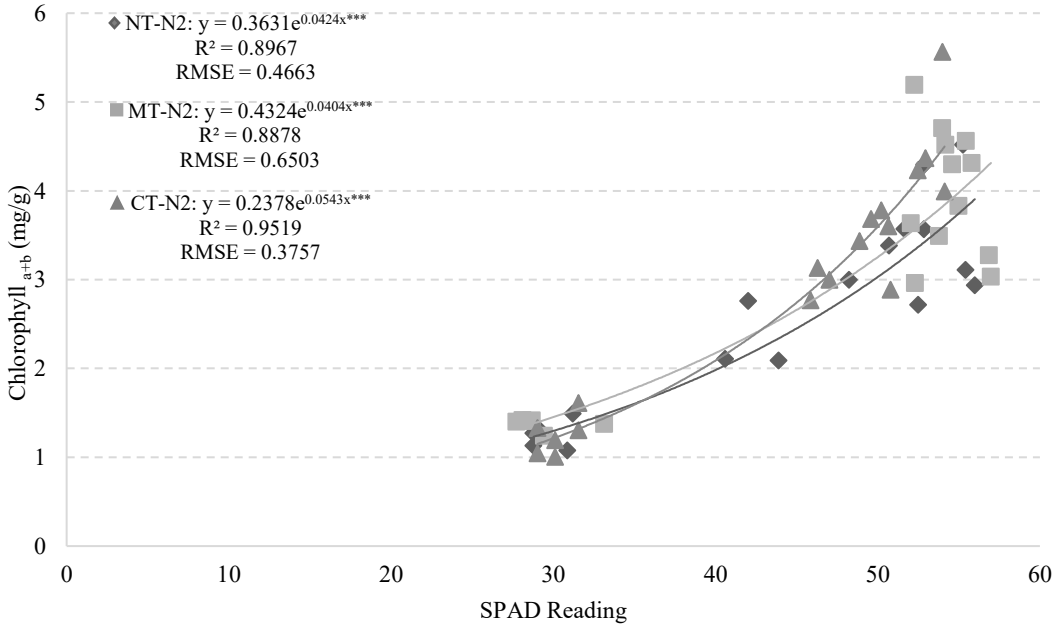

*Figura 16: Relazione tra concentrazione di clorofilla fogliare (mg/g) e letture SPAD durante l'annata agraria 2017-2018 nel trattamento N2 (180 kg N/ha). NT, nessuna lavorazione; MT, minima lavorazione; CT, lavorazione convenzionale. Il simbolo *** identifica la significatività della relazione a livello P=0.1%, RMSE, radice dell'errore quadratico medio*

Tabella 6: Risultati della % N ottenuti per l'annata 2017-2018.

Fattore primario	Fattore secondario Kg/ha	%N 28/03/2018	%N 26/04/2018	%N 28/05/2018
NT	0	1,36 ± 0,09	1,57 ± 0,26	1,28 ± 0,25
	90	1,45 ± 0,03	1,60 ± 0,13	1,62 ± 0,20
	180	1,38 ± 0,02	2,02 ± 0,23	1,70 ± 0,24
Media		**1,4**	**1,73**	**1,53**
MT	0	1,43 ± 0,12	0,87 ± 0,11	0,84 ± 0,13
	90	1,29 ± 0,13	1,47 ± 0,15	1,40 ± 0,20
	180	1,41 ± 0,19	2,19 ± 0,43	1,62 ± 0,14
Media		**1,38**	**1,51**	**1,29**
CT	0	1,33 ± 0,10	0,81 ± 0,09	0,80 ± 0,15
	90	1,28 ± 0,06	1,37 ± 0,27	1,45 ± 0,31
	180	1,11 ± 0,12	1,62 ± 0,18	1,57 ± 0,15
Media		**1,24**	**1,27**	**1,27**

5 CONCLUSIONI

Nella presente tesi vengono presentati i risultati sperimentali di una sola annata agraria, ma lo scopo è quello di verificare, nei prossimi anni, se le dinamiche descritte saranno confermate. Si dovrà anche valutare se lo SPAD può essere utilizzato per un'interpretazione delle immagini di telerilevamento e per valutare la robustezza degli indici di vegetazione, al fine di stimare lo stato azotato del frumento duro in relazione alla gestione del suolo.

Osservando i risultati delle letture SPAD, del contenuto di clorofilla e di azoto, è possibile notare che questi sono influenzati maggiormente dal fattore secondario (concimazione azotata) rispetto al fattore primario (lavorazione).

