



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E
AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN: SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

DETERMINAZIONE DI ZONE OMOGENEE PER
APPLICAZIONI DI AGRICOLTURA DI PRECISIONE SU
FRUMENTO DURO
(*Triticum turgidum* subsp. *durum* Desf)

Zone management determination for precision agriculture application
on durum wheat (*Triticum turgidum* subsp. *durum* Desf.)

TIPO TESI: sperimentale.

Studente:
FLAVIO TASSONI

Relatore:
DOTT. ROBERTO ORSINI

Correlatore:
DOTT. MARCO FIORENTINI

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

ELENCO DELLE TABELLE.....	6
ELENCO DELLE FIGURE	7
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	10
CAPITOLO 1 AGRICOLTURA DI PRECISIONE	12
1.1 Introduzione all'agricoltura di precisione	12
1.2 Origini e diffusione	13
1.2.1 L'agricoltura di precisione nel mondo	16
1.2.2 L'agricoltura di precisione in Italia.....	17
1.3 Variabilità spazio-temporale nell'agricoltura di precisione	19
1.4 Data fusion.....	21
1.5 Telerilevamento in agricoltura di precisione.....	22
1.5.1 Il telerilevamento nel dominio ottico e nella fluorescenza.	24
1.6 Monitoraggio della vegetazione nel dominio ottico.....	27
1.6.1 Indici di vegetazione	27
1.7 Piattaforme satellitari per l'agricoltura di precisione.....	30
1.7.1 Valutazione dei costi delle immagini satellitari.....	32
1.8 Piattaforme a controllo remoto in agricoltura di precisione.....	34
1.8.1 Tipologie di SAPR.....	35
1.8.2 Operazioni per il rilievo da SAPR	36
1.9 Sensori per i rilievi prossimali sulle colture.....	37
1.9.1 Misuratori di clorofilla.....	40
1.10 Le zone omogenee	42
1.10.1 Metodologie di clustering dei dati.	43
1.11 Fertilizzazione di precisione	44
1.11.1 Concimazione azotata di precisione.....	46
1.12 Breve valutazione economica sull'agricoltura di precisione.	50
1.12.1 Effetti sul capitale fisso.....	50
1.12.2 Effetti sul capitale circolante	51

1.12.3 Effetti sul lavoro	51
1.12.4 Effetti sui ricavi	51
CAPITOLO 2 MATERIALI E METODI	53
2.1 Sito sperimentale.....	53
2.2 Campionamenti eseguiti.....	56
2.2.1 Fenologia	56
2.2.2 Peso fresco	56
2.2.3 Peso secco	57
2.2.4 Letture SPAD.....	57
2.2.5 Numero spighe/m ²	58
2.2.6 Numero di cariocidi per spiga	58
2.2.7 Peso dei mille semi	59
2.2.8 Componenti della resa	59
2.3 Riassunto delle date di campionamento e variabili misurate	60
2.4 Voli con SAPR per le operazioni di telerilevamento	61
2.4.1 Pianificazione del volo.....	64
2.5 Processamento delle immagini.....	64
2.6 Delineazione delle zone omogenee.....	65
2.6.1 L' algoritmo di clusterizzazione k-means.....	66
2.7 Analisi statistica	68
CAPITOLO 3 RISULTATI	70
3.1 Andamento termo-pluviometrico.....	70
3.2 Biomassa.....	72
3.3 Variabili produttive	72
3.4 Letture SPAD.....	73
3.5 Indici di vegetazione	74
3.6 Mappe degli indici di vegetazione	75
3.6.1 Indice NDRE.....	75
3.6.2 Indice NDVI	76
3.7 Correlazioni tra gli indici di vegetazione ed i parametri rilevati con i campionamenti	77
3.8 Zone omogenee.....	82
CONCLUSIONI	84
BIBLIOGRAFIA	87

RINGRAZIAMENTI 95

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1. Sensori satellitari a diversa risoluzione messi a confronto.	32
Tabella 2. Costo delle immagini satellitari.	33
Tabella 3. Risultati della concimazione a rateo variabile su riso applicando sensori ottici prossimali.	39
Tabella 4. Schematizzazione delle operazioni colturali eseguite per il frumento nell'annata 2019/2020; T = aratura a 40 cm + 1 affinamento.	55
Tabella 5. Date e variabili misurate presso l'azienda agricola Guzzini.	60
Tabella 6. Indici di vegetazione calcolati e relative formule.	65
Tabella 7. Temperatura media e precipitazioni del periodo novembre 2019 – luglio 2020; Recanati.	70
Tabella 8. Peso fresco e secco della biomassa rilevati presso l'azienda agricola Guzzini.	72
Tabella 9. Variabili produttive relative all'azienda agricola Guzzini.	73
Tabella 10. Letture SPAD relative all'azienda agricola Guzzini.	73
Tabella 11. Indici di vegetazione Normalized Difference Red-Edge (NDRE) e Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dell'azienda agricola Guzzini.	75

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1. Primo esempio di mappa di prescrizione proposto nel 1929 da Linsley e Bauer per la correzione del pH.	14
Figura 2. Numero totale di pubblicazioni scientifiche sull'agricoltura di precisione estratte dal database bibliografico Scopus (Elsevier) mediante i termini di ricerca "precision agriculture" e "precision farming" per il periodo 1990-2015, suddivise per il paese di affiliazione degli autori.	17
Figura 3. Mappa della resa di frumento di tre annate agrarie (Buttafuoco et al., 2016). ..	21
Figura 4. Combinazione di più layer informativi per l'ottenimento di zone omogenee per la gestione della concimazione a rateo variabile. Per ogni zona verrà calcolata una propria dose di fertilizzante.	22
Figura 5. Le diverse bande nel dominio ottico ed infrarosso della radiazione elettromagnetica.	24
Figura 6. Forma della relazione tra NDVI e LAI.	29
Figura 7. Variazione della riflettanza in funzione dello stato di salute della vegetazione in confronto con i valori tipici del suolo.	30
Figura 8. Correlazione tra prezzo minimo per area e risoluzione spaziale delle immagini satellitari.	33
Figura 9. Break even point (punto di pareggio) delle immagini satellitari in ettari.	34
Figura 10. SAPR di medie dimensioni utilizzato per il telerilevamento in agricoltura di precisione.	36
Figura 11. Spandiconcime a rateo variabile che effettua la distribuzione del fertilizzante azotato sul riso in maniera sito specifica, grazie all'utilizzo di due sensori prossimali (frecce rosse) che rilevano in continuo lo stato fisiologico della coltura sfruttando la riflettanza.	39
Figura 12. Misuratore di clorofilla portatile SPAD Minolta 502.	40
Figura 13. Esempio di lettura con SPAD su una foglia di frumento.	41
Figura 14. Esempio di curva di risposta riferita alla produzione di una generica coltura rispetto a crescenti dosi di concime (si ipotizza qui azotato). Sono riportate le dosi di concime DEO e DTO. La produzione y è ottenuta ad una generica dose di concime F . La produzione y_0	

è ottenuta in assenza di concimazione azotata ed indica il potenziale legato alla fertilità naturale del suolo (FN) da (Grignani et al., 2016).	47
Figura 15. Appezamento di terreno dove si è svolta la sperimentazione e relativa suddivisione per quanto riguarda le due dosi di azoto distribuite. In figura sono riportati anche i punti di campionamento georeferenziati per ogni fase fenologica.	53
Figura 16. Prelievo del campione di biomassa in fase di antesi del frumento e georeferenziazione del punto.	56
Figura 17. Lettura SPAD su foglia di frumento.....	57
Figura 18. Conteggio del numero di cariossidi per spiga, all'interno di vaschette di alluminio.	58
Figura 19. Prelievo della biomassa per il successivo rilevamento dei componenti delle rese.	59
Figura 20. Trebbia da banco usata per la trebbiatura delle spighe di frumento, questa operazione permette la separazione della granella dalla pula.	60
Figura 21. SAPR DJI Matrice 600 pro.....	62
Figura 22. Camera multispettrale MAIA S2.....	63
Figura 23. Georeferenziazione dei Ground Control Points (marker) identificati mediante pannelli di polistirolo bianchi.....	64
Figura 24. Punti in uno spazio euclideo che subiranno il processo di clusterizzazione....	67
Figura 25. Due cluster con i relativi centroidi evidenziati in rosso.....	67
Figura 26. Precipitazioni novembre 2019 - luglio 2020; Recanati.	71
Figura 27. Andamento termico novembre 2019 – luglio 2020; Recanati.	71
Figura 28. Mappe dell'indice di vegetazione NDRE dell'azienda agricola Guzzini. In alto sono riportate le mappe di marzo ed aprile derivate dalla camera MAIA S2, in basso le mappe della camera MAIA WV2. Le stampe di queste mappe sono state ottenute con il software QGIS.	76
Figura 29. Mappe dell'indice di vegetazione NDVI dell'azienda agricola Guzzini. In alto sono riportate le mappe di marzo ed aprile derivate dalla camera MAIA S2, in basso le mappe della camera MAIA WV2. Le stampe di queste mappe sono state ottenute con il software QGIS.	77
Figura 30. Correlazione tra il peso fresco e l'NDRE-WV2 del frumento rilevati a marzo.	78
Figura 31. Correlazione tra il peso fresco e l'NDRE-WV2 del frumento rilevati ad aprile.	78

Figura 32. Correlazione tra il peso fresco e l'NDRE-S2 del frumento rilevati a marzo. ..	79
Figura 33. Correlazione tra il peso fresco e l'NDRE-S2 del frumento rilevati ad aprile..	79
Figura 34. Correlazione tra peso fresco e l'NDVI-WV2 del frumento rilevati a marzo...	80
Figura 35. Correlazione tra il peso fresco e l'NDVI-S2 del frumento rilevati ad aprile...	80
Figura 36. Correlazione tra letture SPAD e l'NDRE WV2 rilevati sul frumento.....	81
Figura 37. Correlazione tra letture SPAD e l'NDRE S2 rilevati sul frumento.	81
Figura 38. Mappa delle zone omogenee dell'azienda agricola Guzzini, ottenute con il software "R" applicando l'algoritmo di clusterizzazione k-means.....	82

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Le sfide che dovrà affrontare la popolazione mondiale nel prossimo futuro sono molteplici, quella principale sarà il soddisfacimento del fabbisogno alimentare di un numero sempre maggiore di individui, che con ogni probabilità raggiungerà i nove miliardi fra vent'anni, con tecniche di produzione che hanno un ridotto impatto ambientale sul nostro pianeta.

In base all'ultimo rapporto sulla sicurezza alimentare globale "*The State of Food Security and Nutrition in the World*", nel 2019 quasi 690 milioni di abitanti del pianeta hanno sofferto la fame. Si è verificato un aumento di 10 milioni di unità rispetto all'anno precedente e di quasi 60 milioni in più rispetto a cinque anni fa. A questi si aggiungono le tantissime persone che, a causa dell'aumento nei costi dei beni alimentari e della scarsa disponibilità di denaro, non hanno accesso a una dieta sana o nutriente. In totale, sono circa 2 miliardi, nel mondo, le persone che affrontano livelli moderati o gravi di insicurezza alimentare (FAO, 2019).

Le pressioni ambientali ed economiche sull'agricoltura sono aumentate repentinamente negli ultimi decenni, per la crescente domanda di cibo da parte di una popolazione in continuo aumento (Baudron & Giller, 2014), insieme ad una maggiore domanda di energia derivante da prodotti agricoli (Foley et al., 2011). Allo stesso tempo c'è la tendenza crescente delle sfide ambientali che il mondo si trova ad affrontare quotidianamente, aumentando quindi la necessità di mettere in atto pratiche di conservazione ambientale (Foley et al., 2011). Queste due esigenze in rapida crescita sono difficili da soddisfare contemporaneamente, perciò si stanno moltiplicando le sfide che l'agricoltura deve affrontare in questo secolo. La comunità scientifica sta rispondendo a queste sfide sviluppando metodi sostenibili per migliorare l'efficienza degli input agricoli con l'obiettivo di massimizzare la produzione e allo stesso tempo minimizzare l'impatto ambientale.

Uno dei metodi promettenti è quello di variare l'applicazione degli input secondo le esigenze delle colture e del suolo con l'approccio chiamato agricoltura di precisione.

Per raggiungere le due esigenze sopra citate l'agricoltura del futuro guidata dai progressi scientifici, tra cui l'agricoltura di precisione, dovrà puntare ai seguenti risultati:

- aumento delle rese per unità di superficie;

- maggiore efficienza d'uso dell'acqua e dei nutrienti;
- uso sostenibile dei fitofarmaci;
- prevenzione dell'erosione dei suoli e recupero della loro fertilità;
- conservazione degli ecosistemi e della biodiversità animale e vegetale non solo quella di potenziale interesse agricolo.

Gli obiettivi di questa tesi di laurea sono:

1. la valutazione degli effetti di due livelli di concimazione azotata, sui parametri colturali e le componenti della produzione del frumento duro;
2. l'individuazione di correlazioni tra gli indici di vegetazione produzione di biomassa, unità SPAD e stato nutrizionale della coltura in oggetto, combinando i dati derivati da sensori prossimali e remoti;
3. la valutazione e validazione di una procedura analitica per la determinazione delle zone omogenee all'interno dell'appezzamento.

La sperimentazione è stata condotta presso l'azienda agricola Guzzini Francesco di Recanati.

Capitolo 1

AGRICOLTURA DI PRECISIONE

1.1 Introduzione all'agricoltura di precisione

Negli ultimi decenni sono state proposte molte definizioni per l'agricoltura di precisione, la più conosciuta ed accreditata è quella di un approccio alla gestione del processo produttivo agricolo che consenta di “fare la cosa giusta al momento giusto, al punto giusto” (Gabbers e Adamchuk, 2010). Questa definizione riassume in maniera efficace i principi e gli obiettivi dell'agricoltura di precisione: tenere conto della variabilità nel tempo e nello spazio dei fattori che influiscono sul processo produttivo agricolo, per migliorare l'efficienza degli input (acqua, fertilizzanti, sementi, prodotti fitosanitari, ecc.) nella gestione dinamica del processo.

Migliorare l'efficienza significa:

- utilizzare meno risorse per ottenere lo stesso risultato;
- ottenere un risultato migliore a parità di input utilizzati.

Quindi c'è uno stretto legame tra i principi fondamentali su cui si basa l'agricoltura di precisione e lo sforzo che viene fatto, sotto diversi aspetti, per aumentare la sostenibilità e ridurre l'impatto dell'agricoltura sull'ambiente.

Ad un primo approccio quindi sembrerebbe che gli obiettivi dell'agricoltura di precisione non si discostino molto da quelli delle buone pratiche agronomiche, queste però non tengono adeguatamente in considerazione la dinamicità dei sistemi agricoli causata dalla variabilità temporale che provoca diversi effetti per uno stesso intervento agronomico (ad es. concimazione e difesa fitosanitaria) eseguito nel corso degli anni e, in modo ancora più netto, dalla variabilità spaziale dei fattori che influiscono sulle produzioni, in particolare riferimento alla variabilità presente all'interno degli appezzamenti dovuta alla topografia, alle condizioni climatiche dell'area ed alle proprietà fisiche, chimiche e biologiche del suolo.

L'agricoltura di precisione si pone come obiettivo l'individuazione della variabilità spaziale e temporale, quindi la modulazione degli interventi in base a questa per ottimizzare i risultati del processo produttivo in termini economici e/o ambientali. Per fare ciò l'agricoltura di precisione si serve delle migliori tecnologie in termini di capacità di monitoraggio della

variabilità, per attuare una gestione idonea che ne tenga conto, chiamata gestione sito-specifica. Quindi la gestione agronomica sito-specifica punta a gestire il suolo, la coltura e le avversità tenendo conto della variabilità spazio-temporale all'interno degli appezzamenti.

Si può operare con:

- la continua variazione degli input in ogni punto dell'appezzamento in risposta alle esigenze del suolo e della coltura in quel determinato punto, rilevate attraverso sensori;
- la divisione dell'appezzamento in sotto zone chiamate zone omogenee, all'interno delle quali somministrare uniformemente l'input.

Non bisogna confondere l'agricoltura di precisione con l'informatizzazione o con l'introduzione di tecnologie elettriche o di sensoristica nell'azienda agraria, perché si può parlare di agricoltura di precisione solo quando questi strumenti vengono impiegati con un approccio sito-specifico, che permette la gestione della variabilità spaziale e temporale come descritto sopra.

1.2 Origini e diffusione

Gli agricoltori hanno usato l'approccio dell'agricoltura di precisione in modo informale per migliaia di anni. L'esperienza e la familiarità ha permesso loro di identificare aree specifiche di un campo, che fornivano regolarmente rese alte o basse (Fleming et al., 2000). In passato, l'esperienza e la tradizione hanno guidato l'applicazione di un rimedio appropriato, infatti l'esperienza agronomica era ed è tutt'ora considerata dagli agricoltori la chiave del successo dell'agricoltura. Tuttavia un approccio più obiettivo potrebbe essere sviluppato individuando e gestendo la variabilità del suolo attraverso la suddivisione di un campo in aree di ampia somiglianza, queste classi possono essere definite come zone omogenee o zone di gestione, in inglese management zones (MZ) e possono essere usate come la base per la maggior parte delle decisioni agricole (Nawar et al., 2017).

Possiamo affermare che l'agricoltura di precisione si sia sviluppata a partire dagli anni '80, anche se alcuni esempi che riguardano la conoscenza della variabilità spaziale dei fattori produttivi, nello specifico il suolo, appaiono fin dagli anni '20 con Harris et al.

In una pubblicazione del 1929 Linsley e Bauer forniscono le istruzioni per effettuare un campionamento del pH del suolo, secondo una griglia regolare (contando i passi non essendoci ancora il GPS) ed ottenere la prima mappa di prescrizione (Figura 1) con zone di applicazione di dosi diverse di correttivo (calcare) che veniva distribuito manualmente.

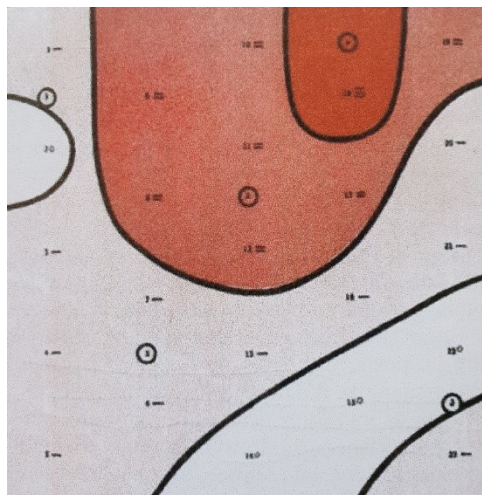


Figura 1. *Primo esempio di mappa di prescrizione proposto nel 1929 da Linsley e Bauer per la correzione del pH.*

Nel 1988 la AgChem Equipment Company del Minnesota (USA) introdusse sul mercato il primo spandiconcime a rateo variabile, tuttavia la ricerca agronomica non aveva ancora sviluppato le metodologie adeguate per il suo utilizzo. Per la prima volta emerse una problematica tipica dell'agricoltura di precisione, ovvero le tecnologie avanzano a una velocità maggiore rispetto alla capacità di sperimentarle e sfruttarle al meglio per la gestione agronomica.

Negli anni '60, grazie al lavoro di Matheron, ebbe inizio lo sviluppo della geostatistica nell'ambito della quale furono messe a punto tecniche di quantificazione ed analisi della variabilità spaziale, essenziali per l'agricoltura di precisione (Oliver, 2010).

Nel corso degli anni l'evento che ha determinato la definitiva affermazione dell'agricoltura di precisione è stata l'invenzione dei sistemi di posizionamento satellitare, in particolare il GPS (Global Position Service) americano concepito per scopi militari negli anni '80 e di cui fu autorizzato l'uso per scopi civili negli USA nel 1993.

Nasce il concetto di georeferenziazione che permette di attribuire delle coordinate geografiche (latitudine, longitudine e altitudine) ad un oggetto sulla superficie terrestre attraverso calcoli trigonometrici.

Frequentemente ci sono degli errori nel determinare la posizione sulla superficie terrestre, però per l'agricoltura di precisione si richiede un errore molto al di sotto del metro, si necessita quindi di correzioni che si effettuano grazie a satelliti aggiuntivi (es. sistema EGNOS di

satelliti europei), o reti di trasmettitori a terra oppure attraverso stazioni fisse posizionate in azienda che, tramite segnale di correzione differenziale cinematica in tempo reale conosciuto come Real Time Kinematic (RTK) limita l'errore a pochi centimetri.

L'uso del GPS anche per scopi civili ha permesso lo sviluppo di sistemi di guida assistita, semi-automatica e automatica nelle macchine agricole, con livelli di precisione e quindi di benefici via via crescenti. In generale questi sistemi di guida permettono di ottenere:

- una maggiore precisione delle lavorazioni;
- un risparmio di tempo e di fattori della produzione (gasolio, agrofarmaci, sementi e fertilizzanti) grazie all'eliminazione delle sovrapposizioni, quindi alla riduzione del numero delle passate;
- un minor affaticamento dell'operatore, che può rimanere più concentrato sul monitoraggio del corretto funzionamento delle macchine operatrici soprattutto quando si stanno distribuendo fattori della produzione;
- la possibilità di svolgere operazioni colturali anche in condizioni di scarsa visibilità ad esempio di notte o in presenza di nebbia.

Un'altra applicazione resa possibile dal GPS in agricoltura, nei primi anni '90, fu lo sviluppo di sistemi di mappatura delle produzioni installati sulle mietitrebbiatrici, i quali ebbero un iniziale sviluppo seguito poi da un veloce abbandono, a causa dell'incapacità della gestione dei dati derivanti da questo sistema senza averne quindi un ritorno economico.

A partire dagli anni '90 la delimitazione, all'interno degli appezzamenti, di zone uniformi per caratteristiche del suolo e ritenute adatte ad una gestione uniforme, fu introdotta nelle pianure centrali degli Stati Uniti grazie all'uso di immagini acquisite da piattaforme aeree o satellitari. A tale scopo vennero anche impiegati a partire dagli anni '80 i primi sensori EM38 in grado di misurare le proprietà geo-elettriche del suolo.

La necessità di quantificare e gestire, oltre la variabilità spaziale del suolo, quella stagionale della coltura, portò allo studio durante gli anni '90 presso l'università dell'Oklahoma, di sensori ottici da installare sulle macchine agricole, in grado di fornire un indice di vegetazione (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) in maniera rapida ed economica. L'obiettivo era lo sviluppo di un sistema affidabile e selettivo in campo per gestire la concimazione azotata a rateo variabile, differenziando le dosi all'interno di un appezzamento. Questa ricerca universitaria portò allo sviluppo del sistema GreenSeeker (Trimble) negli USA (Solie et al., 2003). In Europa ricerche simili iniziarono in Germania presso l'università di Kiel, poi proseguirono presso il centro di ricerca privato a Hanninghof della multinazionale dei

fertilizzanti Hydro-Agri (in seguito Yara), portarono allo sviluppo di un sistema analogo, commercializzato nel 1999 col nome di N-sensor (Lammel et al., 2001). In alternativa al monitoraggio dello stato di nutrizione azotata svolto da terra con questi sensori prossimali, furono sviluppate in Francia tecniche basate sui dati satellitari, mediante un grande progetto di ricerca internazionale che coinvolgeva i centri dell'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), l'agenzia spaziale francese, società private e organizzazioni di produttori agricoli (Guerif e King, 2010). Queste ricerche furono all'origine del servizio commerciale Farmstar (Blondlot et al., 2005) che forniva mappe di prescrizione per la concimazione azotata a partire da dati satellitari, disponibile in Francia a partire dal 2001.

La possibilità di differenziare l'applicazione degli input all'interno degli appezzamenti coltivati, determinò la messa a punto di un protocollo standardizzato di comunicazione tra le trattrici e le macchine operatrici dei diversi costruttori. Già a fine anni '90 fu messo a punto uno standard di comunicazione tra sistemi, nell'ambito del protocollo ISO 11783, denominato ISO-BUS.

1.2.1 *L'agricoltura di precisione nel mondo*

Attualmente l'agricoltura di precisione trova crescente diffusione soprattutto nei paesi in cui c'è un'agricoltura più avanzata. Indagini effettuate mostrano che in generale l'adozione dei sistemi di guida satellitare è più alta rispetto a quella per applicazioni sito-specifiche (rateo variabile), inoltre la percentuale di agricoltori che hanno adottato tecnologie di raccolta dei dati è più alta rispetto alla percentuale di agricoltori che sfrutta realmente queste informazioni (OECD, 2016).

Il maggior tasso di adozione dell'agricoltura di precisione attualmente si registra negli Stati Uniti, dove molte tecnologie di questo settore sono state sviluppate per prime. Si stima che circa l'80% degli agricoltori statunitensi utilizzi sistema di guida GPS, di cui 50% guida automatica e 30% guida assistita. Gli agricoltori che usano sistemi GPS per il controllo delle sezioni delle irroratrici sono il 33% e per la semina il 24%. La concimazione a rateo variabile è adottata dal 30% degli agricoltori, mentre la difesa fitosanitaria dal 13%. Il 4% degli agricoltori usa sistemi geoelettrici di mappatura del suolo, la stessa percentuale usa sensori prossimali per il rilevamento del contenuto di clorofilla. Circa il 40% delle mietitrebbiatrici sono equipaggiate con sistemi di mappatura delle produzioni.

In Australia, nel 2012, gli agricoltori che usano le tecniche di agricoltura di precisione si attestano al 20%. Un'elevata diffusione di queste tecniche è presente anche in Sud America, in particolare in Argentina e Brasile.

