

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Agronomia, Alimenti, Risorse naturali,
Animali e Ambiente**

Corso di Laurea Triennale in
Scienze e Tecnologie Agrarie

Analisi comparativa tra rilievi satellitari e da drone per la stima
dello sviluppo vegetativo di cipolla borettana da pieno campo

Relatore

Prof. Nicola Dal Ferro

Laureanda

Maria Elena Modè

Matricola n. 2000006

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

RIASSUNTO

L'attuale crisi climatica porta il settore agricolo a dover ottimizzare sempre di più gli input energetici necessari per essere in grado di soddisfare la domanda mondiale di alimenti, la quale è in continua crescita sia in quantità che in qualità. L'agricoltura di precisione è in grado di perseguire tale obiettivo sfruttando le innovazioni tecnologiche frutto degli ultimi decenni di ricerca. Il presente lavoro di tesi permette di analizzare due tra i numerosi strumenti applicati in quest'ambito, ossia il drone ed il satellite, allo scopo di confrontare la loro capacità di esecuzione di rilievi multispettrali su una coltura di cipolla borettana coltivata in pieno campo per la stima del suo sviluppo vegetativo e delle richieste di nutrienti, facendo emergere i punti di forza e le criticità di ognuno. L'esperimento è stato condotto nelle stagioni colturali 2021 e 2022, dividendo gli appezzamenti oggetto di studio in venti parcelle, somministrando dosi di solfato ammonico differenziate secondo quattro dosi e cinque ripetizioni, e monitorando la crescita vegetativa attraverso rilievi satellitari, da drone e campionamenti in campo di vegetazione e suolo. Si sono valutate la resa in termini di peso fresco dei bulbi, la correlazione tra l'NDVI calcolato dal drone e quello dal satellite ed il rapporto esistente tra l'azoto totale della coltura espresso in TKN% e l'NDVI proveniente dai due sensori. Le analisi mostrano che la maggiore correlazione tra satellite e drone si presenta quando le date di esecuzione dei rilievi sono molto vicine tra loro e quando lo sviluppo vegetativo della coltura raggiunge il picco di NDVI. In queste due situazioni può risultare conveniente per le aziende sostituire i rilievi da drone con quelli satellitari, ottenendo un beneficio economico in quanto si ridurrebbero i costi aziendali, seppur a discapito di una risoluzione spaziale inferiore.

ABSTRACT

Climate change is impactful for the agricultural sector such that increasing demand for a more efficient use of inputs is required, while simultaneously satisfy an increasing world food demand and quality. Precision farming can pursue this objective by taking advantage of technological innovations resulting from the last decades of research. The present thesis work has been conducted with the aim to compare drone and satellite derived imagery, in order to evaluate their ability to assess the crop growth dynamics in open-field borettana onion cultivation, highlighting pros and cons of both technologies. The experiment was carried out during the cropping season 2021 and 2022, by splitting in twenty plots two experimental fields, each of which was treated according to different quantities of ammonium sulfate in five replicates, and by monitoring vegetative growth through satellite and drone surveys, and soil and vegetation samples in the field. Crop yield in terms of bulb's fresh weight, the correlation between drone and satellite raster NDVI-imagery, and the relationship between crop total nitrogen (expressed in TKN%) and sensor based NDVI were assessed. Analyses show that higher satellite and drone correlation appears when survey execution dates are close each other and when crop vegetative growth reaches its NDVI peak. In these two situations replacing drone imagery with satellite imagery could be advantageous for farms, obtaining also an economic benefit by reducing business costs, despite some lower spatial resolution occur.

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 Verso un'agricoltura più sostenibile	1
1.2 L'agricoltura di precisione	2
1.3 Telerilevamento in agricoltura	3
1.3.1 Droni e satelliti	4
1.4 Normalized Different Vegetation Index (NDVI)	6
2. OBIETTIVI DELLA TESI	9
3. MATERIALI E METODI	10
3.1 Conduzione dell'esperimento	10
3.1.1 Area di studio e impostazione della sperimentazione	10
3.1.2 Campionamento e monitoraggio	12
3.2 Analisi di immagine	15
3.3 Analisi dei dati	16
4. RISULTATI	17
4.1 Rese colturali	17
4.2 Confronto tra NDVI del drone e del satellite	17
4.3 Relazione tra azoto e NDVI	24
5. CONCLUSIONI	26
6. RINGRAZIAMENTI	27
7. BIBLIOGRAFIA	28
8. LISTA DELLE FIGURE	30

1. INTRODUZIONE

1.1 VERSO UN'AGRICOLTURA PIÙ SOSTENIBILE

Il progressivo aumento della popolazione mondiale spinge il settore agricolo a dover soddisfare una sempre maggiore richiesta alimentare, obbligando i produttori a mettere in campo strategie per massimizzare le rese dei propri terreni. Se in alcune parti del mondo la soluzione a questa grande richiesta consista nell'ampliare la superficie coltivata, seppur con impatti significativi dal punto di vista ambientale come la perdita di biodiversità (Reidsma et al., 2006), in pianura Padana questo non è possibile e il limitato spazio a disposizione deve essere quindi impiegato con un'altissima efficienza. Si parla così di intensificazione sostenibile, ossia l'insieme delle pratiche agronomiche mirate ad aumentare le rese colturali tramite il miglioramento dell'efficienza di utilizzazione degli input, senza impatti negativi sul suolo, sulle risorse idriche o sugli ecosistemi in generale (Cassman e Grassini, 2022). La sfida dell'agricoltura di oggi consiste nel garantire un certo livello produttivo in un ambiente in repentino cambiamento, in cui l'attuazione delle tradizionali pratiche agricole spesso comporta difficoltà, a causa della forte crisi climatica che ci troviamo a dover fronteggiare. Periodi di siccità alternati ad eventi piovosi sempre più catastrofici, prezzi esorbitanti dei concimi e delle materie prime stanno mettendo in ginocchio il settore primario. Perché l'agricoltura possa sopravvivere è necessario effettuare una transizione ecologica, la Commissione europea ha infatti adottato una serie di proposte riunite sotto il nome di "Green Deal" per trasformare le politiche dell'UE in materia di clima, energia, trasporti e fiscalità in modo da ridurre le emissioni nette di gas a effetto serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, per raggiungere poi la neutralità climatica entro il 2050 (<https://commission.europa.eu>). A questo obiettivo si aggiunge quanto proposto dall'Unione Europea attraverso la strategia Farm to Fork, la quale mira a sistemi colturali sostenibili i quali, tra gli altri, si prefigge l'obiettivo specifico di ridurre le perdite di nutrienti di almeno il 50%, con conseguente riduzione dell'uso di fertilizzanti di almeno il 20% entro il 2030 (Heyl et al., 2023).



Figura 1.1 – Schema concettuale che descrive le linee di intervento previste per la strategia Farm to Fork (fonte: <https://focuswine.unioneitalianavini.it>).

Questi aspetti devono comunque poggiare le loro basi sul concetto più ampio di sostenibilità, ovvero le azioni da intraprendere devono mirare a necessari benefici ambientali che d’altro canto non possono dimenticare la sfera economica e sociale. L’attività agricola, quindi, deve garantire il sostentamento dell’agricoltore ed il miglioramento duraturo della qualità della vita, soddisfare le esigenze del presente senza danneggiare le risorse necessarie alle future generazioni e limitare il più possibile il suo impatto ambientale (Sorlini, 2017).

1.2 L’AGRICOLTURA DI PRECISIONE

Nel settore agricolo la tradizione sta via via lasciando il posto all’innovazione e, nell’ottica di un’intensificazione sostenibile delle produzioni, le scoperte tecnologiche emerse negli ultimi decenni ricoprono un ruolo essenziale nella diffusione di un nuovo modo di fare agricoltura. Fin dalla fine del secolo scorso si inizia a parlare di agricoltura di precisione, un insieme di pratiche che permettono di “eseguire il giusto trattamento, nel posto giusto e nel momento giusto” (Gebbers e Adamchuk, 2010). Questo approccio consente di attuare una modulazione degli interventi sulla base della variabilità spaziale e temporale dei fattori che influiscono sul processo produttivo, al fine di ottimizzarne i risultati in termini economici e ambientali, mantenendo rese in qualità e quantità elevate (Casa e Pisante, 2016). Perciò, in fase di progettazione degli interventi, non si considerano più i valori medi dell’appezzamento ma si vanno a studiare le diversità della matrice analizzata per effettuare trattamenti sito-specifici,

limitando in questo modo il pericolo di sovrastimare o sottostimare il quantitativo di input da somministrare ed eseguendo un calcolo più dettagliato dell'effettivo bisogno di fertilizzanti, acqua, prodotti fitosanitari, sementi, ecc (Borin, 1999). La gestione sito-specifica dell'appezzamento è attuata grazie a supporti tecnologici, tra cui ad esempio sensori multispettrali o misuratori di conducibilità elettrica del suolo, tramite i quali è possibile stilare una mappa di prescrizione che suddivide il campo in zone omogenee e associa ad ogni area la corretta dose di input da distribuire. Questa mappa di prescrizione è georeferenziata e viene poi sfruttata dalla macchina operatrice, con il supporto del *Global Positioning System* (GPS), per effettuare interventi definiti a rateo variabile sulla coltura.

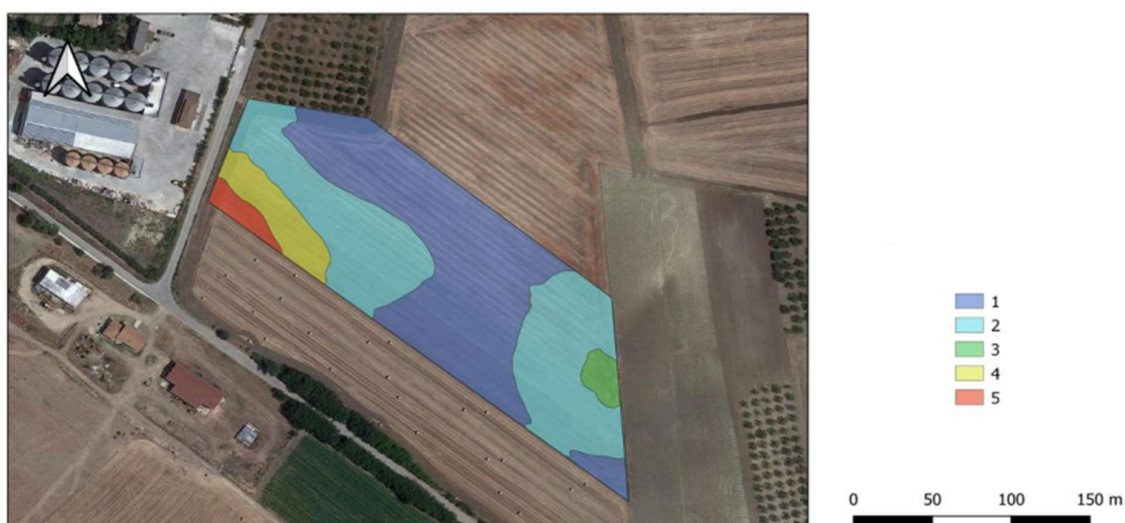


Figura 1.2 – Esempio di mappa di prescrizione per la concimazione fosfatica in frumento duro (fonte: Cuscianna, 2023).