L'andamento delle letture SPAD e del contenuto di clorofilla nel tessuto fogliare è analogo e ben correlato. Osservando il trattamento non fertilizzato, si evince che per la semina su sodo (NT) sono stati riscontrati i risultati migliori. Per quanto riguarda lo stato azotato della coltura, per qualsiasi livello di fertilizzazione, mediamente la semina su sodo ha mostrato una %N superiore ai trattamenti a confronto. Tali andamenti possono essere spiegati dai benefici apportati dalla maggior presenza di sostanza organica che caratterizza il "sistema sodo".

Le letture SPAD eseguite sulla porzione distale ed in quella centrale sono correlate tra loro, ciò sta ad indicare che nel normale utilizzo gli utenti potrebbero limitare le loro misurazioni ad una singola porzione fogliare.

Dai risultati della presente tesi, supportati anche da un'ampia letteratura scientifica, è possibile affermare che lo SPAD è un eccellente strumento per stimare la concentrazione fogliare di clorofilla sia quando la coltura è sottoposta a concimazione che nel trattamento di controllo non fertilizzato.

6 BIBLIOGRAFIA

Allen Dray Jr. F. et al. (2012). “In situ estimates of waterhyacinth leaf tissue nitrogen using a SPAD-502 chlorophyll meter”. *Aquatic Botany* Vol 100, pp 72-75.

Arregui LM, Quemada M, (2006). “Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes”. *Plant Soil* Vol. 288, pp. 57-69.

Arnon, D. I. (1949). “Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta vulgaris”. *Plant Physiol*. Vol 24, pp. 1-15.

Basso B., Bertocco M., SartorI L, Martin E.C. (2007). “Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of Yield in a maize-wheat-soybean rotation.” *European Journal of Agronomy*. Vol 26, pp. 82-91.

Basso B., Dumont B., Cammarano D., Pezzuolo A., Marlnello F., Sartori L. (2016) “Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone.” *Science of the Total Environment*, 545-546, 227-235.

Basso B., Ritchie J.T., Cammarano D., Sartori L. (2011). "A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field.” *European Journal of Agronomy*, Vol 35, pp. 215-1.

Blackmore S., (2000). “The interpretation of trends form multiple yield maps.” *Computers and electronics in agriculture*. Vol 26, pp. 37-51.

Bodirsky BL, Popp A, Lotze-Campen H, Dietrich JP, Rolinski S, Weindl I, Schmitz C, Müller C, Bonsch M, Humpenöder F, Biewald A, Stevanovic M. (2014). “Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution.” *Nature Commun*. Vol. 5, p. 38-58.

Bucci, G.; Bentivoglio, D.; Finco, A. (2018). “Precision agriculture as a driver for sustainable farming systems: state of art in litterature and research”. *Quality –Access to Success.* Vol. 19, pp. 114-121.

Buckwell A., Nordang Uhre A., Williams A., Polakova J., Blum W.E.H., Schiefer J., Lair G.J., Heissenhuber A., Schiebl P., Kramer C., Haber W. (2014). “Sustainable

Intensification of European Agriculture" *Rural Investment Support for Europe, Bruxelles.*

Buttafuoco G., Castrignanò A., Colecchia A.S., Ricca N., (2010). "Delineation of management zones using soil properties and multivariate geostatistical approach." *Italian Journal of Agronomy*. Vol 5, pp. 323-332.

Carr P.M., Carlson G.R., Jacobsen J.S., Nielsen G.A., Skogley E.O., (1991). "Farming soils, not fields: A strategy for increasing fertilizer profitability". *Journal of Production Agriculture*. Vol 4, pp. 57-61.

Casa, R. (2016). Agricoltura di Precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali. Milano: Edagricole.

Castrignanò A., Landrum C., De Benedetto D., (2015). "Delineation of management zones in precision agriculture by integration of proximal sensing with multivariate geostatiscs, exemples of sensor data fusion." *Agriculture Conspectus Scientificus.* Vol 80, pp. 39-45.

Commissione Europea (2012). "Produttività e sostenibilità dell'agricoltura". Bruxelles, COM (2012) 79 del 29.02.2012.

Daughtry, C.S.T. et al. (2000). "Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectace". Remote sensing of environment. Vol 74, pp 229-239

Debaeke, P, Rouet, P. & Justes, E. (2006). "Relationship Between the Normalized SPAD Index and the Nitrogen Nutrition Index: Application to Durum Wheat". *Journal of Plant Nutrition*,29:1, 75-92.

Delin S., Linden B., Berglund K. (2005). "Yield and protein response to fertilizer nitrogen in different parts of a cereal field: Potential of site-specific fertilization". *European Journal of Agronomy*, 22 (3), 325-336.

Evans RJ, (1989). "Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants". *Oecol*. 78(1):9-19.

Ferrise R., Triossi A., Stratonovitch P., Bindi M., Martre P. (2010). “Sowing date and nitrogen fertilisation effects on dry matter and nitrogen dynamics for durum wheat: An experimental and simulation study”. *Field Crops Research* Vol 117, pp. 245–257.