In Europa il tasso di adozione è stato finora principalmente concentrato nelle grandi aziende cerealicole del Centro-Nord Europa, con la maggior diffusione in Germania, Gran Bretagna, Francia e Paesi Scandinavi, con una crescente adozione nei Paesi dell'Est.

Finora le tecnologie di agricoltura di precisione vengono impiegate prevalentemente nei sistemi colturali erbacei (cerealicoltura), ma c'è una crescente diffusione in viticoltura ed anche in orticoltura.

1.2.2 L'agricoltura di precisione in Italia

L'agricoltura di precisione in Italia, pur non avendo potuto contare su finanziamenti destinati alla ricerca comparabili a quelli degli altri paesi, ha avuto comunque una buona produttività scientifica, che la colloca al nono posto a livello mondiale come numero di pubblicazioni scientifiche (Figura 2).

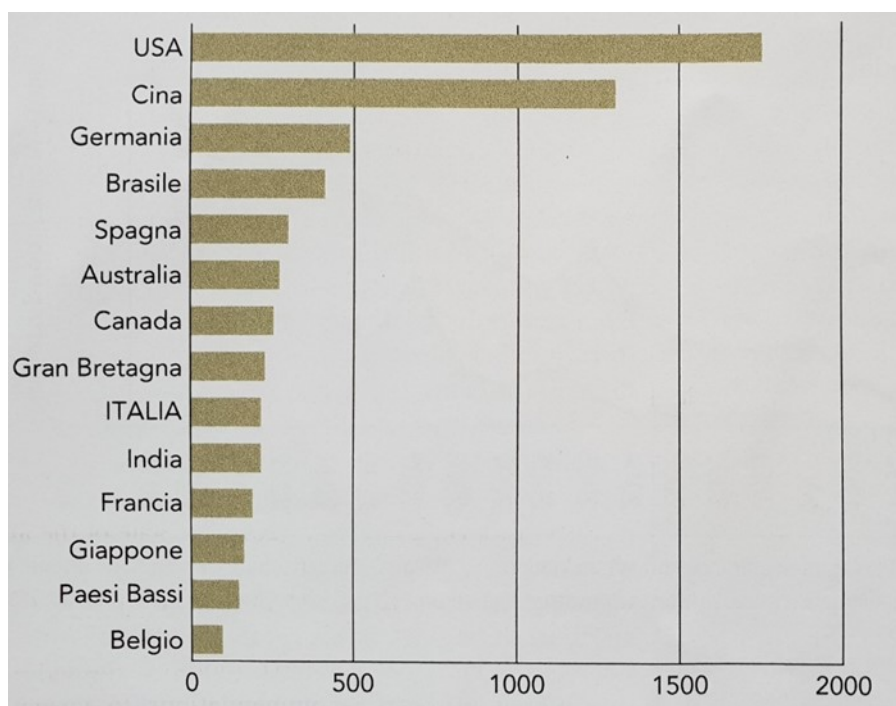


Figura 2. Numero totale di pubblicazioni scientifiche sull'agricoltura di precisione estratte dal database bibliografico Scopus (Elsevier) mediante i termini di ricerca "precision agriculture" e "precision farming" per il periodo 1990-2015, suddivise per il paese di affiliazione degli autori.

Nel 2015 l'allora Ministro delle Politiche Agricole Maurizio Martina lanciò l'obiettivo dell'introduzione e gestione dell'agricoltura di precisione nelle aziende agricole italiane, che nel 2020 avrebbe dovuto raggiungere almeno il 10% della SAU. In questo periodo, in parallelo all'enunciazione di questo obiettivo, si è consolidata nel mondo agricolo la consapevolezza che, indipendentemente dalla politica, l'innovazione tecnologica è un mezzo necessario e/o comunque utile per lo sviluppo più corretto e sostenibile delle attività di settore.

Per far fronte ai bisogni emersi in campo e lungo la filiera agricola e all'ambizioso obiettivo dichiarato sei anni fa, negli ultimi anni sono stati messi in campo vari strumenti di incentivazione all'acquisto e gestione di tali tecnologie per le imprese agricole.

Le principali agevolazioni all'introduzione e gestione delle tecnologie di agricoltura di precisione sono contenute sia nei provvedimenti tradizionalmente specifici dell'agricoltura (Pac e Psr), sia in provvedimenti non settoriali, in particolare quelli orientati a favorire gli investimenti in innovazione tecnologica e robotizzazione: legge Sabatini e cosiddetta Industria 4.0 nelle sue evoluzioni, prima con lo strumento dell'iper ammortamento e poi con quello del credito d'imposta, proprio quest'ultimo ha permesso la fruibilità del settore agricolo alla 4.0.

In questo momento, volendo trarre alcune considerazioni sull'efficacia delle azioni e sul raggiungimento degli obiettivi auspicati per l'agricoltura di precisione, è difficile verificare la superficie realmente interessata dalle innovazioni tecnologiche, però è possibile analizzare l'andamento dei mercati di riferimento delle diverse articolazioni tecnologiche maggiormente disponibili:

- tecnologie considerate di base o di primo livello, cioè le guide assistite/autonome con supporti GPS/RTK;
- tecnologie considerate di secondo livello, cioè la gestione delle attività colturali su base storica e/o in tempo reale con supporti on field (sui mezzi) e/o da remoto (droni/satelliti), che permettono la somministrazione degli input produttivi a rateo variabile;
- tecnologie considerate di terzo livello, ovvero la gestione delle attività colturali su base storica e/o in tempo reale con supporti on field (sui mezzi) e/o da remoto (droni/satelliti), congiunta con la gestione dei parametri quali-quantitativi delle produzioni in campo (mappatura delle produzioni), a disposizione dei produttori e degli operatori lungo la filiera agroalimentare, grazie a questo ultimo aspetto si hanno a disposizione dei dati utili per le scelte future degli agricoltori e si riesce ad implementare la tracciabilità dei prodotti agricoli;

- tecnologie considerate di quarto livello o superiore, ossia quelle che riguardano la piena digitalizzazione delle aziende e il pieno controllo e gestione del dato, con l'introduzione di sistemi con tecnologie informative e intelligenti (Internet of Things, Dss, ecc.)

Nel mercato italiano, facendo riferimento al quinquennio 2015-2020, queste tecnologie di agricoltura di precisione sono presenti nei 2/3 degli acquisti delle macchine agricole per quanto riguarda le tecnologie di primo e secondo livello, mentre il terzo livello di tecnologia è presente per meno di 1/3 degli acquisti effettuati. Il quarto livello di agricoltura di precisione per ora è quasi esclusivamente legato a esperienze pilota e non ancora in piena diffusione su scale reali nel mondo agricolo italiano, anche per riscontrata scarsa offerta e conoscenza delle aziende che sviluppano tali sistemi (Gualandi, 2020).

1.3 Variabilità spazio-temporale nell'agricoltura di precisione

L'applicazione dell'agricoltura di precisione richiede scelte gestionali basate sulla conoscenza della variabilità delle proprietà del suolo e delle colture (Oliver, 2013), di conseguenza è di fondamentale importanza disporre di strumenti idonei per l'analisi di dati spazio-temporali (Kitchen et al., 2002).

Già osservando ad occhio nudo un appezzamento di terreno è possibile notare delle differenze, soprattutto per quanto riguarda il colore sia del suolo che della coltura. Negli ultimi anni grazie all'utilizzo di satelliti e droni dotati di apposite camere multispettrali, queste differenze possono essere apprezzate in modo nettamente migliore.

Ad esempio quando si parla di variabilità spaziale si può fare riferimento alle differenze cromatiche di un suolo nudo dovute ad un diverso contenuto idrico e/o di sostanza organica, oppure alla differente tessitura del suolo presente all'interno dell'appezzamento, alla diversa profondità del suolo, tra la parte a monte e quella a valle, in un appezzamento collinare dovuta a fenomeni erosivi. Le differenze di colore che emergono sulle colture agrarie dipendono dal grado di copertura del suolo, quindi dalla superficie fogliare rispetto ad una determinata superficie di suolo cioè il LAI (Leaf Area Index) e dallo stato nutrizionale e sanitario della coltura che influenzano la quantità di clorofilla.

Tutte queste differenze all'interno di un appezzamento influenzano lo sviluppo e la produzione delle colture.

Un ruolo importante è rivestito anche dalla variabilità temporale, cioè la tendenza di un determinato parametro ad assumere valori differenti nel tempo in corrispondenza dello stesso

punto dell'appezzamento. Si possono individuare due componenti a carico di questa variabilità:

- variabilità temporale a carico del medesimo punto del campo, riscontrabile nel corso della stessa annata, il fattore tenderà a manifestare un'intensità differente nel corso del tempo in base a condizioni ambientali e ad interazioni con altri fattori, come la disponibilità di azoto nel corso dell'annata, influenzata questa sia dall'andamento climatico ed anche da altri fattori come le caratteristiche del suolo;
- variabilità temporale osservabile nel corso di annate differenti, in questo caso si ha a che fare con un parametro che tende a variare nel tempo indipendentemente dall'eventuale variazione subita nel corso della singola stagione colturale. Un tipico esempio è l'andamento della resa produttiva nel corso degli anni, in corrispondenza dello stesso punto dell'appezzamento, che può assumere valori differenti, fermo restando che per tale zona la produttività complessiva può risultare diversa rispetto a quella di zone limitrofe (Basso et al., 2007).

L'efficacia delle decisioni gestionali in agricoltura di precisione dipende quindi, sia dall'accuratezza delle stime della variabilità spaziale delle proprietà del suolo e delle colture, che dalla capacità di riconoscere e gestire i fattori che influenzano tale variabilità (Kitchen et al., 2002).

Nuovo concetto fondamentale è quello della scala spaziale di variabilità, perché mentre non è completamente nuovo in agricoltura il considerare la dimensione spaziale, lo è invece il riferire ad una posizione geografica specifiche proprietà del suolo e della coltura e prendere decisioni sulla base della loro variazione nello spazio (Kitchen et al., 2002).

La valutazione dei potenziali benefici e costi relativi a ciascuna decisione operativa richiede la conoscenza delle effettive richieste sito specifiche della coltura e lo sviluppo di un piano efficiente di gestione dell'agricoltura di precisione.

Le mappe delle diverse proprietà del suolo e della coltura (Figura 3) aiutano gli agricoltori a comprendere come le informazioni spaziali possano essere utilizzate praticamente nella conduzione agronomica dell'azienda.

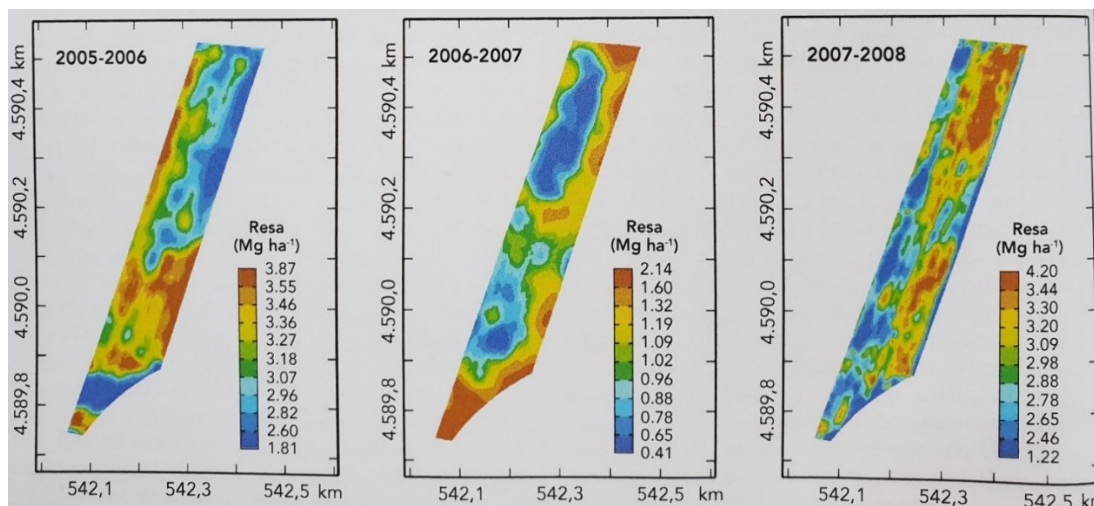


Figura 3. Mappa della resa di frumento di tre annate agrarie (Buttafuoco et al., 2016).

Una pratica efficace dell'agricoltura di precisione va oltre la semplice produzione di mappe che debbono essere opportunamente interpretate (Kitchen et al., 2002). Assume quindi particolare importanza la pianificazione del campionamento e le modalità di raccolta dei dati, per gli effetti che possono avere sulle decisioni derivanti dai risultati delle analisi condotte su tali dati. Una buona preparazione agronomica è fondamentale nel definire la gerarchia dei fattori limitanti la resa delle colture e come questi fattori possono essere gestiti efficientemente nel processo produttivo primario.

La geostatistica consente la quantificazione e la modellizzazione della variabilità spaziale di quelle proprietà ambientali ritenute rilevanti per l'applicazione dell'agricoltura di precisione. Solo a partire dagli anni '80 la geostatistica è stata applicata alla scienza del suolo (Burgess e Webster, 1980, 1981) mentre i primi riferimenti sull'agricoltura di precisione sono riportati in Mulla e Hammond (1988) ed in Mulla (1991, 1993). Da allora in poi l'interesse crescente per la geostatistica in agricoltura di precisione è documentato nei numerosi articoli pubblicati sulle riviste internazionali specializzate e negli studi presentati nei convegni sull'agricoltura di precisione.

1.4 Data fusion

La grande produzione di dati a diverse scale spaziali e temporali, grazie all'impiego di una grande varietà di sensori sta determinando una vera rivoluzione nel campo dell'informazione in agricoltura. Pertanto è di fondamentale importanza definire delle tecniche idonee di analisi e sintesi dei dati per avere una gestione efficiente dell'agricoltura di precisione.

I dati forniti dal telerilevamento cioè satelliti e SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) e dai sensori prossimali, sono molto numerosi, riferiti a diverse scale spaziali e temporali e soggetti ad errori di misura sia sistemici che casuali. Inoltre, sebbene ci siano sempre differenze fra i vari strumenti, un approccio efficace di integrazione dei dati (data fusion) (Figura 4) potrebbe trarre vantaggio dalle loro caratteristiche complementari, combinando i dati in modo tale che il risultato sia statisticamente robusto.

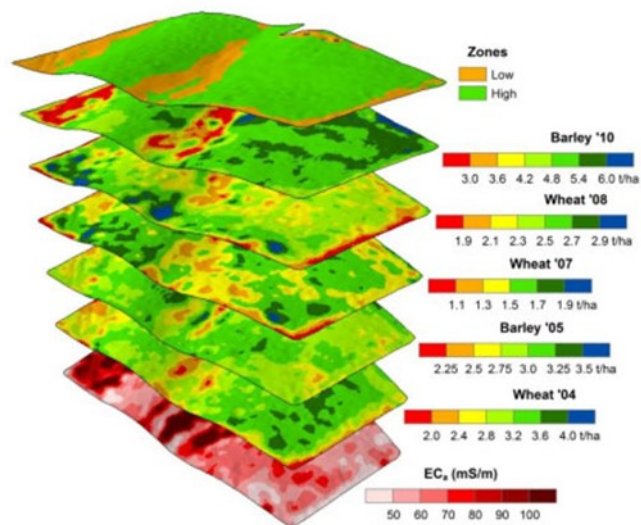


Figura 4. *Combinazione di più layer informativi per l'ottenimento di zone omogenee per la gestione della concimazione a rateo variabile. Per ogni zona verrà calcolata una propria dose di fertilizzante.*

Il problema che sorge in un processo di multi-sensor data fusion è determinare la migliore procedura che combini i dati forniti da più sensori. Il modo migliore è l'approccio statistico, questo permette l'impiego di espliciti modelli probabilistici per esprimere relazioni tra i sensori e le diverse sorgenti d'informazione.

1.5 Telerilevamento in agricoltura di precisione

Il telerilevamento comprende un insieme di tecniche che permettono di rilevare, da una certa distanza le proprietà fisiche o chimiche di un materiale. Nel caso dell'agricoltura di precisione il materiale oggetto del rilievo è costituito dai tessuti vegetali delle colture e dal suolo. Tutte le diverse tecniche di telerilevamento necessitano di sensori, sistemi in grado di

percepire da remoto (in inglese telerilevamento si traduce in “remote sensing”) un segnale proveniente dall’oggetto o dalla superficie da rilevare e di registrarlo.

I progressi raggiunti nello sviluppo di sistemi di telerilevamento sempre più potenti ed accurati, uniti all’accesso sempre più facile ai relativi dati, costituisce una delle spinte allo sviluppo dell’agricoltura di precisione. Infatti grazie al telerilevamento è possibile ottenere informazioni sullo stato delle colture e sulle proprietà del suolo in una maniera rapida ed economica, rendendo fattibile l’esplorazione della variabilità spaziale e temporale, grazie alla notevole riduzione dei costi derivante dall’eliminazione dei lunghi e laboriosi rilievi in campo.

La distanza del sensore dall’oggetto di cui si desidera conoscere le proprietà può variare da pochi metri a centinaia di chilometri, in funzione della piattaforma sulla quale i sensori sono trasportati, si parla pertanto di:

- sensori prossimali quando sono trasportati a bordo delle macchine agricole;
- sensori aerotrasportati a bordo di aerei o più frequentemente da droni cioè SAPR (Sistemi aeromobili a pilotaggio remoto);
- sensori satellitari in orbita su piattaforme satellitari.

Le ultime due categorie possono essere raggruppate nella macrocategoria dei sensori remoti.

I sistemi di telerilevamento sfruttano quei processi in cui vi è un’interazione tra la radiazione elettromagnetica ed i materiali o le superfici da cui si vogliono trarre informazioni. La radiazione elettromagnetica è il risultato di una variazione di intensità e di direzione di un campo elettrico e magnetico, che si manifesta con delle oscillazioni periodiche di questi campi. Può essere quindi immaginata come delle onde che si propagano nello spazio ad una velocità costante, queste possono essere caratterizzate in base alla loro ampiezza, lunghezza e frequenza. L’ampiezza è l’altezza delle onde misurata in metri (m), la lunghezza corrisponde alla distanza tra due onde successive si misura in millimetri (mm), micrometri (μm) o nanometri (nm), e la frequenza è il numero di onde che arrivano in un punto in un dato intervallo di tempo, si misura quindi in cicli al secondo (Hertz).

Tutti i corpi che hanno una temperatura superiore allo zero assoluto ($-273,15^\circ\text{C}$) emettono radiazione elettromagnetica. I corpi che hanno temperature più elevate emettono radiazione elettromagnetica ad una lunghezza d’onda più corta (frequenza maggiore) rispetto ai corpi che hanno una temperatura più bassa. I corpi emettono radiazione in un intervallo di lunghezze d’onda diverse, che viene chiamato spettro. La radiazione elettromagnetica incidente ha caratteristiche differenti in funzione delle diverse lunghezze d’onda di zone dello spettro, dette

bande, tali proprietà determinano la tipologia di interazione con le superfici in funzione delle loro caratteristiche chimico fisiche.

Il dominio ottico include la luce percepita dai nostri occhi, ed è quella utilizzata dalle piante per la fotosintesi, infatti si parla di spettro del visibile (VIS) o di radiazione fotosinteticamente attiva (PAR-Photosynthetically Active Radiation) con una lunghezza d'onda compresa tra 400 e 700 nm. Andando oltre si ha la banda dell'infrarosso (IR), ulteriormente suddiviso in vicino infrarosso o NIR (Near Infra Red 700-1300 nm), infrarosso corto o SWIR (Short Wave Infra Red 1300-2500 nm), infrarosso medio o MWIR (Medium Wave Infra Red 3000-8000 nm) ed infrarosso termico o TIR (Thermal Infra Red 7000-20000 nm) (Figura 5). Sia la banda del visibile che quella dell'infrarosso possono essere sfruttate nel telerilevamento e trovare applicazione successiva nell'agricoltura di precisione.

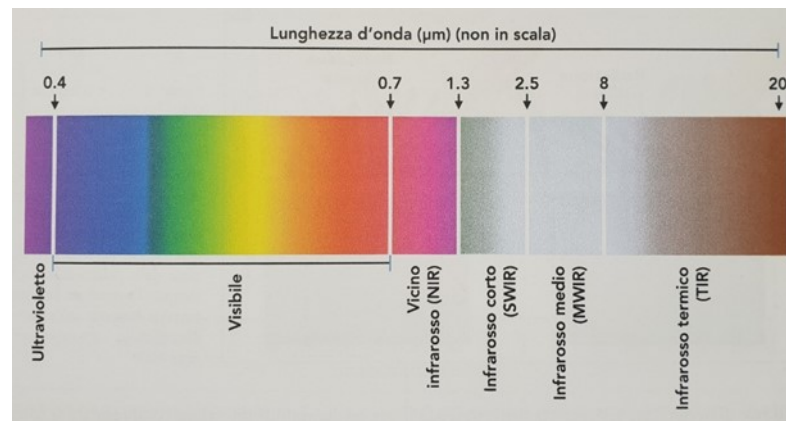


Figura 5. Le diverse bande nel dominio ottico ed infrarosso della radiazione elettromagnetica.

La radiazione ad onda corta possiede un contenuto di energia più alto rispetto a quella ad onda lunga, è la temperatura del corpo che emette la radiazione a determinare le lunghezze d'onda. La radiazione nello spettro ultravioletto UV e nello spettro del visibile è emessa dal sole che ha una temperatura media di oltre 6000°C, mentre la radiazione nello spettro dell'infrarosso è emessa prevalentemente da corpi con temperatura molto più bassa come il suolo e la vegetazione.

1.5.1 Il telerilevamento nel dominio ottico e nella fluorescenza.

Il telerilevamento nel dominio ottico (VIS e NIR) utilizza sensori passivi che rilevano la radiazione di origine solare riflessa dalle superfici (es. suolo e/o vegetazione). In generale

quando la radiazione elettromagnetica, ad una data lunghezza d'onda, colpisce un materiale può subire tre destini:

- può essere assorbita;
- può attraversare il materiale ed essere trasmessa;
- può essere riflessa e ritornare indietro nello spazio.

Le caratteristiche fisiche e chimiche della superficie colpita dalla radiazione determinano in quali lunghezze d'onda dello spettro della radiazione incidente prevale la riflessione, la trasmissione o l'assorbimento. Osservando quindi lo spettro della radiazione riflessa è possibile desumere delle informazioni sul materiale. Facendo un esempio la clorofilla assorbe la radiazione visibile nelle bande del blu (430-475 nm) e del rosso (620-700 nm), riflettendo invece nella banda del verde (490-550 nm), proprio per questo le foglie ci appaiono verdi.

La modalità con cui avviene la riflessione della radiazione dipende:

- dalle caratteristiche fisiche della superficie (liscia o rugosa);
- dall'angolo d'incidenza con cui arriva la radiazione;
- dalla radiazione solare incidente (irradianza);
- dal passaggio della radiazione solare attraverso l'atmosfera terrestre.

Diventa necessario eliminare l'influenza dell'irraggiamento solare e dell'atmosfera per poter ottenere un segnale che dipenda solo dalle caratteristiche della superficie (suolo e/o vegetazione), ottenendo una grandezza detta riflettanza. Questa rappresenta il rapporto tra l'energia elettromagnetica incidente sulle superfici e l'energia riflessa da queste ed ha quindi un valore compreso tra 0 (corpo nero) e 1 (corpo bianco).

Lo spettro della radiazione emessa dal sole, viene modificato dai componenti dell'atmosfera terrestre quali gas ed aerosol (pulviscolo, vapore acqueo, ecc.), che assorbono e diffondono la radiazione solare diretta e riflessa dalla Terra.

La radiazione elettromagnetica (radianza) rilevata dal sensore posto al di sopra di una determinata superficie, oltre ad essere espressione delle caratteristiche di riflessione della superficie stessa, sarà fortemente influenzata dalle condizioni di illuminazione ed atmosferiche al momento del rilievo. Per poterla trasformare in una grandezza che dipende solo dalle caratteristiche della superficie cioè in riflettanza superficiale, bisogna effettuare delle correzioni (atmosferiche, geometriche e radiometriche).

I sensori usati nel telerilevamento ottico, sono in grado di registrare un segnale, proporzionale alla radianza spettrale, non per tutto lo spettro, ma per sezioni limitate di questo, ovvero in un numero predeterminato di bande. Il numero e l'ampiezza delle bande determinano quella che viene chiamata la risoluzione spettrale.

I sensori principalmente utilizzati in agricoltura di precisione per il telerilevamento nel dominio ottico sono due:

- I sensori multispettrali che utilizzano di solito 4-10 bande le quali hanno un'ampiezza elevata, dai 15 ai 70 nm. Questo vuol dire che non sono capaci di distinguere specifici dettagli dello spettro di riflettanza.
- I sensori iper-spettrali hanno centinaia di bande, di ampiezza minore rispetto ai precedenti che va dai 5 ai 10 nm, quindi possono individuare specifici picchi di assorbimento, caratteristici di determinate sostanze (ad esempio un particolare pigmento fotosintetico).

La zona dello spettro che viene coperta dal sensore prende il nome di range spettrale e va a condizionare le sue possibili applicazioni, la maggior parte dei sensori copre le bande del VIS e del NIR.

