



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E
AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SISTEMI AGRICOLI INNOVATIVI

TECNOLOGIE UAV E AGRICOLTURA DI
PRECISIONE PER IL MONITORAGGIO E LA
GESTIONE SOSTENIBILE DEI TAPPETI ERBOSI
SPORTIVI

UAV TECHNOLOGIES AND PRECISION
AGRICULTURE FOR THE MONITORING AND
SUSTAINABLE MANAGEMENT OF SPORTS TURF

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
SIMONE MARINUCCI

Relatore:
DOTT. STEFANO CHIAPPINI

Correlatori:
DOTT.SSA CHIARA RIVOSECCHI
PROF. RODOLFO SANTILOCCHI

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

ELENCO DELLE TABELLE	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	7
CAPITOLO 1 AGRICOLTURA DI PRECISIONE E TELERILEVAMENTO.....	10
1.1 Agricoltura di precisione: principi e obiettivi	10
1.2 Variabilità spaziale e gestione sito-specifica.....	11
1.3 Il telerilevamento in ambito agrario	12
1.4 Remote sensing: principi fisici della radiazione elettromagnetica	13
1.5 Sensori per il monitoraggio della vegetazione	14
1.5.1 Sensori satellitari	15
1.5.2 Sensori aerotrasportati	16
1.5.3 Sensori prossimali.....	16
CAPITOLO 2 MONITORAGGIO DEL TAPPETO ERBOSO SPORTIVO	18
2.1 Tipologie di tappeti erbosi sportivi	18
2.2 Caratteristiche agronomiche dei campi da calcio professionistici.....	19
2.3 Criticità gestionali del tappeto erboso sportivo	20
2.4 Stress biotici e abiotici nei campi sportivi.....	21
2.5 Applicazione dell’agricoltura di precisione nel turfgrass management.....	22
CAPITOLO 3 INDICI DI VEGETAZIONE E MAPPE DI PRESCRIZIONE.....	24
3.1 Monitoraggio della vegetazione nel dominio ottico	24
3.2 Indici di vegetazione	25
3.2.1 NDVI.....	25
26	
3.2.2 NDRE e altri indici complementari	26
3.3 Interpretazione agronomica dei valori NDVI.....	27
3.4 Limiti e criticità degli indici di vegetazione.....	28
3.5 Mappe di prescrizione	28
3.5.1 Definizione e principi	29
3.5.2 Applicazione a concimazione e irrigazione di precisione	29
CAPITOLO 4 MATERIALI E METODI	30
4.1 Area di studio	30
4.2 Descrizione del campo da calcio oggetto di studio	31
4.3 Strumentazione utilizzata	33

4.3.1 UAV	33
4.3.2 Sensori	34
4.3.3 SPAD – 502 plus	36
4.3.4 Ricevitore GNSS-RTK	37
4.3.5 Software di elaborazione	38
4.4 Pianificazione ed esecuzione voli.....	39
4.5 Elaborazione delle immagini.....	41
4.5.1 Generazione ortomosaico	41
4.5.2 Calcolo degli indici di vegetazione.....	44
CAPITOLO 5 RISULTATI	45
5.1 Analisi spaziale dell’NDVI	45
5.2 Analisi spaziale dell’NDRE	47
5.3 Analisi spaziale del SAVI	49
5.4 Analisi spaziale del GNDVI.....	51
5.5 Analisi termica	53
CAPITOLO 6 DISCUSSIONE	56
6.1 Interpretazione agronomica e confronto tra gli indici di vegetazione e i dati termici	56
6.2 Applicabilità pratica delle tecnologie UAV nella gestione dei tappeti erbosi sportivi	58
6.3 Limiti della metodologia adottata.....	59
6.4 Prospettive future di sviluppo.....	60
CONCLUSIONI	62
BIBLIOGRAFIA	64
RINGRAZIAMENTI	68

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 3-1: Interpretazione valori NDVI.....	27
Tabella 4-1: Errore medio di localizzazione delle camere relativo al rilievo multispettrale del 17/04/2026.	43
Tabella 4-2: Errore medio di localizzazione delle camere relativo al rilievo termico del 17/04/2026..	43
Tabella 4-3: Errore medio di localizzazione delle camere relativo al rilievo multispettrale del 23/04/2026.	43
Tabella 4-4: Errore medio di localizzazione delle camere relativo al rilievo termico del 23/04/2026..	43
Tabella 5-1: Confronto dei valori di media e deviazione standard tra i rilievi pre e post-partita dell'indicatore NDVI.....	46
Tabella 5-2: Confronto dei valori di media e deviazione standard tra i rilievi pre e post-partita dell'indicatore NDRE	48
Tabella 5-3: Confronto dei valori di media e deviazione standard tra i rilievi pre e post-partita dell'indicatore SAVI	50
Tabella 5-4: Confronto dei valori di media e deviazione standard tra i rilievi pre e post-partita dell'indicatore GNDVI	53

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: Curve di riflettanza spettrale della vegetazione con assorbimento nelle bande del blu e del rosso e forte riflettanza nel NIR, base per il calcolo dell'NDVI (Roman & Ursu,2016; Govender et al., 2007).....	14
Figura 1-2: Immagine multispettrale acquisita da satellite Sentinel-2 (European Space Agency (ESA), Missione Copernicus Sentinel-2).....	15
Figura 2-1: Confronto tra tappeto erboso naturale, ibrido e sintetico in relazione a utilizzo, costi, manutenzione e prestazioni. (Elaborazione grafica originale su dati adattati da Beard (2002), Puhalla et al. (2010), FIFA Quality Programme (2023)).	18
Figura 2-2: Struttura tipica del tappeto erboso da calcio professionistico (Beard, J.B., Green, R.L. (1994).....	20
Figura 2-3: Esempio di stress biotico e abiotico nel tappeto erboso sportivo (Carrow, R.N., Duncan, R.R., 2012).....	22
Figura 3-1: Esempio di mappa NDVI ottenuta da immagini multispettrali (Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974)	26
Figura 3-2: Esempio di mappa di prescrizione utilizzata per applicare fertilizzanti o acqua a rateo variabile in funzione della variabilità spaziale della coltura (Mulla, 2013).	28
Figura 4-1: Inquadramento dell'area di studio nel comune di Offida (AP) con evidenziazione dello stadio comunale "Alessio Piccioni" (Google Maps,2026).....	31
Figura 4-2: Superficie di gioco del campo sportivo comunale "Alessio Piccioni" durante il periodo di svolgimento dei rilievi sperimentali (Elaborazione propria).....	33
Figura 4-3: UAV DJI Mavic 3T utilizzato durante le attività di rilievo del campo oggetto di studio. (Elaborazione propria)	33
Figura 4-4: Caratteristiche del sensore montato sul drone DJI Mavic 3M (DJI,2026)	35
Figura 4-5: Bande multispettrali dei sensori utilizzati per i rilievi (Aemmesurving, 2016).....	35
Figura 4-6: Misuratore di clorofilla SPAD-502 Plus utilizzato durante le attività di monitoraggio presso il campo oggetto di studio. (Elaborazione propria).....	37
Figura 4-7: Ricevitore GNSS RTK Topcon HiPer HR utilizzato durante le operazioni di rilievo presso il campo oggetto di studio. (Elaborazione propria).....	38
Figura 4-8: Piano di volo DJI MAVIC 3T	41
Figura 4-9: Piano di volo DJI MAVIC 3M.....	41
Figura 4-10: Posizionamento delle camere e sovrapposizione delle immagini utilizzati nel processo di allineamento fotogrammetrico mediante Agisoft Metashape (Elaborazione da report Agisoft Metashape).....	42
Figura 4-11: Visualizzazione e tematizzazione del raster NDVI del tappeto erboso mediante software QGIS. (Elaborazione propria).....	44
Figura 5-1: Mappa NDVI del tappeto erboso acquisita nella fase pre-partita.....	46
Figura 5-2: Mappa NDVI del tappeto erboso acquisita nella fase post-partita Errore. Il segnalibro non è definito.	
Figura 5-3: Mappa dell'indice NDRE del tappeto erboso acquisita nella fase pre-partita	48
Figura 5-4: Mappa dell'indice NDRE del tappeto erboso acquisita nella fase post-partita	48
Figura 5-5: Mappa dell'indice SAVI del tappeto erboso acquisita nella fase pre-partita	50
Figura 5-6: Mappa dell'indice SAVI del tappeto erboso acquisita nella fase post-partita	50
Figura 5-7: Mappa dell'indice GNDVI del tappeto erboso acquisita nella fase pre-partita.....	52
Figura 5-8: Mappa dell'indice GNDVI del tappeto erboso acquisita nella fase post-partita	52
Figura 5-9: Mappa dell'indice TERMICO del tappeto erboso acquisita nella fase pre-partita.....	55
Figura 5-10: Mappa dell'indice TERMICO del tappeto erboso acquisita nella fase post-partita	55

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Negli ultimi decenni il settore agricolo e quello della gestione delle superfici vegetate hanno assistito a una crescente diffusione di tecnologie innovative basate sull'acquisizione e sull'analisi di dati spaziali. Tra queste, il telerilevamento rappresenta uno degli strumenti più promettenti per il monitoraggio delle colture e per l'ottimizzazione delle pratiche di gestione agronomica. Attraverso l'utilizzo di sensori in grado di rilevare la radiazione elettromagnetica riflessa dalla superficie terrestre, il telerilevamento consente infatti di ottenere informazioni dettagliate sullo stato della vegetazione in modo rapido, non distruttivo e su larga scala.

In particolare, l'integrazione tra tecniche di telerilevamento e approcci di agricoltura di precisione ha reso possibile lo sviluppo di nuovi metodi di gestione basati sulla variabilità spaziale delle colture e delle superfici vegetate. Questo approccio consente di monitorare in modo continuo lo stato delle piante, individuare tempestivamente eventuali condizioni di stress e pianificare interventi agronomici mirati, migliorando l'efficienza nell'utilizzo delle risorse e riducendo al contempo l'impatto ambientale delle attività di gestione (Pierce & Nowak, 1999).

Sebbene tali tecnologie siano state inizialmente sviluppate per il settore agricolo, negli ultimi anni esse hanno trovato applicazione anche in ambiti differenti, tra cui la gestione dei tappeti erbosi sportivi. I campi da calcio rappresentano infatti sistemi vegetali altamente gestiti, caratterizzati da elevate esigenze in termini di qualità estetica, uniformità e resistenza all'usura. Il tappeto erboso di un campo sportivo è infatti sottoposto a numerosi fattori di stress, tra cui il calpestio degli atleti, le variazioni climatiche, le carenze idriche o nutrizionali e l'eventuale presenza di patogeni. Questi fattori possono determinare una riduzione della qualità del manto erboso, con conseguenze sia sull'estetica del campo sia sulla sicurezza e sulla qualità del gioco.