Fleming K.L., Westfall D.G., Wiens D.W., Brodahl M.C., (2000). “Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application”. *Precision Agriculture*, Vol 2, pp. 201-215.

Gebbers R., Adamchuk V. (2010). Precision Agriculture and Food security. *Science*, 327, 828-831.

Giles J. (2015). “Nitrogen study fertilizers fears of pollution”. *Nature* 433, 791 (2005).

Gholizadeh, A. et al. (2017). “Leaf chlorophyll and nitrogen dynamics and their relationship to low land rice yield for site-specific paddy management”. *Information processing in agriculture* Vol. 4, pp. 259-268.

Grahmann K., Verhulst N., Peña R. J., Buerkert A, Vargas-Rojas L, Govaerts B. (2014). “Durum wheat (Triticum durum L.) quality and yields as affected by tillage-straw management and nitrogen fertilization practice under furrow-irrigated conditions”. *Field Crops Research* Vol 164, pp 166-177.

Gualandi E. (2015). “La diffusione su scala reale e i possibili risparmi operativi. Speciale Agricoltura di precisione”. *Terra e Vita*, 40, 32-34.

Heege H.J. (2013) “Site-specific fertilizing” In: H.J. Heege (Ed.), *Precision in Crop Farming, Springer*, pp. 193-271.

Hirel B, Tétu T, Lea PJ, Dubois F, 2011.”Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture”. *Sustainability-Basel* . Vol. 3, pp.1452-85.

Iocola I, Bassu S, Farina R, Antichi D, Basso B , Bindi M, Dalla Marta A, Danuso F, Doro L, Ferrise R, Giglio L, Ginaldi F, Mazzoncini M, Mula L, Orsini R, Corti G, Pasqui M, Seddaiu G, Roggero PP, 2017. “Can conservation tillage mitigate climate change impacts in Mediterranean cereal systems? A soil organic carbon assessment using long term experiments”. *Eur. J. Agron.* 90:96-107.

Justes, E., B. Mary, J. M. Meynard, J. M. Machet, and L. Thelier-Huche. (1994). "Determination of critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops". *Annals of Botany.* Vol.74, pp. 397–407.

Kassam A., Friedrich T., Derpsch R., Lahmar R., Mrabet R., Basch G., González-Sánchez E.J., Serraj R. (2012). "Conservation agriculture in the dry Mediterranean climate". *Field Crops Research* Vol 132, pp. 7-17.

Khosla R., Inman D., Westfall D.G. (2005). "Optimum N management using site-specific management zones". In: *John V. Stafford (Ed.), Precision Agriculture '05*, Wageningen University Publishers, Wageningen, pp. 827-834.

Kitchen N.R., Snyder C.J., Franzen D.W., Wiebold W.J. (2002). "Educational Needs of Precision Agriculture". *Precision Agriculture*. Vol.3, pp. 341-351.

Knight S., Miller P., Orson J. (2009). "An up-to-date cost/benefit analysis of precision farming techniques to guide growers of cereals and oil seeds". *Research Review*, 71, HGCA.

Koch B., Khosla R., Frasier W.M., Westfall D.G., Inman D. (2004). "Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones". *Agronomy Journal.* Vol. 96, pp.1572-1580.

Lark R.M. (1998). "forming spatially coherent regions by classification of multivariate data". *International journal of Geographical Information Science* Vol.12 pp. 83-98.

Lazzari M., Longoni A., Beretta E. (2015). "Indagine e messa a punto di un modello di valutazione sulle tecniche di agricoltura di precisione per l'incremento della Sostenibilità economica ed ambientali delle produzioni agricole milanesi", CQCB, Milano, 1-61.

Lemaire, G., and J. M. Meynard. (1997). "Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data". In Diagnosis of the nitrogen status in crops, ed. G. Lemaire, 45–55. Berlin: Springer Verlag.

Lénces E., Takács I., Takács-György K. (2014). "Farmers' Perception of Precision

Farming Technology among Hungarian Farmers". *Sustainability,* Vol 6, pp. 8452-8465.

Lin FF, Qiu LF, Deng JS, Shi YY, Chen LS, Wang K, 2010. "Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status". *Comput. Electron. Agric.* 71: S60-5.

López-Garrido R, Madejón E, Murillo JM, Moreno F, 2011. "Short and long-term distribution with depth of soil organic carbon and nutrients under traditional and conservation tillage in a Mediterranean environment (southwest Spain)". *Soil Use Manage*. Vol.27, pp.177-85.

Marinello F., Pezzuolo A., Sartori L. (2016). "Quando conviene l'impiego dei droni in agricoltura". *l'informatore Agrario,* 2.