Quando la radiazione elettromagnetica colpisce un corpo, una parte può venire assorbita dalle molecole che lo compongono. Questo assorbimento comporta anche un trasferimento di energia, che fa spostare gli elettroni delle molecole da un orbitale ad un altro. In alcuni casi le molecole possono perdere energia emettendo radiazione ad una lunghezza d'onda più lunga rispetto a quella che l'ha colpita. Questo fenomeno viene chiamato fluorescenza ed avviene per alcuni pigmenti presenti nelle foglie tra cui la clorofilla. La maggior parte dell'energia fornita dalla luce che è assorbita dalla clorofilla viene usata per il processo fotosintetico, tuttavia una parte di energia fornita dalla luce è in eccesso, quindi per evitare danni alle cellule viene dispersa sotto forma di calore e di fluorescenza. La fluorescenza della clorofilla avviene con l'emissione di luce in due bande specifiche centrate a 690 nm (rosso) e 740 nm (rosso lontano). L'entità della fluorescenza è in relazione con l'efficienza della fotosintesi, che a sua volta è influenzata dallo stress idrico e termico, è quindi un'utilissima fonte d'informazione su come sta procedendo il processo fotosintetico. È stato osservato che la fluorescenza di altri pigmenti con un picco nel blu (440 nm) o nel verde (530 nm) è in relazione con le infezioni fungine della foglia, fornendo un utile strumento di diagnosi precoce.

Il rilevamento della fluorescenza in condizioni di pieno campo non è facile, perché si tratta di un segnale molto debole, mascherato dalla riflettanza che è molto più forte. Però negli ultimi anni la ricerca ha permesso lo sviluppo di sensori aerotrasportati in grado di rilevare la fluorescenza e sono stati effettuati studi utilizzando anche sensori satellitari a bassa risoluzione spaziale, che hanno dimostrato le grandi potenzialità di queste tecniche per il monitoraggio della produttività della vegetazione e degli stress (Guan et al., 2016).

1.6 Monitoraggio della vegetazione nel dominio ottico.

Nella banda del visibile (400-700 nm) la maggior parte della luce blu e rossa che colpisce la vegetazione è assorbita dalla clorofilla per la fotosintesi, con picchi di assorbimento a 470 nm e 670 nm, invece un picco di riflessione è presente nel verde. Il comportamento spettrale di una coltura, cioè di un manto vegetale (canopy), è legato soprattutto alla concentrazione di pigmenti clorofilliani per area fogliare e dall'abbondanza di foglie, espressa attraverso l'indice di area fogliare LAI (Leaf Area Index).

La concentrazione di clorofilla per area fogliare è una delle variabili più importanti a livello diagnostico per evidenziare nelle colture lo stato di nutrizione azotata, dato che c'è una relazione tra questa e l'azoto fogliare (Vouillot et al., 1998).

Per quanto riguarda la regione dell'infrarosso vicino, NIR (700-1300 nm), i pigmenti cellulari e la cellulosa sono trasparenti a queste lunghezze d'onda e perciò l'assorbanza fogliare in questa regione è molto bassa. Nonostante ciò la riflettanza può raggiungere valori molto alti (fino a 0,6 e oltre) a causa delle riflessioni multiple tra le pareti cellulari idratate e gli spazi fogliari intercellulari pieni d'aria.

Il repentino aumento della riflettanza passando dal visibile all'infrarosso vicino (oltre 700 nm) viene chiamato red-edge, questa regione è perciò molto importante per avere informazioni sullo stato della vegetazione. La riflettanza NIR dipenderà dunque dai parametri strutturali della parte aerea della vegetazione (LAI, spessore del mesofillo, forma ed angolazione delle foglie). Questa relazione rende il NIR la regione spettrale di riferimento per la valutazione delle caratteristiche strutturali delle colture (LAI, biomassa verde).

Le lunghezze d'onda più utilizzate nelle attività di monitoraggio della vegetazione sono green, red e NIR, teoricamente il red e il NIR sono considerate le bande con le quali si può stimare lo stato nutrizionale, lo sviluppo e la biomassa di una coltura.

1.6.1 Indici di vegetazione

Esistono due approcci diversi per il monitoraggio, a partire da dati ottici rilevati, delle variabili di interesse agronomico delle colture:

- Empirico che utilizza la correlazione evidenziata in numerosissimi studi (Baret & Guyot, 1991) (Jacquemoud et al., 1992) (Broge & Leblanc, 2001) esistente tra i diversi indici di vegetazione, ottenuti come combinazioni algebriche delle riflettanze nelle diverse bande e le variabili agronomiche o biofisiche delle colture.
- Fisico cioè basato su modelli matematici che descrivono i processi fisici d'interazione tra la radiazione solare e la vegetazione.

Gli indici di vegetazione possono essere utilizzati, grazie alla loro correlazione con il LAI e con la concentrazione di clorofilla, per valutare il vigore vegetativo o per stimare la biomassa verde e il potenziale fotosintetico di una coltura.

Si conoscono indici di vegetazione “broad band” ottenibili da combinazioni di bande spettrali larghe con ampiezza di 15-60 nm derivate da dati multispettrali, oppure indici di vegetazione “narrow band” ottenibili da bande spettrali strette, con ampiezza generalmente inferiore ai 10 nm derivante da dati iperspettrali. La maggior parte degli indici possono essere applicati sia nella forma “a banda larga” che “a banda stretta”.

Gli indici di vegetazione più semplici sono rapporti/differenze normalizzate incentrati sul contrasto tra la riflettanza della vegetazione nell’infrarosso vicino (NIR) e nel rosso rispetto al suolo e sono:

- Il *simple ratio* (SR) che è stato il primo indice elaborato per lo studio della vegetazione ed è ottenuto dal rapporto tra le riflettanze nel NIR e nel rosso. Può assumere valori tra 0 e 1 per il suolo e tra 6 e 10 per la vegetazione.

$$SR = \frac{r_{NIR}}{r_{RED}}$$

- Il *normalized difference vegetation index* (NDVI) è il più usato tra gli indici di vegetazione, ha il vantaggio di essere normalizzato e avere un campo di variazione tra 0 (suolo nudo) e 1 (massima copertura vegetale).

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

L’NDVI è correlato in maniera positiva con il LAI, quindi all’aumentare dell’indice di vegetazione in oggetto aumenta anche il LAI, la forma tipica della relazione tra indice NDVI e LAI (Figura 6) mostra che per valori di LAI maggiori di 2, l’NDVI tende a saturare, cioè aumenta in modo meno che proporzionale rispetto al LAI fino al raggiungimento di un asintoto.

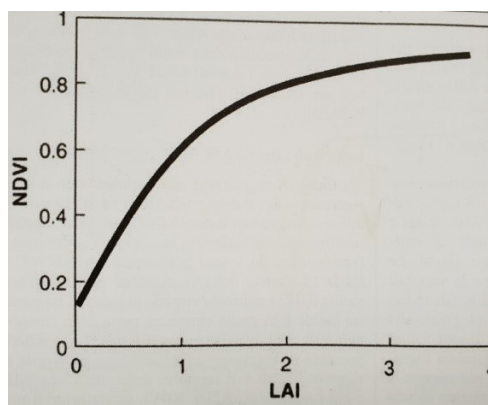


Figura 6. Forma della relazione tra NDVI e LAI.

Quindi ai fini della stima della variabilità spaziale della biomassa verde in un appezzamento coltivato l'indice NDVI sarà più efficace per intervalli di valori di LAI medi e bassi, mentre per valori di LAI superiori le differenze tenderanno ad essere rilevate con crescente difficoltà.

L'NDVI è piuttosto sensibile anche all'influenza della riflettanza del suolo ed all'effetto atmosferico e di illuminazione al momento del rilievo (posizione del sole e angolo di vista del sensore). A partire dall'NDVI e dal SR per porre rimedio ai problemi descritti sono state sviluppate altre famiglie di indici con l'obiettivo di:

1. ottenere caratteristiche di linearità della correlazione con i parametri biofisici;
2. insensibilità al contributo del suolo;
3. minimizzare l'influenza delle condizioni atmosferiche.

Un altro indice di vegetazione di rilievo è il *normalized difference red-edge* (NDRE) differisce dall'NDVI in quanto considera la banda del red-edge (RE) anziché quella del red. Il red-edge è una regione che segna il confine tra l'assorbimento della clorofilla nella banda visibile del rosso e la dispersione causata dalla struttura interna della foglia nella banda del NIR.

$$NDRE = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RE}}{\rho_{NIR} + \rho_{RE}}$$

Utilizzando l'NDRE è possibile individuare l'eventuale infestazione della coltura (Figura 7) da parte di patogeni e insetti, questo rappresenta un utile strumento per il monitoraggio e permette di intervenire con i mezzi di difesa nel momento più opportuno sulla coltura.

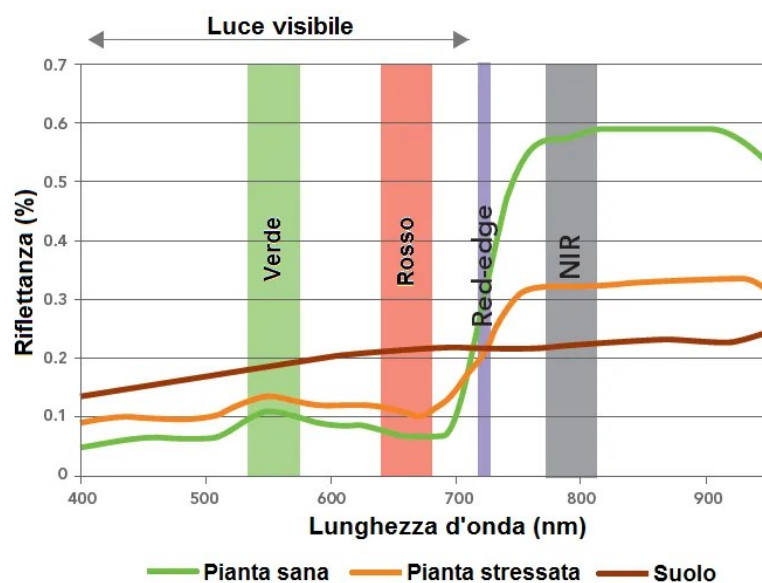


Figura 7. *Variazione della riflettanza in funzione dello stato di salute della vegetazione in confronto con i valori tipici del suolo.*

Oggi in letteratura non esistono indicazioni su quale indice di vegetazione abbia una maggiore correlazione con il LAI, la concentrazione della clorofilla e lo stato di nutrizione azotata delle colture, comunque l'NDVI rimane l'indice di vegetazione più usato a livello applicativo.

1.7 Piattaforme satellitari per l'agricoltura di precisione

I sistemi satellitari che trovano applicazione in agricoltura di precisione sono numerosi ed in continuo aumento, grazie al lancio di nuovi satelliti da parte di agenzie spaziali governative e società private. Inoltre negli ultimi anni l'attenzione dei fornitori di immagini satellitari per agricoltura di precisione è aumentata, portando ad un miglioramento della risoluzione. Attualmente esistono diversi servizi di immagini satellitari che forniscono prodotti diversi per esigenze diverse (Sozzi et al., 2018).

Le esigenze dell'agricoltura di precisione in questo campo sono:

- avere sistemi con elevata risoluzione spaziale ad esempio 20 m o meno;
- elevata frequenza di acquisizione, cioè un tempo di rivisitazione sullo stesso punto il più breve possibile, almeno un'acquisizione al mese (Sozzi et al., 2018) in modo

da poter consentire il monitoraggio delle condizioni delle colture in corrispondenza dei momenti chiave del ciclo colturale;

- risoluzione spettrale focalizzata sulle bande utilizzate per il calcolo degli indici di vegetazione quindi da 450 a 900 nm (Sozzi et al., 2018);
- basse esigenze di potenza per il calcolo e l'elaborazione dei dati (Sozzi et al., 2018).

Inoltre c'è maggiore interesse per i sistemi satellitari che forniscono le immagini gratuitamente o a basso costo, ad esempio quelli gestiti da agenzie spaziali governative, come l'Agenzia Spaziale Europea ESA (European Space Agency) o quella americana NASA (National Aeronautics and Space Administration).

I dati trasmessi dai satelliti vengono ricevuti da stazioni a terra ed elaborati, agli utenti vengono quindi forniti dei prodotti con diversi livelli di correzione, più di frequente dopo correzione radiometrica e geometrica, talvolta anche dopo correzione atmosferica.

È possibile distinguere diversi livelli di prodotti (immagine più informazioni aggiuntive sull'acquisizione):

- prodotti di livello zero (L0) corrispondenti ai dati grezzi;
- prodotti di livello uno (L1) a cui è stata applicata correzione radiometrica (L1A) e a cui è stata applicata correzione sia radiometrica che geometrica (L1B);
- prodotti di livello due (L2) a cui viene applicata anche la correzione atmosferica;
- prodotti di livello tre e quattro (L3) e (L4) comprendono ulteriori elaborazioni come ad esempio il calcolo degli indici di vegetazione e altre variabili biofisiche.

Attualmente la tendenza delle agenzie spaziali e dei fornitori privati è di rendere disponibili prodotti sempre più di alto livello cioè immagini già elaborate.

Alcuni sistemi satellitari ottici d'interesse per l'agricoltura di precisione sono i seguenti:

- Sentinel-2 è una costellazione di due satelliti (2A e 2B) dall'Agenzia Spaziale Europea che prevede l'acquisizione di immagini multispettrali con 12 bande. Le immagini Sentinel-2 hanno una risoluzione spaziale che va dai 10 ai 60 m a seconda delle bande spettrali. Le bande a 60 m sono concepite per consentire la correzione atmosferica e due bande nello SWIR (Short Wave Infra Red) per la discriminazione delle nuvole. Per l'agricoltura di precisione sono di rilevante interesse le bande nel Red Edge e NIR a 20 m e quelle nel VIS e NIR a 10 m. Queste caratteristiche facilitano la stima della clorofilla, quindi dell'azoto e del LAI (Vincini & Frazzi, 2013) (Verrelst et al., 2015). I due satelliti della missione

europea forniscono immagini multispettrali gratuite e riescono a garantire un tempo di rivisitazione di cinque giorni.

- WorldView-2 è un satellite con sensori multispettrali ad altissima risoluzione spaziale gestito dalla società americana DigitalGlobe; ha una risoluzione spaziale di 2 m con otto bande multispettrali. La presenza della banda red-edge e di due bande NIR insieme all'altissima risoluzione spaziale lo rendono molto adatto alle applicazioni in agricoltura di precisione, la frequenza di rivisitazione è di circa un giorno.
- WorldView-3 attualmente è il satellite che fornisce la migliore risoluzione spaziale e spettrale, è dotato delle medesime otto bande multispettrali del WorldView-2 con una risoluzione di 1,24 m, a queste si aggiungono altre otto bande nello SWIR (Short Wave Infra Red) e dodici bande appositamente concepite per la correzione atmosferica che sono dette CAVIS (Clouds, Aerosol, Vapors, Ice and Snow). Il tempo di rivisitazione è di un giorno. Le immagini fornite dai satelliti WorldView 2 e 3 sono a pagamento con un costo che oscilla tra i 20 e i 70 €/km² a seconda della tipologia richiesta.

1.7.1 Valutazione dei costi delle immagini satellitari.

Secondo l'analisi effettuata nello studio "Benchmark of Satellites Image Services for Precision Agricultural use" (Sozzi et al., 2018), che ha messo a confronto il costo e la risoluzione delle immagini derivanti da diverse piattaforme satellitari (Tabella 1), le principali voci di costo delle immagini satellitari sono rappresentate da:

- prezzo per unità di superficie;
- elaborazione dei dati;
- tempo di download.

Tabella 1. Sensori satellitari a diversa risoluzione messi a confronto.

	Spatial resolution <i>m</i>	Spectral resolution VIS/NIR <i>nm</i>	Radiometric resolution <i>bits pixel⁻¹</i>	Revisit time <i>dd</i>
Deimos-2	0.75	466-697/770-892	10	2
Dove (Planet)	3	420-700/770-900	16	1
GeoEye-1	0.5	450-690/780-920	11	3
Kompsat-2	1	450-690/760-900	14	6
Kompsat-3	0.7	450-690/760-900	14	3
Kompsat-3A	0.55	450-690/760-900	14	3
Landsat-7/8	15	450-690/770-900	8-12	8
Pleiades-1A/1B	0.5	430-720/750-950	12	1
RapidEye	5	440-685/690-850	12	5.5
Sentinel-2	10	458-680/785-900	16	5
Spot-6/7	1.5	455-695/760-890	12	1
WorldView-2/3/4	0.3-0.5	450-690/770-1040	11	1

Nella tabella 2 sono riportati i listini di diversi fornitori di immagini satellitari, l'area minima che è possibile richiedere e il prezzo minimo per area richiesta che è ottenuto moltiplicando il prezzo di listino per unità di superficie per l'area minima richiesta addizionata al costo del lavoro (100\$/ora) per l'elaborazione dell'immagine satellitare, considerando che per tale operazione sia necessaria un'ora di tempo.

Tabella 2. Costo delle immagini satellitari.

	Minimum order area <i>ha</i>	Price per unit <i>\$ ha⁻¹</i>	Minimum area price* <i>\$</i>	Computational demand <i>KB ha⁻¹</i>
Deimos-2	10 000	0.060	700	50
Dove	10 000	0.012	218	8
GeoEye-1	10 000	0.275	2850	100
Kompsat-2	2 500	0.055	237.5	20
Kompsat-3	2 500	0.110	375	50
Kompsat-3A	2 500	0.160	500	100
Landsat-7/8	3 700 000 (one scene)	0	100	0.5
Pleiades-1A/1B	10 000	0.213	2225	100
Rapideye	10 000	0.012	218	4
Sentinel-2	1 200 000 (one scene)	0	100	0.63
Spot-6/7	10 000	0.045	550	8
WorldView-2/3/4	10 000	0.275	2850	130

Anche se il costo unitario per ettaro delle immagini è irrisorio, la superficie minima acquistabile va ad influenzare in modo notevole il costo complessivo delle immagini satellitari e del download. Come fattore primario di scelta dei sensori va presa in considerazione la loro risoluzione spaziale, che è legata al prezzo minimo per area. In Figura 8 si mostra la forte correlazione inversa tra il prezzo minimo per area e la risoluzione spaziale delle immagini (dimensione pixel).

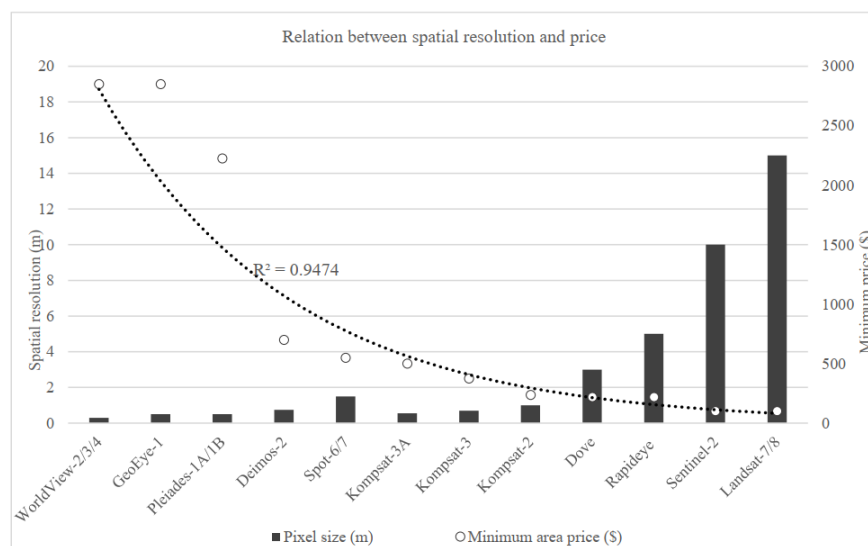


Figura 8. Correlazione tra prezzo minimo per area e risoluzione spaziale delle immagini satellitari.

Nella Figura 9 sono riportati il numero di ettari a partire dal quale diventa conveniente l'uso di immagini satellitari derivanti dalle diverse piattaforme, tenendo conto dei vantaggi economici medi apportati dall'agricoltura di precisione che si aggirano sui 30 \$/ha come proposto da (Colaço & Bramley, 2018).

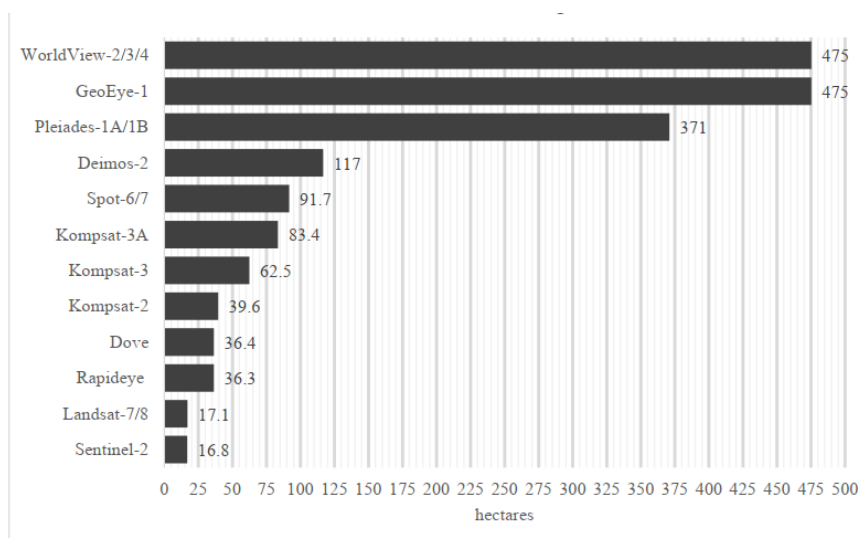


Figura 9. Break even point (punto di pareggio) delle immagini satellitari in ettari.

1.8 Piattaforme a controllo remoto in agricoltura di precisione

Il ruolo principale ricoperto dalla sensoristica in agricoltura di precisione è quello di effettuare osservazioni e fornire informazioni georiferite, che rappresentano uno degli input principali nel processo di elaborazione dell'informazione a fini gestionali in agricoltura di precisione. Tuttavia le tradizionali piattaforme, come ad esempio i satelliti, impiegate per attività di telerilevamento possono presentare alcuni limiti quali:

- limitata versatilità;
- scarsa flessibilità operativa;
- ridotta risoluzione spaziale e temporale.

Per superare queste limitazioni nell'ultimo decennio, hanno trovato una progressiva diffusione dei nuovi strumenti di monitoraggio, cioè aerei a pilotaggio remoto definiti UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o in italiano SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto), più comunemente detti droni. Attualmente sono presenti in commercio una vasta gamma di sensori (es. camere multispettrali ed iper-spettrali) adatti ad essere portati sui droni, con caratteristiche sempre più performanti e prezzi competitivi.

I SAPR sono in grado di volare autonomamente, possono essere controllati a distanza, quando rimangono nel campo visivo del pilota a terra; oppure possono volare autonomamente seguendo un insieme di punti preimpostati “percorso”, detti way points, definito dall’utente, questo è reso possibile grazie ad un complesso sistema di sensori di controllo di volo quali giroscopi, bussola magnetica, GNSS (Global Navigation Support System cioè il GPS), sensore di pressione e accelerometri triassiali, controllati da un microprocessore.

I punti di forza dell’impiego dei SAPR nel telerilevamento sono l’alta risoluzione spaziale a terra, centimetrica e la possibilità di un controllo altamente flessibile e tempestivo delle colture, grazie ai tempi ridotti di pianificazione del volo.

Queste caratteristiche rendono i SAPR particolarmente adatti nei sistemi agricoli medio-piccoli, da 1 a 10 ettari e in comprensori caratterizzati da elevata frammentazione della superficie coltivata, o in condizioni di elevata eterogeneità all’interno degli stessi appezzamenti (A Matese et al., 2013), condizioni per il quale la risoluzione spaziale dei sensori satellitari non è sufficiente a generare dati utili.

Altri vantaggi dei SAPR rispetto alle tradizionali piattaforme satellitari sono il basso costo d’investimento iniziale o di servizio, l’alta manovrabilità e la possibilità di rendere autonoma e ripetibile l’operazione di monitoraggio a basse quote ed in ambienti complessi (Alessandro Matese et al., 2015). Per queste ragioni, nei prossimi anni si prevede un’enorme crescita di questo settore come impiego nell’agricoltura di precisione.

1.8.1 Tipologie di SAPR

Con il termine SAPR (Figura 10) si definisce un complesso sistema di acquisizione dati, costituito dalla piattaforma impiegata per il monitoraggio remoto, uno o più sensori che rappresentano parte del payload supportato dal drone e una stazione di controllo a terra gestita da una o più persone in aggiunta ad un pilota. Le tipologie di SAPR ad uso civile, militare, e scientifico sono diverse e possono essere classificate in base alla dimensione, l’altitudine e la durata del volo, distinguiamo quindi:

- MAV (Micro Air Vehicles) caratterizzati dalle loro piccole dimensioni, massimo 15 cm e pochi grammi di peso:
- VTOL (Vertical Take-Off and Landing) sono piattaforme a decollo e atterraggio verticale, molto usate nelle zone dove il terreno rappresenta una limitazione;

- LASE (Low Altitude Long-Endurance) sono in grado di volare a poche migliaia di metri di altitudine per lunghi periodi e possono supportare diversi chilogrammi di carico utile;
- HALE (High Altitude Long-Endurance) sono le piattaforme più grandi e complesse in grado di volare ad altezze di 20000 m per più di 30 ore.

I SAPR più utilizzati in agricoltura di precisione sono i VTOL e i LASE scelti in funzione delle superfici da coprire e della conformazione del terreno. Invece i LALE e gli HALE sono usati principalmente per scopi militari.