Tradizionalmente, il monitoraggio delle condizioni del tappeto erboso è stato effettuato attraverso osservazioni visive e interventi di gestione uniformi su tutta la superficie del campo. Tuttavia, questo approccio presenta alcune limitazioni, poiché non consente di cogliere pienamente la variabilità spaziale che caratterizza spesso le superfici erbose. All'interno dello stesso campo possono infatti essere presenti zone con caratteristiche differenti in termini di

vigore vegetativo, disponibilità idrica o condizioni del suolo. L'applicazione uniforme di fertilizzanti, acqua o altri input agronomici può quindi risultare inefficiente e comportare un aumento dei costi di gestione e degli impatti ambientali.

In questo contesto, il telerilevamento e gli indici di vegetazione rappresentano strumenti particolarmente utili per il monitoraggio del tappeto erboso. Attraverso l'analisi della riflettanza spettrale della vegetazione è infatti possibile ottenere informazioni indirette sullo stato fisiologico delle piante, sulla biomassa vegetale e sull'attività fotosintetica. Tra i diversi indici sviluppati per questo scopo, uno dei più diffusi è il NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), che consente di valutare il vigore vegetativo delle piante attraverso il confronto tra la riflettanza nella banda rossa e quella nel vicino infrarosso (Rouse et al., 1974; Tucker, 1979).

L'impiego di tali tecnologie permette di individuare in modo rapido eventuali aree del campo caratterizzate da condizioni di stress o da una crescita non uniforme della vegetazione. Le informazioni ottenute possono essere utilizzate per pianificare interventi di gestione più mirati, come la fertilizzazione o l'irrigazione localizzata, migliorando l'efficienza nell'utilizzo delle risorse e contribuendo alla sostenibilità delle pratiche di gestione.

Un ulteriore sviluppo in questo ambito è rappresentato dall'utilizzo di piattaforme aeree a pilotaggio remoto, comunemente note come droni. Questi sistemi consentono di acquisire immagini multispettrali ad alta risoluzione spaziale, permettendo un'analisi dettagliata delle condizioni della vegetazione anche su superfici relativamente ridotte, come nel caso dei campi sportivi (Zhang & Kovacs, 2012). Grazie alla loro flessibilità operativa e ai costi relativamente contenuti, i droni rappresentano oggi uno strumento sempre più diffuso nel monitoraggio delle colture e delle superfici erbose.

Nel contesto dei tappeti erbosi sportivi, l'utilizzo di tecniche di telerilevamento e di analisi degli indici di vegetazione offre quindi la possibilità di sviluppare strategie di gestione più efficienti e sostenibili. Questo aspetto risulta particolarmente rilevante non solo per le strutture sportive professionistiche, che dispongono generalmente di risorse economiche e tecniche più elevate, ma anche per le realtà sportive di dimensioni minori, come i campi comunali o quelli gestiti da società dilettantistiche.

In molte di queste realtà, la gestione del tappeto erboso deve infatti confrontarsi con risorse economiche limitate, che rendono difficile mantenere elevati standard qualitativi del campo. L'introduzione di tecnologie di monitoraggio relativamente accessibili, come i rilievi con drone e l'analisi degli indici di vegetazione, potrebbe quindi rappresentare una soluzione

efficace per migliorare la qualità dei campi da gioco senza richiedere investimenti comparabili a quelli delle strutture professionistiche.

Alla luce di queste considerazioni, l'obiettivo della presente tesi è quello di analizzare il potenziale delle tecnologie di telerilevamento per il monitoraggio e la gestione dei tappeti sportivi, con particolare riferimento ai campi da calcio. In particolare, il lavoro si propone di valutare come l'utilizzo di immagini multispettrali e di indici di vegetazione possa contribuire all'individuazione di eventuali criticità nel tappeto erboso e alla definizione di strategie di gestione più efficienti.

L'approccio adottato mira, inoltre, a evidenziare come queste tecnologie possano essere applicate non solo in contesti professionistici, ma anche in realtà sportive di dimensioni più ridotte, contribuendo a migliorare la qualità dei campi da gioco, ridurre i costi di gestione e favorire pratiche di manutenzione più sostenibili dal punto di vista ambientale.

Capitolo 1

AGRICOLTURA DI PRECISIONE E TELERILEVAMENTO

1.1 Agricoltura di precisione: principi e obiettivi

L'agricoltura di precisione rappresenta un approccio gestionale innovativo basato sull'analisi della variabilità spazio-temporale delle colture, con l'obiettivo di migliorare la sostenibilità economica e ambientale delle aziende agricole e di ottimizzare gli input produttivi. A differenza della gestione tradizionale, che considera il campo come un'unità omogenea, l'agricoltura di precisione riconosce l'esistenza di differenze intra-parcellari legate a suolo, disponibilità idrica, stato nutrizionale e condizioni fitosanitarie (Pierce & Nowak, 1999).

Il principio alla base è la gestione sito-specifica (site-specific management), che prevede l'applicazione differenziata di input quali fertilizzanti, acqua e prodotti fitosanitari in funzione delle effettive esigenze delle diverse porzioni di campo (Gebbers & Adamchuk, 2010). Questo mira a ridurre gli sprechi e aumentare l'efficienza produttiva limitando l'impatto ambientale.

Dal punto di vista operativo, l'agricoltura di precisione si fonda sull'integrazione di varie tecnologie, come sistemi di posizionamento globale (GNSS), sensori prossimali e remoti, sistemi informativi geografici (GIS) e macchine agricole a rateo variabile (VRT). L'evoluzione nell'acquisizione dei dati ha permesso di ottenere informazioni sempre più dettagliate, rendendo possibile un monitoraggio continuo e ad alta risoluzione (Zhang et al., 2002).

Negli ultimi anni, il concetto di agricoltura di precisione si è progressivamente esteso anche a contesti non prettamente agricoli, come la gestione dei tappeti erbosi sportivi, dove l'uniformità e la qualità del manto rappresentano parametri fondamentali. In tali ambiti, l'applicazione di strumenti di monitoraggio avanzati consente di individuare tempestivamente aree soggette a stress e di programmare di conseguenza interventi mirati, migliorando le performance del sistema vegetale e ottimizzando le risorse.

In tale contesto, il telerilevamento e l'impiego di piattaforme UAV (Unmanned Aerial Vehicles) assumono un ruolo centrale, in quanto permettono di acquisire dati ad alta risoluzione spaziale utili alla valutazione dello stato vegetativo con conseguente elaborazione di mappe di prescrizione per la gestione sito-specifica.

1.2 Variabilità spaziale e gestione sito-specifica

La variabilità spaziale rappresenta uno dei cardini dell'agricoltura di precisione, poiché descrive le differenze fisico-chimiche del suolo e nelle risposte colturali di uno stesso appezzamento. Questo fenomeno deriva da molteplici fattori, come la tessitura, la fertilità, l'umidità e le condizioni microclimatiche e si manifesta come eterogeneità del vigore vegetativo e della produttività osservabile anche su scala ridotta (Bahri & El Aissaoui, 2022; Ruralab CREA, 2024).

Per affrontare la variabilità spaziale, l'agricoltura di precisione usa la gestione sito-specifica (site-specific management o SSCM), basata sull'analisi e la caratterizzazione dettagliata dei singoli settori di un campo per ottimizzare l'impiego di input agronomici solo dove effettivamente necessario. La SSCM si differenzia profondamente dall'approccio usato nell'agricoltura tradizionale, in cui gli input vengono forniti in modo omogeneo su tutta la superficie senza tener conto delle reali esigenze locali (McBratney & Whelan, 2001; Precision Agriculture Lab, 2026).

L'obiettivo della gestione sito-specifica è duplice: da un lato migliorare l'efficienza delle risorse riducendo sprechi d'acqua, fertilizzanti e fitofarmaci; dall'altro aumentare la produttività e la sostenibilità ambientale delle pratiche agronomiche. Questo approccio si basa su dati spaziali e temporali raccolti mediante tecnologie come sensori prossimali, sistemi di posizionamento satellitare (GNSS) e telerilevamento da piattaforme aeree o satellitari (San Emeterio et al., 2023; Laveglia et al., 2024).

Nella SSCM una delle pratiche più diffuse è la delimitazione di zone di gestione omogenee (management zones), quindi aree con caratteristiche simili vengono identificate tramite metodi geostatistici e classificazioni multi-variabili, consentendo così l'elaborazione di mappe di prescrizione che guidano gli interventi differenziati. Studi recenti hanno dimostrato che la definizione di queste zone può portare a una gestione più precisa dei nutrienti e a una riduzione degli input chimici senza compromettere la resa produttiva (Lu et al., 2025).

In sintesi, la variabilità spaziale è una risorsa informatica da interpretare e gestire, non è un ostacolo da eliminare; grazie alla SSCM, gli agronomi sono in grado di adattare gli interventi culturali alle reali esigenze delle piante, migliorando sia la produttività che l'impatto ambientale delle produzioni (Precision Agriculture Definition – ISPA, 2024).

1.3 Il telerilevamento in ambito agrario

Il telerilevamento (remote sensing) è una disciplina incentrata sulla raccolta di informazioni sulla superficie terrestre senza un contatto fisico diretto, attraverso quindi sensori montati su piattaforme aeree o satellitari. Questa tecnologia si basa sulla misura della radiazione elettromagnetica riflessa o emessa dagli oggetti. La sua applicazione in agricoltura ha rivoluzionato il monitoraggio delle colture, consentendo la valutazione dello stato vegetativo, la diagnosi dello stress biotico e abiotico e la gestione sito-specifica delle risorse (Mulla, 2023).

Storicamente, l'uso del telerilevamento in agricoltura è iniziato con le immagini satellitari a bassa risoluzione per analisi delle colture su larga scala. Con l'arrivo di sensori ad alta risoluzione e tecnologie di elaborazione sempre più avanzate, questa disciplina ha esteso il suo campo d'azione fino a coprire dettagli sempre più piccoli, come le variazioni intra-particellari in un unico campo o aree molto ristrette (Zhang et al., 2002). Questo ha reso possibile la valutazione quantitativa di parametri agronomici come l'indice di vigore vegetativo, la temperatura del suolo e la copertura fogliare.

Negli ultimi anni, lo sviluppo di piattaforme aeree non occupate, comunemente noti come droni, ha portato il telerilevamento su una nuova frontiera, ovvero i droni possono essere equipaggiati con sensori multispettrali, iperspettrali o termici, permettendo acquisizioni ad altissima risoluzione spaziale e temporale, difficilmente ottenibili con satelliti per via delle limitazioni di passaggio e condizioni meteorologiche (Hunt et al., 2018).

L'impiego del telerilevamento e in particolare dei dati multispettrali raccolti da sensori UAV consente di estrarre indici di vegetazione come l'Indice di Vigore Normalizzato (NDVI) e altri indici correlati alla salute delle piante. Questi indicatori permettono di monitorare lo sviluppo vegetativo, di individuare zone soggette a stress idrico o nutrizionale e di costruire mappe termiche facilmente interpretabili per l'agronomo (Torres -Sánchez et al., 2014). Dal punto di vista operativo, i dati tele rilevati devono essere processati tramite una serie di fasi: correzione radiometrica, ortorettifica, generazione di ortomosaici e successivo calcolo degli

indici di vegetazione. Questi passaggi richiedono software dedicati e competenze specifiche, ma garantiscono che le informazioni ottenute siano coerenti, ripetibili e confrontabili nel tempo (Gebbers & Adamchuk, 2010; Maes & Steppe, 2019).