In alternativa alle mappe, che comportano un rilievo preliminare all'effettivo intervento in campo, possono essere impiegati dei sistemi “on the go”, i cui sensori vengono posizionati direttamente sulla trattoria, rilevano i dati sul momento e li trasmettono alla macchina operatrice in opera (Grisso et al., 2011). Tale metodo consente di unire due operazioni in una e non necessita dell'uso del GPS.

1.3 TELERILEVAMENTO IN AGRICOLTURA

Le nuove tecnologie possono aiutare la transizione ecologica fornendo strumenti innovativi per lo sviluppo di tecniche di agricoltura di precisione, le quali permettono di ottimizzare

l'impiego di quelle risorse primarie ormai non più prontamente disponibili come un tempo. Molte aziende oggi si affidano ai dati colturali rilevati dai droni e dai satelliti per prendere decisioni sulle modalità e sulle tipologie di pratiche agronomiche da attuare, come ad esempio concimazione e irrigazione a rateo variabile. Le tecnologie per la stima immediata delle variabili del suolo o della coltura variano tra quelle definibili di proximal sensing (rilievi di prossimità, nelle immediate vicinanze o a contatto con la matrice da analizzare) e di remote sensing (telerilevamento), le quali rappresentano uno strumento efficace e non distruttivo per monitorare nel tempo e nello spazio ad esempio le esigenze delle colture, al fine di applicare determinati input in dosaggi differenziati in modo localizzato e preciso, in base alla richiesta riscontrata nell'appezzamento (Jiang et al., 2020). Esse si basano principalmente su rilievi eseguiti da sensori radiometrici misuranti la risposta spettrale emessa dal corpo analizzato, utili per monitorare gli indici colturali, e da sensori a risposta elettromagnetica, impiegati ad esempio per misurare la capacità del terreno di condurre una carica elettrica. I primi si dividono in multispettrali e iperspettrali, i quali rilevano rispettivamente un numero ridotto di bande larghe, soprattutto le frequenze del *Red* e del *Near Infra-Red* (NIR), e un numero elevato di bande strette, fornendo uno spettro quasi continuo nell'intervallo del visibile, NIR e *Short Wave Infra-Red* (SWIR) (Papi, 2019). Dei sensori a risposta spettrale fanno parte anche le termocamere, utili per la stima dell'evapotraspirazione della coltura. Le tipologie di sensori capaci di registrare l'energia riflessa e/o emessa dall'oggetto analizzato proveniente da una fonte esterna, come la radiazione solare, sono definiti di tipo passivo, i multispettrali rappresentano un esempio di questa categoria. Quelli invece in grado di rilevare la risposta dell'oggetto ad una radiazione artificiale che loro stessi emanano vengono detti di tipo attivo (Viscarra Rossel et al., 2011), come ad esempio i sensori ad induzione elettromagnetica.

1.3.1 DRONI E SATELLITI

Molti sono gli strumenti di telerilevamento che trovano applicazioni nell'ambito dell'agricoltura di precisione, in questo studio si intende trattare principalmente di droni, detti anche sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR) e di satelliti, confrontandoli tra di loro per analizzarne i possibili utilizzi in campo agronomico.

Il principale vantaggio dei droni è l'elevata risoluzione spaziale dell'immagine che restituiscono, permettendo così di effettuare rilievi molto precisi sulla vegetazione o sul suolo;

il volo può essere eseguito nel momento in cui si presenta la necessità garantendo tempestività, velocità d'intervento e flessibilità d'impiego (Calcante, 2015). I droni sono piuttosto indipendenti dalle variabili climatiche, soprattutto durante le stagioni con maggiore frequenza di precipitazioni, quando le nuvole sono un ostacolo per l'acquisizione delle immagini satellitari (Messina et al., 2020), rendendoli utilizzabili anche in condizioni di cielo nuvoloso, previa adeguata calibrazione in quanto i sensori multispettrali sono sensibili alla variazione d'intensità di energia luminosa che arriva al suolo, ad esclusione dei momenti in cui sono in corso precipitazioni o si presentano forti correnti d'aria in quota. Inoltre, rappresentano uno strumento versatile da applicare in agricoltura, utili sia per l'elaborazione di mappe colturali grazie alle loro telecamere multispettrali, sia per l'esecuzione di lanci in campo di insetti o microrganismi nell'ambito della lotta biologica. Per contro, l'utilizzo di un drone necessita della presenza di un operatore adibito a tale ruolo e dotato di relativa licenza, il che potrebbe comportare il mancato allineamento temporale tra le esigenze del produttore e la disponibilità dell'azienda che fornisce il servizio di rilievo. Nel caso invece in cui il produttore volesse acquistare tale dispositivo, esso rappresenterebbe un investimento ingente, dal momento che per avere un drone performante le telecamere devono essere leggere, poco ingombranti e allo stesso tempo fornire immagini di alta qualità. Per le categorie di droni usati in agricoltura, la durata delle batterie è, di norma, inferiore all'ora (Calcante, 2015), rendendone sfavorevole l'utilizzo su vaste superfici. Bisogna considerare inoltre che le immagini necessitano di una correzione, tenendo conto che la riflettanza della coltura risente della luminosità della giornata nonché dell'orario in cui si effettua il rilievo (Calcante, 2015).

Negli ultimi anni il numero di satelliti messi in orbita attorno alla Terra si è moltiplicato; molti di questi offrono immagini multispettrali (es. Landsat o progetto Copernicus) o iperspettrali (es. progetto PRISMA) della superficie terrestre con risoluzione spaziale che va da pochi metri fino alla decina o le centinaia (Yang, 2018); i satelliti identici del progetto Copernicus, Sentinel-2A e Sentinel-2B, dai quali provengono le immagini analizzate in questo studio, forniscono dati con una risoluzione spaziale da 10 a 60 metri, a seconda della banda dello spettro. Le mappe satellitari sono facilmente consultabili online e scaricabili gratuitamente: la loro rapidità di ottenimento e l'assenza di costi rappresentano quindi i principali vantaggi del loro utilizzo, al contrario dei droni per cui bisogna tenere presente i costi e le tempistiche di esecuzione del rilievo. Per questi motivi risulta più conveniente sfruttare le immagini satellitari quando si stanno prendendo in esame ampi appezzamenti. Alcune limitazioni si possono riscontrare nella risoluzione dell'immagine trasmessa, nel fatto che sia necessario attendere

alcuni giorni perché il satellite transiti nuovamente sopra l'area di terreno interessata e nella necessità che il cielo sia privo di copertura nuvolosa. Pertanto, è possibile che il giorno in cui sia prevista la trasmissione dell'immagine si verifichino eventi piovosi o più in generale di copertura nuvolosa, rendendo il rilievo non disponibile per un numero di giorni superiore. In ogni caso si tenga presente che queste tecnologie sono in continuo miglioramento e non è da escludere un futuro aumento di precisione e affidabilità della raccolta dati operata dal satellite.

1.4 NORMALIZED DIFFERENT VEGETATION INDEX (NDVI)

Le misure di riflettanza di una qualsiasi matrice, come quella fogliare, vengono effettuate con appositi sensori multispettrali o iperspettrali, basandosi sull'interazione di differenti lunghezze d'onda della luce con la massa vegetale (Pardossi et al., 2020); le riflettanze di specifiche lunghezze d'onda sono usate per calcolare indici di vegetazione, cioè parametri numerici frutto di algoritmi che possono essere utilizzati per quantificare, ad esempio, lo stato di salute della coltura, la specie vegetale, la densità di copertura fogliare ecc. (Furlanetto et al., 2023). Uno degli indici attualmente più utilizzato è il Normalized Different Vegetation Index (NDVI), utile per stimare la nutrizione azotata della copertura vegetale. Per il suo calcolo sono considerate le lunghezze d'onda del rosso (*Red*, R) compresa tra 620 e 760 nm e dell'infrarosso vicino (*Near Infra-Red*, NIR) compresa tra 750 e 1400 nm, combinate nella seguente formula:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Il valore che può assumere quest'indice è compreso in un intervallo che va da -1 a +1, i valori positivi indicano presenza di copertura vegetale e più ci si avvicina a +1, più intenso è il colore verde e, di conseguenza, migliore è lo stato nutrizionale delle piante. Valori vicini allo zero denotano assenza di vegetazione e sono quindi associati al terreno nudo o urbanizzato, mentre se sono negativi vi è presenza di acqua (Viana et al., 2019). Le piante che sono in condizioni ottimali di nutrizione azotata riflettono meno *Red* e più NIR e, al contrario, quelle in carenza di azoto più *Red* e meno NIR modificando così l'NDVI (Pardossi et al., 2020).

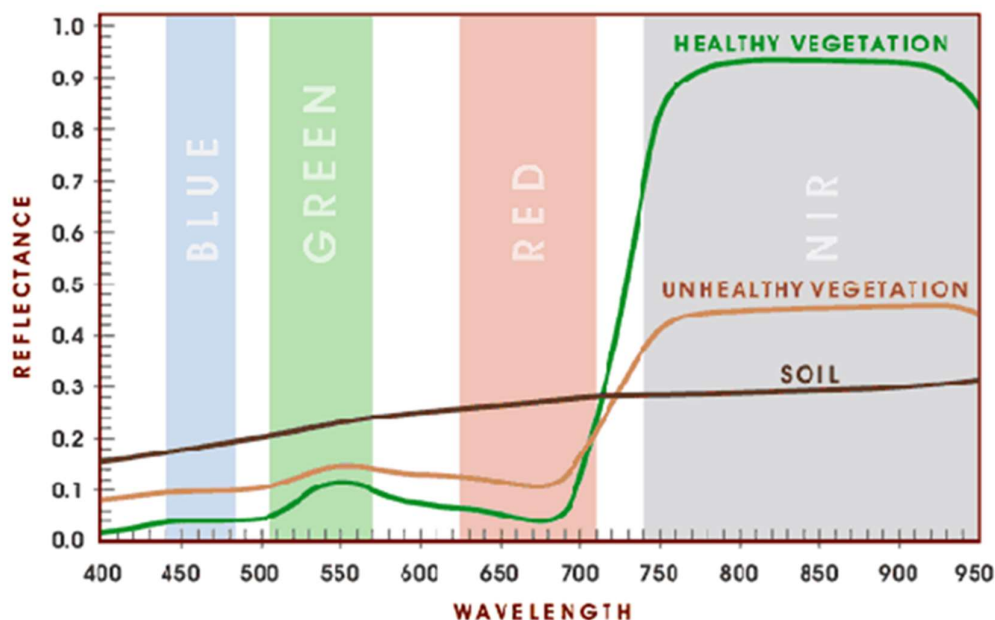


Figura 1.3 – Descrizione dell’indice NDVI in matrici differenti (fonte: <https://physicsopenlab.org>).