Figura 10. *SAPR di medie dimensioni utilizzato per il telerilevamento in agricoltura di precisione.*

1.8.2 Operazioni per il rilievo da SAPR

Prima di effettuare un rilievo con SAPR devono essere effettuate una serie di operazioni che vengono riportate qui di seguito in maniera molto sintetica:

1. Pianificazione del volo che viene effettuata in ufficio con software dedicato, partendo da un'attenta analisi della zona d'interesse e dalla valutazione delle esigenze di monitoraggio. In questa fase si va a determinare la quota di volo in funzione delle caratteristiche dei sensori, si identifica la rotta di way points da seguire, si definisce la velocità di volo, la frequenza di acquisizione delle immagini e il grado di sovrapposizione delle immagini.
2. Esecuzione del volo ed acquisizione dei dati operazione che si può eseguire manualmente da terra (pilotaggio manuale) o in modo automatico seguendo la rotta

di way points preimpostata, quest'ultima soluzione è quella solitamente impiegata nel telerilevamento per applicazioni in agricoltura di precisione.

3. Calibrazione radiometrica è eseguita per normalizzare le immagini in funzione delle reali condizioni di luce presenti al momento del volo, si effettua con l'utilizzo di pannelli target di calibrazione. La correzione atmosferica si effettua per eliminare l'influenza dello strato d'aria tra sensore e superficie monitorata, si usano modelli di trasferimento radiativo come ad esempio il MODTRAN, analogamente per come avviene per i satelliti. Infine la correzione geometrica ha lo scopo di eliminare le deformazioni spaziali introdotte dal sistema di acquisizione (sensore), si effettua con l'utilizzo dei Ground Control Points (GCPs) cioè punti georiferiti con sistemi GPS differenziali ad altissima risoluzione spaziale (cm).
4. Mosaicatura e georeferenziazione permettono la ricostruzione delle superfici e la generazione di orto-immagini mosaicate, il mosaico può essere ricostruito artificialmente mediante procedure automatizzate di matching digitale con appositi software.
5. Elaborazione delle immagini attraverso il calcolo di indici di vegetazione, utilizzando ad esempio il software QGIS.

1.9 Sensori per i rilievi prossimali sulle colture

La necessità di monitorare le variazioni dello stato della coltura nel tempo e nello spazio con un'elevata frequenza ha portato allo sviluppo di tecniche di rilevamento con sensori prossimali.

Con il termine sensori prossimali si intende l'insieme delle tecnologie di misura in cui il sensore è a contatto diretto, o al massimo ad una distanza di due metri dall'oggetto da misurare (Rossel et al., 2010).

Con questi strumenti è possibile avere informazioni in tempi rapidi e relativamente a basso costo riguardo a: copertura vegetale, stato nutrizionale, efficienza del sistema fotosintetico e del processo di evapotraspirazione, stato idrico, concentrazione di pigmenti secondari, stato fitosanitario e risposta produttiva. Tutti questi sensori necessitano di calibrazioni sito-specifiche, prima di eseguire le misure in campo.

L'impiego dei sensori prossimali operanti nel dominio ottico-riflessivo si basa sulla misura della radiazione elettromagnetica riflessa o emessa dai corpi e consente di rilevare

rapidamente, in modo non distruttivo e su ampie superfici informazioni fondamentali per la misura indiretta dello stato della vegetazione.

La risposta spettrale della vegetazione, si caratterizza per alcuni tratti distintivi, legati principalmente alle caratteristiche di assorbimento dei pigmenti, questi tratti sono alla base dell'uso dei sensori prossimali per il monitoraggio delle colture. Particolarmente rilevanti sono il forte contrasto nelle caratteristiche di riflettanza tra il rosso ed il vicino infrarosso, ed il conseguente comportamento nella risposta spettrale nella regione di transizione, il red-edge. Questa regione, collocata tra 680 e 750 nm, è fortemente sensibile alle variazioni nello stato fisiologico delle colture (Carter & Knapp, 2001).

I sensori ottici prossimali, utilizzati per la valutazione dello stato della vegetazione, vengono classificati secondo vari criteri:

- Passivi, quando utilizzano la radiazione solare o altre fonti di illuminazione esterne allo strumento;
- Attivi, se possiedono una fonte di illuminazione propria, facendo quindi ricorso a fonti di illuminazione artificiale. Questa tipologia di sensori è meno influenzata da variazioni nelle condizioni di illuminazione esterna. Possono essere caratterizzati da sorgente luminosa selettiva oppure pancromatica (Gebbers, 2015);
- Multispettrali quando registrano la radiazione riflessa in un numero ridotto di bande larghe, solitamente inferiore a 10;
- Iperspettrali rilevano la riflettanza in un numero elevato di bande strette, da centinaia a migliaia;
- Utilizzati in modalità stazionaria;
- Utilizzati in modalità mobile, quindi possono essere montati sui trattori e/o su apposite barre di attrezzature per la concimazione e difesa, effettuando così la raccolta dei dati in continuo.

Alcuni sensori prossimali multispettrali in commercio più diffusi sono:

- GreenSeeker (Trimble) sensore attivo dotato di sorgente luminosa selettiva;
- CropCircle (Holland Scientific) sensore attivo dotato di sorgente luminosa non selettiva;
- OptRx (AgLeader Technology) sensore attivo;
- YARA N-sensor (Yara) sensore attivo;
- CropSpec (Topcon) sensore attivo;
- CropScan sensore passivo che può misurare la radiazione riflessa a 5, 8 o 16 bande.

Un'applicazione pratica di questi strumenti è l'impiego di sensori multispettrali attivi usati in modalità mobile, quindi applicati sulla trattrice e/o sullo spandiconcime, per la fertilizzazione azotata di copertura a rateo variabile (Figura 11).



Figura 11. Spandiconcime a rateo variabile che effettua la distribuzione del fertilizzante azotato sul riso in maniera sito specifica, grazie all'utilizzo di due sensori prossimali (frecce rosse) che rilevano in continuo lo stato fisiologico della coltura sfruttando la riflettanza.

Uno studio effettuato per l'ottimizzazione della concimazione azotata su riso, impiegando i sensori ottici prossimali operanti su tre bande dello spettro elettromagnetico (rosso, red-edge e NIR) (Lazzari et al., 2015), ha mostrato (Tabella 3) un risparmio della dose di azoto complessiva ed un aumento dell'efficienza d'uso dell'azoto rispetto alla concimazione tradizionale.

Tabella 3. Risultati della concimazione a rateo variabile su riso applicando sensori ottici prossimali.

PARAMETRO	FERTILIZZAZIONE TRADIZIONALE	FERTILIZZAZIONE A TASSO VARIABILE	VANTAGGIO
Dose complessiva azoto media (kg/ha)	199,58	174,10	-12,8%
Produzione media (t/ha 2013)	7,08	7,45	+5,2%
NUE (kg risone/kgN)	35,48	42,97	+ 21,1%

1.9.1 Misuratori di clorofilla

I misuratori di clorofilla sono stati usati e studiati su diverse colture sia erbacee (frumento, mais, riso e soia) che arboree (melo e vite). Nella maggior parte dei casi si tratta di piccoli sensori portatili alimentati a batterie, con la quale si effettuano misurazioni sulla vegetazione, nei punti strategici dell'appezzamento, in modo da rilevarne lo stato nutrizionale, nello specifico per quanto riguarda l'azoto, dato che si conosce bene la sua correlazione con il contenuto di clorofilla nella foglia (Vouillot et al., 1998).

L'utilizzo di questi strumenti ha un trend crescente negli ultimi anni, grazie alla loro facilità di utilizzo e ai vantaggi, sia in termini economici sia ambientali, che possono apportare in un'azienda agricola per quanto riguarda le decisioni da prendere sulla concimazione azotata delle colture.

Uno dei misuratori portatili più usati è lo SPAD (Soil Plant Analysis Development) Minolta 502 (Figura 12), uno strumento di dimensioni contenute e dal facile utilizzo, infatti dopo l'accensione è richiesta la calibrazione, dopo di che è subito pronto per effettuare le misurazioni.



Figura 12. Misuratore di clorofilla portatile SPAD Minolta 502.

Lo strumento rileva la trasmittanza fogliare a due diverse lunghezze d'onda il rosso (600-700 nm) e l'infrarosso (900-1000 nm). La scelta delle lunghezze d'onda è motivata dal fatto che nel blu e nel rosso le foglie assorbono la maggiore quota di energia radiante grazie ai

pigmenti presenti, nello specifico tra le due lunghezze d'onda è stata scelta quella del rosso perché presenta il picco di assorbimento più consistente.

Bisogna tener presente che i pigmenti fotosintetici non sono costituiti solo da clorofilla A e B, ma anche da carotenoidi e xantofille. Le clorofille assorbono maggiormente nelle regioni del violetto, blu, arancione e rosso, mentre i carotenoidi assorbono solo nel blu e nel violetto (Salisbury, 1994).

Per effettuare la misurazione la foglia va inserita tra i due fotodiodi dello strumento che rilevano su una superficie di 6 mm². La luce incidente, proveniente dai fotodiodi emettitori, viene parzialmente assorbita dai pigmenti fogliari, invece la quota che oltrepassa la lamina è rilevata dal fotodiodo al silicio che converte il raggio luminoso in un segnale elettrico, questo grazie ad un microprocessore sarà tradotto in digitale sul display dove sarà leggibile un numero a tre cifre (Figura 13).



Figura 13. Esempio di lettura con SPAD su una foglia di frumento.

Quando si effettuano le misurazioni per avere una corretta stima delle condizioni nutrizionali della coltura è importante scegliere una foglia che sia rappresentativa della pianta e che sia sana, inoltre non bisogna effettuare le letture sulle nervature.

I valori delle letture SPAD possono essere usati tal quali o essere mediati con altri dati raccolti.

1.10 Le zone omogenee

L'identificazione e la gestione di sotto-aree con diverse caratteristiche (della coltura e/o del suolo), all'interno di un campo coltivato è un'attività che rientra nell'ottica della gestione sito-specifica delle colture. Le sotto-aree identificate vengono chiamate zone omogenee, oppure zone a gestione omogenea, in inglese management zone (MZ) e, sono definite tali sulla base di misure quantitative di variabili certe.

Ci sono diverse definizioni delle zone omogenee, ad esempio possono essere identificate come sotto-regioni di un campo che hanno una combinazione relativamente omogenea dei fattori che limitano la resa, per cui una determinata quantità di uno specifico input è adatta per ottenerne la massima efficienza (Vrindts et al., 2005), oppure una zona omogenea può essere definita come una sotto-regione di un campo che è relativamente omogenea rispetto le caratteristiche del suolo e del paesaggio (L. Haghverdi et al., 2015).

Le variabili che possono essere prese in considerazione per la delimitazione delle zone omogenee sono:

- la resa delle colture;
- i parametri fisico-chimici del suolo;
- gli indici di vegetazione;
- la combinazione di queste variabili (Fraisie et al., 2001), usando quindi un approccio di data fusion.

Tuttavia si raccomanda la presa in considerazione delle variabili che sono rappresentative della variabilità spaziale, che sono correlate con il rendimento delle colture, che sono stabili e prevedibili nel tempo (Li et al., 2013).

La definizione delle zone omogenee è stata suggerita come un approccio economicamente percorribile nell'agricoltura di precisione vista la disponibilità e l'adozione di sistemi di posizionamento relativamente economici e precisi uniti alle attrezzature agricole che permettono la distribuzione a rateo variabile degli input.

L'uso delle zone omogenee in agricoltura di precisione, insieme alle tecnologie appena citate permette di gestire e quindi ridurre la variabilità spaziale delle rese colturali, e i danni ambientali dovuti alla distribuzione eccessiva degli input (es. fertilizzanti azotati) in campo.

Le sotto-zone individuate possono rappresentare anche degli indicatori di dove eseguire i campionamenti del suolo e delle colture, riducendo così il numero di campioni da prelevare ed analizzare (Cid-Garcia et al., 2014).

Le metodologie usate più di frequente per la delimitazione delle zone omogenee possono essere divise in due categorie:

- analisi empirica;
- analisi dei cluster.

I metodi empirici sono basati sull'uso di conoscenze specialistiche e sulla distribuzione della resa all'interno del campo, in modo da poterlo dividere in un determinato numero di sotto-aree. Questo approccio è più semplice, però risente fortemente delle decisioni soggettive.

L'approccio di analisi cluster divide i dati puntuali di un campo in classi, per questa divisione viene impiegata una funzione della valutazione della somiglianza. In pratica le classi vengono usate per definire le zone omogenee, che possono essere successivamente delimitate nel campo (Boydell & Mcbratney, 2002).

Le metodologie di clustering sono più complesse rispetto a quelle empiriche e permettono una maggiore differenziazione tra le classi, utilizzando criteri meno soggettivi e impiegando quindi diverse variabili nel processo di definizione delle zone omogenee (Gavioli et al., 2019).

In letteratura sono descritte diverse opzioni per quanto riguarda i vari algoritmi di clustering, due di questi sono stati i più usati negli studi relativi alla delimitazione delle zone omogenee (Gavioli et al., 2019):

- K-means (MacQueen, 1967);
- Fuzzy C-means (FCM) (Bezdek, 1981).

Risultati soddisfacenti usando K-means sono stati riportati da diversi autori (Albornoz et al., 2018; Arno et al., 2011; A. Haghverdi et al., 2015; Ikenaga & Inamura, 2008). Invece altri autori tra cui (Fraisse et al., 2001), (Moral et al., 2010) e (Schenatto et al., 2017) riportano risultati soddisfacenti con l'uso dell'algoritmo Fuzzy C-means.

Tuttavia gli algoritmi K-means e Fuzzy C-means potrebbero non fornire il miglior risultato per quanto riguarda l'individuazione delle zone omogenee, alcuni studi hanno mostrato come altri algoritmi di clustering possano fornire la delimitazione delle zone omogenee con maggiore accuratezza, due esempi sono: il confronto tra gli algoritmi K-means e FCM con il Ward's Method (Ward 1963) effettuato da Dobermann et al., (2003) e il confronto tra il metodo K-means e il metodo Partitionig Around Medoids (PAM) (Kaufman & Rousseeuw, 1990) effettuato da Xu & Wunsch, (2008).

1.10.1 Metodologie di clustering dei dati.

In letteratura sono presenti algoritmi di clustering gerarchico e non gerarchico (metodi basati sul partizionamento).

I metodi di clustering gerarchico dividono gli elementi di un dataset (come i punti georeferenziati) in uno specifico numero di gruppi, in due o più passaggi. Viene eseguito il raggruppamento (clustering), definendo una serie di divisioni una dentro l'altra, queste possono iniziare con un gruppo contenente tutti gli n elementi per ottenere la formazione di n gruppi con un elemento in ciascuno o viceversa. Il primo metodo è chiamato clustering gerarchico divisivo, mentre se la procedura viene eseguita nella direzione opposta si parla di clustering gerarchico agglomerativo (Everitt et al., 2011). Secondo Jain & Dubes, (1988) i metodi gerarchici agglomerativi sono usati più frequentemente rispetto a quelli divisivi, perché i primi vengono eseguiti con meno requisiti di elaborazione computazionale.

I metodi di clustering basati sul partizionamento, come ad esempio il k-means, dividono un insieme di elementi in k gruppi senza costruire una struttura gerarchica, seguendo il principio in base al quale gli elementi di uno stesso gruppo dovrebbero essere più simili degli elementi appartenenti a gruppi diversi. Questa tipologia di algoritmi esegue solo una divisione dei dati, nel tentativo di identificare i gruppi naturalmente presenti all'interno di questi (Jain & Dubes, 1988). In questo processo di solito si cerca di ottimizzare una funzione di valutazione della partizione, cioè si cerca di organizzare un insieme di n elementi in k gruppi, $G_1 \dots G_k$, massimizzando o minimizzando una funzione di valutazione prestabilita.

1.11 Fertilizzazione di precisione

La fertilizzazione comprende interventi che migliorano la fertilità chimica, fisica e biologica del suolo. Le applicazioni che trovano attualmente la maggior diffusione nell'agricoltura di precisione, riguardano la concimazione minerale azotata.

La concimazione in generale ha lo scopo di fornire alle colture gli elementi nutritivi che ne limitano la crescita, in quantità e tempi tali da consentire il raggiungimento della massima potenzialità produttiva. I sistemi colturali sono caratterizzati da ingenti asportazioni di elementi minerali contenuti nei prodotti raccolti, con un evidente rischio d'impoverimento del suolo. Il concetto che le asportazioni degli elementi minerali, con la raccolta dei prodotti vegetali, devono essere restituite al suolo è da tempo consolidato nelle scienze agronomiche. Questo concetto si è evoluto per cercare di tenere conto di componenti aggiuntivi riguardanti le entrate oltre che le uscite addizionali di elementi nutritivi nel suolo, attraverso il metodo del bilancio (Grignani et al., 2003) ed è stato pienamente adottato, ad esempio nei disciplinari di produzione integrata delle misure agroambientali (Reg. CE 1234/07).

Finora la stima delle asportazioni e delle restituzioni, o l'applicazione di procedure più complesse di calcolo del bilancio, faceva riferimento all'intero appezzamento coltivato, ignorando la variabilità spaziale in esso presente; inoltre si dava scarsa considerazione anche alle variazioni nel tempo delle voci del bilancio, quindi molto spesso la dose di fertilizzante prescritta era sempre la stessa nei diversi anni. Risulta evidente che questo procedimento porti a rilevanti inefficienze, con situazioni di eccessi e difetti molto diffuse.

Negli attuali sistemi colturali si stima che l'efficienza d'uso dell'azoto NUE (Nitrogen Use Efficiency) (Equazione 1) calcolata dal rapporto tra azoto asportato dalla coltura (al netto delle perdite per lisciviazione ed apporti da mineralizzazione e deposizioni atmosferiche) ed azoto distribuito col fertilizzante, è generalmente molto bassa.

$$NUE = \frac{[N_{asp} - (N_{suolo} + N_{dep})]}{(N_{fert})}$$

Dove:

N_{asp} = azoto asportato dalla coltura

N_{suolo} = azoto fornito dal suolo alla coltura derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica

N_{dep} = azoto proveniente da deposizioni atmosferiche

N_{fert} = azoto fornito con la concimazione.

Equazione 1. *NUE (Nitrogen Use Efficiency).*

Raun & Johnson, (1999) stimano che a livello mondiale la NUE sia pari al 33%, ciò è dovuto al fatto che una quota consistente dell'azoto distribuito come fertilizzante viene persa per lisciviazione, ammonizzazione o come protossido di azoto, potente gas ad effetto serra. Achim Dobermann & Cassman, (2005) usando dati da oltre 800 esperimenti hanno stimato che in media, solo il 51% dell'azoto apportato come concime è recuperato nella parte epigea delle colture cerealicole.

La possibilità di rilevare e quantificare in maniera rapida la variabilità spaziale e temporale di alcune voci del bilancio degli elementi nutritivi, apre la possibilità di gestire con maggiore precisione la fertilizzazione, con il tentativo di soddisfare con maggiore accuratezza i fabbisogni delle colture attraverso la distribuzione a rateo variabile.

Va però ricordato che la fertilizzazione è un'operazione molto complessa i cui risultati dipendono dall'andamento di un gran numero di processi:

- fisici, legati alla tessitura del terreno e ai flussi idrici;
- chimici, cioè reazioni a cui sono soggette le molecole che contengono i nutrienti;

- biologici, quindi processi di nitrificazione e assorbimento radicale da parte delle piante. L'andamento di tutti questi processi nel tempo e nello spazio è molto difficile da conoscere.

Per gestire la fertilizzazione con l'approccio dell'agricoltura di precisione si possono adottare metodologie diverse (Heege et al., 2013) quali:

- quantificare le asportazioni degli elementi nutritivi dal suolo attraverso la mappatura delle produzioni della coltura dell'anno precedente, questo metodo non tiene però conto delle altre modalità con cui un elemento nutritivo può essere allontanato dal suolo come i fenomeni di lisciviazione e volatilizzazione che possono interessare l'azoto, quindi è particolarmente adatto per la concimazione a base di fosforo e potassio che sono due elementi poco mobili nel suolo;
- utilizzare metodi rapidi di mappatura del suolo di proprietà correlate ad elementi della fertilità;
- monitorare lo stato nutrizionale della coltura durante il corso della stagione attraverso sensori prossimali e remoti, questa metodologia risulta molto valida per gli apporti azotati.

1.11.1 *Concimazione azotata di precisione*

La gestione della concimazione azotata è più complessa di quella degli altri elementi fertilizzanti, a causa della maggiore dinamicità dei processi che riguardano il ciclo dell'azoto. Inoltre, per questo, elemento le inefficienze sono tra le più elevate, con pesanti conseguenze ambientali ed economiche e pressioni da parte dell'opinione pubblica che hanno portato a provvedimenti normativi restrittivi come la Direttiva Nitrati.

La dose ottimale di azoto da distribuire ad una coltura può essere definita in termini tecnici e/o economici, conoscendo la curva di risposta della coltura (Figura 14) alle dosi crescenti. La situazione tipica è quella di un incremento marginale decrescente, con il raggiungimento di un livello oltre il quale, all'aumentare della dose di concime, la produzione non aumenta o addirittura tende a diminuire a causa di effetti negativi sulla coltura, ad esempio l'allettamento. Sulla base di queste curve è possibile stabilire anche la dose tecnica ottimale (DTO) e la dose economica ottimale (DEO) del concime.

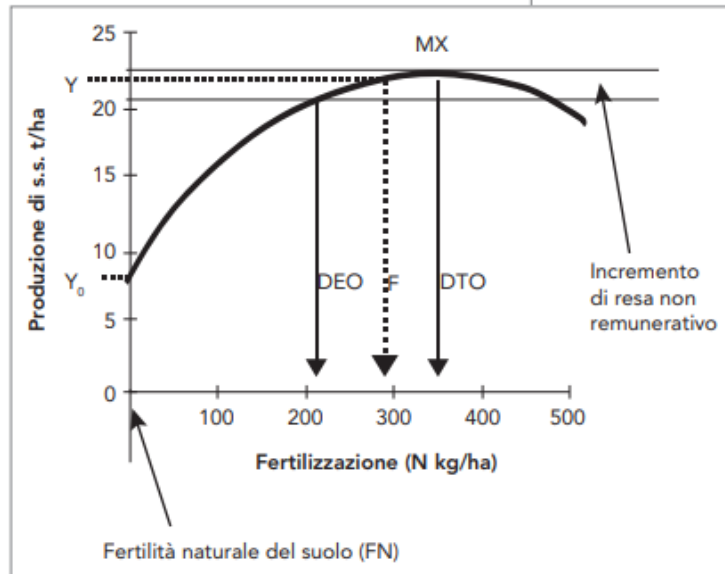


Figura 14. Esempio di curva di risposta riferita alla produzione di una generica coltura rispetto a crescenti dosi di concime (si ipotizza qui azotato). Sono riportate le dosi di concime DEO e DTO. La produzione y è ottenuta ad una generica dose di concime F . La produzione y_0 è ottenuta in assenza di concimazione azotata ed indica il potenziale legato alla fertilità naturale del suolo (FN) da (Grignani et al., 2016).

Si è osservato però, che la forma specifica della curva di risposta varia sia nel tempo che nello spazio (Delgado et al., 2005; Delin et al., 2005), anche all'interno di un singolo appezzamento a causa dell'interazione con numerosi altri fattori come la disponibilità di acqua che a sua volta è legata alla tessitura del suolo. La variabilità all'interno del campo, delle curve di risposta, rende evidente come una distribuzione uniforme possa tradursi in elevati livelli di inefficienza della concimazione, è impossibile costruire curve di risposta specifiche per ogni singola area del campo nel caso di concimazione a rateo variabile. Da un punto di vista pratico risulta più fattibile stabilire la dose ottimale di azoto da distribuire, attraverso il metodo del bilancio (Equazione 2), applicandolo ad esempio per ciascuna zona omogenea individuata all'interno del campo e creare la mappa di prescrizione per la concimazione.

$$N_C = N_A + N_L + N_R - N_{min} - N_P$$

Dove:

N_C = dose di azoto da fornire con la concimazione;

N_A = azoto asportato dalla coltura;

N_L = azoto lisciviato;

N_R = azoto minerale residuo nel terreno a fine ciclo;

N_{min} = azoto mineralizzato dal suolo durante la stagione colturale;

N_P = azoto minerale disponibile presente nel suolo ad inizio ciclo.

Equazione 2. *Bilancio dell'azoto.*

L'obiettivo è cercare di rendere l'azoto assimilabile dalla coltura, prevalentemente in forma nitrica, seguendo l'andamento temporale del suo fabbisogno.

Le metodologie che si possono adottare per la concimazione azotata in agricoltura di precisione applicando il rateo variabile (variable rate application - VRA) sono essenzialmente tre (Castrignano et al., 2020):

1. Applicazione a rateo variabile tradizionale, questa è una metodologia che non prevede l'uso di sensori e attrezzature costose, le quantità di concime sono basate semplicemente su osservazioni visive in campo o dati raccolti nel tempo (Liakos et al., 2013). Ad esempio nel 1992 un agricoltore statunitense di cotone applicava azoto a tasso variabile, attaccando un pezzo di nastro adesivo sull'asse anteriore del suo camion, quando l'altezza del cotone scendeva sotto quella del nastro, accendeva l'impianto di fertilizzazione, viceversa quando l'altezza delle piante era sopra il nastro. Il vantaggio di questa tecnica è che può essere usata da ogni agricoltore dato il suo basso costo e la facilità di applicazione, lo svantaggio invece è che il successo dipenderà dalle decisioni dell'agricoltore e da alcuni vincoli operativi.
2. Applicazione a rateo variabile basata sui sensori, questa tecnica consiste nella determinazione della quantità di input azotato on the go, ciò è reso possibile grazie all'applicazione di sensori ottici montati sulla trattrice e/o sullo spandiconcime a rateo variabile che sono in grado di rilevare le proprietà delle colture. I dati registrati dai sensori ottici, trasformati in indici di vegetazione, vengono elaborati da algoritmi appositamente sviluppati ed integrati nella centralina di acquisizione dei dati, per stabilire la dose di concime azotato da distribuire. Il vantaggio della VRA basata sui sensori è che non sono richiesti sistemi di guida GPS e mappe di prescrizione, tuttavia usando i sistemi GPS si ha il grande vantaggio di memorizzare i dati e quindi di creare mappe di prescrizione per applicazioni future e si evitano sovrapposizioni tra le passate. In questi sistemi si fa quasi sempre uso di sensori ottici attivi, dotati di una propria fonte di illuminazione, per cercare di ridurre l'effetto di disturbo della variazione delle condizioni di illuminazione sui

valori di riflettanza. Tra gli svantaggi che emergono nella VRA basata sui sensori troviamo i diversi angoli di osservazione dei sensori e diverse dimensioni del campo di vista, i fenomeni di saturazione dell'indice di vegetazione (es. NDVI) che si possono avere oltre un certo valore di LAI della coltura, la necessità di calibrazione del sensore su parti del campo dove non si evidenziano carenze di azoto sulla coltura ed infine la velocità del cambio di dose da parte dello spandiconcime dal momento in cui il sensore rileva valori diversi di riflettanza, tutti questi aspetti possono causare errori di calcolo sulla dose di azoto da distribuire.