In conclusione, il telerilevamento in ambito agrario rappresenta uno strumento fondamentale per gestire in modo sostenibile le colture e ottimizzare gli input produttivi. Le tecnologie UAV, integrate con sensori ad alta risoluzione e tecniche di elaborazione avanzate, hanno reso possibile un monitoraggio dettagliato e continuo, aprendo nuove prospettive per l'agricoltura di precisione, anche in contesti non convenzionali come i tappeti erbosi sportivi.

Nel presente lavoro sperimentale, il telerilevamento da piattaforma UAV è impiegato per analizzare lo stato vegetativo del tappeto erboso tramite calcolo NDVI e produzione di mappe di prescrizione, col fine di supportare decisioni gestionali sito-specifiche.

1.4 Remote sensing: principi fisici della radiazione elettromagnetica

Il telerilevamento si fonda sull'analisi dell'interazione tra la radiazione elettromagnetica e la superficie terrestre. Questo tipo di radiazione è una forma di energia che si propaga nello spazio sotto forma di onde caratterizzate da una lunghezza d'onda e una frequenza specifica. Lo spettro elettromagnetico comprende un ampio intervallo di lunghezze d'onda, dalle onde radio ai raggi gamma, in ambito agronomico risultano di particolare interesse le bande del visibile (400 – 700 nm) e del vicino infrarosso (700 – 1300 nm) (Jensen, 2015).

Quando la radiazione solare colpisce una superficie vegetale, essa può essere assorbita, riflessa o trasmessa. La proporzione di ciascun processo dipende dalle caratteristiche chimico-fisiche del tessuto fogliare e dalla lunghezza d'onda considerata. Nella regione del visibile, la clorofilla assorbe principalmente le radiazioni nel blu (circa 450 nm) e nel rosso (circa 670 nm), mentre riflette maggiormente il verde, conferendo alle foglie la loro tipica colorazione (Campbell & Wynne, 2011).

Nel vicino infrarosso (NIR), invece, la radiazione non viene significativamente assorbita dai pigmenti fotosintetici, ma è influenzata fortemente dalla struttura interna della foglia, in particolare dagli spazi intercellulari del mesofillo spugnoso. Una vegetazione sana e ben sviluppata riflette intensamente nel NIR, mentre una vegetazione stressata o diradata mostra valori inferiori di riflettanza in questa banda (Tucker, 1979; Mulla, 2013).

La combinazione tra forte assorbimento nel rosso e alta riflettanza nel NIR costituisce la base fisica degli indici di vegetazione, tra cui l'NDVI. Questo indice sfrutta proprio la differenza di comportamento spettrale tra le due bande per stimare indirettamente il vigore vegetativo e lo stato fisiologico della copertura vegetale.

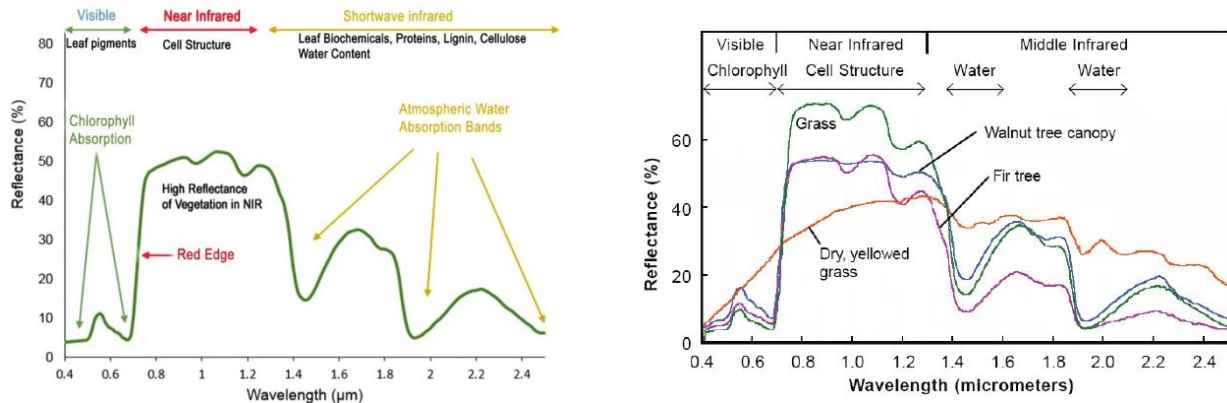


Figura 1-1: Curve di riflettanza spettrale della vegetazione con assorbimento nelle bande del blu e del rosso e forte riflettanza nel NIR, base per il calcolo dell'NDVI (Roman & Ursu, 2016; Govender et al., 2007)

Dal punto di vista applicativo, i sensori utilizzati nel telerilevamento agricolo sono progettati per acquisire dati in bande spettrali specifiche, selezionate in funzione delle informazioni agronomiche da ottenere. La corretta interpretazione dei dati richiede quindi una comprensione delle proprietà radiometriche della vegetazione e dei meccanismi fisici che regolano l'interazione tra radiazione e tessuti vegetali (Jensen, 2015).

In sintesi, la conoscenza dei principi fisici della radiazione elettromagnetica consente di comprendere le basi teoriche del monitoraggio remoto delle colture e di interpretare correttamente gli indici di vegetazione nell'ambito dell'agricoltura di precisione.

1.5 Sensori per il monitoraggio della vegetazione

Il monitoraggio della vegetazione mediante tecniche di telerilevamento si basa sull'utilizzo di diversi tipi di sensori in grado di registrare la radiazione elettromagnetica riflessa o emessa dalle superfici terrestri. Questi strumenti permettono di acquisire informazioni sulla risposta

spettrale della vegetazione e di valutare parametri agronomici legati allo stato fisiologico delle colture (Campbell & Wynne, 2011).

I sensori utilizzati nel telerilevamento agricolo possono essere classificati in base alla piattaforma su cui sono installati e alla distanza dalla superficie osservata. In generale si distinguono in sensori satellitari, montati su piattaforme orbitali, sensori aerotrasportati, installati su aeromobili o droni e sensori prossimali, utilizzati direttamente in prossimità della coltura. Ognuna di queste tecnologie presenta specifiche caratteristiche in termini di risoluzione spaziale, temporale e spettrale, che ne determinano le potenzialità applicative in ambito agronomico (Jensen, 2007).

La scelta del tipo di sensore dipende quindi dagli obiettivi dell'analisi, della scala spaziale dell'area di studio e dal livello di dettaglio richiesto per il monitoraggio delle colture.

1.5.1 Sensori satellitari

I sensori satellitari rappresentano una delle principali fonti di dati per il telerilevamento della vegetazione su larga scala. Installati su satelliti in orbita attorno alla Terra, questi strumenti permettono di acquisire immagini multispettrali con copertura spaziale molto ampia e con una frequenza di acquisizione regolare (Jensen, 2007).



Figura 1-2: Immagine multispettrale acquisita da satellite Sentinel-2 (European Space Agency (ESA), Missione Copernicus Sentinel-2)

Tra i principali vantaggi dei sensori satellitari vi sono la possibilità di monitorare vaste superfici agricole e la disponibilità di serie temporali di immagini che consentono di analizzare

l'evoluzione delle colture nel tempo. Molti programmi satellitari, come quelli gestiti da agenzie spaziali internazionali, mettono inoltre a disposizione dati gratuiti che vengono ampiamente utilizzati nella ricerca e nelle applicazioni agronomiche.

Tuttavia, i sensori satellitari presentano alcune limitazioni legate principalmente alla risoluzione spaziale delle immagini e alla dipendenza dalle condizioni atmosferiche. La presenza di nuvole o fenomeni atmosferici può infatti ridurre la qualità dei dati acquisiti e limitare la disponibilità di immagini utilizzabili in determinati periodi dell'anno (Campbell & Wynne, 2011).

1.5.2 Sensori aerotrasportati

I sensori aerotrasportati sono installati su piattaforme aeree quali aeroplani, elicotteri o più recentemente UAV. Questa tipologia di sensori consente di acquisire immagini ad altissima risoluzione spaziale, rendendo possibile l'analisi dettagliata della variabilità all'interno degli appezzamenti agricoli (Zhang & Kovacs, 2012).

Rispetto ai sensori satellitari, le piattaforme aerotrasportate offrono maggiore flessibilità operativa, poiché i rilievi possono essere programmati in funzione delle specifiche esigenze di monitoraggio. Inoltre, la minore distanza tra sensore e superficie osservata permette di ottenere dati più dettagliati e di individuare con maggiore precisione eventuali anomalie nello sviluppo delle colture.

Negli ultimi anni l'utilizzo dei droni ha conosciuto una rapida diffusione nel settore agricolo, grazie alla loro capacità di acquisire immagini multispettrali e termiche con elevata risoluzione e costi relativamente contenuti. Questa tecnologia rappresenta oggi uno degli strumenti più promettenti per il monitoraggio delle colture nell'ambito dell'agricoltura di precisione (Zhang et al., 2019).

1.5.3 Sensori prossimali

I sensori prossimali sono strumenti utilizzati direttamente in prossimità della superficie vegetale e consentono di acquisire misurazioni puntuali delle caratteristiche spettrali delle piante. A differenza dei sensori satellitari e aerotrasportati, che operano a distanza dalla superficie osservata, i sensori prossimali vengono generalmente utilizzati direttamente sul campo o montati su macchine agricole (Mulla, 2013).

Questa tipologia di sensori permette di ottenere dati molto accurati e di analizzare in modo dettagliato le condizioni della vegetazione. Tra gli strumenti più utilizzati rientrano gli spettrometri portatili e i sensori ottici montati su trattori o altre attrezzature agricole, che

consentono di misurare parametri come l'indice di vegetazione o lo stato nutrizionale delle colture.

I sensori prossimali sono particolarmente utili nelle applicazioni di agricoltura di precisione, dove vengono impiegati per valutare la variabilità all'interno dei campi e supportare la gestione sito-specifica delle colture. Le informazioni raccolte possono infatti essere integrate con dati provenienti da altre piattaforme di telerilevamento per ottenere un quadro più completo delle condizioni agronomiche dell'area studiata (Mulla, 2013).

Capitolo 2

MONITORAGGIO DEL TAPPETO ERBOSO SPORTIVO

2.1 Tipologie di tappeti erbosi sportivi

I tappeti erbosi sportivi rappresentano superfici vegetate progettate per rispondere a specifiche esigenze funzionali legate alla pratica sportiva, tra cui la resistenza al calpestio, l'uniformità della superficie e la capacità di recupero dopo sollecitazioni meccaniche. In funzione delle caratteristiche costruttive e dei materiali impiegati, essi possono essere distinti in tre principali categorie: tappeti erbosi naturali, artificiali e sistemi ibridi (Beard, 2002; Puhalla et al., 2010).