I dati rilevati da quest’indice sono stati usati per tracciare la produzione di diverse colture e per predirne le rese in differenti condizioni agro-climatiche (Kizilgeci et al., 2021). Diversi studi dimostrano che il contenuto di azoto nelle foglie è strettamente collegato all’NDVI: in un’analisi effettuata da Arai et al. (2014) questo rapporto viene evidenziato da un coefficiente di determinazione R^2 che assume valori fino a 0,66. Nello studio di Kizilgeci et al. (2021) vengono confrontati i valori di NDVI e azoto fogliare in tre fasi fenologiche di frumento duro, facendo emergere che tale indice di vegetazione non fornisce in realtà una corretta stima del contenuto azotato della pianta in ogni stadio di sviluppo, bensì solamente in fase di spigatura e antesi, non in fase di maturazione lattea. L’NDVI ha pertanto vaste applicazioni in agricoltura e rappresenta uno strumento valido nella creazione di mappe di vegetazione per effettuare interventi a rateo variabile sulla coltura. Purtroppo, l’indice NDVI risente dell’effetto “saturazione”, ovvero una volta raggiunto un certo plateau l’indice non cresce ulteriormente nonostante la crescita della coltura prosegua, determinando una ridotta sensibilità dell’indice alle possibili esigenze colturali. Dal momento che esistono vari indici di vegetazione rilevabili con telecamere multispettrali, l’utilizzo combinato di alcuni di questi potrebbe consentire di migliorare la precisione dell’analisi dello stato di salute della coltura. Per contro, questo effetto di “saturazione” avviene solitamente quando la coltura è già in fase avanzata di crescita, ovvero in fasi fenologiche per cui le principali concimazioni sono già state effettuate. Infine,

è interessante notare come, nonostante l'NDVI sia un indice solido e ampiamente utilizzato, esso non sia stato sufficientemente testato in diverse colture con lo scopo di poterlo utilizzare in agricoltura di precisione, suggerendo che sono possibili ampi margini di miglioramento nell'uso efficiente dei nutrienti.

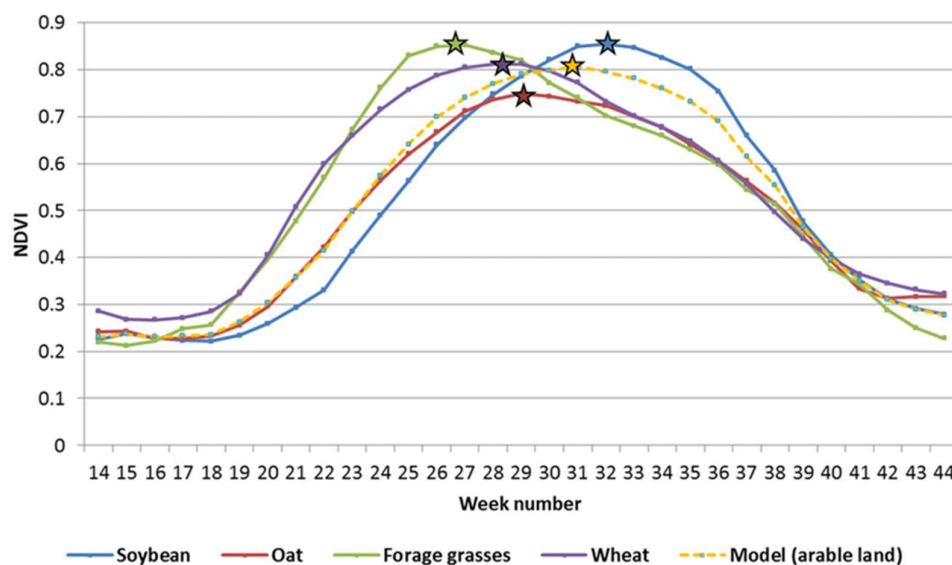


Figura 1.4 – Variazione stagionale di NDVI in colture differenti (fonte: Stepanov et al., 2020). I valori massimi di NDVI sono contrassegnati da stelle.

2. OBIETTIVI DELLA TESI

Lo studio è stato eseguito con lo scopo di valutare le potenzialità di utilizzo di tecniche di agricoltura di precisione con dati di telerilevamento satellitari rispetto a quelli da drone per la predisposizione di mappe di concimazione in una prova di pieno campo su cipolla borettana, confrontando e individuando possibili relazioni spaziali tra le due tipologie di rilievo durante le stagioni colturali 2021 e 2022. Si sono in particolare analizzate e confrontate le mappe di NDVI satellitari e da drone, poi si sono studiate le correlazioni tra i dati di azoto totale della coltura ed i rilievi. A completamento dello studio sono state inoltre esaminate le applicazioni delle due tecnologie nell'ambito dell'agricoltura di precisione, facendo emergere di ognuna i relativi vantaggi e svantaggi.

3. MATERIALI E METODI

Il presente lavoro si inserisce nel contesto di uno studio più ampio iniziato nel 2021 e tutt'ora in corso. Lo studio presentato in questa tesi è stato realizzato prendendo in esame i dati raccolti nelle sperimentazioni delle stagioni colturali 2021 e 2022.

3.1 CONDUZIONE DELL'ESPERIMENTO

3.1.1 AREA DI STUDIO E IMPOSTAZIONE DELLA SPERIMENTAZIONE

Lo studio prende in esame due appezzamenti di cipolla borettana coltivati in anni differenti, il primo nel 2021 e il secondo nel 2022, gestiti dall'azienda Orti dei Berici Soc. Coop. Agricola, ubicati rispettivamente nei comuni di Oppeano e Isola della Scala, entrambi in provincia di Verona. La mappa qui di seguito ne illustra le posizioni (figura 3.1).

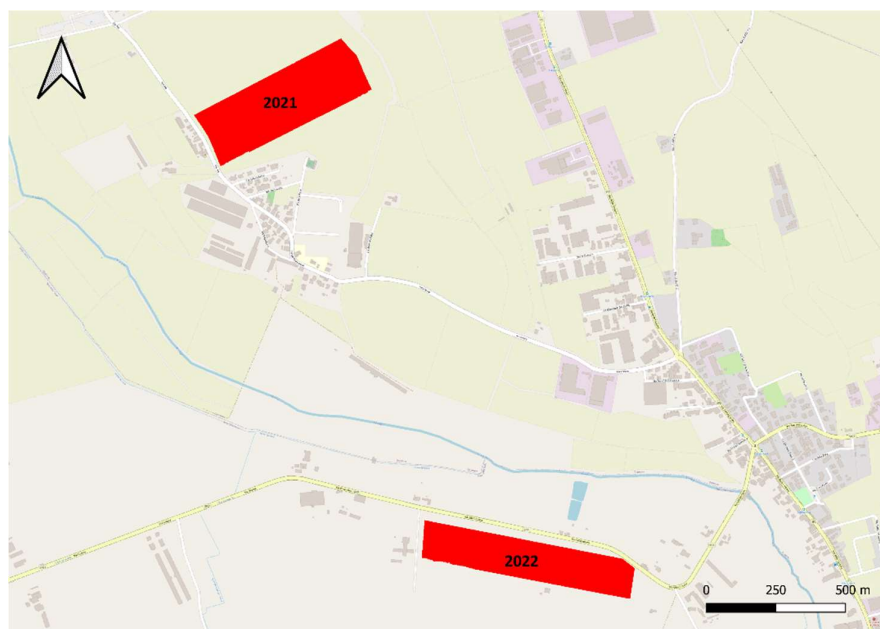


Figura 3.1 – I due appezzamenti analizzati nello studio: in alto quello del 2021 nel comune di Oppeano, in basso quello del 2022 nel comune di Isola della Scala.

Ogni appezzamento, delle dimensioni di 7 ha, è stato suddiviso in 20 parcelle, ognuna delle quali è stata gestita secondo una dose nota di concime minerale azotato. L'esperimento prevedeva 4 trattamenti e 5 repliche ciascuno secondo un disegno sperimentale a blocchi randomizzati. La figura 3.2 mostra la suddivisione dei trattamenti nelle singole parcelle. Il

concime utilizzato era solfato ammonico $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ con titolo del 21%. Per quanto riguarda la conduzione della prova, si sottolinea come l'unico fattore oggetto di variazione fosse la dose di azoto, mentre le lavorazioni del terreno erano convenzionali con aratura ed erpicatura prima delle semina, ed interventi irrigui e trattamenti antiparassitari e/o fungini omogenei negli appezzamenti secondo le richieste della coltura durante la stagione colturale.

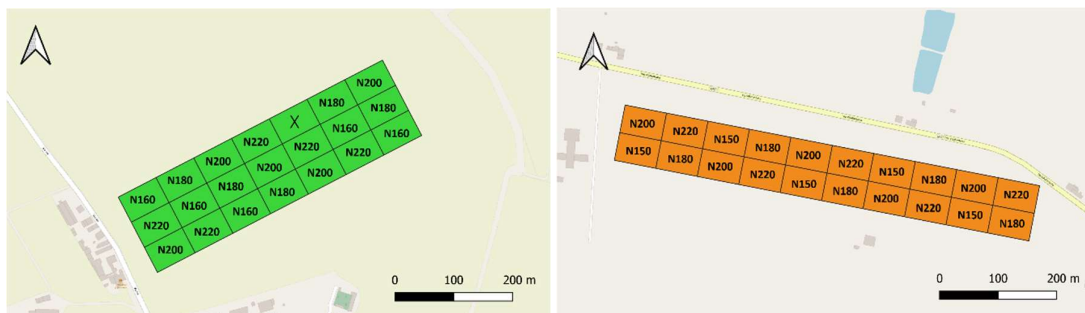


Figura 3.2 – Concimazione azotata differenziata per ogni parcella.

La dose di azoto totale, con la quale viene identificato il tipo di trattamento, è stata frazionata nel tempo secondo cinque interventi tra metà marzo e metà giugno ad accompagnamento delle richieste della coltura. Come si può vedere dalla tabella 3.1, le dosi maggiori sono state distribuite durante la fase di maggiore sviluppo vegetativo.

Tabella 3.1 – Distribuzione della dose di solfato ammonico nei vari trattamenti

Anno	Trattamenti (kgN/ha)	Dose frazionata di solfato ammonico (kg/ha)	Concime totale distribuito (kg/ha)
2021	N180	120 + 120 + 170 + 170 + 170 + 100	850
	N200	140 + 140 + 190 + 190 + 190 + 100	950
	N220	160 + 160 + 210 + 210 + 210 + 100	1050
	N240	180 + 180 + 230 + 230 + 230 + 100	1150
2022	N150	90 + 90 + 140 + 140 + 140 + 100	700
	N180	120 + 120 + 170 + 170 + 170 + 100	850
	N200	140 + 140 + 190 + 190 + 190 + 100	950
	N220	160 + 160 + 210 + 210 + 210 + 100	1050

3.1.2 CAMPIONAMENTO E MONITORAGGIO

Nel corso della stagione colturale sono stati eseguiti dei rilievi in campo poco dopo gli interventi di concimazione, allo scopo di prelevare dei campioni di terreno e di vegetazione influenzati dalla dose di solfato ammonico distribuita, per poi analizzarli nei laboratori del dipartimento DAFNAE e dell'azienda Agraria Toniolo dell'Università di Padova. Si sono effettuate: analisi della tessitura e dell'umidità del suolo, conta del numero di piante per ogni campione, misurazione del diametro dei bulbi, peso fresco e peso secco della materia vegetale aerea e nel sottosuolo, misurazione del contenuto di azoto in apparati epigei, ipogei e stima dell'azoto totale (analisi Total Kjeldhal Nitrogen, TKN%).