3. Applicazione a rateo variabile basata sulle mappe di prescrizione, questo approccio si differenzia dal precedente in quanto la dose di concime azotato da distribuire viene stabilita prima di eseguire l'operazione in campo sulla base di mappe di prescrizione. Usando il ricevitore GPS il tasso di input viene modificato man mano che la trattrice si sposta sul campo, sincronizzando la posizione delle mappe di prescrizione con la posizione effettiva della macchina che svolge l'applicazione. Le mappe di prescrizione sono file di dati digitali che specificano la quantità di input da applicare su ogni punto del campo, che vengono caricati sulla centralina dello spandiconcime a rateo variabile tramite una semplice penna USB. Le management zone (MZ), quindi le quantità di concime azotato ed infine le mappe di prescrizione sono determinate da diverse proprietà del suolo rilevate con metodologie tradizionali (analisi delle proprietà fisico chimiche del suolo) o con i sensori (conduttività elettrica) e della coltura (indici di vegetazione calcolati da immagini tele-rilevate, mappatura delle produzioni). Una combinazione delle proprietà del campo coltivato permette quindi di delineare, con appositi algoritmi, le MZ, definite come parti del campo con proprietà omogenee che possono essere gestite in modo uniforme (Nawar et al., 2017). L'uso delle mappe di prescrizione basate su dati storici, di almeno 5 anni, come le mappe di produzione o le immagini da telerilevamento storiche della coltura possono esse impiegate nel primo intervento di concimazione azotata sulle colture, quando la biomassa vegetale è ridotta, quindi si avrebbe un'elevata influenza del suolo nelle immagini tele-rilevate, inoltre molto di frequente le piante non manifestano ancora evidenti sintomi di carenza di azoto (Casa e Morari., 2016). Per le concimazioni successive si creano le mappe di prescrizione con i dati relativi allo stato attuale della coltura

definito dalle immagini da telerilevamento, integrandoli laddove possibile con altri layer informativi (proprietà del suolo, mappa delle produzioni).

1.12 Breve valutazione economica sull'agricoltura di precisione.

L'agricoltura di precisione è una tecnologia disponibile da più di un ventennio, ma nonostante ciò solo una piccolissima parte degli agricoltori italiani la utilizza nei processi produttivi. I motivi principali della bassa adozione dell'agricoltura di precisione sono:

- la resistenza da parte degli agricoltori ad investire risorse economiche, senza valutare se la tecnologia fornirà un profitto. Eppure diversi studi (Godwin et al., 2003; Karpinski et al., 2015; Lazzari et al., 2015; Lencsés et al., 2014; Robertson et al., 2007; Tey & Brindal, 2012; Timmermann et al., 2003; Zhang et al., 2002) nazionali ed internazionali hanno dimostrato i diversi benefici economici dell'agricoltura di precisione a partire dalle forme più semplici fino a quelle più avanzate;
- la difficoltà a comprendere i vantaggi rispetto alle tecnologie attuali;
- forte resistenza degli operatori rispetto alle tecniche consolidate e alla meccanizzazione tradizionale.

La redditività economica rappresenta un elemento essenziale per l'introduzione e la diffusione di un'innovazione. Quindi la stima dei benefici economici dell'agricoltura di precisione è un aspetto rilevante per la diffusione di questa tecnologia, tra l'altro è tra le meno costose delle innovazioni in agricoltura.

1.12.1 Effetti sul capitale fisso

Le tecnologie dell'agricoltura di precisione comportano un investimento in capitale fisso nell'azienda agraria, in particolare in macchine agricole e/o in componenti di esse (sistemi di guida elettroidraulica, antenna, ricevitori, display, droni) e relativi software. L'entità degli investimenti varia in funzione delle tecnologie impiegate (guida assistita, automatica, mappatura delle produzioni, distribuzioni a rateo variabile, droni), le dotazioni per una media azienda agricola italiana si aggirano tra i 2000 e i 50000 €.

Contemporaneamente però l'agricoltura di precisione va a ridurre il costo d'uso delle macchine (es riduzione dei costi di manutenzione) sia per effetto della maggiore rapidità di esecuzione delle operazioni sia per l'aumento dell'efficienza nell'uso delle macchine.

1.12.2 *Effetti sul capitale circolante*

I maggiori effetti positivi dell'agricoltura di precisione si hanno sul risparmio dei fattori della produzione a logorio totale quali: sementi, fertilizzanti, agrofarmaci, acqua di irrigazione, carburanti e lubrificanti. Sotto questo aspetto i benefici dell'agricoltura di precisione sono anche di tipo ambientale, negli ultimi anni sono soprattutto questi ad essere esaltati anche sotto la spinta della collettività particolarmente attenta alla sostenibilità dell'attività agricola (Pisante et al., 2012; Westhoek et al., 2013).

1.12.3 *Effetti sul lavoro*

L'agricoltura di precisione produce un cambiamento rilevante sulle risorse umane dell'azienda agraria, sia dal punto di vista dei costi che della qualità e professionalità del lavoro.

Con queste tecnologie si riesce quindi a ridurre l'impiego della manodopera, perché le riduzioni delle sovrapposizioni con guida assistita ed automatica comportano la riduzione del tempo di lavoro del trattorista. L'efficienza del lavoro dei trattoristi aumenta anche in termini qualitativi con l'aumento delle prestazioni di lavoro, la riduzione dello stress e quindi degli incidenti.

L'agricoltura di precisione impatta anche sulla qualità delle risorse umane, richiedendo nuovi requisiti di professionalità, soprattutto per quanta riguarda le tecnologie di secondo livello (sistemi di monitoraggio, applicazioni a rateo variabile e droni), che richiedono una preparazione teorico-pratica per l'interpretazione dei dati e l'interazione che questi hanno con il settaggio delle macchine. Invece le tecnologie di primo livello (guida assistita e guida automatica) risultano di più facile applicazione per gli operatori delle macchine agricole (Gualandi, 2015). Tuttavia molti agricoltori sono restii ad introdurre tecnologie di agricoltura di precisione a causa della loro riluttanza all'apprendimento di nuove tecnologie.

Nell'introduzione delle tecnologie di agricoltura di precisione molte aziende hanno la necessità di aumentare le consulenze esterne, soprattutto nei primi anni per apprenderne il loro utilizzo e potenzialità.

1.12.4 *Effetti sui ricavi*

L'analisi dei benefici dell'agricoltura di precisione normalmente si concentra sulla riduzione degli sprechi dei fattori della produzione e sulla riduzione dei costi. Non bisogna però trascurare i molteplici effetti diretti e indiretti di questa tecnologia sulle rese e quindi sui ricavi.

Gli effetti diretti derivano dall'ottimizzazione dei processi produttivi, ad esempio la guida automatica consente la distribuzione uniforme di sementi, fertilizzanti e agrofarmaci evitando sovrapposizioni e fallanze così da avere un miglioramento dello sviluppo delle colture.

Gli effetti indiretti nascono dalle migliori conoscenze sullo stato dei suoli e delle colture, in modo tale che l'agricoltore possa prendere decisioni più tempestive (Knight et al., 2009).

L'agricoltura di precisione in alcuni casi consente anche un miglioramento qualitativo delle produzioni, ad esempio nel frumento l'ottimizzazione nel tempo e nello spazio della concimazione azotata, consente di ottenere benefici in termini di contenuto proteico della granella (Heege, 2013).

Capitolo 2

MATERIALI E METODI

2.1 Sito sperimentale

L'attività sperimentale presente in questa tesi è stata condotta presso l'azienda agricola "Guzzini Francesco" di Recanati (MC), l'azienda è a prevalente indirizzo cerealicolo.

L'appezzamento oggetto della sperimentazione ha un'estensione di circa 8 ettari (Figura 15) coltivato a frumento duro (cv. Tirex); è stata praticata la lavorazione tradizionale con un'aratura a 40 cm seguita da un'affinamento con erpice rotante.

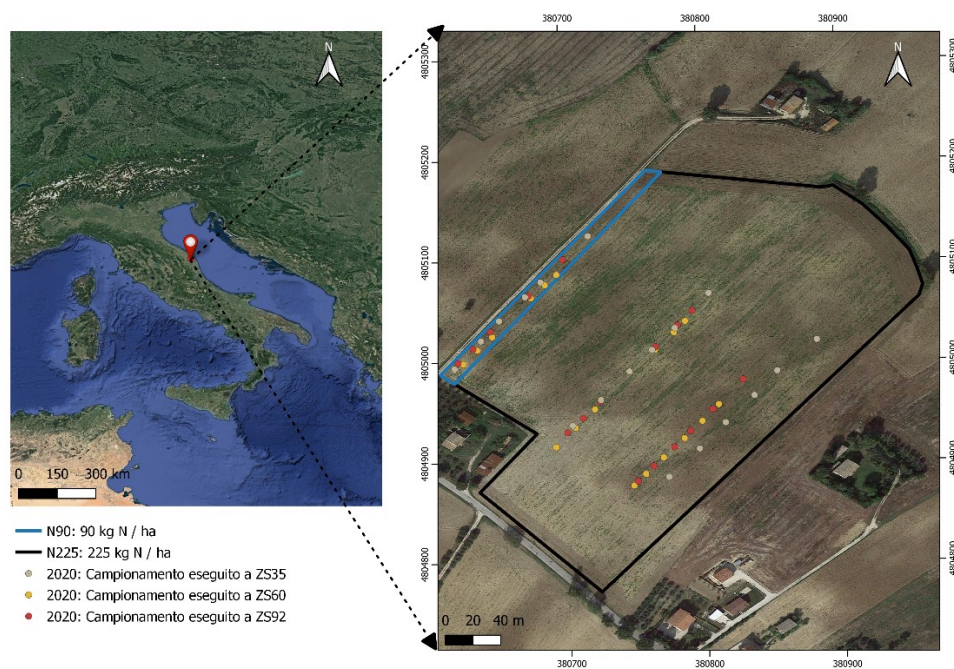


Figura 15. *Appiezzamento di terreno dove si è svolta la sperimentazione e relativa suddivisione per quanto riguarda le due dosi di azoto distribuite. In figura sono riportati anche i punti di campionamento georeferenziati per ogni fase fenologica.*

In questo sito sono stati messi a confronto due livelli di concimazione azotata:

- 225 kg/ha di azoto (N225) sulla maggior parte dell'appezzamento;

- 90 kg/ha di azoto (N90) in una fascia laterale dell'appezzamento larga 14 m (Figura 15).

L'avvicendamento colturale adottato dall'azienda è il seguente:

- Mais da granella (ibrido DKC 4316 Dekalb) nell'annata 2018/2019
- Frumento duro (cv. Tirez) nell'annata 2019/2020

Il frumento è stato seminato ad una densità di 240-250 kg/ha, con una distanza tra le file di 13 cm. Nella Tabella 4 viene riportato il quaderno di campagna per il frumento duro dell'azienda agricola Guzzini.

Tabella 4. Schematizzazione delle operazioni colturali eseguite per il frumento nell'annata 2019/2020; T = aratura a 40 cm + 1 affinamento.

Gestione del suolo	Aratura e lavorazioni complementari	Semina	Concimazioni azotate	Controllo flora infestante e patogeni fungini	Raccolta
T	<p>25/08/2019 Aratura</p> <p>15/11/2019 Affinamento con erpice rotante</p>	<p>15/11/2019 Semina cv. Tirez</p> <p>15/11/2019 Rullatura e passaggio scavafossi</p>	<p>15/01/2020 N90: 60 kg/ha N225: 60kg/ha (Azotech)</p> <p>18/02/2020 N90: 30 kg/ha N225: 69 kg/ha (Urea)</p> <p>20/03/2020 N225: 69 kg/ha (Urea)</p> <p>15/05/2020 N225: 25 kg/ha (Sulfan)</p>	<p>24/04/2020 controllo infestanti Mesosulfuron-Metile (0,012 kg/ha) Iodosulfuron-Metil-Sodium (0,004 kg/ha) Amidosulfuron (0,02 kg/ha) Mefenpir-Dietile (0,036 kg/ha) Mecoprop-P (0,189 l/ha) EDTA (0,03 l/ha) MCPA (0,235 l/ha) 2,4D (0,0015 l/ha)</p> <p>24/02/2020 trattamento fungicida Protioconazolo (0,127 l/ha) Tebuconzolo (0,127 l/ha)</p>	28/06/2020

2.2 Campionamenti eseguiti

2.2.1 Fenologia

Ad ogni campionamento eseguito è stato rilevato lo stadio fenologico del frumento impiegando la scala proposta da Zadocks et al., 1974, composta da valori da 0 a 99.

2.2.2 Peso fresco

Il peso fresco della biomassa è stato ottenuto mediante il prelievo di un transetto lineare di piante di 0,5 m secondo le linee di massima pendenza su 18 punti dell'appezzamento: 12 ricadenti nella parte di campo concimata con 225 kg/ha di N e 6 ricadenti all'interno della fascia concimata con 90 kg/ha di N. Nella parte di campo di area più estesa i campionamenti sono stati effettuati su due traiettorie parallele, individuate nella parte centrale del campo, ed in ciascuna di queste sono stati individuati sei punti di saggio. Per ogni campionamento si è avuti l'accortezza di evitare zone calpestate dalle macchine operatrici. Il prelievo delle piante di frumento è avvenuto con un taglio raso al suolo mediante l'ausilio di apposite forbici (Figura 16a), le piante così prelevate sono state poste all'interno di appositi sacchetti di carta.

Ogni punto campionato è stato georeferenziato mediante GPS portatile modello Leica Zeno 20 (Figura 16b)

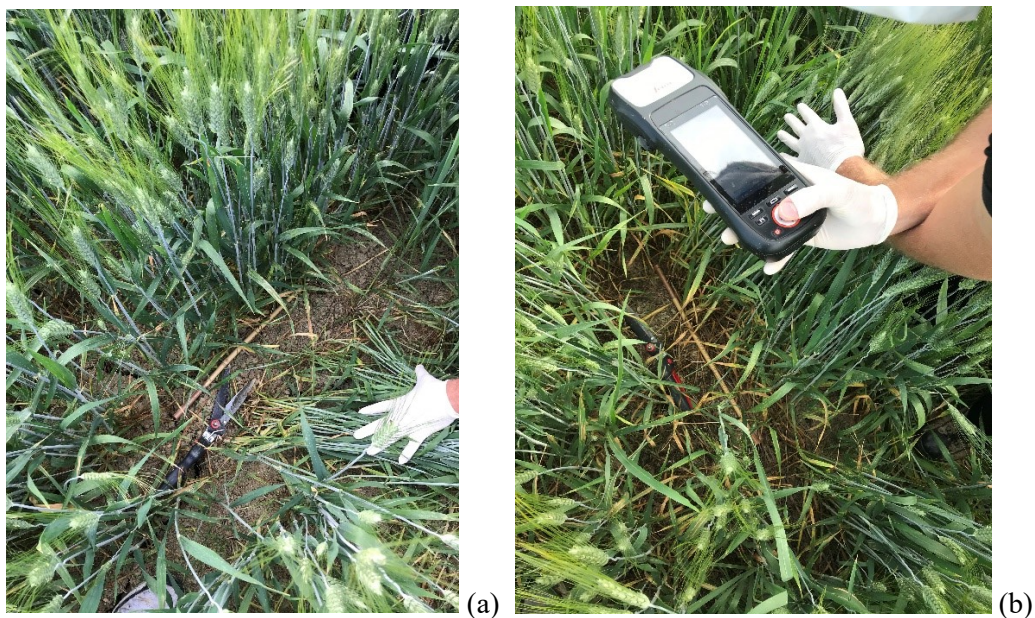


Figura 16. *Prelievo del campione di biomassa in fase di antesi del frumento e georeferenziazione del punto.*

Per quanto riguarda il peso fresco sono stati eseguiti due campionamenti il primo in data 19/03/2020 con il frumento allo stadio fenologico ZS 35 (levata) e il secondo in data 24/04/2020 con il frumento allo stadio fenologico ZS 60 (antesi).

Ciascun campione è stato pesato con apposita bilancia di precisione in modo da ottenere il peso fresco della biomassa prelevata in campo.

2.2.3 *Peso secco*

Il peso secco è stato ottenuto ponendo i campioni di biomassa fresca in stufa a 105°C per 48 ore, questi in seguito sono stati pesati con bilancia di precisione.

2.2.4 *Lecture SPAD*

Le letture SPAD sono state eseguite con il dispositivo portatile SPAD Minolta 502 (Minolta camera Co., Ltd., Japan). Le letture sono state effettuate contemporaneamente ai due campionamenti della biomassa verde, per ogni punto di campionamento sono state prelevate 10 foglie a random scegliendo quelle più espanse e su ciascuna di queste sono state effettuate due letture SPAD (Figura 17), una nella parte centrale e una nella parte distale. In seguito i valori delle venti letture per ciascun punto di campionamento sono stati mediati in modo da avere un unico valore, il quale è stato collegato al punto georeferenziato in campo.



Figura 17. *Lettura SPAD su foglia di frumento.*

2.2.5 Numero spighe/m²

Il numero delle spighe/m² è stato ottenuto mediante il conteggio delle spighe di un transetto lineare di 1 m su 18 punti dell'appezzamento, 12 all'interno del trattamento N225 e 6 all'interno del trattamento N90, in maniera analoga per quanto effettuato nel campionamento della biomassa verde, è stato georeferenziato ogni punto di campionamento e si è avuti l'accortezza di non campionare le parti di campo calpestate dalle macchine operatrici. Considerando l'interfila di semina di 13 cm è possibile ricavare il numero di spighe/m² attraverso la seguente relazione matematica:

$$\text{Numero spighe/m}^2 = \frac{\text{numero di spighe contate}}{\text{interfila}}$$

2.2.6 Numero di cariossidi per spiga

Il numero delle cariossidi per spiga è stato ottenuto facendo la media della conta delle cariossidi integre presenti in 10 spighe prelevate in maniera casuale su 18 punti all'interno dei due trattamenti. Ciascuna spiga è stata sgranata manualmente all'interno di apposite vaschette in alluminio (Figura 18), soffiando è stata allontanata la pula in modo da facilitare il conteggio delle cariossidi.



Figura 18. Conteggio del numero di cariossidi per spiga, all'interno di vaschette di alluminio.

2.2.7 Peso dei mille semi

Il peso dei mille semi in grammi è stato ottenuto mediante il prelievo di un campione rappresentativo di granella, al momento della trebbiatura in campo, per ciascun trattamento. È stato mediato il peso di tre gruppi da 100 semi integri e non striminziti o danneggiati, poi moltiplicato per 10.

2.2.8 Componenti della resa

Quando il frumento si trovava nello stadio fenologico ZS 92, quindi pronto per essere raccolto, sui 18 punti di campionamento all'interno dei due trattamenti è stata prelevata la biomassa su un transetto lineare di 1m, facendo un taglio raso al suolo mediante l'ausilio di forbici (Figura 19). Ogni punto di prelievo è stato georeferenziato con GPS portatile Leica Zeno 20.



Figura 19. *Prelievo della biomassa per il successivo rilevamento dei componenti delle rese.*

Per ogni campione sono state divise le diverse parti della pianta: paglia, pula e granella. Sulle piante di frumento mediante una forbice sono state recise le spighe, in modo da ottenere la paglia. Le spighe sono state introdotte all'interno di una trebbia da banco (Figura 20) in modo da ottenere la separazione di pula e granella.

Le tre componenti così separate sono state inserite all'interno di sacchetti di carta e poste in stufa a 105°C per 48 ore, in seguito sono state pesate con bilancia di precisione per ottenere il peso secco di ciascuna componente.

I valori discussi sono stati riportati in t/ha con la seguente relazione matematica:

$$\text{Peso componente} \left[\frac{t}{ha} \right] = \frac{\text{peso secco componente [g]}}{\frac{\text{interfila}}{100}}$$



Figura 20. Trebbia da banco usata per la trebbiatura delle spighe di frumento, questa operazione permette la separazione della granella dalla pula.

2.3 Riassunto delle date di campionamento e variabili misurate

Tabella 5. Date e variabili misurate presso l'azienda agricola Guzzini.

Data	19/03/2020 1° campionamento	24/04/2020 2° campionamento	28/06/2020 Trebbiatura
Fenologia	x	x	x
Peso fresco	x	x	
Peso secco	x	x	
Lecture SPAD	x	x	
Numero spighe/m ²			x
Numero cariossidi/spiga			x

Peso mille semi			x
Componenti della resa			x
Produzione osservata			x
Umidità			x

2.4 Voli con SAPR per le operazioni di telerilevamento

I voli con il SAPR, per l'acquisizione delle immagini multispettrali, sono stati effettuati in due date:

- 19/03/2020 in corrispondenza della fase fenologica ZS 35;
- 24/04/2020 in corrispondenza della fase fenologica ZS 60.

Il SAPR (sistema aeromobile a pilotaggio remoto) utilizzato è un "DJI Matrice 600 pro (SZ DJI Technology Co., Ltd., Shenzhen China) (Figura 21) avente le seguenti caratteristiche:

- dimensioni: 1668 x 1518 x 727 mm, con eliche e carrelli di atterraggio aperti, 437 x 402 x 553 mm in modalità trasporto;
- peso: da 9,5 a 10 kg in base al pacchetto batterie montato;
- peso massimo consigliato al decollo: 15,5 kg;
- velocità massima: 65 km/h;
- tempo di volo: 32 minuti senza nessun carico;
- munito di ricevitore GPS;
- decollo e atterraggio autonomi.



Figura 21. *SAPR DJI Matrice 600 pro.*

Il SAPR è equipaggiato con due camere multispettrali:

- MAIA S2 (Figura 22): permette l'acquisizione simultanea di immagini ad alta risoluzione a diverse lunghezze d'onda nello spettro del visibile e del vicino infrarosso; lo stesso intervallo di lunghezze d'onda del satellite "Sentinel-2" della European Spatial Agency (ESA). La camera possiede nove sensori monocromatici con relativi filtri per rilevare informazioni nello spettro del visibile e del NIR;
- MAIA WV2: come la S2 permette l'acquisizione simultanea di immagini ad alta risoluzione a diverse lunghezze d'onda nello spettro del visibile e vicino infrarosso, presenta nove sensori (1 RGB e 8 monocromatici) per rilevare le immagini multispettrali nel visibile e vicino infrarosso da 390 nm a 950 nm, lo stesso intervallo di lunghezze d'onda del satellite "WorldView-2" della Digital Globe.



Figura 22. Camera multispettrale MAIA S2.

Prima di ogni volo è stata eseguita una calibrazione radiometrica attraverso il pannello di calibrazione della riflettanza, che è rappresentato da un target bianco utilizzato come verità di terra nell'area di studio. Il pannello permette di misurare la quantità di luce riflessa e assorbita di un oggetto di cui si conosce il valore di riflettanza. Grazie al target bianco è possibile calibrare la camera in base alle effettive condizioni di luminosità del sito sulla quale si effettua il volo. È buona pratica catturare l'immagine del target prima e dopo il volo per avere un'accurata rappresentazione delle condizioni di luminosità.

Al fine di migliorare l'acquisizione delle immagini, il drone è stato equipaggiato con un sensore di luce incidente (ILS) in grado di registrare la variazione di riflettanza della luce durante il volo per ognuna delle 9 bande spettrali.

Per avere una migliore accuratezza nel telerilevamento sono stati geo-riferiti 6 GCPs (Ground Control Points), detti anche marker, prima di ogni volo. L'operazione è stata eseguita ponendo 6 pannelli bianchi di polistirolo nell'area di volo, la posizione di ognuno di questi è stata georeferenziata con GPS portatile Leica Zeno 20 (Figura 23), sono stati usati i pannelli bianchi affinché fossero ben visibili nelle immagini multispettrali e potessero essere usati nel processo di correzione geometrica delle immagini telerilevate.



Figura 23. *Georeferenziazione dei Ground Control Points (marker) identificati mediante pannelli di polistirolo bianchi.*

L'operazione di volo avviene in modalità automatica, il drone segue la rotta di way points che gli è stata impostata in fase di pianificazione del volo. Durante il volo tramite un iPad collegato al telecomando del SAPR è possibile tenere sotto controllo tutti i vari parametri di volo e l'acquisizione delle immagini.

2.4.1 Pianificazione del volo

Questa operazione viene svolta preliminarmente per eseguire il volo in campo in modalità automatica. La pianificazione è stata effettuata con l'app DJI GS Pro che permette di definire determinati parametri quali:

- rotta di way points da seguire;
- quota di volo: 70m;
- velocità di avanzamento;
- frequenza di acquisizione delle immagini;
- sovrapposizione laterale (orizzontal overlap): 70%.