PARAMETRO		TAPPETO ERBOSO NATURALE	TAPPETO ERBOSO IBRIDO	TAPPETO ERBOSO SINTETICO
				
	ORE DI UTILIZZO ANNUALE	400 – 800 ore/anno	800 – 1.200 ore/anno	2.000 – 3.000 ore/anno
	COSTI DI INSTALLAZIONE	Bassi – Medi	Elevati	Alti
	COSTI DI MANUTENZIONE ANNUALE	Elevati	Medi	Bassi
	FABBISOGNO IRRIGUO	Elevato	Medio	Molto basso o nullo
	DURATA MEDIA	10 – 15 anni	10 – 15 anni	15 – 20 anni
	PRESTAZIONI DI GIOCO	Ottime	Ottime	Buone
	IMPATTO AMBIENTALE	Basso – Positivo (superficie viva)	Medio	Medio – Alto (materiali sintetici)
	SICUREZZA PER GLI ATLETI	Ottima	Ottima	Buona

Figura 2-1: Confronto tra tappeto erboso naturale, ibrido e sintetico in relazione a utilizzo, costi, manutenzione e prestazioni. (Elaborazione grafica originale su dati adattati da Beard (2002), Puhalla et al. (2010), FIFA Quality Programme (2023)).

I tappeti erbosi naturali sono costituiti da vegetazione viva e rappresentano la soluzione tradizionalmente più diffusa nei campi da calcio. Essi garantiscono elevate prestazioni in termini di qualità del gioco e comfort per gli atleti, ma richiedono una gestione continua e accurata, in quanto soggetti a fenomeni di usura e degradazione legati all'intensità d'uso e alle condizioni ambientali.

Dal punto di vista agronomico, tali sistemi possono essere classificati in base alle caratteristiche fisiologiche delle specie impiegate, distinguendo tra tappeti erbosi a prevalenza di specie microterme e macroterme. Le specie microterme sono adatte a climi temperati e risultano particolarmente diffuse nei contesti europei, mentre le macroterme sono tipiche di ambienti più caldi e caratterizzate da una maggiore tolleranza agli stress idrici e termici (Beard, 2002; Carrow & Duncan, 2003). Questa distinzione risulta fondamentale ai fini della scelta della composizione del tappeto erboso in relazione alle condizioni climatiche dell'area di interesse.

I tappeti erbosi artificiali sono costituiti da materiali sintetici progettati per riprodurre le caratteristiche delle superfici naturali. Essi presentano una maggiore resistenza all'usura e consentono un utilizzo più intensivo nel tempo, risultando particolarmente adatti in contesti caratterizzati da elevata pressione d'uso. Tuttavia, possono presentare alcune limitazioni legate al comportamento termico e alle condizioni di comfort per gli atleti.

I sistemi ibridi rappresentano una soluzione intermedia, in cui elementi sintetici vengono integrati con il tappeto erboso naturale al fine di migliorarne la stabilità e la resistenza meccanica. Questa tipologia è sempre più diffusa nei campi sportivi di alto livello, dove è richiesta una combinazione tra elevate prestazioni agronomiche e durabilità nel tempo (James, 2011).

La scelta della tipologia di tappeto erboso dipende da diversi fattori, tra cui le condizioni climatiche, l'intensità d'uso della superficie sportiva e le risorse economiche disponibili per la gestione. Nei contesti non professionistici, come quello oggetto del presente studio, la gestione di un tappeto erboso naturale rappresenta spesso una sfida significativa, rendendo particolarmente rilevante l'adozione di strumenti innovativi per il monitoraggio e l'ottimizzazione delle pratiche agronomiche.

2.2 Caratteristiche agronomiche dei campi da calcio professionistici

I campi da calcio professionistici rappresentano sistemi agronomici altamente gestiti, caratterizzati da elevati standard qualitativi e da una forte intensità di utilizzo. Il tappeto erboso deve garantire condizioni ottimali di gioco, sicurezza per gli atleti e uniformità della superficie, mantenendo al tempo stesso un elevato livello estetico e funzionale (Beard, 2001).

Dal punto di vista agronomico, i campi sportivi sono generalmente costituiti da specie erbacee appartenenti alle famiglie delle Poacee, selezionate per la loro capacità di tollerare il

calpestio e di recuperare rapidamente dopo il danneggiamento meccanico. Tra le specie più utilizzate nei campi da calcio europei si trovano *Lolium perenne*, *Poa pratensis* e *Festuca arundinacea*, spesso utilizzate in miscuglio per sfruttare le diverse caratteristiche agronomiche e migliorare la resistenza del tappeto erboso (Turgeon, 2011).

La gestione agronomica dei tappeti sportivi comprende numerosi interventi tecnici, tra cui irrigazione, fertilizzazione, sfalcio, aerazione e risemina. Lo sfalcio rappresenta una delle pratiche più frequenti e influisce significativamente sulla densità e sulla qualità del tappeto erboso. Nei campi professionistici l'altezza del taglio viene generalmente mantenuta tra i 20 e i 30 mm, al fine di garantire un buon equilibrio tra resistenza meccanica e qualità della superficie di gioco (Stier et al., 2013).

Un ulteriore elemento fondamentale è rappresentato dalla struttura del suolo o del substrato di coltivazione. Nei campi professionistici vengono spesso utilizzati sistemi costruttivi specifici con strati drenanti composti da sabbia e ghiaia, progettati per favorire il rapido deflusso dell'acqua e ridurre il rischio di ristagni idrici. Queste soluzioni consentono inoltre di limitare i fenomeni di compattazione del suolo e favorire lo sviluppo dell'apparato radicale delle piante (Beard & Green, 1994).



Figura 2-2: Struttura tipica del tappeto erboso da calcio professionistico (Beard, J.B., Green, R.L. (1994)

2.3 Criticità gestionali del tappeto erboso sportivo

La gestione dei tappeti erbosi sportivi presenta numerose criticità legate sia all'elevata intensità di utilizzo sia alla necessità di mantenere condizioni di gioco ottimali durante tutta la stagione sportiva. L'elevata frequenza di allenamenti e partite comporta infatti un forte stress

meccanico sulla superficie del campo, determinando fenomeni di usura, perdita di copertura vegetale e compattazione del suolo (Puhalla et al., 2010).

Uno dei principali problemi riscontrati nei campi da calcio è rappresentato dalla compattazione del suolo, causata dal continuo calpestio degli atleti e dall'utilizzo di macchinari per la manutenzione. La compattazione riduce la porosità del terreno, limitando la circolazione dell'aria e dell'acqua e ostacolando lo sviluppo radicale delle piante (Carrow & Petrovic, 1992).

Un'altra criticità rilevante riguarda la distribuzione non uniforme dell'usura sulla superficie di gioco. Alcune aree del campo, come le zone di porta o il centrocampo, sono soggette a un utilizzo più intenso e tendono a deteriorarsi più rapidamente rispetto ad altre. Questa eterogeneità spaziale rende più complessa la gestione agronomica del tappeto erboso e richiede interventi localizzati di manutenzione.

Le condizioni del tappeto erboso all'interno di un campo sportivo non risultano infatti uniformi, ma presentano una marcata variabilità spaziale legata a differenze di utilizzo, caratteristiche del suolo e microcondizioni ambientali. L'analisi di tale variabilità rappresenta un elemento fondamentale nell'approccio dell'agricoltura di precisione, poiché consente di individuare aree del campo che richiedono interventi gestionali differenziati.

2.4 Stress biotici e abiotici nei campi sportivi

Il tappeto erboso dei campi sportivi è soggetto a numerose forme di stress che possono compromettere la qualità della superficie di gioco e la salute delle piante. Tali stress vengono generalmente distinti in stress biotici e stress abiotici.

Gli stress biotici sono causati da organismi viventi come patogeni fungini, insetti fitofagi e infestanti. Tra le malattie fungine più comuni nei tappeti erbosi sportivi si possono citare il *dollar spot* e il *brown patch*, che possono provocare ingiallimenti e necrosi localizzate sulla superficie del campo (Smiley et al, 2005).

Gli insetti fitofagi rappresentano un'altra possibile fonte di danno, poiché alcune specie si nutrono delle radici o delle parti aeree delle piante compromettendo la stabilità del tappeto erboso. Anche la presenza di infestanti può ridurre la qualità della superficie di gioco alterando l'uniformità della copertura vegetale.

Gli stress abiotici comprendono invece fattori ambientali quali temperatura, disponibilità idrica, compattazione del suolo e carenze nutrizionali. Periodi prolungati di siccità possono determinare condizioni di stress idrico e riduzione dell'attività fotosintetica, mentre un eccesso di acqua può favorire lo sviluppo di patogeni e ridurre l'ossigenazione delle radici (Bears, 2001).

In questo contesto, il monitoraggio periodico dello stato vegetativo del tappeto erboso assume un ruolo fondamentale. Tecnologie di osservazione basate su telerilevamento permettono infatti di acquisire informazioni in modo rapido e non distruttivo, permettendo di individuare variazioni dello stato fisiologico delle piante anche prima che i sintomi siano visibili a occhio nudo.



Figura 2-3: Esempio di stress biotico e abiotico nel tappeto erboso sportivo (Carrow, R.N., Duncan, R.R., 2012)

2.5 Applicazione dell'agricoltura di precisione nel turfgrass management

Negli ultimi anni l'applicazione dei principi dell'agricoltura di precisione alla gestione dei tappeti erbosi sportivi ha suscitato un crescente interesse. L'obiettivo principale di questo approccio è ottimizzare le pratiche di gestione attraverso l'analisi della variabilità spaziale delle condizioni del tappeto erboso (Mulla, 2013).

L'analisi delle mappe di vigore consente di individuare zone del campo caratterizzate da stress idrico, carenze nutrizionali o danni da calpestio. Sulla base di queste informazioni è possibile applicare interventi di gestione differenziata, ad esempio attraverso irrigazione o fertilizzazione a rateo variabile.

Un contesto in cui l'applicazione delle tecnologie di agricoltura di precisione e telerilevamento risulta particolarmente diffusa è rappresentato dai campi da golf. In questi sistemi il tappeto erboso deve essere mantenuto in condizioni estremamente uniformi e di elevata qualità estetica e funzionale, soprattutto nelle aree di green e fairway. Per questo motivo numerosi studi hanno analizzato l'utilizzo di sensori prossimali e rilievi multispettrali per monitorare lo stato di vigore del tappeto erboso e individuare precocemente situazioni di stress (Stier et al., 2013). Queste piattaforme consentono di ottenere immagini ad altissima risoluzione spaziale e di effettuare rilievi frequenti della superficie di gioco.

Capitolo 3

INDICI DI VEGETAZIONE E MAPPE DI PRESCRIZIONE

3.1 Monitoraggio della vegetazione nel dominio ottico

Il monitoraggio dello stato della vegetazione rappresenta uno degli aspetti fondamentali nell'ambito dell'agricoltura di precisione e della gestione sostenibile dei sistemi colturali. Le tecniche di telerilevamento permettono di osservare la superficie terrestre e di raccogliere informazioni sulle condizioni delle colture senza la necessità di effettuare misurazioni dirette sul campo (Mulla, 2013).