I punti di campionamento sono stati effettuati in duplice replica per ogni parcella, ottenendo così ad ogni rilievo quaranta campioni di vegetazione e/o suolo, situati in un punto georeferenziato e prestabilito all'inizio dei rilievi. Il campionamento veniva eseguito sempre nell'immediata vicinanza dei punti georiferiti, scegliendo casualmente un punto nel raggio di un metro. Il prelievo del campione di vegetazione (figura 3.3) consisteva nel raccogliere sia la parte epigea (foglie) che ipogea (radici e bulbi) di tutte le piante comprese in un'area di saggio di 25 cm x 25 cm, mentre il prelievo di suolo avveniva tramite carotatore manuale nello strato 0-20 cm.



Figura 3.3 – Campionamento della vegetazione.

Dalle analisi del terreno (i cui risultati sono illustrati nella tabella 3.2) è emerso che nella zona di ubicazione degli appezzamenti il suolo si presenta con tessitura franco sabbiosa, possedendo quindi caratteristiche ideali per la coltivazione della cipolla, come i bassi rischi di ristagno idrico; l'ottenimento di valori molto simili è dato dalla breve distanza presente tra i due appezzamenti.

Tabella 1.2 – Caratteristiche principali del suolo (\pm errore standard)

Anno	Sabbia (%)		Limo (%)		Argilla (%)		SOC (%)		N-tot (%)		C/N	
2021	69,5	$\pm 1,04$	16,5	$\pm 0,65$	14,75	$\pm 0,63$	0,52	$\pm 0,03$	0,13	$\pm 0,005$	4,07	$\pm 0,23$
2022	71,5	$\pm 0,64$	14	$\pm 0,41$	14,5	$\pm 0,29$	0,58	$\pm 0,004$	0,06	$\pm 0,002$	10,38	$\pm 0,26$

I campionamenti sopra descritti sono accompagnati da rilievi sulla vegetazione attuati tramite l'utilizzo di un drone (figura 3.4), il quale, grazie alle telecamere multispettrali di cui è dotato, esegue una mappatura dell'appezzamento sulla base dell'NDVI culturale. Dal momento che uno degli obiettivi del presente lavoro di tesi consiste nel confrontare le mappe satellitari con quelle rilevate dal drone, il download delle immagini satellitari è stato effettuato sincronizzando temporalmente le mappe di satellite con quelle ottenute da drone. Nel corso della stagione colturale sono state inoltre monitorate le precipitazioni e le irrigazioni (barre blu) ed il livello di umidità del suolo, i cui valori sono rappresentati in figura 3.5. Si noti come i campionamenti di campo siano stati eseguiti poco dopo i rilievi multispettrali da drone.

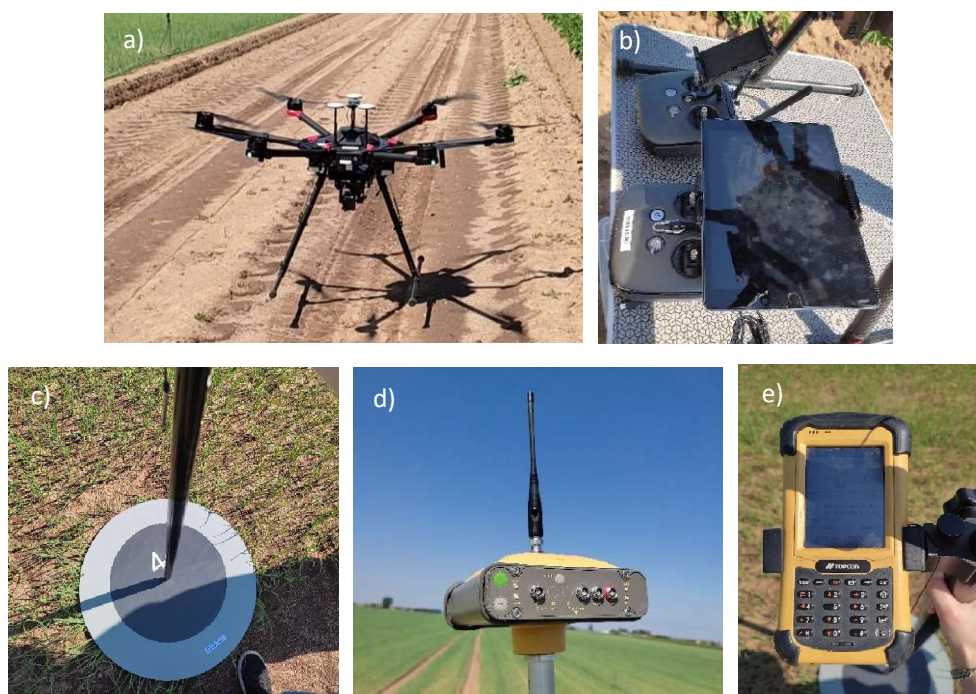


Figura 3.4 – a) drone usato per i rilievi; b) sistemi di comando del drone; c) pannelli georeferenziati posizionati sul perimetro dell'appezzamento usati come traccia per il volo del drone; d) ed e) GPS.

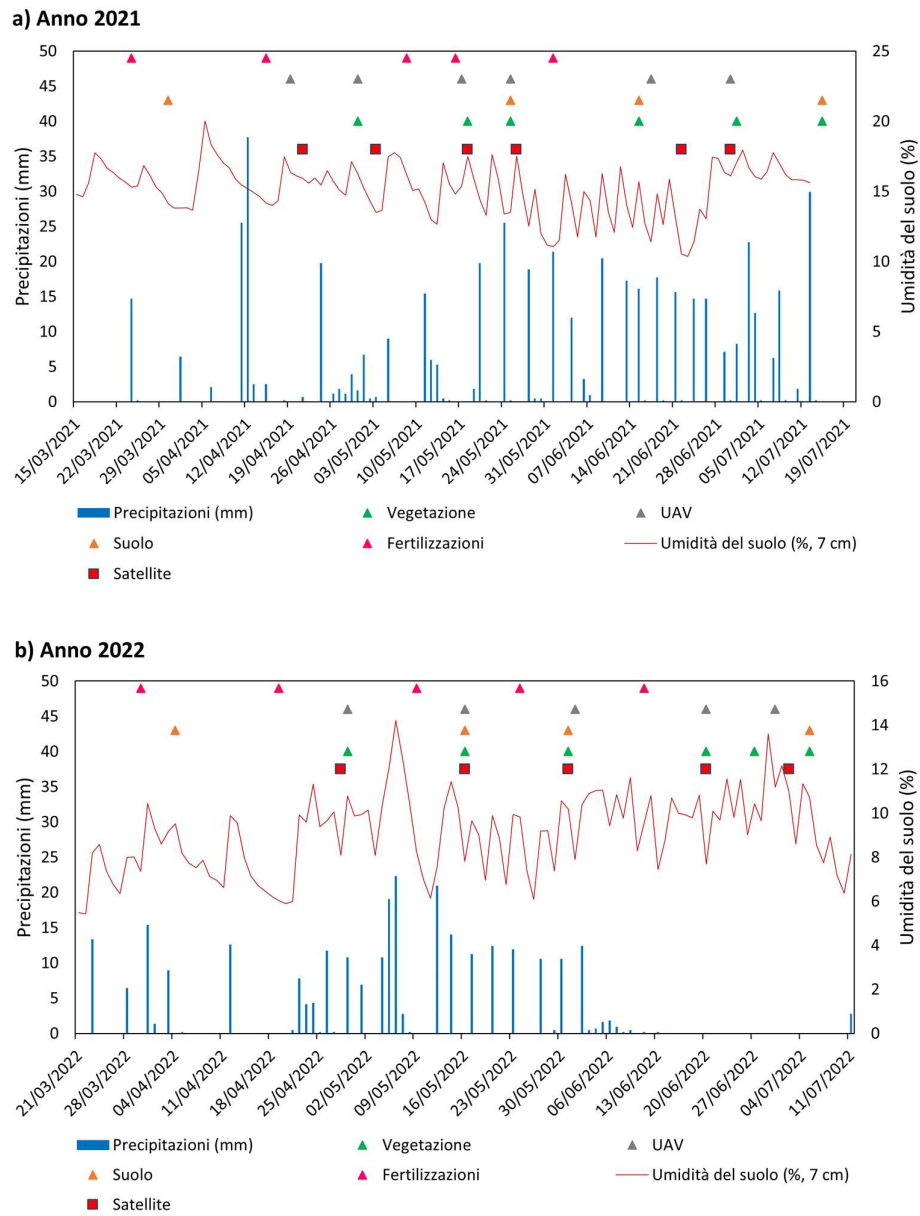


Figura 3.5 – Monitoraggio di precipitazioni e umidità del suolo. I simboli posti nella parte superiore dei grafici indicano le date delle fertilizzazioni, del campionamento di vegetazione e del suolo, dei rilievi satellitari e da drone.

3.2 ANALISI DI IMMAGINE

Per poter mettere a confronto le mappe provenienti dalle due risorse analizzate in questa tesi, si è resa necessaria una rielaborazione preliminare di tali dati usufruendo del software QGIS, il quale permette di lavorare con mappe georeferenziate.

La prima fase consisteva nell'ottenere le immagini satellitari dei due appezzamenti studiati. I dati di nostro interesse provenivano dai rilievi eseguiti dai satelliti gemelli Sentinel-2A e Sentinel-2B, appartenenti al progetto Copernicus, le cui mappe sono gratuitamente e facilmente scaricabili online da diverse piattaforme come ad esempio il sito Sentinel Hub EO Browser (<https://apps.sentinel-hub.com>). La ricerca di esse è stata svolta sulla base delle date dei rilievi del drone, tuttavia, essendo disponibili solo ogni due/tre giorni e non potendo essere di utilità in caso di copertura nuvolosa, la perfetta sovrapposizione temporale non è stata sempre possibile. Al fine di analizzare la correlazione tra i due rilievi, per ogni mappa del drone sono state scaricate due mappe del satellite collocate in date prossime al rilievo, in modo tale da poter identificare la più affidabile e utilizzabile per il confronto (es. per via di bagnatura fogliare a causa di irrigazione della vegetazione). I sensori multispettrali del satellite permettono di produrre delle immagini differenti captando singole bande di radiazione emessa e riflessa dalla superficie terrestre. Per calcolare l'NDVI sono necessarie le bande del Red e del NIR, corrispondenti rispettivamente alle sigle B04 e B08 in Sentinel-2. Per ogni data sono state quindi scaricate due immagini distinte per essere successivamente utilizzate, tramite una funzione di QGIS, per generare una singola immagine rappresentante tale indice di vegetazione.

Successivamente le immagini sono state oggetto di ulteriore rielaborazione per poter renderle confrontabili, uniformando in primis la risoluzione. Il singolo pixel quadrato che compone l'immagine del rilievo da drone aveva una risoluzione di 25 cm x 25 cm, mentre l'immagine satellitare da Sentinel-2 aveva una risoluzione spaziale di 7 m; è stata quindi diminuita la risoluzione del primo per poter sovrapporre ogni pixel secondo la risoluzione inferiore del satellite. In seguito, è stata eseguita un'operazione di allineamento tra i pixel delle due mappe allo scopo di consentire la totale sovrapposizione. Infine, le immagini sono state tagliate (clip) per restringerne il perimetro all'effettiva area di sperimentazione oggetto di studio. Al termine di tali operazioni si sono ottenute mappe georeferenziate perfettamente sovrapponibili tra loro e della stessa dimensione, sulle quali è stato possibile procedere con le analisi successive dei dati.