2.5 Processamento delle immagini

Le immagini acquisite durante il volo del SAPR devono essere processate per ricavare le informazioni rilevanti, tale operazione è composta da quattro fasi:

1. conversione da formato raw a tiff;
2. generazione della mappa ad orto mosaico della riflettanza;
3. selezione e calcolo degli indici di vegetazione;
4. estrazione dati.

Le immagini sono state convertite dal formato raw al formato multicanale tiff, con l'utilizzo del software "MultiCam Stitcher PRO" (SAL engineering ed Eoptis, Russi; Italia).

Per la creazione della mappa ad orto mosaico della riflettanza è stato impiegato il software Agisoft Metashape (Agisoft LLC, San Pietroburgo, Russia), basato sull'algoritmo Structure for Motion (SfM).

La mappa della riflettanza è stata poi importata all'interno del software statistico "R" ed utilizzata per il calcolo degli indici di vegetazione (Tabella 6), di questi ne sono stati messi a confronto dieci per selezionare quelli più rilevanti sulla base delle immagini multispettrali per l'applicazione nell'agricoltura di precisione. È stato deciso di lavorare con due indici di vegetazione: l'NDRE (Normalized Difference Red-Edge) e l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), il primo dalla letteratura (Orsini et al., 2020; Wang et al., 2019) risulta essere il più accurato per la stima dello stato vegetativo e nutrizionale della coltura, il secondo oggi è il più usato a livello applicativo. Le mappe di questi due indici sono state importate su QGIS per assegnare loro una scala corretta ed effettuare le stampe.

Tabella 6. *Indici di vegetazione calcolati e relative formule.*

Vegetation Index	Formula
ARVI ¹	$ARVI = \frac{NIR - RB}{NIR + RB}$ Where: $RB = Red - y \cdot (Blue - Red)$
GARI ²	$GARI = \frac{NIR - (Green - y \cdot (Blue - Red))}{NIR + (Green - y \cdot (Blue - Red))}$ Where: $y = 1,7$
MSAVI2 ³	$MSAVI2 = \frac{2 \cdot NIR + 1 - \sqrt{(2 \cdot NIR + 1)^2 - 8 \cdot (NIR - Red)}}{2}$
NDRE ⁴	$NDRE = \frac{NIR - Red\ Edge}{NIR + Red\ Edge}$
NDVI ⁵	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
GLI ⁶	$GLI = \frac{(Green - Red) + (Green - Blue)}{(2 \cdot Green) + Red + Blue}$
VARI ⁷	$VARI = \frac{Green - Red}{Green + Red + Blue}$
VARI Green ⁸	$VARI\ Green = \frac{Green - Red}{Green + Red + Violet}$
VDVI ⁹	$VDVI = \frac{2 \cdot Green - Red - Blue}{2 \cdot Green + Red + Blue}$
Vig ¹⁰	$Vig = \frac{Green - Red}{Green + Red}$

¹ ARVI: Atmospherically resistant vegetation index; ² GARI: Green atmospherically resistant vegetation index; ³ MSAVI2: Modified soil-adjusted vegetation index 2; ⁴ NDRE: Normalized difference red edge index; ⁵ NDVI: Normalized difference vegetation index; ⁶ GLI: Green leaf index; ⁷ VARI: Visible atmospherically resistant index; ⁸ VARI Green: Visible atmospherically resistant index green; ⁹ VDVI: Visible-band difference vegetation index; ¹⁰ Vig: Vegetation index green.

2.6 Delineazione delle zone omogenee

Per la determinazione delle zone omogenee si fa ricorso alla cluster analysis, che prevede la creazione di un determinato numero di cluster, questi indicano un raggruppamento di

oggetti, nel nostro caso dati georeferenziati dell'indice di vegetazione NDRE, che hanno una o più caratteristiche in comune. Nella clusterizzazione quindi, si vuole estrapolare un certo numero di gruppi, nel nostro caso zone omogenee, in cui è possibile separare i dati di un insieme analizzando i valori dei loro attributi.

Il flusso di lavoro per la creazione della mappa con le zone omogenee è stato eseguito con il software statistico "R" ed è diviso nei seguenti passaggi:

1. generazione dello stack layer;
2. analisi dei cluster;
3. creazione della mappa delle zone omogenee.

Prima di applicare la cluster analysis è fondamentale preparare il giusto set di dati su cui applicarla. Al fine di creare un unico stack layer su cui applicare l'analisi, i singoli strati raster, che in questo caso sono le mappe dell'indice NDRE di marzo e aprile, devono avere la stessa risoluzione spaziale. Per l'ottenimento di due strati raster con la stessa risoluzione spaziale, è stata usata la funzione "resample" del pacchetto raster di "R", che trasferisce i valori tra strati raster non corrispondenti in termini di risoluzione spaziale. Lo stack layer contenente gli strati raster NDRE è stato creato utilizzando la funzione "stack" del pacchetto raster di "R".

La cluster analysis è stata eseguita con l'impiego dell'algoritmo k-means, utilizzando la funzione "kmeans" del pacchetto stats di "R". Per la definizione del numero ottimale di cluster è stato eseguito il gap statistic index, come risultato si è ottenuto che il numero ottimale di cluster è 2.

2.6.1 *L'algoritmo di clusterizzazione k-means*

Tutti gli algoritmi di clustering si basano su una metrica, puramente geometrica, che permette di identificare quanto siano simili due oggetti o dati fra di loro. Infatti gli oggetti o dati in esame vengono visti come insieme di valori reali che ne rappresentano le caratteristiche. Questi valori a loro volta, possono essere raggruppati in modo da formare dei vettori che rappresentino punti in uno spazio euclideo (Figura 24).

Nel nostro caso i valori di NDRE di marzo ed aprile dei punti georeferenziati possono essere riportati rispettivamente sull'asse delle ordinate e su quello delle ascisse ed essere visualizzabili in uno spazio euclideo.

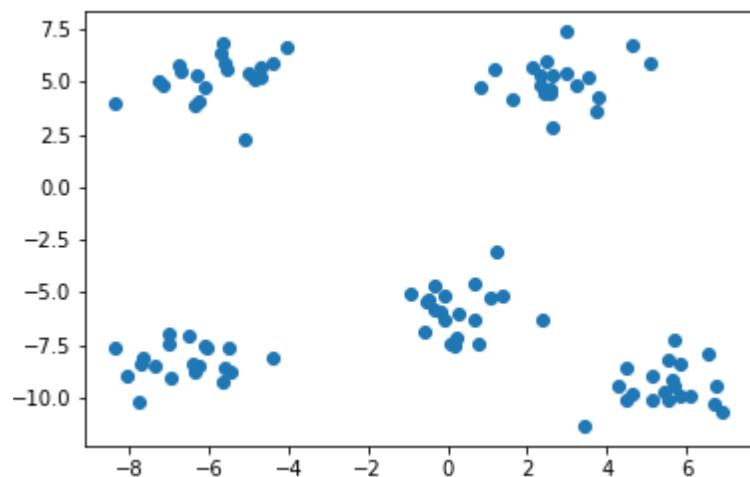


Figura 24. *Punti in uno spazio euclideo che subiranno il processo di clusterizzazione.*

Il k-means è un algoritmo che divide un insieme di elementi in k gruppi (cluster) senza costruire una struttura gerarchica, seguendo il principio in base al quale gli elementi di uno stesso gruppo dovrebbero essere più simili degli elementi appartenenti a gruppi diversi. I cluster rappresentano i gruppi che dividono i dati a seconda della presenza o meno di una certa somiglianza tra di loro e, il loro numero viene scelto prima dell'esecuzione dell'algoritmo. Ogni cluster raggruppa un particolare insieme di dati che vengono definiti data points, che a loro volta rappresentano il set di dati. Per ogni cluster si definisce un centroide, ossia un punto al centro del cluster (Figura 25).

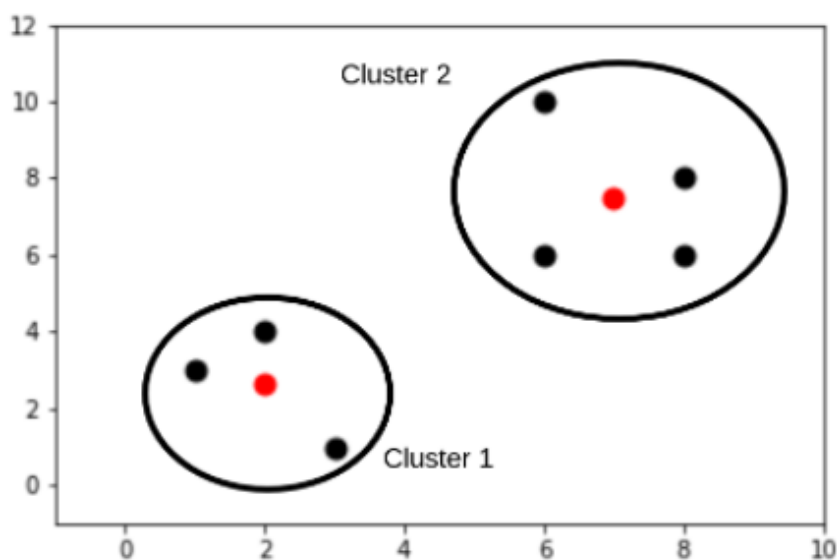


Figura 25. *Due cluster con i relativi centroidi evidenziati in rosso.*

Il k-means è un algoritmo iterativo, ossia che esegue ripetutamente alcune fasi, fondamentalmente è formato dai seguenti step:

1. Inizializzazione, cioè si definiscono i parametri di input per eseguire l'algoritmo, si sceglie quindi l'ampiezza del set di dati e k centroidi iniziali disposti casualmente. Con la scelta del numero di centroidi, si identificano i cluster di cui il data set sarà composto, quindi i raggruppamenti che si vogliono effettuare.
2. Assegnazione del cluster, in questa fase l'algoritmo analizza ciascuno dei data points e li assegna al centroide più vicino, questo viene eseguito con il calcolo della distanza euclidea tra ogni data points e ogni centroide.
3. Aggiornamento della posizione del centroide, dopo lo step 2 è probabile che si siano formati nuovi cluster, in quanto a quelli precedenti si saranno assegnati o tolti dei data points. Quindi si ricalcola la posizione media dei centroidi, il cui valore sarà la media di tutti i data points che sono stati assegnati al nuovo cluster.

L'algoritmo continuerà a ripetere gli step 2 e 3 finché i centroidi non si modificano, ossia si raggiunge un punto di convergenza tale per cui non si hanno più modifiche dei cluster, si dice che è stata raggiunta la condizione di stop che può essere rappresentata da una delle seguenti opzioni:

- nessun data points cambia cluster;
- la somma delle distanze dei punti di un cluster rispetto al proprio centroide è ridotta al minimo;
- viene raggiunto un numero massimo di iterazioni.

Alla fine il software "R" restituisce la mappa delle zone omogenee.

2.7 Analisi statistica

Tutte le analisi statistiche sono state condotte con il software "R". Ogni buona analisi è basata su un modello biologicamente rilevante e su ipotesi realistiche.

È stato costruito un modello lineare, usando la funzione "lm" di "R", dove la concimazione viene considerata il fattore principale.

Prima di effettuare l'analisi della varianza (ANOVA), è stato verificato che il modello fosse in grado di soddisfare le tre ipotesi dell'ANOVA.

La distribuzione della normalità del modello residuo è stata verificata sia geograficamente (QQ-plot), sia attraverso il test di normalità Shapiro-Wilk.

L'omoschedasticità è stata verificata attraverso il test di Levene.

L'ultima ipotesi dell'ANOVA è stata soddisfatta attraverso il disegno sperimentale e il campionamento casuale.

Solo quando l'ANOVA ha mostrato una differenza significativa tra i fattori ($p\text{-value} < 0,5$), l'analisi post-hoc delle medie marginali stimate è stata eseguita utilizzando la funzione "emmeans" con la regolazione Bonferroni del pacchetto emmeans R.

Le relazioni esponenziali tra le variabili sono state analizzate utilizzando il coefficiente di determinazione R^2 .

Per analizzare i dati della resa è stato utilizzato lo stesso approccio statistico usato per i parametri delle colture e i dati relativi agli indici di vegetazione.

Capitolo 3

RISULTATI

3.1 Andamento termo-pluviometrico

Attraverso i dati forniti dall'ASSAM (Agenzia Servizi Settore Agroalimentare delle Marche), si è potuto analizzare l'andamento termo-pluviometrico di Recanati, nel periodo che va dalla semina alla raccolta del frumento nell'annata agraria 2019/2020.

Nel periodo che va dalla semina alla raccolta del frumento duro le precipitazioni sono ammontate a 322,2 mm, con un massimo nel mese di marzo (86,6 mm) ed un minimo nel mese di luglio (3,2 mm).

Dalla tabella 7 si riscontra che i mesi più piovosi sono stati marzo, aprile e giugno. La figura 26 evidenzia l'elevata piovosità del mese di giugno e l'evento che con molta probabilità ha provocato il completo allettamento del frumento che ha ricevuto la dose di azoto più alta.

Per quanto riguarda l'andamento termico (Figura 27), si riscontra una temperatura media mensile di 14,25°C. La massima temperatura media mensile (Tabella 7) è stata misurata a luglio con 25,4°C, invece la minima nel mese di gennaio con 6,53°C.

Tabella 7. *Temperatura media e precipitazioni del periodo novembre 2019 – luglio 2020; Recanati.*

Anno	Mese	Guzzini	
		Temperatura media	Precipitazioni
2019	11	12,9	16,6
2019	12	8,98	36,8
2020	1	6,53	4,4
2020	2	10,1	21
2020	3	10,1	86,6
2020	4	13,5	52,2
2020	5	18,5	33,4
2020	6	22,3	68
2020	7	25,4	3,2

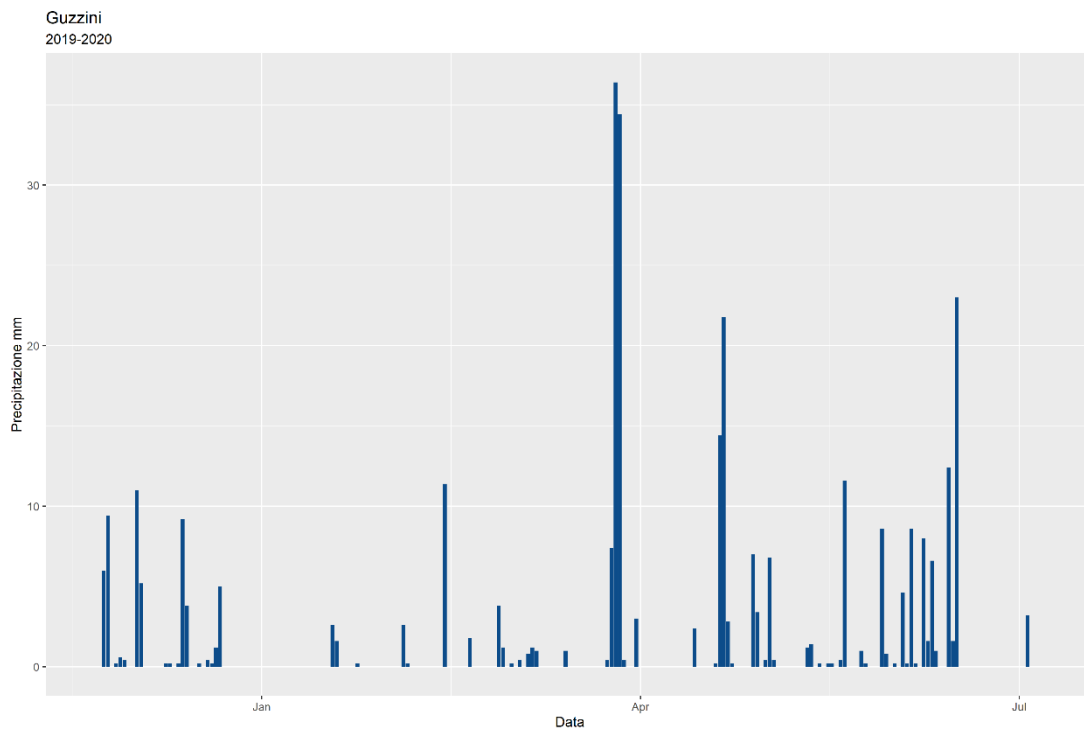


Figura 26. *Precipitazioni novembre 2019 - luglio 2020; Recanati.*

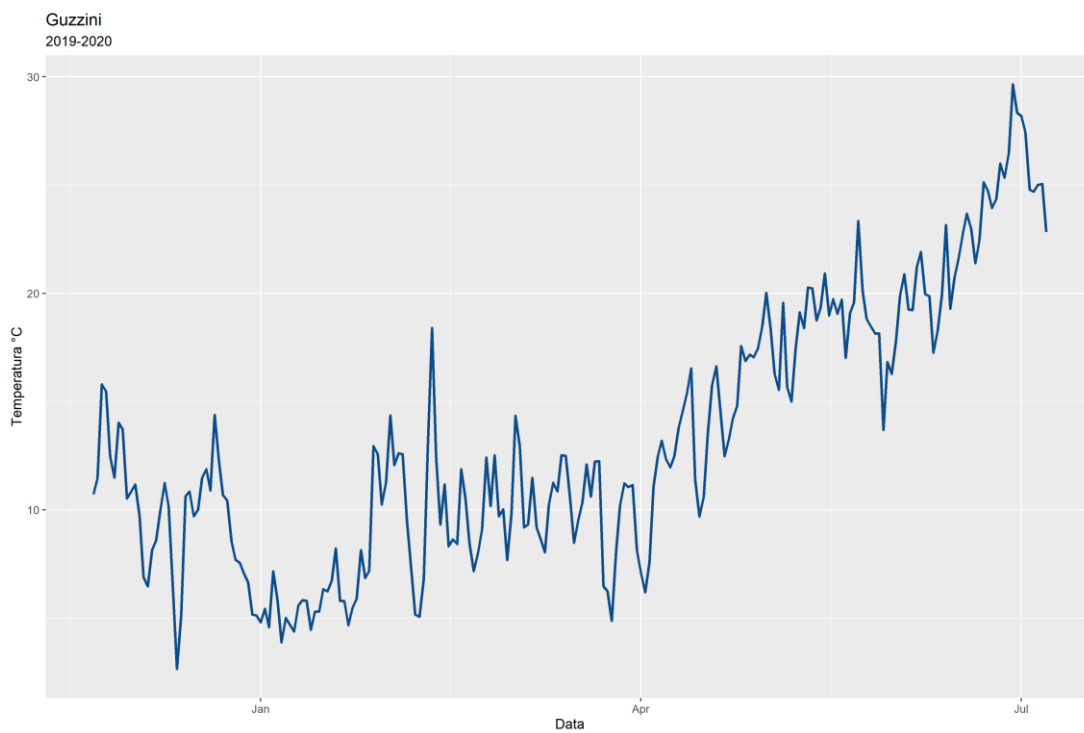


Figura 27. *Andamento termico novembre 2019 – luglio 2020; Recanati.*

3.2 Biomassa

Prendendo in considerazione il peso fresco della biomassa la quantità di azoto somministrata al frumento influisce in modo significativo su questo parametro, infatti nel campionamento del 19/03/2020 per il trattamento N90 il peso fresco della biomassa è risultato essere pari a 50,83 g, invece in N225 pari a 127,90 g. Anche nel rilievo eseguito il 24/04/2020 viene confermata questa tendenza, il peso della biomassa fresca in N90 è risultato pari a 173,87 g mentre in N225 sono stati osservati valori medi pari a 330,06 g di biomassa fresca.

Questi valori insieme a quelli dei pesi secchi, dopo aver posto i campioni in stufa a 105°C per 48 ore, sono riportati in tabella 8.

Tabella 8. *Peso fresco e secco della biomassa rilevati presso l'azienda agricola Guzzini.*

Data	Input azoto	Peso fresco [g]	Peso secco [g]
19/03/2020	N90	50,83 ($\pm 9,79$) b	8,19 ($\pm 2,35$) b
	N225	127,90 ($\pm 29,47$) a	24,89 ($\pm 5,94$) a
24/04/2020	N90	173,87 ($\pm 39,11$) b	43,55 ($\pm 10,40$) b
	N225	330,06 ($\pm 70,67$) a	85,02 ($\pm 16,50$) a

Si assiste ad un incremento del peso secco del 67% passando da N90 a N225 nel campionamento del 19/03/2020, mentre c'è un incremento del 49% passando da N90 ad N225 nel campionamento del 24/04/2020.

3.3 Variabili produttive

Per quanto riguarda il numero di cariossidi per spiga è emerso che la minore concimazione azotata ha portato ad un numero maggiore di cariossidi per spiga, infatti si riscontano in media 50 ($\pm 4,08$) cariossidi per spiga in N90 rispetto alle 43 ($\pm 3,60$) cariossidi per spiga di N225.

Il trattamento N90 ha portato all'ottenimento in media di 440 spighe/m² con una deviazione standard di 60, mentre il trattamento N225 ha permesso di raggiungere in media 624 spighe/m² con una deviazione standard di 146, si ha una differenza percentuale tra i due trattamenti del 29,5%.

Il peso dei mille semi non ha fatto registrare differenze significative tra i due trattamenti, infatti il valore medio del trattamento N90 è di 60 \pm 1,15 g simile al valore medio del

trattamento N225 che è di $60 \pm 2,92$ g. Questo è in accordo con quanto descritto da (Karam et al., 2009).

La resa media è stata di 5,35 t/ha per N90 e 6,54 t/ha per N225, si registra un aumento di produzione di granella dovuto alla concimazione azotata.

Le variabili produttive sono riportate in tabella 9.

Tabella 9. Variabili produttive relative all'azienda agricola Guzzini.

Input azoto	Numero cariossidi/spiga	n° spighe/m²	Peso 1000 semi	Granella [t/ha]
N90	50 ($\pm 4,08$) a	440 ($\pm 59,69$) b	60 ($\pm 1,55$) a	5,35 ($\pm 1,18$) b
N225	43 ($\pm 3,60$) b	624 ($\pm 146,3$) a	60 ($\pm 2,92$) a	6,54 ($\pm 0,92$) a

3.4 Letture SPAD

Le letture SPAD sono state eseguite in due date 19/03/2020 e 24/04/2020, rispettivamente in corrispondenza delle fasi fenologiche di levata (ZS 35) e di antesi (ZS 60).

Dai valori registrati è possibile osservare che i valori più alti si ottengono nella zona dove è stato apportato il maggior quantitativo di azoto. In N90 si sono osservati valori di 38 nel primo campionamento e 41 nel secondo, invece in N225 i valori sono stati rispettivamente di 48 e 51.

Come descritto in precedenza è stata riscontrata una correlazione tra il contenuto di azoto e la quantità di clorofilla nella foglia, con l'aumento dell'azoto disponibile aumentano i valori di SPAD (Vouillot et al., 1998). I valori delle letture SPAD sono riportati nella tabella 10.

Tabella 10. Letture SPAD relative all'azienda agricola Guzzini.

Data	Input azoto	Letture SPAD
19/03/2020	N90	38 ($\pm 2,6$) b
	N225	48 ($\pm 1,5$) a
24/04/2020	N90	41 ($\pm 1,1$) b
	N225	51 ($\pm 0,7$) a

3.5 Indici di vegetazione

Da precedenti risultati sperimentali (Orsini et al., 2020) e da quanto emerso in letteratura (Wang et al., 2019) è chiaro che l'indice di vegetazione più accurato per la stima dello stato vegetativo e nutrizionale di una coltura è il Normalized Difference Red-Edge (NDRE), tuttavia ancora oggi l'indice di vegetazione più usato a livello applicativo rimane il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), nonostante quest'ultimo tenda a saturare quando la coltura supera un LAI di 2 (Goswami et al., 2015; Gu et al., 2013).

Possiamo quindi confrontare i due indici di vegetazione (NDRE e NDVI) rilevati dalle due camere multispettrali portate dal SAPR "DJI Matrice 600 pro" le quali corrispondono alle camere portate dai satelliti "Sentinel-2" e "WorldView-2".

Nell'azienda agricola "Guzzini" entrambe le camere rilevano un incremento dell'indice NDRE all'aumentare della dose di azoto somministrata al frumento. Nel volo del 19/03/2020 si passa da $N_{90} = 0,68$ a $N_{225} = 0,86$ per la camera MAIA S2, i valori rilevati dalla camera MAIA WV2 sono $N_{90} = 0,32$ e $N_{225} = 0,45$. Nel volo del 24/04/2020 i valori della camera MAIA S2 sono $N_{90} = 0,76$ e $N_{225} = 0,91$, mentre i valori della camera MAIA WV2 sono $N_{90} = 0,38$ e $N_{225} = 0,53$ (Tabella 11).

Risulta evidente che l'indice NDRE derivato dalla camera MAIA S2 è più alto rispetto a quello derivante dalla camera MAIA WV2.

Per quanto riguarda l'indice NDVI si nota un incremento significativo di questo, all'aumentare della dose di azoto, solo nel volo di marzo, i valori sono $N_{90} = 0,86$ e $N_{225} = 0,97$ per la camera MAIA S2, invece per la MAIA WV2 i valori sono stati $N_{90} = 0,88$ e $N_{225} = 0,95$. Nel volo di aprile si è verificato il fenomeno di saturazione dell'NDVI, dovuto al notevole incremento della biomassa della coltura e quindi del LAI, infatti non si notano differenze significative dell'indice tra i due trattamenti. I valori della camera MAIA S2 sono $N_{90} = 0,93$ e $N_{225} = 0,97$, mentre i valori della camera MAIA WV2 sono $N_{90} = 0,92$ e $N_{225} = 0,96$ (Tabella 11).