Nel dominio ottico dello spettro elettromagnetico la vegetazione presenta un comportamento spettrale caratteristico. La radiazione solare che colpisce le foglie viene in parte assorbita, in parte riflessa e in parte trasmessa. La clorofilla e gli altri pigmenti fotosintetici assorbono fortemente la radiazione nelle bande del blu e del rosso per alimentare il processo fotosintetico, mentre la struttura interna delle foglie determina una forte riflettanza nella regione del vicino infrarosso (Tucker, 1979).

Questa differenza tra l'assorbimento del rosso e la riflettanza del vicino infrarosso costituisce il principio alla base delle tecniche di analisi della vegetazione tramite telerilevamento. Analizzando la riflettanza della superficie vegetata nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico è infatti possibile ottenere informazioni sullo stato fisiologico delle piante e sul livello di vigore vegetativo (Rouse et al., 1974).

Negli ultimi anni l'introduzione dei droni equipaggiati con sensori multispettrali ha reso possibile acquisire immagini con risoluzioni spaziali molto elevate. Questa tecnologia permette di monitorare in modo dettagliato anche superfici relativamente ridotte come vigneti, frutteti o tappeti erbosi sportivi. L'elevata risoluzione dei dati acquisiti consente di individuare precocemente eventuali condizioni di stress della vegetazione e di intervenire in modo mirato (Radočaj et al., 2023). Nel caso di tappeti erbosi sportivi e dei campi da golf, questo tipo di monitoraggio consente di individuare rapidamente differenze nello stato di crescita del prato dovute a fattori come stress idrico, compattazione del suolo o carenze nutrizionali.

3.2 Indici di vegetazione

Gli indici di vegetazione rappresentano uno degli strumenti più utilizzati per l'analisi delle superfici vegetate tramite dati di telerilevamento. Essi sono parametri matematici ottenuti dalla combinazione di diverse bande spettrali registrate dai sensori multispettrali o iperspettrali (Xue & Su, 2017).

Lo scopo principale degli indici di vegetazione è quello di evidenziare le differenze tra superfici vegetate e non vegetate e di stimare lo stato fisiologico delle piante. Gli indici sfruttano il comportamento spettrale della vegetazione, caratterizzato da un forte assorbimento della radiazione nella banda del rosso e da un'elevata riflettanza nella regione del vicino infrarosso (Tucker, 1979).

Grazie alla loro semplicità di calcolo e alla loro efficacia, gli indici di vegetazione sono ampiamente utilizzati per il monitoraggio delle colture, la stima della biomassa vegetale, la valutazione dello stato nutrizionale delle piante e l'individuazione precoce di condizioni di stress (Mukiibi et al., 2024).

Negli ultimi anni il numero di indici di vegetazione sviluppati è aumentato notevolmente grazie ai progressi nel campo del telerilevamento e alla disponibilità di sensori multispettrali sempre più avanzati. Tuttavia, alcuni indici, come l'NDVI, rimangono tra i più utilizzati per la loro affidabilità e per la facilità di interpretazione.

3.2.1 NDVI

Il NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) è uno degli indici di vegetazione più diffusi e utilizzati nel campo del telerilevamento agricolo. Questo indice è stato introdotto negli anni Settanta per monitorare lo stato della vegetazione utilizzando le bande del rosso e del vicino infrarosso (Rouse et al., 1974).

L'indice viene calcolato attraverso la seguente formula:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

dove NIR rappresenta la riflettanza nella banda del vicino infrarosso e RED rappresenta la riflettanza nella banda del rosso dello spettro visibile.

I valori dell'indice variano generalmente tra -1 e +1. Valori negativi sono associati a superfici come acqua o neve, valori prossimi allo zero indicano suolo nudo o vegetazione molto scarsa, mentre valori positivi elevati indicano una vegetazione sana e vigorosa (Tucker, 1979).

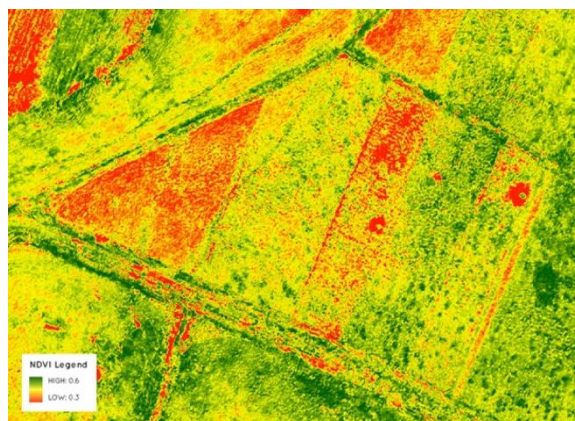


Figura 3-1: Esempio di mappa NDVI ottenuta da immagini multispettrali (Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974)

3.2.2 NDRE e altri indici complementari

Oltre all'NDVI, negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi altri indici di vegetazione progettati per migliorare l'analisi dello stato delle colture.

Tra questi uno dei più utilizzati è il NDRE (Normalized Difference Red Edge Index), che sfrutta la banda spettrale del red edge, situata tra il rosso e il vicino infrarosso dello spettro elettromagnetico (Barnes et al., 2000).

Questo indice risulta particolarmente sensibile al contenuto di clorofilla nelle foglie e può risultare più efficace dell'NDVI nelle fasi avanzate di sviluppo della vegetazione, quando la copertura fogliare è molto elevata.

L'indice NDRE viene calcolato mediante la formula:

$$\text{NDRE} = (\text{NIR} - \text{Rededge}) / (\text{NIR} + \text{Rededge}).$$

Inoltre, l'NDRE è spesso utilizzato per valutare lo stato nutrizionale delle colture e individuare eventuali carenze di azoto, risultando particolarmente utile nella pianificazione di interventi di fertilizzazione a rateo variabile (Mulla, 2013).

Un ulteriore indice utilizzato nel monitoraggio della vegetazione è il GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), derivato dall'utilizzo della banda verde al posto della banda rossa. Questo indice risulta particolarmente utile nella valutazione dell'attività fotosintetica e del contenuto di clorofilla delle piante.

La formula del GNDVI è la seguente:

$$\text{GNDVI} = (\text{NIR} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green})$$

dove Green rappresenta la riflettanza nella banda verde dello spettro visibile.

Rispetto all'NDVI, il GNDVI può risultare maggiormente sensibile a variazioni nella concentrazione di clorofilla e allo stato nutrizionale della vegetazione (Gitelson et al., 1996).

Tra gli indici complementari assume inoltre particolare importanza il SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), sviluppato per ridurre l'influenza del suolo nudo nelle aree caratterizzate da copertura vegetale limitata.

Il SAVI viene espresso dalla seguente formula:

$$\text{SAVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + L) \times (1 + L)$$

dove L rappresenta un fattore di correzione del suolo, generalmente assunto pari a 0,5.

Questo indice risulta particolarmente utile nelle prime fasi di sviluppo delle colture o in superfici caratterizzate da vegetazione rada, condizioni nelle quali il contributo della riflettanza del suolo può influenzare significativamente i valori degli indici tradizionali (Huete, 1988).

L'utilizzo combinato di differenti indici di vegetazione consente quindi di ottenere una valutazione più completa dello stato fisiologico delle piante e della variabilità spaziale del sistema culturale, migliorando le possibilità di interpretazione dei dati acquisiti mediante telerilevamento multispettrale.

3.3 Interpretazione agronomica dei valori NDVI

L'interpretazione dei valori NDVI rappresenta un passaggio fondamentale per trasformare le informazioni derivanti dal telerilevamento in indicazioni utili per la gestione agronomica.

In generale valori elevati di NDVI indicano una vegetazione caratterizzata da elevata attività fotosintetica e da un buon stato di vigore. Valori intermedi possono indicare vegetazione con sviluppo moderato, mentre valori bassi sono spesso associati a condizioni di stress vegetativo o a scarsa copertura fogliare (Mulla, 2013).

Tabella 3-1: Interpretazione valori NDVI

Valori NDVI	Interpretazione
< 0	Superfici non vegetate
0 – 0,2	Suolo nudo o vegetazione molto scarsa
0,2 – 0,4	Vegetazione rada
0,4 – 0,6	Vegetazione moderatamente sviluppata
> 0,6	Vegetazione densa e vigorosa

Nel contesto dell'agricoltura di precisione, l'analisi delle mappe NDVI consente di individuare zone del campo che presentano condizioni diverse rispetto alla media della

superficie. Queste differenze possono essere causate da vari fattori, tra cui la variabilità del suolo, disponibilità idrica, fertilità del terreno o presenza di patogeni.

3.4 Limiti e criticità degli indici di vegetazione

Nonostante i numerosi vantaggi offerti dagli indici di vegetazione, il loro utilizzo presenta alcune limitazioni.

Uno dei principali limiti dell'NDVI riguarda il fenomeno della saturazione dell'indice in presenza di vegetazione molto densa. In queste condizioni l'indice tende a raggiungere valori elevati che non aumentano significativamente anche se la biomassa continua a crescere (Mulla, 2013).

Un'altra criticità riguarda l'influenza del suolo nudo, che può alterare i valori dell'indice soprattutto nelle fasi iniziali di sviluppo delle colture.

Inoltre, fattori come condizioni atmosferiche, presenza di ombre, angolo di acquisizione delle immagini e variazioni di illuminazione possono influenzare i valori registrati dai sensori.

Per questo motivo l'interpretazione dei dati derivanti dagli indici di vegetazione deve essere sempre accompagnata da una corretta conoscenza delle condizioni agronomiche e ambientali dell'area di studio.

3.5 Mappe di prescrizione

Le mappe di prescrizione rappresentano uno degli strumenti più avanzati dell'agricoltura di precisione. Esse consentono di applicare interventi agronomici differenziati all'interno di uno stesso campo in base alle specifiche condizioni delle diverse zone (Mulla, 2013).

Queste mappe vengono generate a partire dall'analisi di dati spaziali come immagini multispettrali, mappe di resa o informazioni pedologiche.

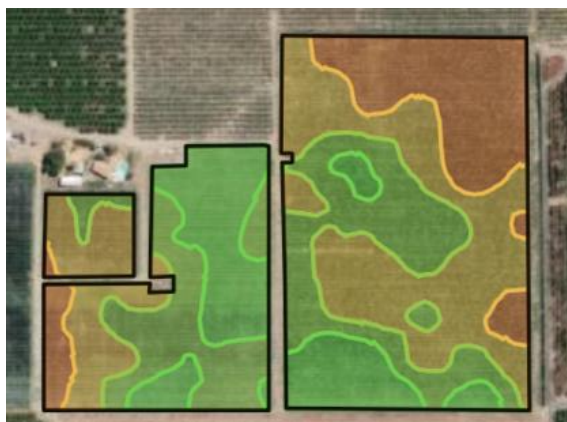


Figura 3-2: Esempio di mappa di prescrizione utilizzata per applicare fertilizzanti o acqua a rateo variabile in funzione della variabilità spaziale della coltura (Mulla, 2013).

3.5.1 *Definizione e principi*

Una mappa di prescrizione è una rappresentazione cartografica che indica come variare l'intensità di un determinato intervento agronomico all'interno di un campo agricolo (Mulla, 2013).