3.3 ANALISI DEI DATI

La fase di rielaborazione dati è stata svolta tramite foglio di calcolo Excel e plugin specifici presenti in QGIS.

Il primo confronto è stato eseguito raccogliendo per ciascuna mappa il valore medio di NDVI di ogni parcella, successivamente realizzando grafici a dispersione e infine stimando un modello lineare e calcolando il coefficiente di regressione R^2 esistente tra i dati rilevati dal drone in una certa data e quelli satellitari nella data corrispondente. Dal momento che per ogni immagine del drone si sono scaricate due immagini satellitari, il totale di grafici ottenuto è di dodici per l'anno 2021 e dieci per l'anno 2022. Questo con l'obiettivo di valutare quando la relazione fosse più significativa, evidenziare eventuali anomalie dell'indice di vegetazione e se necessario scartare le mappe non utilizzabili.

In seguito, una volta terminate le operazioni descritte nel paragrafo 3.3, usufruendo della funzione "*r.covar*" di QGIS, è stata calcolata una matrice di correlazione ognuna per i due anni di studio includendo tutti i pixel delle immagini raster nel confronto, secondo un livello di significatività $p < 0,05$.

Al fine di valutare il legame tra il contenuto di azoto nella vegetazione e l'NDVI rilevato, si è infine proceduto alla creazione di due grafici di regressione (anche in questo caso uno per anno) per osservare la variazione di NDVI durante l'intera stagione colturale in funzione della quantità di azoto presente nella vegetazione.

4. RISULTATI

4.1 RESE COLTURALI

La tabella 4.1 riporta la resa media di tutte le parcelle sottoposte allo stesso trattamento di concimazione azotata ed il valore medio della resa dell'intero appezzamento nei due anni distinti. I valori associati al 2021 risultano più alti perché sono state applicate dosi di solfato ammonico più elevate e perché la forte crisi idrica manifestatasi nell'anno 2022 in pianura padana ha avuto una notevole incidenza negativa sulle produzioni agrarie, nonostante l'irrigazione frequente effettuata dall'azienda agraria. Per quanto riguarda invece l'applicazione di concimazioni differenziate nelle parcelle, non si sono riscontrate differenze significative tra i vari trattamenti: all'aumentare della dose di azoto l'incremento del peso dei bulbi è infatti molto lieve e la variabilità intra-trattamento elevata, sintomo di variabilità spaziale degli appezzamenti.

Tabella 4.1 – Rese colturali dei due appezzamenti espresse in peso fresco dei bulbi

Anno	Trattamenti	Resa in peso fresco (t/ha)	Errore standard
2021	N180	80.06	±3.31
	N200	81.98	±4.21
	N220	81.63	±3.58
	N240	85.16	±4.34
	Media	82.21	±1.07
2022	N150	77.53	±1.02
	N180	79.41	±1.66
	N200	79.54	±1.14
	N220	79.59	±2.10
	Media	79.02	±0.50

4.2 CONFRONTO TRA NDVI DEL DRONE E DEL SATELLITE

L'analisi della relazione esistente tra i rilievi di NDVI eseguiti dal drone e dal satellite è stata svolta prima di tutto creando dei grafici di regressione lineare tra le due variabili, riportati nelle figure 4.1 e 4.2 qui di seguito. Ogni grafico mette in evidenza le difformità e le somiglianze riscontrate tra dati provenienti da una singola immagine del drone e quelli generati dai rilievi satellitari in date vicine; le immagini satellitari confrontate con quella del drone sono generalmente due a parte alcuni casi nell'anno 2021 in cui era disponibile un solo rilievo

satellitare nell'intervallo temporale di interesse (grafico c) oppure erano presenti tre immagini potenzialmente valide (grafico f). Grazie a questi grafici si sono potute selezionare le immagini con le quali è stato portato avanti lo studio, operando una scelta sulla base in primo luogo della vicinanza temporale, in seguito della valutazione del coefficiente di regressione R^2 e della sovrapposizione della linea di tendenza dei dati con la retta bisettrice del grafico. Secondo tali criteri, i dati satellitari considerati validi appartengono ai giorni 21 aprile, 3 maggio, 18 maggio, 26 maggio, 22 giugno e 30 giugno per l'anno 2021 ed ai giorni 28 aprile, 16 maggio, 31 maggio, 20 giugno e 2 luglio per l'anno 2022. Le date del primo anno dello studio che portano valori di R^2 più elevati, cioè compresi tra 0,7 e 0,8, corrispondono al 21 aprile, 18 maggio e 20 giugno, mentre quelli più elevati nel secondo anno sono maggiori di 0,9 ed appartengono alle date del 28 aprile e 16 maggio.

Nella maggior parte dei casi analizzati il rilievo di NDVI da drone riporta valori assoluti più bassi rispetto al satellite, soprattutto per l'anno 2022. In altri invece sembra accadere il contrario, senza che vi sia alcuna apparente relazione con il periodo in cui è stato eseguito il rilievo. Nei grafici c), d), e) della figura 4.1 e nel grafico e) della figura 4.2 si nota infatti una sovrastima del drone rispetto al satellite. In seguito all'osservazione del coefficiente di regressione R^2 si nota che tale valore in genere tende ad aumentare se riferito a giorni tra loro vicini, mentre diminuisce con il distanziarsi delle date. I grafici del 30 giugno 2021 e del 16 maggio 2022 sono degli esempi evidenti di questo andamento e dal primo si riscontra anche una significativa differenza tra l' R^2 associato ai dati satellitari raccolti nello stesso giorno del drone e quello associato alle altre due date più distanti. I risultati emersi in questa analisi suggeriscono l'importanza di possedere mappe satellitari di NDVI dotate di una buona risoluzione temporale.

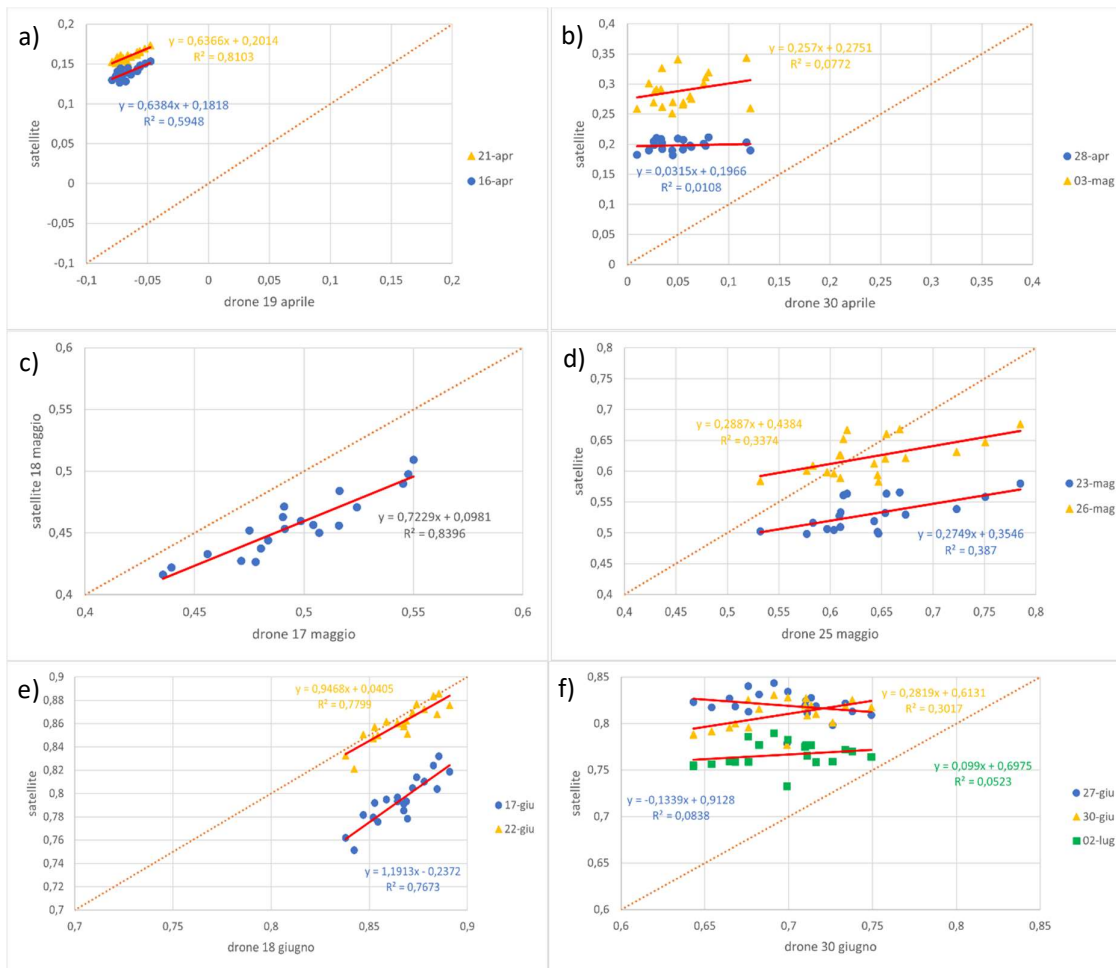


Figura 4.1 – Relazione tra NDVI satellitare e da drone delle mappe di vegetazione relative al 2021.