In questo caso l'indice NDVI derivato dalle due camere mostra valori pressoché simili, a differenza di quanto successo con l'indice NDRE.

Il fenomeno di saturazione dell'indice NDVI risulta molto evidente anche tra i due voli di marzo ed aprile per quanto riguarda il trattamento N225, infatti abbiamo un NDVI di 0,97 rilevato dalla camera MAIA S2 che è lo stesso per entrambe le date, la stessa cosa si verifica per la camera MAIA WV2 che rileva un NDVI di 0,95 per il volo di marzo e 0,96 per quelle di aprile.

Tabella 11. *Indici di vegetazione Normalized Differece Red-Edge (NDRE) e Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dell'azienda agricola Guzzini.*

Data	Input azoto	NDRE	NDRE	NDVI	NDVI
		Sentinel	WorldView	Sentinel	WorldView
19/03/2020	N90	0,68 ($\pm 0,10$) b	0,32 ($\pm 0,04$) b	0,86 ($\pm 0,10$) b	0,88 ($\pm 0,03$) b
	N225	0,86 ($\pm 0,05$) a	0,45 ($\pm 0,05$) a	0,97 ($\pm 0,02$) a	0,95 ($\pm 0,03$) a
24/04/2020	N90	0,76 ($\pm 0,02$) b	0,38 ($\pm 0,04$) b	0,93 ($\pm 0,03$) a	0,92 ($\pm 0,03$) a
	N225	0,91 ($\pm 0,04$) a	0,53 ($\pm 0,04$) a	0,97 ($\pm 0,03$) a	0,96 ($\pm 0,02$) a

3.6 Mappe degli indici di vegetazione

I voli per la generazione delle mappe degli indici di vegetazione sono stati effettuati il 19/03/2020 dopo che il frumento aveva ricevuto due concimazioni azotate in entrambi i trattamenti, nello specifico in N90 la seconda concimazione rappresenta l'ultima somministrazione di azoto. Il secondo volo è stato effettuato il 24/04/2020 quindi dopo che il frumento aveva ricevuto la terza concimazione azotata nel trattamento N225.

3.6.1 *Indice NDRE*

Dalle mappe dell'indice NDRE derivante dalle due camere multispettrali MAIA S2 e MAIA WV2, si nota come la fascia che ha ricevuto la minore dose di azoto mostri un valore più basso di NDRE. Invece la parte di campo che ha ricevuto la dose di azoto più alta mostra un valore dell'indice NDRE più elevato (Figura 28). Questo andamento è percepibile già nel volo effettuato il 19/03/2020 e, risulta ancora più evidente con il secondo volo del 24/04/2020, a conferma dell'effetto della dose crescente di azoto sulla coltura. Dalla figura si nota anche l'aumento dell'NDRE, all'interno dello stesso trattamento, con il procedere della stagione vegetativa, questo conferma l'effetto dell'azoto sullo sviluppo vegetativo della coltura e la buona stima che restituisce l'indice NDRE per quanto riguarda lo sviluppo vegetativo della coltura. Sempre nella figura 28 si vede come la tonalità dei colori derivati dalla camera MAIA S2 siano più scuri, rispetto a quelli derivati dalla camera MAIA WV2, quindi i valori dell'indice NDRE saranno rispettivamente più alti nel primo caso e più bassi nel secondo caso.

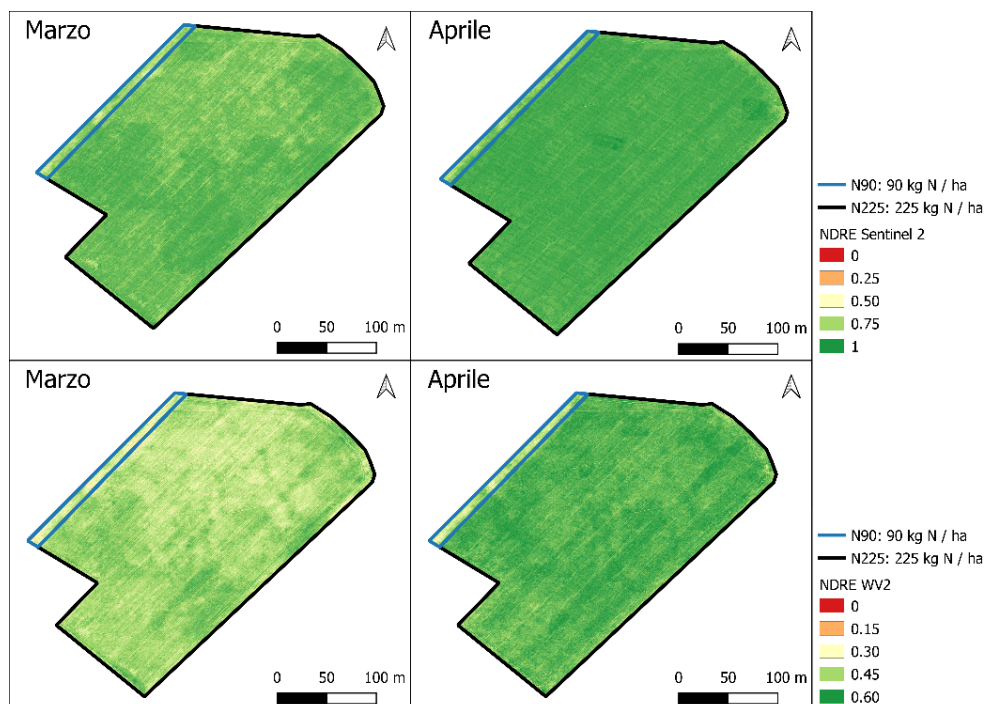


Figura 28. Mappe dell'indice di vegetazione NDRE dell'azienda agricola Guzzini. In alto sono riportate le mappe di marzo ed aprile derivate dalla camera MAIA S2, in basso le mappe della camera MAIA WV2. Le stampe di queste mappe sono state ottenute con il software QGIS.

3.6.2 Indice NDVI

Dalle mappe dell'indice NDVI derivate dalle due camere multispettrali si riesce a percepire che la fascia di campo che ha ricevuto la minore dose di azoto presenta un valore di NDVI più basso rispetto alla parte che ha ricevuto la dose maggiore. La differenza però risulta significativa solo nel volo del 19/03/2020, come riportato precedentemente in tabella 11, invece nel volo del 24/04/2020 non si apprezza una differenza statisticamente significativa tra i due trattamenti (Figura 29), questo a conferma dei problemi di saturazione che interessano l'NDVI quando il LAI supera il valore di 2.

In questo caso non si notano differenze rilevanti per quanto riguarda il valore dell'indice NDVI derivato dalle due diverse camere (MAIA S2 e MAIA WV2), come invece è accaduto per l'indice NDRE.

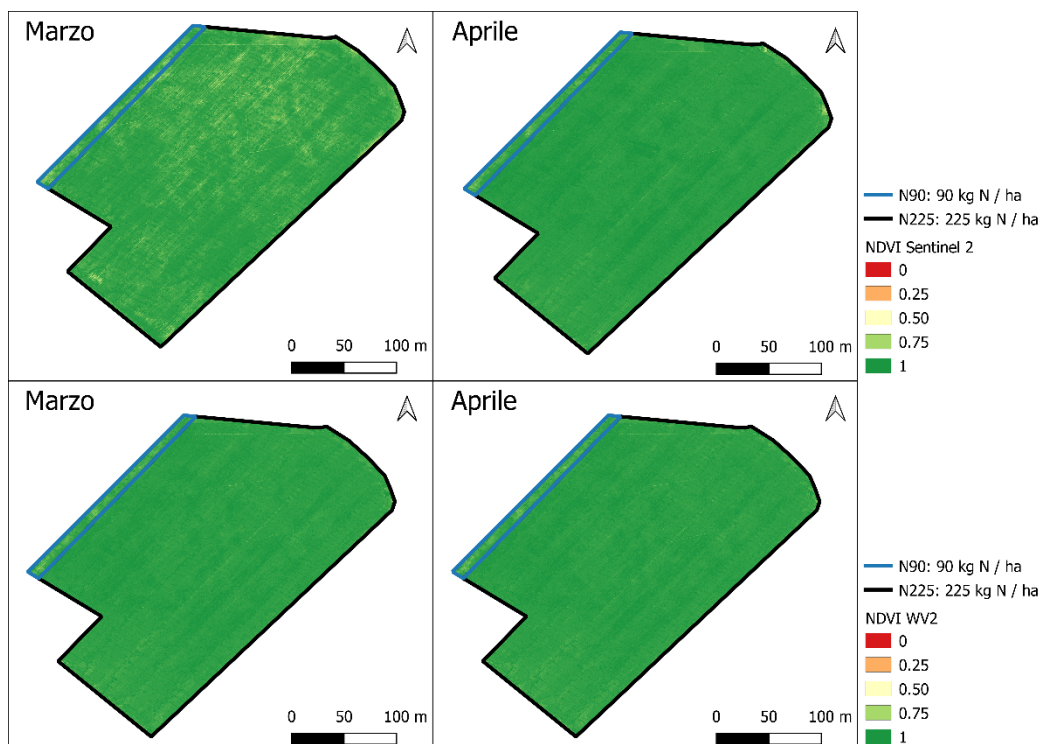


Figura 29. Mappe dell'indice di vegetazione NDVI dell'azienda agricola Guzzini. In alto sono riportate le mappe di marzo ed aprile derivate dalla camera MAIA S2, in basso le mappe della camera MAIA WV2. Le stampe di queste mappe sono state ottenute con il software QGIS.

3.7 Correlazioni tra gli indici di vegetazione ed i parametri rilevati con i campionamenti

L'elaborazione degli indici di vegetazione, nello specifico l'NDRE e l'NDVI hanno permesso di valutare le correlazioni tra questi ed il peso fresco della biomassa prelevata in campo con i campionamenti.

Si sono registrate buone correlazioni tra il peso fresco e l'NDRE derivato dalla camera multispettrale MAIA WV2 sia nel volo di marzo che in quello di aprile con un R^2 rispettivamente di 0,83 (Figura 30) e 0,79 (Figura 31).

L'NDRE derivato dalla camera MAIA S2 ha mostrato una buona correlazione con il peso fresco solo nel volo di marzo con un R^2 di 0,70 (Figura 32). Invece nel volo di aprile la correlazione tra l'indice ed il peso fresco ha mostrato una diminuzione con $R^2 = 0,52$ (Figura 33).

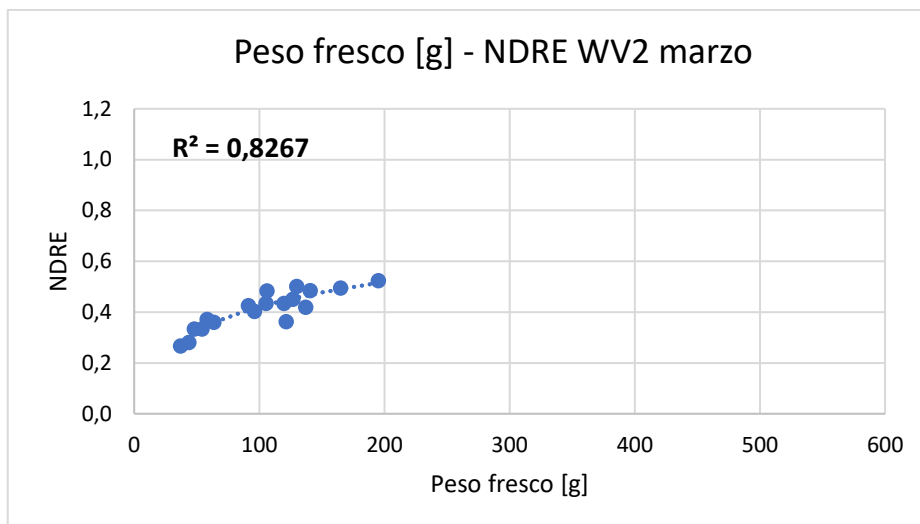


Figura 30. Correlazione tra il peso fresco e l'NDRE-WV2 del frumento rilevati a marzo.

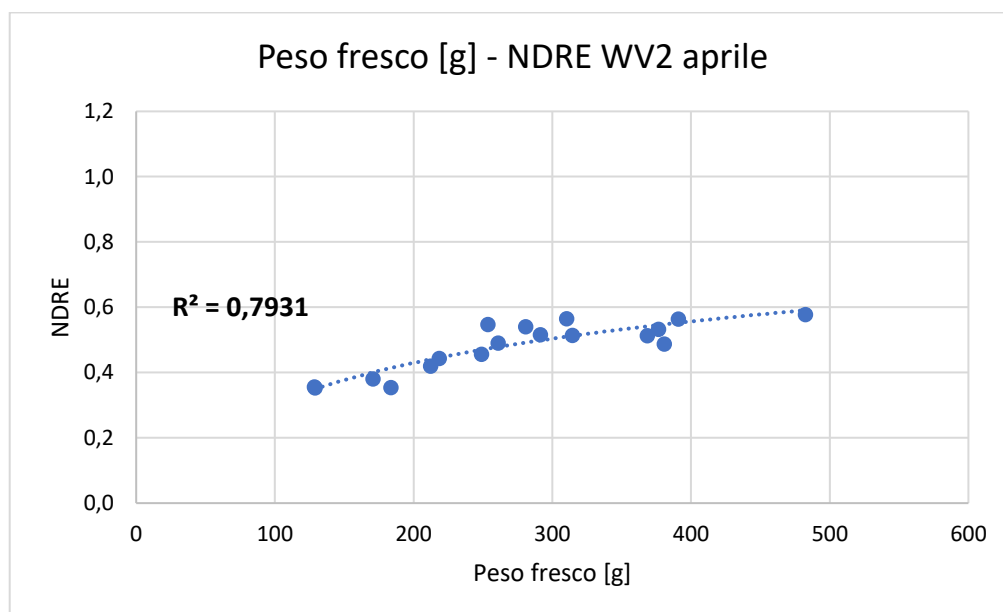


Figura 31. Correlazione tra il peso fresco e l'NDRE-WV2 del frumento rilevati ad aprile.

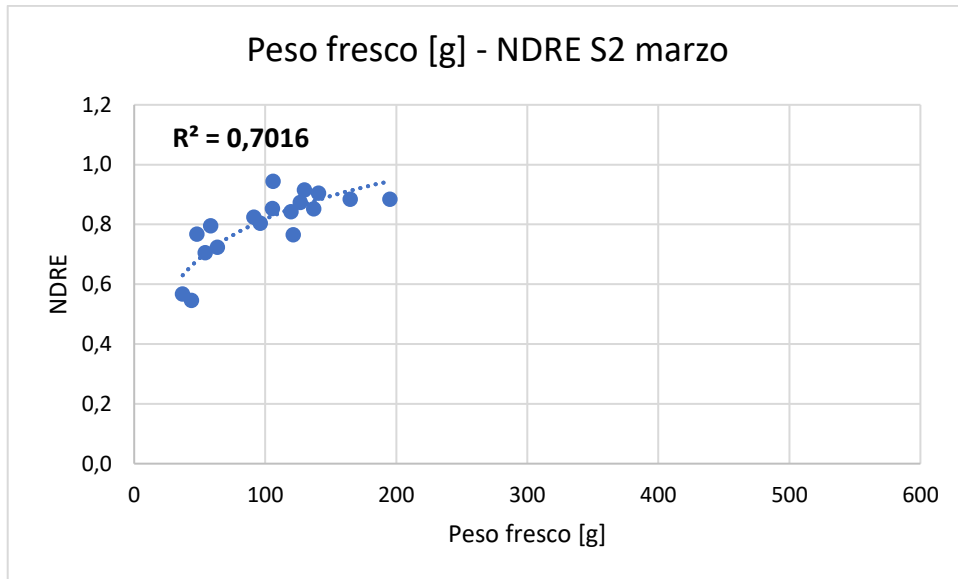


Figura 32. Correlazione tra il peso fresco e l'NDRE-S2 del frumento rilevati a marzo.

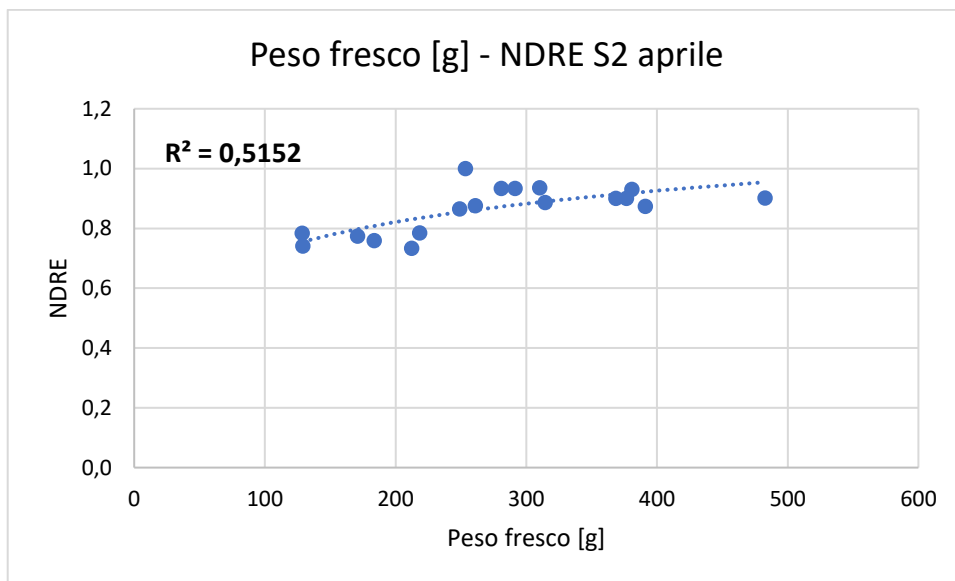


Figura 33. Correlazione tra il peso fresco e l'NDRE-S2 del frumento rilevati ad aprile.

L'indice NDVI ha dimostrato di avere una correlazione meno forte con il peso fresco, infatti solo nel volo di marzo si è riscontrato un R^2 di 0,65 con l'NDVI derivato dalla camera MAIA WV2 (Figura 34), ma l'NDVI derivato dalla camera MAIA S2 ha mostrato un R^2 di 0,5. Invece nei voli di aprile le correlazioni tra l'NDVI, derivato da entrambe le camere, e i pesi freschi sono state molto basse (Figura 35).

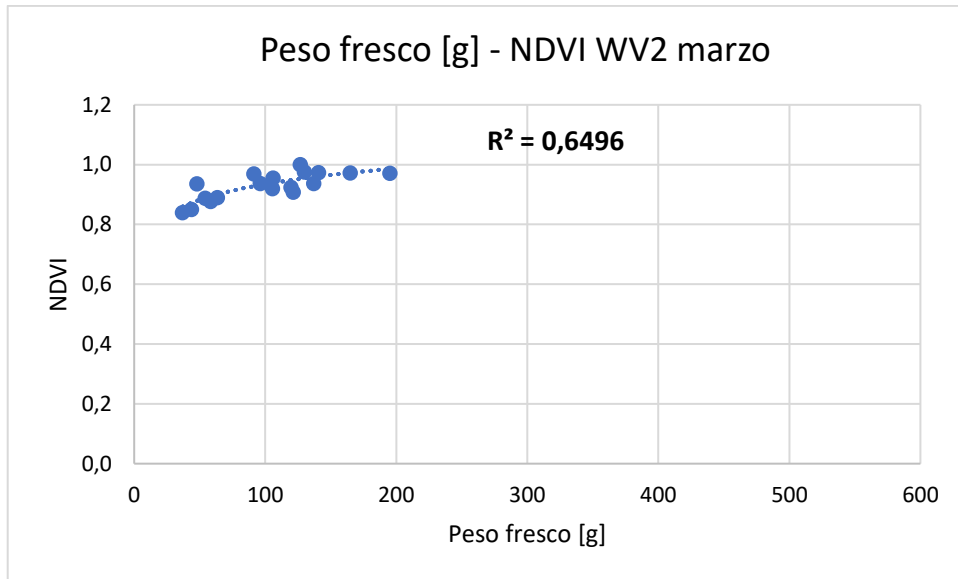


Figura 34. Correlazione tra peso fresco e l'NDVI-WV2 del frumento rilevati a marzo.

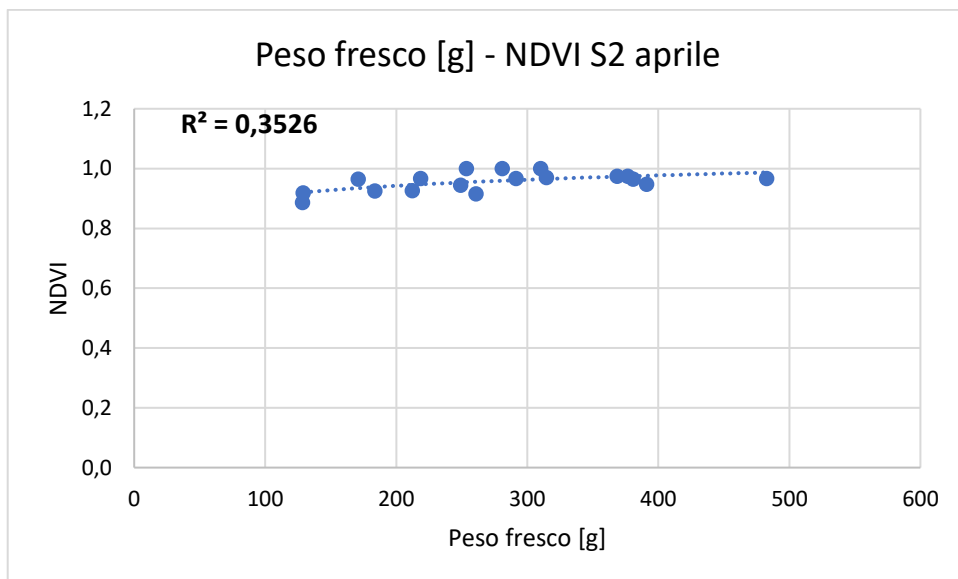


Figura 35. Correlazione tra il peso fresco e l'NDVI-S2 del frumento rilevati ad aprile.

Le letture SPAD effettuate sulle foglie di frumento hanno mostrato buone correlazioni con l'NDRE derivante da entrambe le camere multispettrali (Figura 36 e 37), sono stati osservati valori di R^2 di 0,81 per la MAIA WV2 e di 0,74 per MAIA S2. Lo SPAD è un misuratore di clorofilla che permette di rilevare lo stato nutrizionale azotato delle piante, perché dalla letteratura (Vouillot et al., 1998) si conosce bene la sua correlazione con il contenuto di clorofilla nella foglia, quindi la buona correlazione tra letture SPAD e NDRE conferma come

quest'ultimo indice sia un ottimo estimatore dello stato nutrizionale della coltura. Invece è emerso che c'è una scarsa correlazione tra le letture SPAD e l'NDVI.

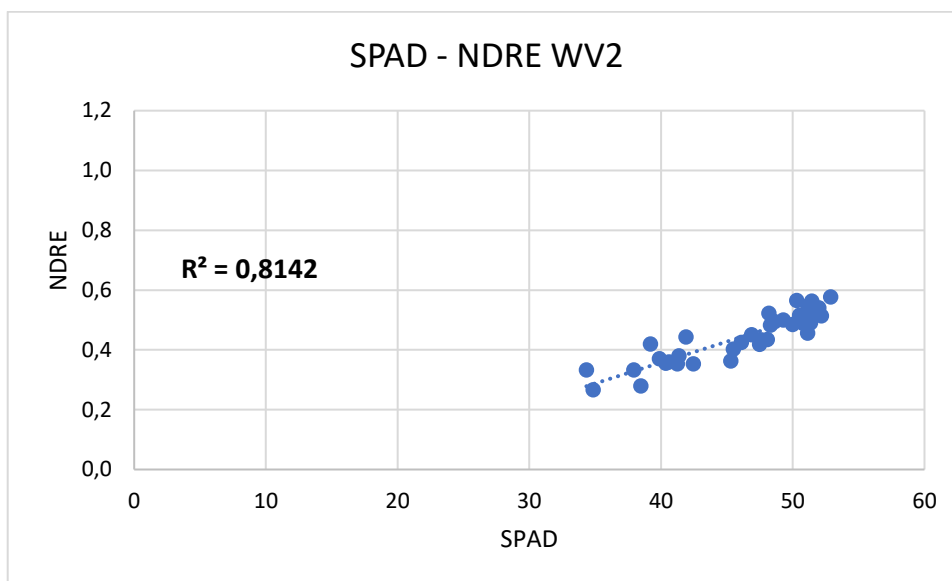


Figura 36. *Correlazione tra letture SPAD e l'NDRE WV2 rilevati sul frumento.*

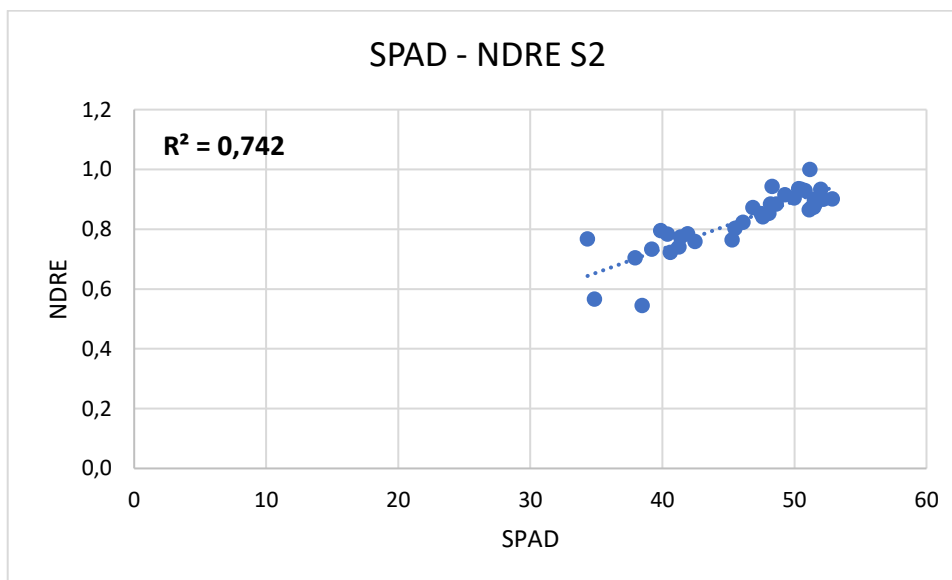


Figura 37. *Correlazione tra letture SPAD e l'NDRE S2 rilevati sul frumento.*

3.8 Zone omogenee

Le zone omogenee sono state determinate con il software “R” applicando l’algoritmo *k-means*. Come dati di input sono stati usati gli indice NDRE derivati dal volo di marzo ed aprile, in quanto questo indice sembra essere il migliore descrittore dello stato vegetativo e nutrizionale della coltura.