L'obiettivo principale è quello di adattare la gestione agronomica alla variabilità spaziale delle colture e del suolo, applicando input come fertilizzanti, acqua o fitofarmaci solo dove necessario.

Questo approccio consente di migliorare l'efficienza nell'utilizzo delle risorse e ridurre gli impatti ambientali ed economici, mantenendo al tempo stesso elevati livelli produttivi.

3.5.2 *Applicazione a concimazione e irrigazione di precisione*

Nel caso della concimazione di precisione, le mappe di prescrizione permettono di applicare quantità differenti di fertilizzante nelle diverse zone del campo in funzione dello stato nutrizionale delle colture.

Allo stesso modo, nell'irrigazione di precisione le informazioni provenienti dagli indici di vegetazione possono essere utilizzate per individuare aree soggette a stress idrico e pianificare interventi irrigui mirati (Radočaj et al., 2023).

Nel caso dei tappeti erbosi sportivi, questo approccio può essere utilizzato per migliorare la gestione dell'irrigazione e della fertilizzazione, mantenendo una crescita uniforme del prato e riducendo il consumo di acqua e fertilizzanti.

L'integrazione tra dati provenienti dal telerilevamento, sistemi informativi geografici (GIS) e macchine agricole a rateo variabile rappresenta quindi una delle principali evoluzioni nella gestione sostenibile dei sistemi agricoli e dei tappeti erbosi sportivi.

Capitolo 4

MATERIALI E METODI

4.1 Area di studio

L'area di studio oggetto della presente ricerca è situata nel comune di Offida, in provincia di Ascoli Piceno, nella regione Marche. Il territorio si inserisce nel contesto collinare dell'Italia centrale ed è caratterizzato da un paesaggio prevalentemente agricolo, con una forte presenza di coltivazioni e aree rurali che si alternano a piccoli centri abitati.

Dal punto di vista geografico, l'area presenta un'orografia dolce, con altitudini moderate e pendenze contenute, fattori che favoriscono sia l'attività agricola sia la realizzazione di infrastrutture sportive. Il contesto territoriale risulta quindi particolarmente idoneo allo sviluppo di superfici vegetate gestite, come nel caso dei tappeti erbosi sportivi.

Sotto il profilo climatico, la zona è caratterizzata da un clima temperato di tipo mediterraneo, con estati calde e tendenzialmente secche e inverni miti e moderatamente piovosi. Le precipitazioni risultano generalmente distribuite nei mesi autunnali e primaverili, mentre nel periodo estivo si possono verificare condizioni di deficit idrico che possono influenzare negativamente lo stato della vegetazione, in assenza di adeguati interventi irrigui. Le temperature medie annue si mantengono su valori moderati, con escursioni stagionali che possono incidere sul ciclo vegetativo delle specie erbacee utilizzate nei tappeti erbosi sportivi.

Il sito di interesse è rappresentato dallo stadio comunale "Alessio Piccioni", localizzato approssimativamente alle coordinate geografiche 42°93' N di latitudine e 13°70' E di longitudine, ad un'altitudine di circa 290 m s.l.m. La struttura sportiva è situata in un contesto urbano-periferico ed è destinata principalmente allo svolgimento di attività calcistiche. L'impianto è inserito in un'area facilmente accessibile e circondata da spazi aperti e infrastrutture sportive, configurandosi come un punto di riferimento per le attività sportive locali.

Negli anni precedenti, il campo è stato caratterizzato da un utilizzo particolarmente intensivo, essendo impiegato non solo per le partite ufficiali della prima squadra, ma anche per allenamenti e attività agonistiche delle categorie giovanili e amatoriali. Tale utilizzo

comportava una pressione significativa sul tappeto erboso, con più cicli di utilizzo giornalieri distribuiti nell'arco della settimana, determinando condizioni di stress elevato per la vegetazione.

A partire dalla stagione più recente, la gestione dell'impianto ha subito una modifica rilevante a seguito della realizzazione di un campo sintetico adiacente, destinato principalmente alle attività di allenamento. Questo cambiamento ha comportato una riduzione del carico di utilizzo sul campo in erba naturale, che viene attualmente impiegato prevalentemente per le partite ufficiali della prima squadra.

Il contesto descritto rappresenta un caso di studio particolarmente significativo per l'applicazione di tecniche di monitoraggio basate sul telerilevamento, in quanto consente di analizzare lo stato del tappeto erboso in relazione a differenti condizioni di utilizzo e gestione, evidenziando eventuali criticità e potenzialità di intervento nell'ottica di una gestione più efficiente e sostenibile.



Figura 4-1: Inquadramento dell'area di studio nel comune di Offida (AP) con evidenziazione dello stadio comunale "Alessio Piccioni" (Google Maps, 2026).

4.2 Descrizione del campo da calcio oggetto di studio

Il campo oggetto del presente studio è situato presso lo stadio comunale "Alessio Piccioni" di Offida ed è costituito da una superficie in erba naturale destinata all'attività calcistica agonistica. Il terreno di gioco presenta dimensioni approssimative pari a circa 105×60 m, per una superficie complessiva prossima ai 6500 m^2 , in linea con quanto riportato nella documentazione tecnica relativa agli interventi manutentivi effettuati sull'impianto.

Dal punto di vista agronomico, il tappeto erboso è costituito prevalentemente da specie microterme appartenenti alla famiglia delle *Poaceae*, con presenza di graminacee sottoposte periodicamente a interventi di trasemina di Loietto (*Lolium perenne*). Questa specie risulta particolarmente diffusa nei tappeti erbosi sportivi grazie alla rapidità di germinazione, alla buona densità vegetativa e alla capacità di tollerare condizioni di intenso calpestio.

La superficie di gioco è soggetta a regolari operazioni manutentive finalizzate al mantenimento delle caratteristiche funzionali e qualitative del prato sportivo. Le principali pratiche agronomiche comprendono sfalcio periodico, irrigazione, fertilizzazione e interventi di rigenerazione della cotica erbosa, indispensabili per garantire uniformità vegetativa e adeguate condizioni di gioco.

Nel corso dell'ultimo anno il campo è stato interessato da un importante programma di manutenzione straordinaria finalizzato al recupero agronomico della superficie. Secondo la documentazione tecnica disponibile, nel periodo primaverile sono stati effettuati interventi di arieggiatura mediante rete Keiston e trattamenti di concimazione specifica per favorire il rinverdimento e il risveglio vegetativo del tappeto erboso.

Successivamente sono state eseguite operazioni di scarificazione del prato con attrezzature professionali dotate di sistemi di raccolta del materiale vegetale secco, accompagnate da ulteriori interventi di fertilizzazione. Tali lavorazioni risultano fondamentali per ridurre la presenza di feltro superficiale e migliorare gli scambi gassosi e idrici del terreno.

Gli interventi più rilevanti sono stati realizzati nel mese di settembre, con operazioni di decompattazione profonda del suolo mediante tecnologia Verti-Drain, effettuata fino a circa 20 cm di profondità senza alterare la superficie di gioco. Contestualmente sono state effettuate lavorazioni di sabbiatura con materiale specifico tipo ECO-SOIL e successivo rilivellamento del terreno, con l'obiettivo di migliorare drenaggio, struttura del substrato e uniformità della superficie.

La fase finale della manutenzione ha previsto una risemina totale pre-autunnale effettuata mediante seminatrice professionale in grado di incidere microsolchi nel terreno per favorire il corretto insediamento del seme. La trasemina è stata eseguita con miscugli di loietto distribuiti alla dose di circa 25–30 g m⁻².

Le lavorazioni effettuate hanno consentito un significativo miglioramento delle condizioni vegetative e strutturali del tappeto erboso, creando condizioni particolarmente adatte all'applicazione di tecniche di monitoraggio basate su UAV e sensori prossimali per la valutazione dello stato del prato sportivo.



Figura 4-2: Superficie di gioco del campo sportivo comunale "Alessio Piccioni" durante il periodo di svolgimento dei rilievi sperimentali (Elaborazione propria)

4.3 Strumentazione utilizzata

4.3.1 UAV

Le attività di rilievo svolte nel presente studio sono state effettuate mediante l'impiego di piattaforme UAV della serie DJI Mavic 3 Enterprise, progettate per applicazioni professionali nel settore del telerilevamento, del monitoraggio territoriale e dell'agricoltura di precisione. In particolare, sono stati utilizzati i modelli DJI Mavic 3T e DJI Mavic 3M, entrambi caratterizzati da elevata portabilità, precisione operativa e integrazione di sensori avanzati.

Il drone DJI Mavic 3M è stato impiegato per le acquisizioni multispettrali finalizzate al monitoraggio dello stato vegetativo del tappeto erboso. Tale piattaforma integra, infatti, una camera RGB e un sensore multispettrale utilizzati per il calcolo di indici vegetazionali.

Per le acquisizioni termiche è stato invece utilizzato il drone DJI Mavic 3T, equipaggiato con camera termica radiometrica e sensore RGB ad alta risoluzione.



Figura 4-3: UAV DJI Mavic 3T utilizzato durante le attività di rilievo del campo oggetto di studio. (Elaborazione propria)

Entrambe le piattaforme UAV utilizzate presentano sistemi di navigazione satellitare integrati e funzionalità di volo automatico programmabile, caratteristiche fondamentali per garantire acquisizioni ripetibili e georeferenziate. La possibilità di pianificare missioni automatiche con parametri di volo costanti consente infatti di migliorare la confrontabilità temporale dei dati acquisiti durante differenti campagne di rilievo.

4.3.2 *Sensori*

Il drone DJI Mavic 3M utilizzato nelle attività sperimentali è equipaggiato con un sistema di acquisizione multispettrale progettato per applicazioni di agricoltura di precisione e monitoraggio della vegetazione. Il sensore integra una camera RGB da 20 MP e quattro camere multispettrali da 5 MP dedicate all'acquisizione delle principali bande spettrali utilizzate nell'analisi dello stato vegetativo delle colture (DJI, 2024).

Le camere multispettrali acquisiscono simultaneamente differenti porzioni dello spettro elettromagnetico, consentendo di ottenere informazioni relative alle condizioni fisiologiche della vegetazione e alla risposta spettrale del tappeto erboso. Le bande acquisite dal sensore comprendono:

Green (G) – 560 nm

Red (R) – 650 nm

Red Edge (RE) – 730 nm

Near Infrared (NIR) – 860 nm

Ciascuna banda risulta associata a specifiche proprietà della vegetazione. La banda verde è correlata alla riflettanza della copertura vegetale, mentre la banda rossa è fortemente influenzata dall'assorbimento della clorofilla durante i processi fotosintetici. La banda Red Edge rappresenta una regione spettrale particolarmente sensibile alle variazioni fisiologiche e al contenuto di clorofilla delle piante, risultando utile nell'individuazione precoce di

condizioni di stress vegetativo. La banda NIR, infine, è strettamente legata alla struttura interna delle foglie e al vigore vegetativo del tappeto erboso (Mulla, 2013).