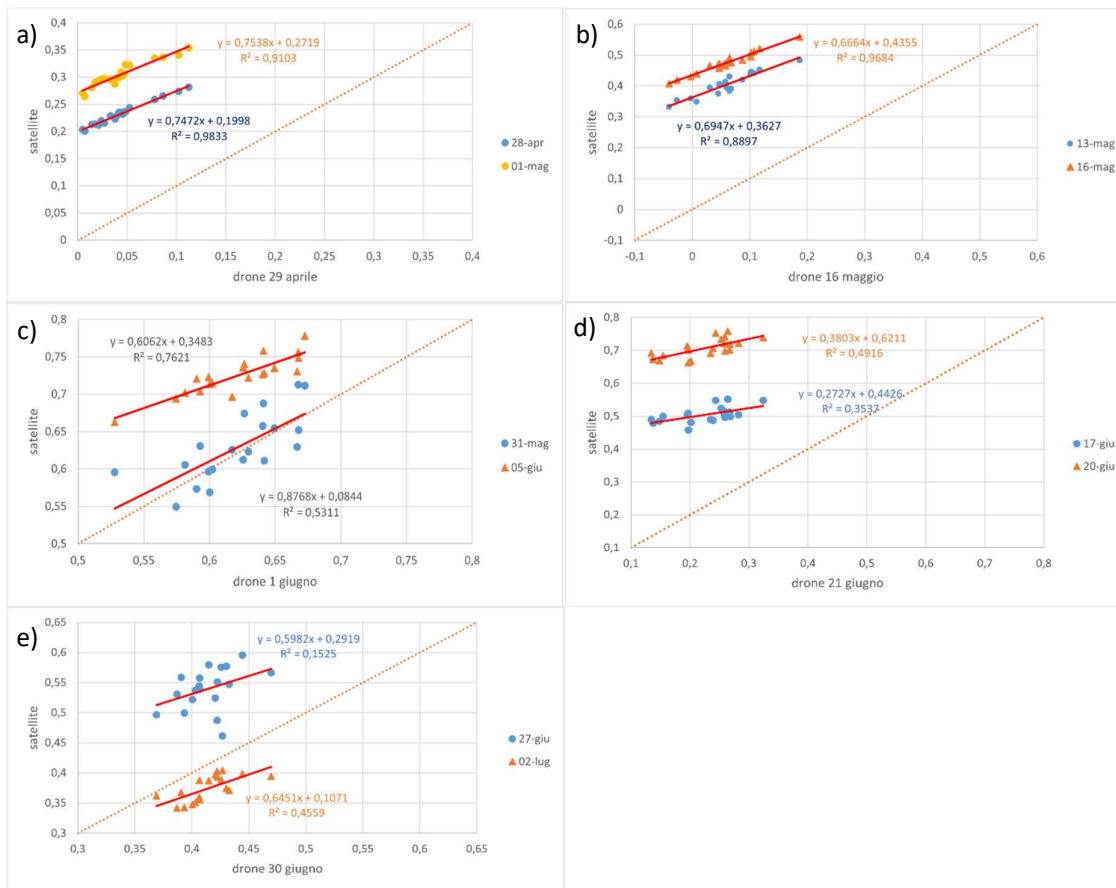
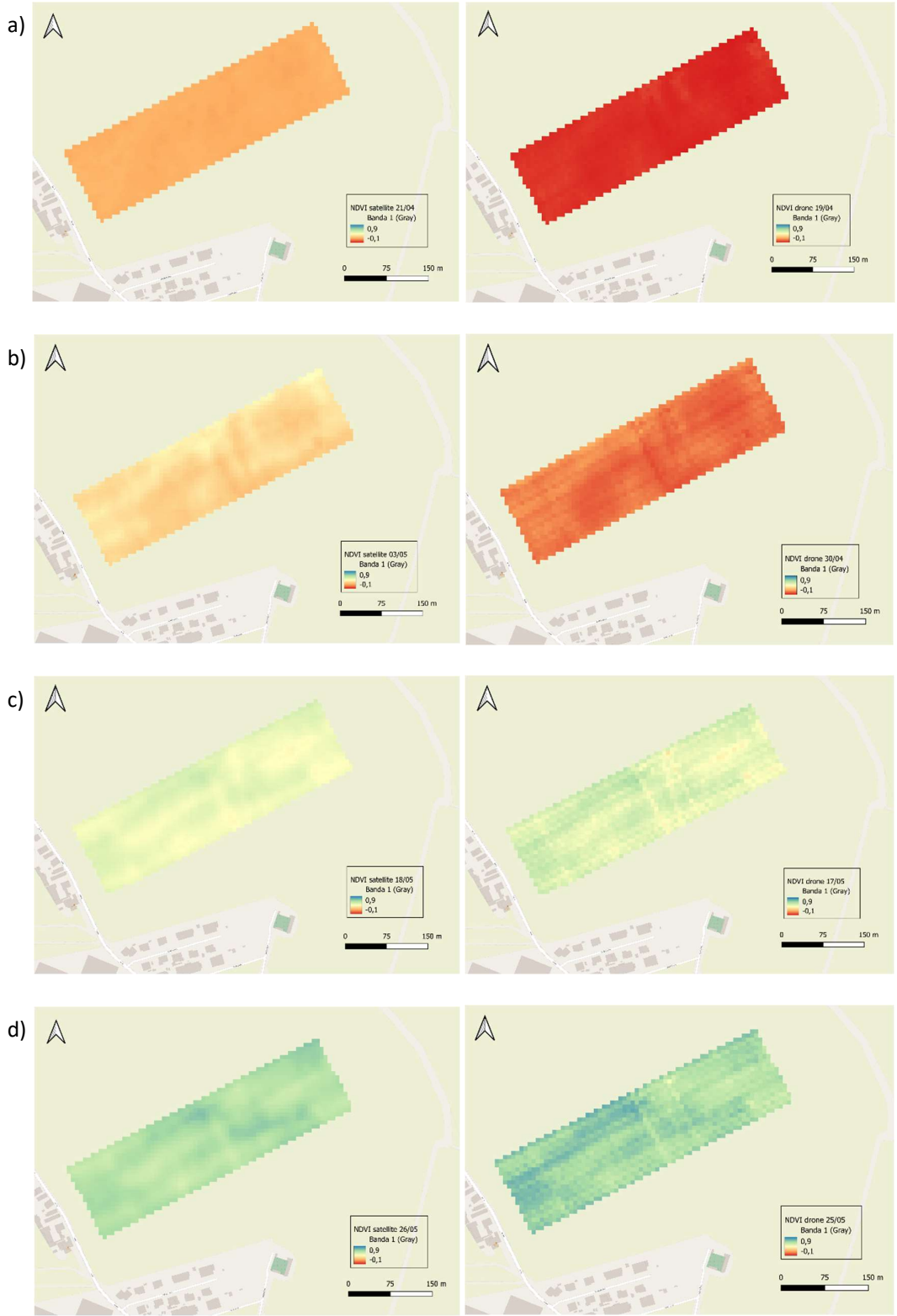


Figura 4.2 – Relazione tra NDVI satellitare e da drone delle mappe di vegetazione relative al 2022.

Sulle mappe selezionate è stata approfondita l'analisi creando, grazie al software QGIS, delle immagini tra loro uniformate sulla base della stessa scala cromatica per poter essere facilmente confrontate (figure 4.3 e 4.4). Da queste si nota che il satellite tende generalmente a sovrastimare i valori di NDVI forniti dal drone, in modo particolare nelle fasi colturali iniziali in cui la vegetazione presenta ancora uno sviluppo ridotto ed in quelle finali dove la parte epigea della pianta va in contro ad un progressivo ingiallimento. I rilievi da drone eseguiti nei periodi tra metà aprile ed inizio maggio e tra fine giugno ed inizio luglio del 2021 si presentano con valori più bassi rispetto ai rilievi satellitari; anche nell'anno seguente si riscontra un andamento simile. L'ultimo rilievo del 2022 mostra NDVI più bassi rispetto a quello dell'anno precedente eseguito negli stessi giorni, probabilmente a causa dello stress idrico a cui la coltura è stata sottoposta nel periodo estivo. Inoltre, le zone all'interno delle mappe che presentano valori di NDVI più alti corrispondono alle parcelle in cui sono stati applicati i trattamenti di concimazione con concentrazione azotata maggiore. Nel complesso l'evoluzione dell'NDVI satellitare rispecchia il normale sviluppo di tale indice nella coltura analizzata.



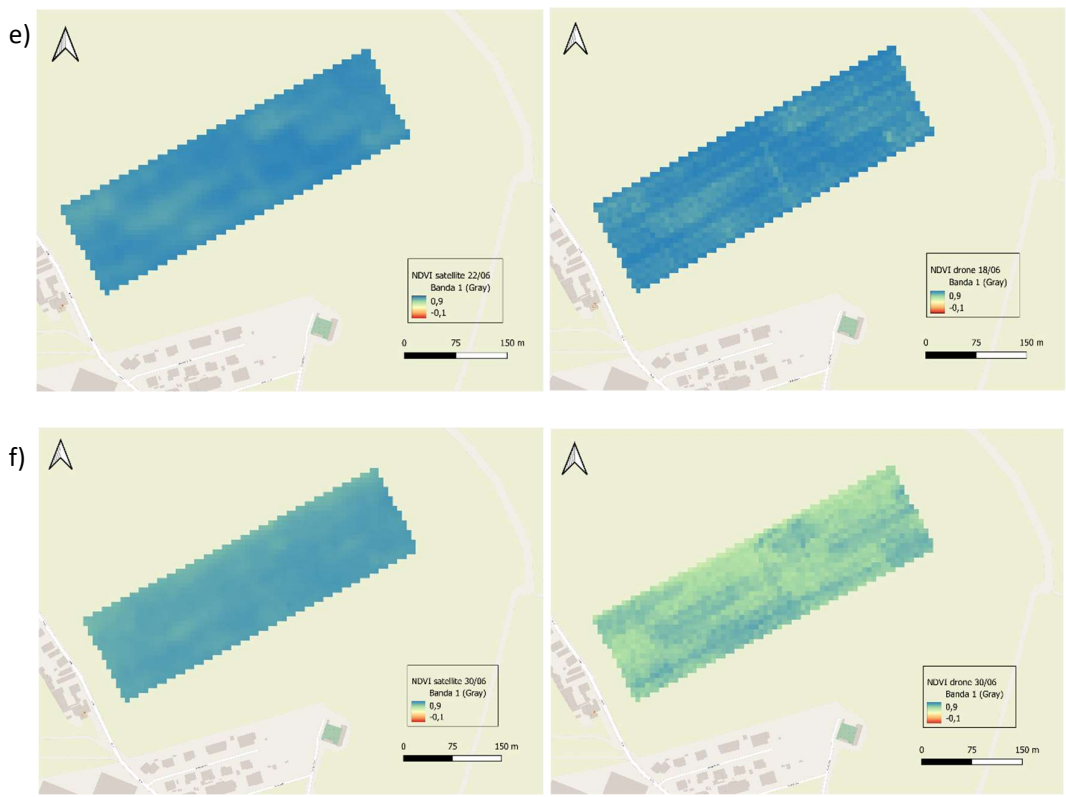
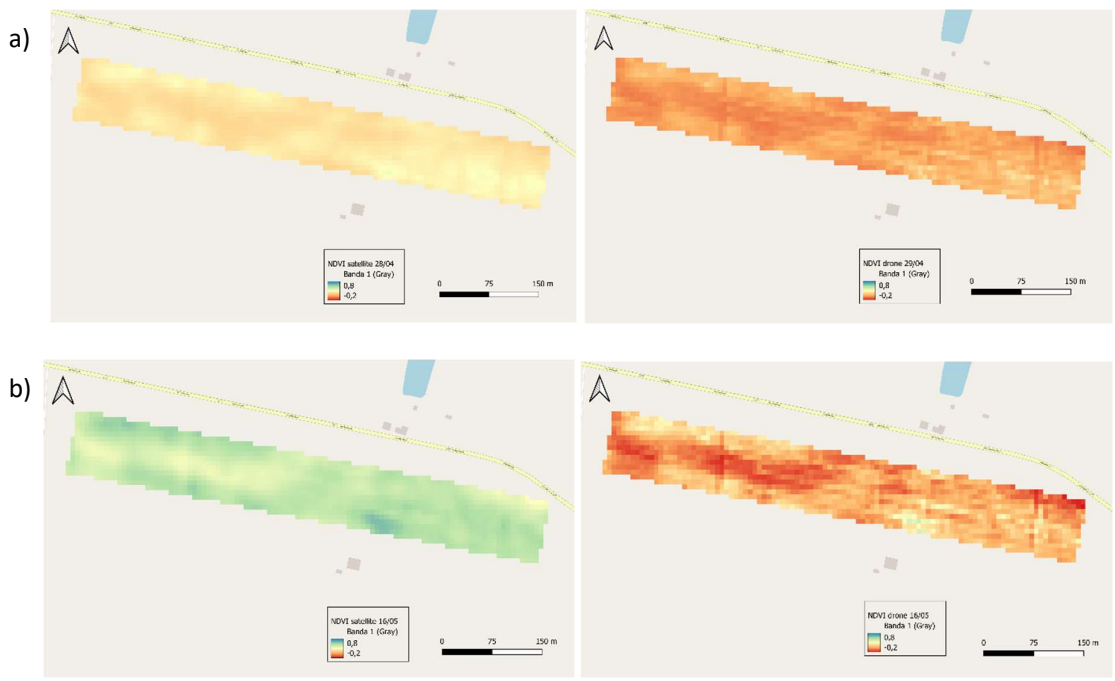


Figura 4.3 – Mappe dell'NDVI satellitare e da drone, anno 2021.