L’algoritmo *k-means* ha dato come risultato la delineazione di due zone omogenee (Figura 38) che corrispondono alle differenze significative tra i due trattamenti e si vanno a sovrapporre perfettamente allo schema sperimentale di campo. Quindi questa metodologia è stata validata agronomicamente perché i parametri rilevati in campo sulla coltura (peso fresco e secco, letture SPAD, numero spighe/m², resa della granella) mostrano differenze statisticamente significative all’interno delle due aree. In questo modo è stata confermata l’accuratezza dell’algoritmo nella determinazione delle zone omogenee, in quanto è uno dei più usati negli ambiti applicativi dell’agricoltura di precisione.

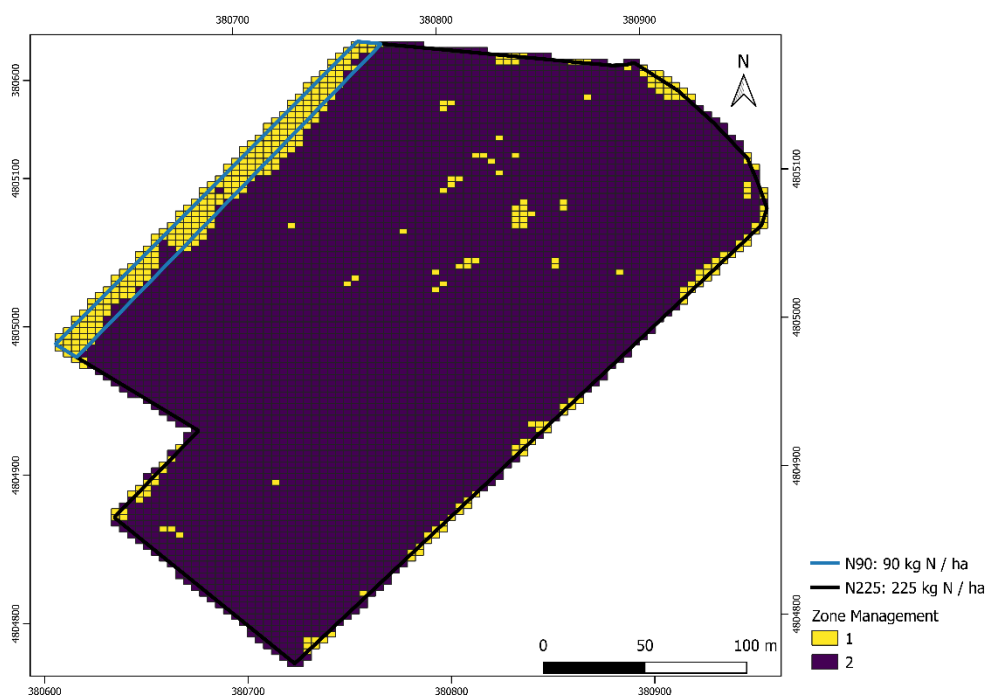


Figura 38. *Mapa delle zone omogenee dell’azienda agricola Guzzini, ottenute con il software “R” applicando l’algoritmo di clusterizzazione k-means.*

La determinazione delle zone omogenee rappresenta il punto cardine per l’applicazione degli input a rateo variabile in agricoltura di precisione, infatti utilizzando questa metodologia

di delimitazione delle MZ è possibile utilizzare più layer informativi come gli indici di vegetazione derivati da immagini multispettrali acquisite in diversi stadi fenologici della coltura, le mappe di produzione derivanti dalle macchine da raccolta dotate di questa tecnologia ed anche la mappatura del suolo. Con la sovrapposizione di più strati informativi si riesce ad individuare in modo più preciso la variabilità presente all'interno dell'appezzamento. Andando poi ad assegnare ad ogni zona omogenea individuata, una specifica quantità di concime azotato si genererà la mappa di prescrizione per la concimazione a rateo variabile, da effettuarsi con appositi spandiconcime e rateo variabile.

Questo approccio fornisce interessanti spunti applicativi per la gestione sostenibile dei sistemi colturali descritti, riuscendo a massimizzare l'efficienza d'uso dell'azoto riducendone quindi gli sprechi e l'impatto ambientale, inoltre è un approccio che può essere trasferito a livello territoriale grazie alle numerose costellazioni di satelliti in orbita intorno alla terra che forniscono immagini multispettrali.

CONCLUSIONI

Analizzando i parametri rilevati con i campionamenti in campo si può fare una valutazione sulla significatività dei trattamenti, il peso fresco e secco della biomassa è più elevato nel trattamento N225, anche il numero di spighe/m² e la produzione di granella in t/ha sono stati più alti in N225, questo conferma la forte influenza esercitata dall'azoto su questi parametri colturali. Il peso dei 1000 semi come confermato dalla letteratura (Karam et al., 2009) non ha mostrato differenze significative tra i due trattamenti. Il numero di cariossidi per spiga invece è stato significativamente più alto in N90 rispetto a N225, segno che l'elevata dose di azoto somministrata possa aver creato uno squilibrio tra la parte riproduttiva e quella vegetativa a favore di quest'ultima, provocando una minore differenziazione di fiori per spiga. Anche i valori delle letture SPAD sono stati più alti in N225, rispetto ad N90.

Gli indici di vegetazione derivati dai due voli effettuati sulla coltura confermano l'effetto della dose crescente di azoto somministrata alla coltura, nello specifico l'NDRE mostra differenze significative tra i due trattamenti in entrambe le date di volo, assumendo quindi valori più alti in N225 e più bassi in N90. L'NDVI mostra differenze significative tra i due trattamenti solo nel volo di marzo, mentre nel volo di aprile non ci sono differenze significative dell'indice tra i due trattamenti. Questo riporta in evidenza il problema di saturazione che ha l'NDVI (Goswami et al., 2015; Gu et al., 2013) quando la coltura supera il valore 2 di LAI, cioè l'indice aumenta in maniera meno che proporzionale rispetto al LAI fino al raggiungimento di un asintoto.

L'elaborazione degli indici di vegetazione ed i parametri rilevati in campo hanno permesso di individuare alcune importanti correlazioni, fondamentali per le applicazioni di agricoltura di precisione:

1. l'NDRE derivato da entrambe le camere nel complesso mostra una buona correlazione con il peso fresco della coltura, la camera MAIA WV2 ha dato i valori più alti di R²;
2. solo l'NDVI derivato dalla camera MAIA WV2 nel mese di marzo ha mostrato una buona correlazione con il peso fresco;

3. è emersa una buona correlazione anche tra le letture SPAD e l'NDRE derivato da entrambe le camere.

I punti 1 e 3, insieme alle differenze significative del NDRE tra i due trattamenti, ci permettono di dire come questo indice di vegetazione sia più adatto per la stima dello stato vegetativo e nutrizionale della coltura, in linea con quanto riportato in letteratura (Orsini et al., 2020; Wang et al., 2019).

L'NDVI invece dimostra di essere affidabile per la stima della variabilità della biomassa verde solo per valori di LAI medi e bassi, sul frumento quindi potrebbe essere usato per le applicazioni di agricoltura di precisione fino allo stadio di metà levata del frumento.

L'indice di vegetazione NDRE derivato sulla coltura con il volo di marzo e di aprile, con il frumento duro rispettivamente allo stadio di levata e di antesi hanno permesso la delimitazione delle zone omogenee, applicando l'algoritmo di clusterizzazione k-means. Questo si è dimostrato essere accurato nella determinazione delle zone omogenee, come già riportato in letteratura (Albornoz et al., 2018; Arno et al., 2011; L. Haghverdi et al., 2015; Ikenaga & Inamura, 2008), in quanto le due zone individuate si vanno a sovrapporre perfettamente sopra allo schema sperimentale. Infatti i diversi parametri rilevati in campo, direttamente sulla coltura, (peso fresco e secco, letture SPAD, numero spighe/m², resa della granella) mostrano valori con differenze statisticamente significative all'interno delle due zone omogenee individuate dall'algoritmo, confermando che, gli strumenti e le procedure descritte siano utili per identificare porzioni di campo sulle quali poter massimizzare l'utilizzo degli input azotati riducendo l'impatto ambientale dei sistemi colturali descritti.

Questa sperimentazione mette in evidenza come sia di fondamentale importanza scegliere un indice di vegetazione che sia altamente correlato con i parametri dello stato vegetativo e nutrizionale della coltura, in questo caso l'NDRE, in modo tale da ottenere una mappa delle zone omogenee che sia rappresentativa della reale variabilità spaziale dello stato nutrizionale della coltura. In questo modo, si riusciranno poi a generare mappe di prescrizione per la concimazione a rateo variabile di copertura nel frumento, che garantiscano la massima efficienza dell'input azotato.

Le metodologie applicate in questa sperimentazione risultano essere trasferibili a livello territoriale, grazie alle numerose costellazioni di satelliti presenti in orbita, ad esempio il Sentinel-2 è un satellite europeo dell'ESA che garantisce una copertura globale e la fornitura delle relative immagini satellitari.

BIBLIOGRAFIA

- Albornoz, E. M., Kemerer, A. C., Galarza, R., Mastaglia, N., Melchiori, R., & Martínez, C. E. (2018). Development and evaluation of an automatic software for management zone delineation. *Precision Agriculture*, *19*(3), 463–476. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9530-9>
- Arno, J., Martinez-Casasnovas, J. A., Ribes-Dasi, M., & Rosell, J. R. (2011). Clustering of grape yield maps to delineate site-specific management zones. *Spanish Journal of Agricultural Research*; *Vol 9, No 3 (2011)DO - 10.5424/Sjar/20110903-456-10* . <https://revistas.inia.es/index.php/sjar/article/view/2022>
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, *35*(2–3), 161–173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- 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*, *26*(2), 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.08.008>
- Baudron, F., & Giller, K. E. (2014). Agriculture and nature: Trouble and strife? *Biological Conservation*, *170*, 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.12.009>
- Blondlot, A., Gate, P., & Poilvé, H. (2005). Providing operational nitrogen recommendations to farmers using satellite imagery. In *Precision agriculture '05. Papers presented at the 5th European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden* (pp. 345–352). Wageningen Academic Publishers.
- Boydell, B., & Mcbratney, A. (2002). Identifying Potential Within-Field Management Zones from Cotton-Yield Estimates. *Precision Agriculture*, *3*, 9–23. <https://doi.org/10.1023/A:1013318002609>
- Broge, N. H., & Leblanc, E. (2001). 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*(2), 156–172. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00197-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00197-8)

- Carter, G. A., & Knapp, A. K. (2001). Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *Am J Bot*, 88(4), 677–684. <https://doi.org/10.2307/2657068>
- Casa, R. (2017). *Agricoltura di precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali*. Edagricole-New Business Media.
- Castrignano, A., Buttafuoco, G., Khosla, R., Mouazen, A., Moshou, D., & Naud, O. (2020). *Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming*. Elsevier Science. <https://books.google.it/books?id=kyzJDwAAQBAJ>
- Cid-Garcia, N. M., Bravo-Lozano, A. G., & Rios-Solis, Y. A. (2014). A crop planning and real-time irrigation method based on site-specific management zones and linear programming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 107, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.06.002>
- Colaço, A., & Bramley, R. (2018). Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *Field Crops Research*, 218, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>
- Delgado, J. A., Khosla, R., Bausch, W. C., Westfall, D. G., & Inman, D. J. (2005). Nitrogen fertilizer management based on site-specific management zones reduces potential for nitrate leaching. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60(6), 402 LP – 410. <http://www.jsowconline.org/content/60/6/402.abstract>
- Delin, S., Lindén, 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, 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.05.001>
- Dobermann, A., Ping, J. L., Adamchuk, V. I., Simbahan, G. C., & Ferguson, R. B. (2003). Classification of Crop Yield Variability in Irrigated Production Fields. *Agronomy Journal*, 95(5), 1105–1120. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj2003.1105>
- Dobermann, Achim, & Cassman, K. G. (2005). Cereal area and nitrogen use efficiency are drivers of future nitrogen fertilizer consumption. *Science in China Series C: Life Sciences*, 48(2), 745–758. <https://doi.org/10.1007/BF03187115>
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). Hierarchical clustering. *Cluster Analysis*, 5, 71–110.
- Fleming, K. L., Westfall, D. G., & Bausch, W. C. (2000). Evaluating management zone technology and grid soil sampling for variable rate nitrogen application. In *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000* (pp. 1–13). American Society of Agronomy.

- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, *478*(7369), 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Fraisse, C., Sudduth, K., & Kitchen, N. (2001). Delineation of Site-Specific Management Zones by Unsupervised Classification of Topographic Attributes and Soil Electrical Conductivity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, *44*. <https://doi.org/10.13031/2013.2296>
- Gavioli, A., de Souza, E. G., Bazzi, C. L., Schenatto, K., & Betzek, N. M. (2019). Identification of management zones in precision agriculture: An evaluation of alternative cluster analysis methods. *Biosystems Engineering*, *181*, 86–102. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.019>
- Gebbers, R. (2015). *Current Crop and Soil Sensors for Precision Agriculture Leibniz-Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim, Germany Robin Gebbers Current Crop and Soil Sensors for Precision Agriculture. SEPTEMBER 2014*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4038.2244>
- Godwin, R. J., Richards, T. E., Wood, G. A., Welsh, J. P., & Knight, S. M. (2003). An economic analysis of the potential for precision farming in UK cereal production. *Biosystems Engineering*, *84*(4), 533–545. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00282-9](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00282-9)
- Goswami, S., Gamon, J., Vargas, S., & Tweedie, C. (2015). Relationships of NDVI, Biomass, and Leaf Area Index (LAI) for six key plant species in Barrow, Alaska. *PeerJ PrePrints*, *3*, e913v1. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.913v1>
- Grignani, C., Bassanino, M., Sacco, D., & Zavattaro, L. (2003). Il bilancio degli elementi nutritivi per la redazione del piano di concimazione. *Riv. Agron.*, *37*, 155–172.
- Gu, Y., Wylie, B. K., Howard, D. M., Phuyal, K. P., & Ji, L. (2013). NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA. *Ecological Indicators*, *30*, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.041>
- Guan, K., Berry, J. A., Zhang, Y., Joiner, J., Guanter, L., Badgley, G., & Lobell, D. B. (2016). Improving the monitoring of crop productivity using spaceborne solar-induced fluorescence. *Global Change Biology*, *22*(2), 716–726. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.13136>

- Haghverdi, A., Leib, B. G., Washington-Allen, R. A., Ayers, P. D., & Buschermohle, M. J. (2015). Perspectives on delineating management zones for variable rate irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, *117*, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.019>
- Haghverdi, L., Buettner, F., & Theis, F. J. (2015). Diffusion maps for high-dimensional single-cell analysis of differentiation data. *Bioinformatics*, *31*(18), 2989–2998. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btv325>
- Heege, H. J. (2013). Precision in Crop Farming. In *Precision in Crop Farming*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6760-7>
- Ikenaga, S., & Inamura, T. (2008). Evaluation of site-specific management zones on a farm with 124 contiguous small paddy fields in a multiple-cropping system. *Precision Agriculture*, *9*(3), 147–159. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9062-4>
- Jacquemoud, S., Baret, F., & Hanocq, J. F. (1992). Modeling spectral and bidirectional soil reflectance. *Remote Sensing of Environment*, *41*(2–3), 123–132. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90072-R](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90072-R)
- Jain, A. K., & Dubes, R. C. (1988). *Algorithms for Clustering Data*. Prentice-Hall, Inc.
- Karam, F., Kabalan, R., Breidi, J., Roupheal, Y., & Oweis, T. (2009). Yield and water-production functions of two durum wheat cultivars grown under different irrigation and nitrogen regimes. *Agricultural Water Management*, *96*(4), 603–615. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.09.018>
- Karpinski, I., Schuler, J., & Müller, K. (2015). A New Approach to Support Site-Specific Farming and Economic Decision Making for Precision Agriculture in East Germany: The Heterogeneity Indicator. *Outlook on Agriculture*, *44*(4), 283–289. <https://doi.org/10.5367/oa.2015.0224>
- Kitchen, N. R., Snyder, C. J., Franzen, D. W., & Wiebold, W. J. (2002). Educational Needs of Precision Agriculture. *Precision Agriculture*, *3*(4), 341–351. <https://doi.org/10.1023/A:1021588721188>
- Knight, S., Miller, P., & Orson, J. (2009). An up-to-date cost/benefit analysis of precision farming techniques to guide growers of cereals and oilseeds. In *HGCA Research Review* (Issue No.71, p. 115 pp.). Home Grown Cereals Authority.
- Lammel, J., Wollring, J., & Reusch, S. (2001). *Tractor based remote sensing for variable nitrogen fertilizer application BT - Plant Nutrition: Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research* (W. J. Horst, M. K. Schenk, A. Bürkert, N. Claassen, H. Flessa, W. B. Frommer, H. Goldbach, H.-W. Olf, V. Römheld,

- B. Sattelmacher, U. Schmidhalter, S. Schubert, N. v. Wirén, & L. Wittenmayer (eds.); pp. 694–695). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/0-306-47624-X_336
- 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 ambientale delle produzioni agricole milanesi*.
- Lencsés, E., Takács, I., & Takács-György, K. (2014). Farmers' Perception of Precision Farming Technology among Hungarian Farmers. In *Sustainability* (Vol. 6, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/su6128452>
- Li, Y., Shi, Z., Wu, H.-X., Li, F., & Li, H.-Y. (2013). Definition of Management Zones for Enhancing Cultivated Land Conservation Using Combined Spatial Data. *Environmental Management*, 52(4), 792–806. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0124-7>
- Liakos, V., Tagarakis, A., Vatsanidou, A., Fountas, S., Nanos, G., & Gemtos, T. (2013). *Application of variable rate fertilizer in a commercial apple orchard BT - Precision agriculture '13* (J. V Stafford (ed.); pp. 675–681). Wageningen Academic Publishers.
- Matese, A., Capraro, F., Primicerio, J., Gualato, G., Gennaro, S. F. Di, & Agati, G. (2013). *Mapping of vine vigor by UAV and anthocyanin content by a non-destructive fluorescence technique BT - Precision agriculture '13* (J. V Stafford (ed.); pp. 201–208). Wageningen Academic Publishers.
- Matese, Alessandro, Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., Belli, C., Zaldei, A., Bianconi, R., & Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. In *Remote Sensing* (Vol. 7, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/rs70302971>
- Moral, F. J., Terrón, J. M., & Silva, J. R. M. da. (2010). Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 335–343. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.12.002>
- Nawar, S., Corstanje, R., Halcro, G., Mulla, D., & Mouazen, A. M. (2017). Delineation of Soil Management Zones for Variable-Rate Fertilization: A Review. In *Advances in Agronomy* (Vol. 143, pp. 175–245). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.003>
- Oliver, R. (2010). Customer Satisfaction. In *Metal Finishing* (Vol. 100). <https://doi.org/10.1002/9781444316568.wiem03008>
- Orsini, R., Fiorentini, M., & Zenobi, S. (2020). Evaluation of Soil Management Effect on Crop Productivity and Vegetation Indices Accuracy in Mediterranean Cereal-Based Cropping

- Systems. In *Sensors* (Vol. 20, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/s20123383>
- Pisante, M., Stagnari, F., & Grant, C. A. (2012). Agricultural innovations for sustainable crop production intensification. *Italian Journal of Agronomy*, 7(4 SE-Review Articles), e40. <https://doi.org/10.4081/ija.2012.e40>
- Raun, W. R., & Johnson, G. V. (1999). Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. *Agronomy Journal*, 91(3), 357–363. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030001x>
- Robertson, M., Carberry, P., & Brennan, L. (2007). The economic benefits of precision agriculture: case studies from Australian grain farms. Retrieved March, 12(March), 2012.
- Rossel, R. A. V, McBratney, A. B., & Minasny, B. (2010). *Proximal Soil Sensing*. Springer Netherlands. <https://books.google.it/books?id=xpcaRHfiewC>
- Salisbury, F. B. (1994). *Fisiología vegetal* (C. W. Ross, V. González Velázquez tr, & R. Palacios Martínez rev (eds.)). México, Grupo Editorial Iberoamérica.
- Schenatto, K., de Souza, E. G., Bazzi, C. L., Gavioli, A., Betzek, N. M., & Beneduzzi, H. M. (2017). Normalization of data for delineating management zones. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.017>
- Solie, J. B., Stone, M. L., Raun, W. R., Johnson, G. V, Freeman, K., Mullen, R., Needham, D. E., Reed, S., & Washmon, C. N. (2003). Real-time sensing and N fertilization with a field scale greensseeker™ applicator. In *Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Minneapolis, MN, USA, 14-17 July, 2002* (pp. 1546–1556). American Society of Agronomy.
- Sozzi, M., Marinello, F., Pezzuolo, A., & Sartori, L. (2018). *Benchmark of Satellites Image Services for Precision Agricultural use*.
- Tey, Y. S., & Brindal, M. (2012). Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications. *Precision Agriculture*, 13(6), 713–730. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9273-6>
- Timmermann, C., Gerhards, R., & Kühbauch, W. (2003). The Economic Impact of Site-Specific Weed Control. *Precision Agriculture*, 4(3), 249–260. <https://doi.org/10.1023/A:1024988022674>
- Verrelst, J., Rivera, J. P., Veroustraete, F., Muñoz-Marí, J., Clevers, J. G. P. W., Camps-Valls, G., & Moreno, J. (2015). Experimental Sentinel-2 LAI estimation using parametric, non-parametric and physical retrieval methods - A comparison. *ISPRS Journal of*

- Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 260–272.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.04.013>
- Vincini, M., & Frazzi, E. (2013). *Portability of leaf chlorophyll empirical estimators obtained at Sentinel-2 spectral resolution BT - Precision agriculture '13* (J. V Stafford (ed.); pp. 151–157). Wageningen Academic Publishers.
- Vouillot, M. O., Huet, P., & Boissard, P. (1998). Early detection of N deficiency in a wheat crop using physiological and radiometric methods. *Agronomie*, 18(2), 117–130.
<https://doi.org/10.1051/agro:19980202>
- Vrindts, E., Mouazen, A. M., Reyniers, M., Maertens, K., Maleki, M. R., Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. (2005). Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data. *Biosystems Engineering*, 92(4), 419–428.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.08.010>
- Wang, K., Huggins, D. R., & Tao, H. (2019). Rapid mapping of winter wheat yield, protein, and nitrogen uptake using remote and proximal sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 101921.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101921>
- Westhoek, H. J., Overmars, K. P., & van Zeijts, H. (2013). The provision of public goods by agriculture: Critical questions for effective and efficient policy making. *Environmental Science and Policy*, 32, 5–13. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.06.015>
- Xu, R., & Wunsch, D. (2008). *Clustering*. Wiley.
https://books.google.it/books?id=kYC3YCyl%5C_tkC
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture - A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 113–132.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il professore Roberto Orsini che mi accolto nel dipartimento di agronomia e mi ha dato la disponibilità di svolgere la tesi con lui.

Un ringraziamento particolare va al Dottor Marco Fiorentini che mi ha seguito durante tutto questo percorso, mi ha supportato e sopportato, mi ha fatto imparare tante cose nuove nell'ambito dell'agricoltura di precisione ed ha fatto sì che io potessi portare avanti la mia attività di tesi anche durante i momenti più critici della pandemia COVID-19.

Ringrazio anche il Dottor Stefano Zenobi che ci ha dato una grandissima mano durante tutti i campionamenti in campo e Manuel il mio compagno di tesi con cui ho condiviso tutta l'attività di campo e di misurazione dei campioni.

Un grande ringraziamento va a tutti i professori del D3A che durante questi cinque anni mi hanno trasmesso con passione ed entusiasmo tutte le loro conoscenze nelle varie discipline.

Ringrazio in modo particolare anche tutta la mia famiglia che mi ha permesso di intraprendere il percorso universitario e, mi è stata vicino soprattutto nei momenti più difficili.

Ringrazio tutti i miei amici anche quelli che al momento dell'iscrizione all'università mi dissero: "ma lascia perdere che ci fai con agraria". Ed eccomi qua alla fine di questo bellissimo percorso, dove non sono mancati i momenti difficili, ma ci sono stati anche molti momenti felici e pieni di soddisfazioni, fiero di tutto quello che ho imparato, ma anche consapevole di quanto c'è ancora da imparare.

Il percorso universitario mi ha permesso una grande crescita sia come persona che come professionista in ambito agricolo, sono molto soddisfatto che le conoscenze acquisite si vadano ad aggiungere alla mia più grande passione che ho fin da quando ero bambino l'agricoltura, infatti come allora ancora oggi rimango incantato nell'osservare le mietitrebbie durante la raccolta del frumento, un momento della stagione agraria che per me è sempre stato e continuerà ad essere speciale e pieno di emozioni.