Figura 4-4: Caratteristiche del sensore montato sul drone DJI Mavic 3M (DJI,2026)

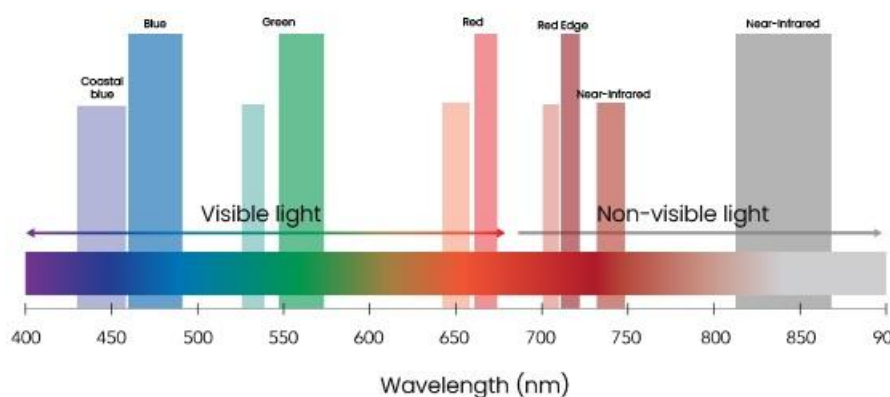


Figura 4-5: Bande multispettrali dei sensori utilizzati per i rilievi (Aemmesurving, 2016)

Per l'acquisizione dei dati termici è stato invece utilizzato il drone DJI Mavic 3T, equipaggiato con una termocamera integrata in grado di rilevare la radiazione infrarossa emessa dalle superfici. I sensori termici permettono di misurare la temperatura superficiale del tappeto erboso e di evidenziare eventuali anomalie termiche riconducibili a condizioni di stress idrico, differenze di umidità o problemi vegetativi (DJI, 2024).

Nel monitoraggio dei tappeti erbosi sportivi, l'analisi termica rappresenta uno strumento particolarmente utile per individuare aree soggette a deficit idrico o condizioni di stress fisiologico non immediatamente visibili mediante semplice osservazione visiva. Le immagini termiche consentono infatti di evidenziare variazioni spaziali di temperatura che possono essere correlate alle condizioni del cotico erboso e alla distribuzione dell'umidità nel suolo.

Entrambi i droni utilizzati risultano inoltre equipaggiati con sistemi RTK (Real Time Kinematic), che consentono il posizionamento centimetrico delle immagini acquisite e migliorano significativamente la precisione geometrica dei prodotti fotogrammetrici finali.

Tale caratteristica risulta particolarmente importante nelle applicazioni di agricoltura di precisione e nella sovrapposizione dei dati multispettrali, termici e georeferenziati acquisiti durante le attività sperimentali (DJI, 2024).

Per il funzionamento del sistema RTK è stato utilizzato un servizio di correzione satellitare basato su reti nazionali a pagamento, nello specifico la rete Hexagon SmartNet, caratterizzata da copertura estesa sull'intero territorio italiano. Tale sistema consente di ricevere correzioni differenziali in tempo reale migliorando significativamente la precisione del posizionamento durante le operazioni di volo e acquisizione dati. Le credenziali di accesso alla rete sono state configurate all'interno dell'applicazione di volo DJI Pilot 2, utilizzata per la gestione delle missioni automatiche UAV.

Il corretto funzionamento del servizio RTK richiede inoltre una connessione dati attiva per la ricezione delle correzioni satellitari. Nel caso specifico, durante le attività sperimentali la connessione è stata garantita mediante rete dati mobile con copertura 5G fornita dal dispositivo mobile utilizzato per il controllo del drone. Tale configurazione ha consentito di mantenere stabile la connessione alla rete RTK durante le operazioni di rilievo, assicurando elevata accuratezza geometrica dei dati acquisiti.

4.3.3 SPAD – 502 plus

Tra la strumentazione impiegata nel presente studio è stato utilizzato il misuratore portatile di clorofilla SPAD-502 Plus (Konica Minolta), strumento largamente diffuso nelle applicazioni agronomiche per la valutazione rapida e non distruttiva dello stato nutrizionale e fisiologico delle piante. Il dispositivo consente infatti di stimare indirettamente il contenuto relativo di clorofilla fogliare, parametro strettamente correlato all'attività fotosintetica e, in molti casi, allo stato nutrizionale azotato della coltura (Markwell et al., 1995).

Il modello SPAD-502 Plus opera mediante la trasmissione di luce a due differenti lunghezze d'onda, generalmente nel rosso e nel vicino infrarosso, attraverso il tessuto fogliare. Il diverso assorbimento della radiazione luminosa da parte della clorofilla viene convertito in un indice numerico adimensionale denominato valore SPAD, proporzionale al contenuto relativo di pigmenti presenti nella foglia (Konica Minolta, 2025). Tale metodologia consente misurazioni rapide senza danneggiare il campione vegetale e senza necessità di analisi di laboratorio.

Nel presente lavoro, il misuratore SPAD è stato utilizzato come supporto alle indagini da remoto, al fine di integrare le informazioni ottenute dai rilievi UAV con misure dirette sullo stato fisiologico del tappeto erboso. Il confronto tra dati prossimali e dati telerilevati consente

infatti di rafforzare l'interpretazione agronomica degli indici di vegetazione e delle mappe ottenute mediante sensori multispettrali.



Figura 4-6: Misuratore di clorofilla SPAD-502 Plus utilizzato durante le attività di monitoraggio presso il campo oggetto di studio. (Elaborazione propria)

4.3.4 Ricevitore GNSS-RTK

Tra la strumentazione di supporto impiegata nel presente studio è stato utilizzato un ricevitore satellitare GNSS RTK Topcon HiPer HR, strumento professionale ad elevata precisione impiegato per il rilievo dei punti di controllo a terra e per la georeferenziazione delle acquisizioni effettuate mediante UAV. L'impiego di sistemi GNSS ad accuratezza centimetrica risulta infatti fondamentale nelle applicazioni di telerilevamento di precisione, in quanto consente di migliorare l'affidabilità geometrica dei prodotti cartografici ottenuti e la corretta localizzazione spaziale dei dati acquisiti (Colomina & Molina, 2014).

Il modello Topcon HiPer HR è un ricevitore multifrequenza e multicostellazione progettato per operare con i principali sistemi satellitari globali, tra cui GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS e SBAS, garantendo elevata disponibilità di segnali e continuità operativa anche in condizioni ambientali non ottimali (Topcon Positioning Systems, 2025). Tale caratteristica consente una maggiore affidabilità del posizionamento e tempi ridotti di inizializzazione della soluzione RTK.

Nel presente lavoro il ricevitore GNSS è stato impiegato per il rilievo georeferenziato dei punti acquisiti manualmente mediante strumento SPAD. L'obiettivo principale è stato quello di associare con elevata precisione spaziale le misurazioni puntuali relative al contenuto di clorofilla del tappeto erboso ai raster multispettrali e termici ottenuti dai rilievi UAV.

L'integrazione tra dati puntuali georeferenziati e prodotti raster ha consentito di sviluppare successive analisi spaziali all'interno dell'ambiente GIS, permettendo il confronto tra valori SPAD, indici di vegetazione e informazioni termiche acquisite durante le attività sperimentali.



Figura 4-7: Ricevitore GNSS RTK Topcon HiPer HR utilizzato durante le operazioni di rilievo presso il campo oggetto di studio. (Elaborazione propria)

4.3.5 Software di elaborazione

Nel presente studio sono stati impiegati differenti software specialistici, utilizzati in maniera integrata nelle diverse fasi del workflow operativo, dalla gestione dei dati fotogrammetrici fino all'analisi spaziale e alla georeferenziazione delle misurazioni effettuate in campo.

Per l'elaborazione fotogrammetrica delle immagini acquisite mediante UAV è stato utilizzato il software Agisoft Metashape, una delle piattaforme maggiormente diffuse nell'ambito della fotogrammetria digitale e del remote sensing da drone. Il software consente di elaborare immagini RGB, multispettrali e termiche attraverso procedure automatizzate di ricostruzione tridimensionale basate sulla tecnica Structure from Motion (SfM), permettendo la generazione di nuvole di punti dense, modelli digitali della superficie e ortofoto georeferenziate ad alta risoluzione (Agisoft LLC, 2025).

Nel presente lavoro Metashape è stato utilizzato per il processamento delle immagini ottenute durante i voli UAV effettuati sul campo sportivo oggetto di studio. Dopo l'importazione delle immagini, il software ha permesso l'allineamento automatico dei fotogrammi e la successiva ricostruzione della geometria della superficie rilevata. Le elaborazioni hanno portato alla produzione di ortomosaici multispettrali, termici e RGB, successivamente utilizzati per l'analisi dello stato vegetativo del tappeto erboso.

Una volta completata l'elaborazione fotogrammetrica, i dati raster ottenuti sono stati esportati e successivamente analizzati all'interno del software GIS open source QGIS, ampiamente utilizzato per la gestione e l'analisi di dati territoriali georeferenziati. Il software ha consentito di integrare differenti livelli informativi, tra cui ortofoto multispettrali, mappe termiche e dati acquisiti direttamente in campo. Attraverso gli strumenti GIS è stato possibile effettuare analisi spaziali, confrontare i diversi layer informativi e produrre cartografie tematiche finalizzate all'interpretazione agronomica dei risultati.

All'interno di QGIS sono stati inoltre importati i dati puntuali derivanti dalle misurazioni effettuate mediante strumentazione SPAD e georeferenziate tramite ricevitore GNSS RTK. Per la gestione e l'organizzazione dei dati topografici è stato inoltre utilizzato il software Meridiana, impiegato principalmente per l'elaborazione dei dati provenienti dal ricevitore GNSS RTK. Attraverso tale software è stato possibile associare alle coordinate geografiche rilevate in campo i corrispondenti valori SPAD, creando dataset georeferenzati successivamente esportati in formato compatibile GIS. Questa fase ha rappresentato un passaggio fondamentale per l'integrazione tra misure di campo e dati derivanti dalle elaborazioni UAV. Pianificazione ed esecuzione voli

4.4 Pianificazione ed esecuzione voli

Nel presente studio, i voli sono stati programmati con l'obiettivo di monitorare il tappeto erboso del campo comunale "Alessio Piccioni" di Offida in due differenti momenti temporali, corrispondenti alla fase pre-evento e post-evento sportivo. In particolare, le acquisizioni sono state effettuate nelle date del 17/04/2026 e del 23/04/2026, così da consentire il confronto tra lo stato del manto erboso prima e dopo l'utilizzo agonistico del terreno di gioco.

La pianificazione delle missioni è stata realizzata mediante software dedicati, attraverso la predisposizione di specifici piani di volo automatici per ciascuna piattaforma utilizzata. I percorsi sono stati impostati con schema regolare a griglia, al fine di garantire una copertura completa dell'area di studio e un adeguato livello di sovrapposizione longitudinale e

trasversale tra le immagini acquisite. Tale configurazione risulta necessaria per la corretta generazione degli ortomosaici e dei prodotti cartografici derivanti (Turner et al., 2016).