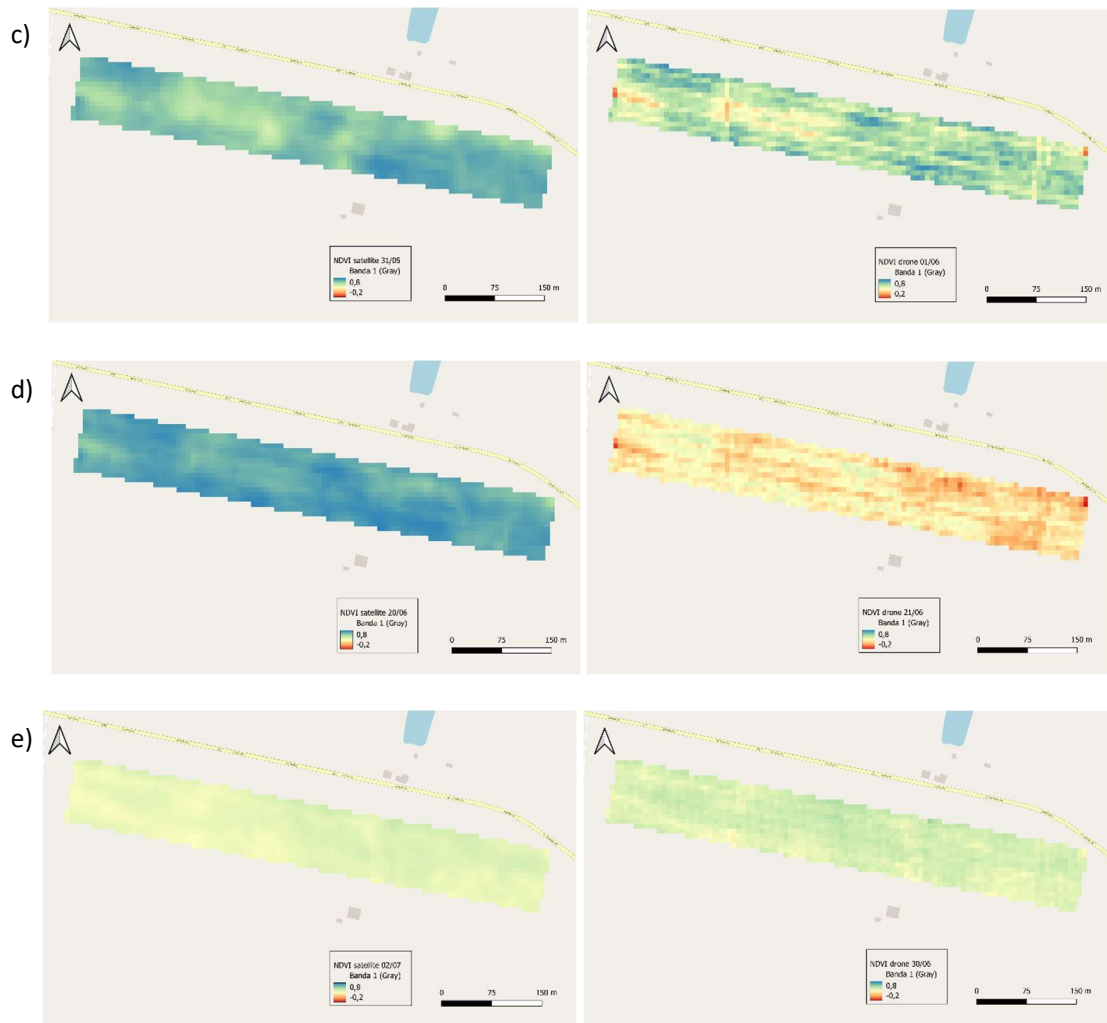


Figura 4.4 – Mappe dell’NDVI satellitare e da drone, anno 2022.

Le due tabelle sottostanti (figura 4.5 e 4.6) mostrano le matrici di correlazione che mettono in relazione tutte le mappe NDVI analizzate in questo studio, separate per anno. Si può notare come i coefficienti di correlazione descriventi la relazione esistente tra un’immagine satellitare e la corrispondente immagine da drone siano quasi sempre superiori a 0,60, a parte un singolo caso del 2021 che presenta coefficiente di 0,46. Nel primo anno i coefficienti vanno da un minimo di 0,46 fino ad un massimo di 0,82 mentre nel secondo anno assumono valori compresi tra 0,61 e 0,91. In queste matrici i valori più elevati si possono leggere proprio in corrispondenza di date simili, andando poi a diminuire con l’incrementare del numero di giorni che separa i due rilievi. Si deduce quindi che esiste una buona correlazione tra i dati ricavati dal satellite e quelli da drone, purché ci sia un’adeguata vicinanza temporale tra i due,

confermando la bontà dei rilievi da telerilevamento con satellite che, seppur con una risoluzione spaziale inferiore, dal punto di vista temporale hanno una buona risoluzione e possono essere usati per la pianificazione di interventi di concimazione a rateo variabile in pieno campo.

2021	19/04*	21/04	30/04*	03/05	17/05*	18/05	25/05*	26/05	18/06*	22/06	30/06*	30/06
19/04*	1,00	0,74	0,69	0,45	0,38	0,31	0,38	0,11	0,08	-0,12	0,05	-0,16
21/04	0,74	1,00	0,66	0,46	0,41	0,31	0,37	0,15	0,06	-0,12	0,01	-0,17
30/04*	0,69	0,66	1,00	0,76	0,64	0,62	0,66	0,40	0,40	0,05	-0,40	-0,49
03/05	0,45	0,46	0,76	1,00	0,60	0,75	0,50	0,57	0,42	0,24	-0,57	-0,50
17/05*	0,38	0,41	0,64	0,60	1,00	0,82	0,80	0,55	0,57	0,29	-0,55	-0,33
18/05	0,31	0,31	0,62	0,75	0,82	1,00	0,77	0,79	0,63	0,51	-0,71	-0,36
25/05*	0,38	0,37	0,66	0,50	0,80	0,77	1,00	0,60	0,65	0,32	-0,61	-0,29
26/05	0,11	0,15	0,40	0,57	0,55	0,79	0,60	1,00	0,68	0,76	-0,65	-0,09
18/06*	0,08	0,06	0,40	0,42	0,57	0,63	0,65	0,68	1,00	0,73	-0,56	0,01
22/06	-0,12	-0,12	0,05	0,24	0,29	0,51	0,32	0,76	0,73	1,00	-0,45	0,33
30/06*	0,05	0,01	-0,40	-0,57	-0,55	-0,71	-0,61	-0,65	-0,56	-0,45	1,00	0,46
30/06	-0,16	-0,17	-0,49	-0,50	-0,33	-0,36	-0,29	-0,09	0,01	0,33	0,46	1,00

Figura 4.5 – Matrice di correlazione riferita all’anno 2021. Le date contrassegnate da un asterisco rappresentano i rilievi del drone. Livello di significatività $p < 0,05$; F critico = 3.85; F calcolato = 0,05.

2022	29/04*	28/04	16/05*	16/05	01/06*	31/05	21/06*	20/06	30/06*	02/07
29/04*	1,00	0,90	0,82	0,76	0,60	0,60	0,10	0,37	-0,25	0,03
28/04	0,90	1,00	0,75	0,83	0,53	0,64	0,03	0,38	-0,27	0,02
16/05*	0,82	0,75	1,00	0,91	0,76	0,62	0,28	0,52	-0,22	0,02
16/05	0,76	0,83	0,91	1,00	0,70	0,71	0,20	0,59	-0,27	0,06
01/06*	0,60	0,53	0,76	0,70	1,00	0,61	0,61	0,69	0,02	0,23
31/05	0,60	0,64	0,62	0,71	0,61	1,00	0,20	0,57	-0,11	0,24
21/06*	0,10	0,03	0,28	0,20	0,61	0,20	1,00	0,70	0,24	-0,02
20/06	0,37	0,38	0,52	0,59	0,69	0,57	0,70	1,00	0,05	0,14
30/06*	-0,25	-0,27	-0,22	-0,27	0,02	-0,11	0,24	0,05	1,00	0,66
02/07	0,03	0,02	0,02	0,06	0,23	0,24	-0,02	0,14	0,66	1,00

Figura 4.6 – Matrice di correlazione riferita all’anno 2022. Le date contrassegnate da un asterisco rappresentano i rilievi del drone. Livello di significatività $p < 0,05$; F critico = 3.85; F calcolato = 0,05.

4.3 RELAZIONE TRA AZOTO E NDVI

I grafici della figura 4.7 riportano l’analisi di regressione tra l’azoto totale contenuto nella vegetazione e l’NDVI culturale rilevato dal drone e dal satellite. Ogni grafico raccoglie i dati dell’intera stagione culturale: all’inizio del ciclo la coltura si presenta con un’alta percentuale di azoto e NDVI molto basso, con il procedere dello sviluppo diminuisce il contenuto azotato e aumenta l’NDVI fino a raggiungere la fase antecedente alla raccolta (maturazione del bulbo) in cui l’azoto rimane stabile e l’NDVI decresce rapidamente. Tramite i rilievi eseguiti dal drone nell’anno 2022 sono stati ottenuti alcuni dati di NDVI molto bassi in un periodo in cui l’azoto totale si presenta in concentrazioni tali da aspettarsi valori dell’indice più elevati, portando quindi a dover escludere questi dati dal calcolo della curva di interpolazione. Come già osservato nei grafici precedentemente mostrati, anche in questi si nota come i valori rilevati

dal drone siano spesso più bassi di quelli satellitari, fatta eccezione per un determinato periodo del 2021 in cui avviene il contrario nell'intervallo di NDVI che va da 0,20 a 0,70.

L'andamento generale dei dati è simile tra satellite e drone ed entrambi sono sensibili alla variazione di TKN della coltura. Le curve di interpolazione si presentano ben separate quando l'NDVI è basso e tendono ad avvicinarsi con il progredire degli stadi fenologici, fino a raggiungere la fase colturale di massimo sviluppo vegetativo in cui si manifesta il picco di NDVI. In corrispondenza di indici superiori a 0,70 i dati satellitari e da drone sono pressoché sovrapponibili. Si deduce quindi che maggiore è l'NDVI, migliore è la precisione che il satellite è in grado di raggiungere nella stima del contenuto azotato della coltura. Questo effetto è probabilmente dovuto alla differente risoluzione dei due sensori che, nelle fasi iniziali di sviluppo vegetativo, rispondono in maniera differente all'elevata variabilità in campo tra aree con copertura vegetale e terreno nudo.