Malhi S.S.,Grant C.A., Johnston A.M., Gill K.S. (2001). "Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review". *Soil & Tillage Research* Vol 60, pp. 101–122.

Matese A., Toscano P., Di Gennaro S.F., Genesio L., Vaccari F. P., Primicerio J., Belli C., Zaldei A., Bianconi R., Gioli B., (2015). "Intercomparasion of UAV. aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture". *Remote sensing*. Vol 7, pp. 2971-2990.

Mccann B.L., Pennock D.J., Van kessel C., Walley F.L., (1996). "The development of management units for site specific farming", In: P.C. Robert et al (Eds). Proceedings of the 3rd international conference on precision agriculture, Madison, WI: ASA, CSSA, and SSSA, pp. 295-302.

Moore I.D., Gessler P.E., Peterson G.A. (1993). "Soil attribute prediction using terrain analysis". *Soil science Society of America Journal*. Vol 57, pp.443-452.

Mulla D.J., (2013). "Twenty five years of remote sensing agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps". *Biosystems engineering.* Vol 114, pp. 358-371.

Nolan S.C., Goddard T.W., Lohstraeter G., (2000). "Assessing management units on tolling topography", In: Precision agriculture [CD-ROM]. Proceedings of the 5th

international conference on precision and other resource management. Madison WI, ASA, CSSA, and SSSA.

Oliver M. A. (2013). “An overview of precision agriculture”, in: M.A. Olier, T.F.A. Bishop, B.P. Marchant (Eds) Precision agriculture for sustainability and environment protection, Routledge, 3-19.

Prost L., Jeuffroy M.H. (2007) Replacing the nitrogen nutrition index by the chlorophyll meter to asses wheat N status, Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag (Germany), 2007, 27 (4), pp.321-330.

Raun WR, Johnson GV, (1999). “Improving nitrogen use efficiency for cereal production”. *Agron. J.* Vol.91, pp.357-63.

Ravier C, Jeuffroy MH, Gate P, Cohan JP, (2017). “Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization”. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* Vol.110, pp.117-34.

Seddaiu G., Iocola I., Farina R., Orsini R., Iezzi G., Roggero P.P., (2016). “Long-term effects of tillage practices and N fertilization in rainfed Mediterranean cropping systems: durum wheat, sunflower and maize grain yield”. *European Journal of Agronomy.*

Stagnari F, Ramazzotti S, Pisante M, 2009. “Conservation Agriculture: A Different Approach for Crop Production through Sustainable Soil and Water Management: a review”. In: Lichtfouse E, ed. Organic Farming, Pest Control and Remediation of Soil Pollutants. Dordrecht, NL: Springer; 2009. pp 56-83.

Sutton M.A., Van Grinsven H. (2011) “Summary for policy makers”, *The European Nitrogen Assessment*, Cambridge University Press, pp. 24.

Tey Y.S., Brindal M. (2012). “Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications”. *Precision Agriculture*. Vol 3, pp.713-730.

Tou J.T., Gonzalez R.C., (1974). Pattern recognition principles, Addison-Wesley, Reading.

Westhoek H.J., Overmars K.P., Van Zeitjs H. (2013). “The provision of public goods by agriculture: critical questions for effective and efficient policymaking”. *Environmental science & policy*, XXXII.

Wood, C.W; Reeves, D.W. and Himelrick, G.G (1993). “Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status and crop yield: A review”. *Procedings Agronomy society of N.Z.* Vol. 23, pp. 1-7.

Xie Y, Xiong Z, Xing G, Sun G, Zhu Z, 2007. “Assessment of nitrogen pollutant sources in surface waters of Taihu Lake region”. *Pedosphere* 17:200-8.

Yuan, Z et al. (2015). “Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyll meter readings”. *Field Crops Research*. Vol 185; pp. 12-20.

Zavattaro L. , Grignani C. , Acutis M. , Rochette P. (2012). “Mitigation of environmental impacts of nitrogen use in agriculture”. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol 147; pp. 1-3.

Zhang N., Wang M., Wang N. (2002). “Precision Agricultural: a worldwide overview”. *Computers and Electronics in Agriculture.* Vol. 36, pp. 113-132.

Zheng HL, Liu YC, Qin YL, Chen Y, Fan MS, (2015). “Establishing dynamic thresholds for potato nitrogen status diagnosis with the SPAD chlorophyll meter”. *J. Integr. Agr.* Vol.14, pp.190-5.

Ziadi, N., G. Bélanger , A. Claessens, L. Lefebvre, N. Tremblay, A.N. Cambouris, et al. (2010). Plant-based diagnostic tools for evaluating wheat nitrogen status. *Crop Sci*. Vol.50, pp.2580-2590.