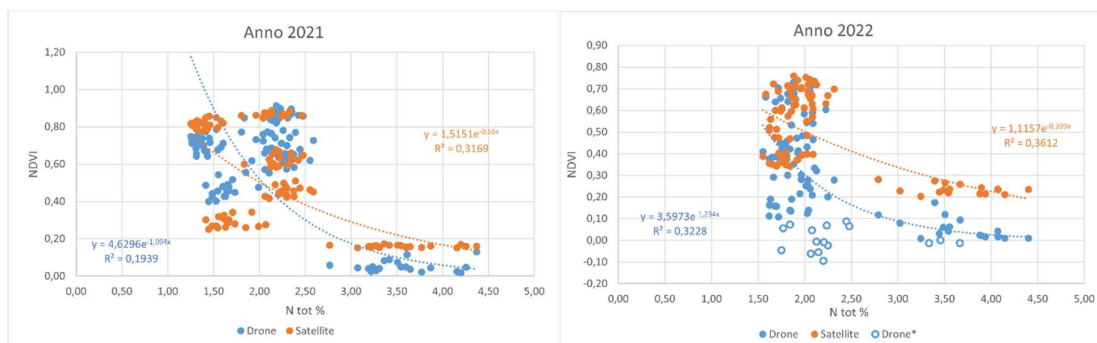


Figura 4.7 – Analisi di regressione tra azoto totale (espresso in TKN%) e NDVI. Nell'anno 2022 i dati appartenenti alla serie "drone*" sono stati esclusi dall'interpolazione.

5. CONCLUSIONI

L'analisi comparativa svolta in questo studio ha fatto emergere le analogie e le differenze esistenti tra i dati di NDVI provenienti dai rilievi satellitari e da drone, approfondendo anche i benefici e gli svantaggi dell'utilizzo di questi due strumenti a supporto delle decisioni aziendali in un'ottica di agricoltura di precisione. L'indice di vegetazione rilevato dal satellite si era dimostrato sensibile alle variazioni delle dosi di concime azotato somministrate alla coltura e alla concentrazione di azoto nella biomassa vegetale, confermando la sua applicabilità in agricoltura. Si sono riscontrate delle differenze tra le due fonti di dati, alcune dovute al fatto che l'NDVI sia un indice che subisce variazioni in base all'intensità luminosa a cui la superficie del corpo analizzato è sottoposta, di conseguenza l'ora del giorno in cui sono stati eseguiti i rilievi può aver avuto una certa influenza sui valori raccolti. Un'altra fonte di divergenza nei dati era la fase del ciclo vegetativo della coltura; è emersa infatti una bassa corrispondenza tra l'NDVI riportato dal satellite e quello del drone nei periodi in cui la vegetazione si presentava con uno sviluppo tale da non creare una completa copertura del terreno. I valori erano invece molto simili nelle fasi di pieno sviluppo vegetativo, per poi discostarsi ancora durante la fase di senescenza della coltura. Lo strumento del rilievo satellitare era perciò più affidabile e preciso nel momento in cui andava ad analizzare una vegetazione in completo sviluppo.

Nel caso in cui si dovessero impiegare i dati satellitari per redigere un piano di concimazione sulla base dell'NDVI, sarebbe opportuno considerare il fatto che il satellite tende a sovrastimare i valori di tale indice rispetto a quelli ottenuti dal drone, in particolare nelle prime fasi fenologiche della coltura. Nonostante queste problematiche, si è riscontrato un buon indice di correlazione tra i dati rilevati dalle due tecnologie, suggerendo che anche il satellite, nonostante la risoluzione spaziale inferiore, è sufficientemente sensibile a rilevare la variabilità spaziale in campo. Inoltre, è auspicabile un utilizzo dei satelliti per tali scopi, previa un'adeguata calibrazione per aumentarne la precisione e l'accuratezza; in aggiunta non si esclude un futuro avanzamento nelle tecnologie satellitari che porti ad un incremento di risoluzione spaziale e temporale delle immagini trasmesse.

6. RINGRAZIAMENTI

La prima persona che vorrei ringraziare è il mio relatore Nicola Dal Ferro per le numerose cose che mi ha insegnato, per il tempo che mi ha dedicato e per la sua grande disponibilità e pazienza. Un ringraziamento va anche a quei professori che sono stati in grado di trasmettermi un po' della loro passione per tutto ciò che riguarda il mondo dell'agricoltura, senza i quali probabilmente non avrei intrapreso questo percorso di studi con così tanta convinzione. Grazie infine a tutte le persone che mi hanno accompagnata e supportata in questo pezzo di strada.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Arai K., Sakashita M., Shigetomi O. e Miura Y. (2014) Estimation of Protein Content in Rice Crop and Nitrogen Content in Rice Leaves Through Regression Analysis with NDVI Derived from Camera Mounted Radio-Control Helicopter. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, Vol. 3, No.3, pp. 12-19.
2. Borin M. (1999) *Introduzione all'ecologia del sistema agricoltura*. Cleup, Padova, pp 258-261.
3. Calcante A. (2015) Potenzialità dei droni. *Intersezioni* 57.
4. Casa R. e Pisante M. (2016) *Introduzione*. A cura di: Casa R. *Agricoltura di Precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali*. Edagricole, Milano, pp 1-8.
5. Cassman K. e Grassini P. A global perspective on sustainable intensification research (2020). *Agronomy & Horticulture -- Faculty Publications*. 1344.
6. Cuscianna A. (2023) *Concimazione di precisione in frumento duro: l'integrazione fra le mappe di prescrizione e bilancio dei nutrienti (Triticum turgidum subsp. durum Desf)*. Tesi di laurea in Scienze Agrarie e del Territorio, Università degli studi delle Marche, a.a. 2022/2023.
7. Furlanetto, J., Dal Ferro, N., Longo, M., Sartori, L., Polese, R., Caceffo, D., ... & Morari, F. (2023). LAI estimation through remotely sensed NDVI following hail defoliation in maize (*Zea mays* L.) using Sentinel-2 and UAV imagery. *Precision Agriculture*, 1-25.
8. Gebbers R., Adamchuk V. (2010). *Precision Agriculture and Food security*. *Science*, 327, 828-831.
9. Grisso R.D., Alley M.M., Thomason W.E., Holshouser D.L. e Roberson G.T. (2011). *Precision farming tools: variable-rate application*. *Virginia Cooperative Extension* 442-505.
10. Heyl, K., Ekardt, F., Roos, P., & Garske, B. (2023). Achieving the nutrient reduction objective of the Farm to Fork Strategy. An assessment of CAP subsidies for precision fertilization and sustainable agricultural practices in Germany. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1088640.
11. Jiang j., Zhang Z., Cao Q., Liang Y., Krienke B., Yongchao T., Khu Y., Cao W. e Liu X. (2020) Use of an Active Canopy Sensor Mounted on an Unmanned Aerial Vehicle to Monitor the Growth and Nitrogen Status of Winter Wheat. *Remote Sensing* 12 (22).

12. Kizilgeci F., Yildirim M., Islam S.M., Ratnasekera D., Iqbal A.M. e El Sabagh A. (2021) Normalized Difference Vegetation Index and Chlorophyll Content for Precision Nitrogen Management in Durum Wheat Cultivars under Semi-Arid Conditions. *Sustainability*, 13.
13. Laroche-Pinel E., Duthoit S., Albughdadi M., Costard A.D., Rousseau J., Chéret V. e Clenet H. (2021) Towards VineWater Status Monitoring on a Large Scale Using Sentinel-2 Images. *Remote Sensing* 13 (9).
14. Messina G., Praticò S., Siciliani B., Curcio A., Di Fazio S. e Modica G. (2020) Telerilevamento multispettrale da drone per il monitoraggio delle colture in agricoltura di precisione. Un'applicazione alla cipolla rossa di tropea. *LaborEst* 21.
15. Papi S., (2019) Agricoltura di precisione. Sensori applicati alle operazioni meccanizzate. Tesi di laurea in Scienze e Tecnologie Agrarie, Università Politecnica delle Marche, a.a. 2018/2019.
16. Pardossi A., Prosdocimi G., Santamaria P. e Incrocci L. (2020) Orticoltura principi e pratica. Edagricole, Milano, pp. 148-149.
17. Reidsma, P., Tekelenburg, T., Van den Berg, M., & Alkemade, R. (2006). Impacts of land-use change on biodiversity: An assessment of agricultural biodiversity in the European Union. *Agriculture, ecosystems & environment*, 114(1), 86-102. ISO 690.
18. Sorlini C., Agricoltura sostenibile, Sintesi della relazione tenuta il 30 novembre 2017, Università degli studi di Milano.
19. Stepanov, A., Dubrovin, K., Sorokin, A., & Aseeva, T. (2020). Predicting soybean yield at the regional scale using remote sensing and climatic data. *Remote Sensing*, 12(12), 1936.
20. Viana M.C., Oliveira S., Oliveira S.C. e Rocha J. (2019) *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*. Elsevier, Lisbon, pp. 621-651.
21. Viscarra Rossel R.A., Adamchuk V.I., Sudduth K.A., McKenzie N.J., Lobsey C. (2011) Capitolo cinque - Proximal Soil Sensing: An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time. A cura di: Sparks D.L., *Advances in Agronomy*, volume 113, Academic Press, pp 243-291.
22. Yang C. (2018) High resolution satellite imaging sensors for precision agriculture. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 5(4): 393–405.

8. LISTA DELLE FIGURE

Figura 1.1 – Schema concettuale che descrive le linee di intervento previste per la strategia Farm to Fork	2
Figura 1.2 – Esempio di mappa di prescrizione per la concimazione fosfatica in frumento duro	3
Figura 1.3 – Descrizione dell'indice NDVI in matrici differenti	7
Figura 1.4 – Variazione stagionale di NDVI in colture differenti	8
Figura 3.1 – I due appezzamenti analizzati nello studio: in alto quello del 2021 nel comune di Oppeano, in basso quello del 2022 nel comune di Isola della Scala	10
Figura 3.2 – Concimazione azotata differenziata per ogni parcella	11
Figura 3.3 – Campionamento della vegetazione	12
Figura 3.4 – a) drone usato per i rilievi; b) sistemi di comando del drone; c) pannelli georeferenziati posizionati sul perimetro dell'appezzamento usati come traccia per il volo del drone; d) ed e) GPS	13
Figura 3.5 – Monitoraggio di precipitazioni e umidità del suolo	14
Figura 4.1 – Relazione tra NDVI satellitare e da drone delle mappe di vegetazione relative al 2021	19
Figura 4.2 – Relazione tra NDVI satellitare e da drone delle mappe di vegetazione relative al 2022	20
Figura 4.3 – Mappe dell'NDVI satellitare e da drone, anno 2021	22
Figura 4.4 – Mappe dell'NDVI satellitare e da drone, anno 2022	23
Figura 4.5 – Matrice di correlazione riferita all'anno 2021	24
Figura 4.6 – Matrice di correlazione riferita all'anno 2022	24
Figura 4.7 – Analisi di regressione tra azoto totale (espresso in TKN%) e NDVI	25