I parametri di volo, quali quota operativa, velocità di avanzamento, distanza tra le traiettorie e percentuale di overlap, sono stati definiti in funzione delle caratteristiche tecniche dei sensori installati sui droni. In particolare, le differenti configurazioni ottiche e geometriche delle camere RGB, termiche e multispettrali hanno richiesto impostazioni specifiche per ciascun rilievo. Sensori con diversa lunghezza focale, campo visivo, risoluzione spaziale e tempo di acquisizione comportano infatti differenti esigenze operative, influenzando direttamente la quota di volo e la densità delle immagini necessarie.

Nel caso del sensore multispettrale, l'esigenza principale è stata quella di ottenere un'elevata accuratezza radiometrica e una risoluzione spaziale adeguata all'analisi della variabilità del tappeto erboso. Per il sensore termico, invece, particolare attenzione è stata posta alla stabilità delle condizioni ambientali e all'altezza di volo, al fine di garantire una corretta lettura delle differenze superficiali di temperatura. Le acquisizioni RGB sono state utilizzate come supporto visivo e geometrico per l'interpretazione generale dello stato della superficie.

Le operazioni di volo sono state eseguite in condizioni meteorologiche favorevoli, con assenza di precipitazioni e ventilazione contenuta, così da limitare possibili interferenze sulla qualità delle immagini e sulla stabilità della piattaforma. Prima di ciascuna missione sono stati effettuati i controlli preliminari relativi allo stato del mezzo, alla carica delle batterie, al corretto funzionamento dei sensori e alla sicurezza dell'area operativa.

I piani di volo adottati per i due rilievi sono riportati nelle figure seguenti, nelle quali sono evidenziate le traiettorie automatiche seguite dalle piattaforme UAV durante le acquisizioni.

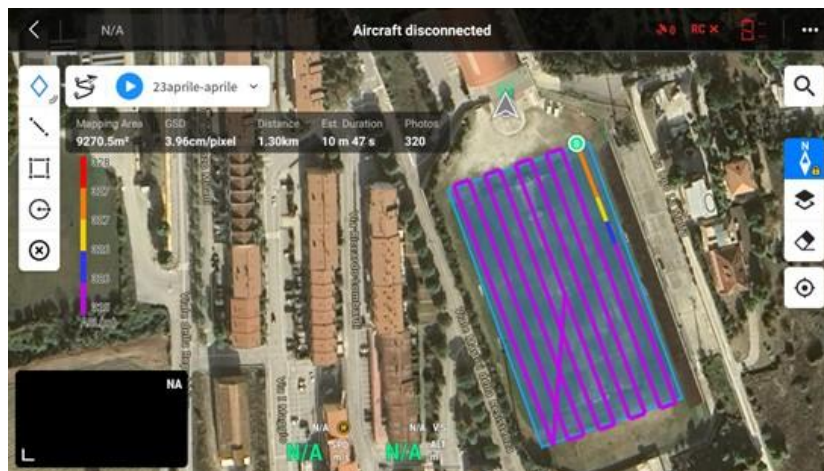


Figura 4-8: Piano di volo DJI MAVIC 3T

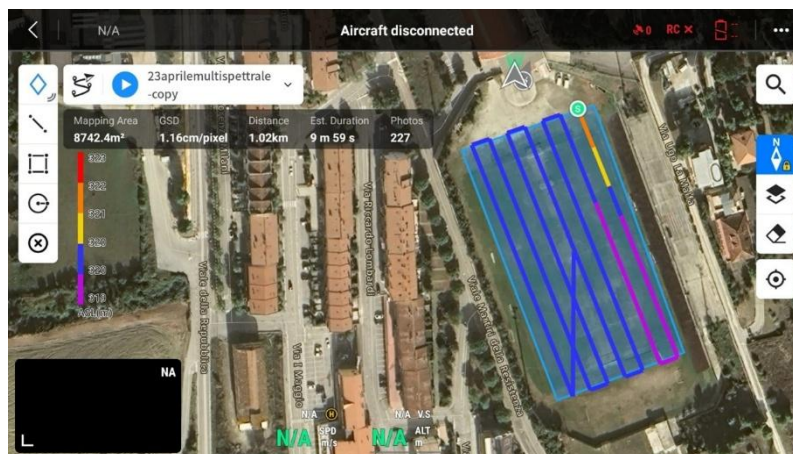


Figura 4-9: Piano di volo DJI MAVIC 3M

4.5 Elaborazione delle immagini

4.5.1 Generazione ortomosaico

L'elaborazione dei dati acquisiti durante le missioni UAV è stata eseguita mediante il software Agisoft Metashape Professional, utilizzato per la ricostruzione fotogrammetrica delle immagini multispettrali e termiche e per la successiva generazione degli ortomosaici.

Le immagini acquisite dai sensori UAV risultano inizialmente dati grezzi sia dal punto di vista geometrico sia radiometrico; pertanto, è necessario sottoporle a specifiche procedure di elaborazione fotogrammetrica (Mussi, 2020). Il workflow adottato si basa sugli algoritmi

Structure from Motion (SfM), che consentono di ricostruire la geometria tridimensionale dell'area rilevata a partire da sequenze di immagini bidimensionali sovrapposte.

La prima fase del processo ha riguardato l'importazione delle immagini all'interno del progetto Metashape e il successivo allineamento automatico delle fotografie. Durante questa operazione il software individua punti omologhi presenti in immagini differenti, sfruttando contemporaneamente le informazioni di posizione registrate dal sistema GNSS/RTK integrato nei droni. L'allineamento costituisce una fase fondamentale poiché consente di definire l'orientamento delle camere e di generare la cosiddetta nuvola di punti sparsa, rappresentativa della geometria preliminare dell'area di studio (Agisoft, 2024).

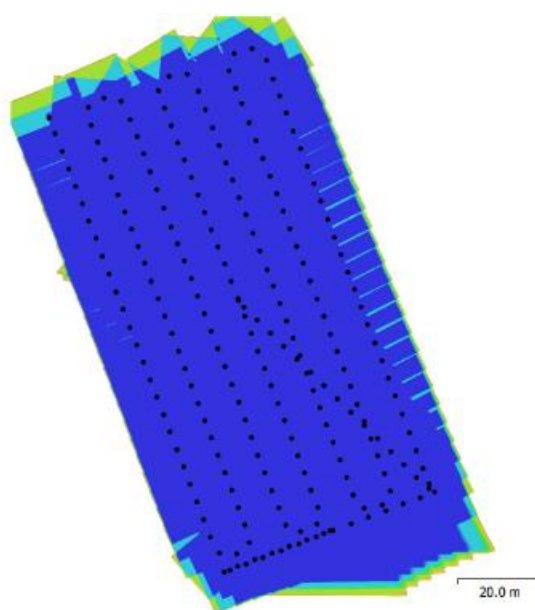


Figura 4-10: Posizionamento delle camere e sovrapposizione delle immagini utilizzati nel processo di allineamento fotogrammetrico mediante Agisoft Metashape (Elaborazione da report Agisoft Metashape)

Successivamente è stata effettuata l'ottimizzazione dell'allineamento, finalizzata alla riduzione degli errori di riproiezione e al miglioramento dell'accuratezza geometrica complessiva del modello fotogrammetrico. Una volta completata tale fase, il software ha consentito la generazione del modello digitale di elevazione (DEM) e dei relativi ortomosaici multispettrali e termici georeferenziati.

Per i rilievi multispettrali eseguiti in data 17 aprile 2026 sono state elaborate 896 immagini, tutte correttamente allineate dal software. Il processo di elaborazione ha prodotto un ortomosaico con risoluzione spaziale pari a 7.12 mm/pixel e un DEM con risoluzione di 4.39

cm/pixel. L'errore medio totale associato alla localizzazione delle camere è risultato pari a 8.24 cm, valore ritenuto adeguato rispetto alla scala del rilievo effettuato pari a 1:1000.

Tabella 4-1: Errore medio di localizzazione delle camere relativo al rilievo multispettrale del 17/04/2026.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
6.25885	4.99329	1.94653	8.00663	8.23985

Nel caso dei rilievi termici effettuati nella medesima giornata, il dataset elaborato comprendeva 864 immagini termiche georeferenziate. L'ortomosaico termico ottenuto presenta una risoluzione pari a 2.67 cm/pixel, mentre il DEM associato ha mostrato una risoluzione di 11.9 cm/pixel. L'errore medio totale di localizzazione delle camere è risultato pari a 9.08 cm.

Tabella 4-2: Errore medio di localizzazione delle camere relativo al rilievo termico del 17/04/2026.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
3.41763	6.20864	5.67189	7.08713	9.07732

Le medesime procedure di elaborazione sono state successivamente applicate anche ai voli effettuati in data 23 aprile 2026, sia per il rilievo multispettrale sia per quello termico, al fine di ottenere prodotti cartografici confrontabili tra fase pre-partita e post-partita.

Tabella 4-3: Errore medio di localizzazione delle camere relativo al rilievo multispettrale del 23/04/2026.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
3.55305	6.61725	2.45388	7.5108	7.9015

Tabella 4-4: Errore medio di localizzazione delle camere relativo al rilievo termico del 23/04/2026.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
0.575658	1.57271	4.38542	1.67475	4.69433

Gli ortomosaici generati rappresentano il principale prodotto fotogrammetrico utilizzato nelle successive fasi di analisi GIS e calcolo degli indici di vegetazione. Grazie alla loro elevata risoluzione spaziale e precisione geometrica, tali prodotti hanno consentito di

analizzare in dettaglio la variabilità spaziale del tappeto erboso e di confrontare le informazioni multispettrali, termiche e puntuali raccolte mediante sensore SPAD.

4.5.2 Calcolo degli indici di vegetazione

A partire dagli ortomosaici multispettrali ottenuti mediante elaborazione fotogrammetrica in Agisoft Metashape, è stato successivamente calcolato l'indice di vegetazione NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ampiamente utilizzato nel monitoraggio dello stato fisiologico della vegetazione e nelle applicazioni di agricoltura di precisione.

Il calcolo dell'NDVI è stato eseguito direttamente all'interno del software Agisoft Metashape sfruttando le bande multispettrali acquisite dal drone DJI Mavic 3M.

Una volta generati i raster NDVI in ambiente Metashape, questi sono stati esportati e successivamente importati nel software QGIS per le operazioni di visualizzazione, analisi spaziale e tematizzazione cartografica. All'interno dell'ambiente GIS è stata effettuata la personalizzazione della scala cromatica dei raster, associando differenti colorazioni ai diversi intervalli di valori NDVI al fine di facilitare l'interpretazione visiva dello stato del tappeto erboso.

L'utilizzo di scale cromatiche tematizzate ha consentito di evidenziare eventuali differenze spaziali nella vigoria vegetativa del campo da calcio, permettendo l'individuazione di aree caratterizzate da maggiore o minore attività vegetativa. Tale procedura rappresenta uno strumento particolarmente utile nell'ambito del monitoraggio dei tappeti erbosi sportivi, poiché consente di individuare rapidamente eventuali criticità e supportare la pianificazione degli interventi manutentivi.

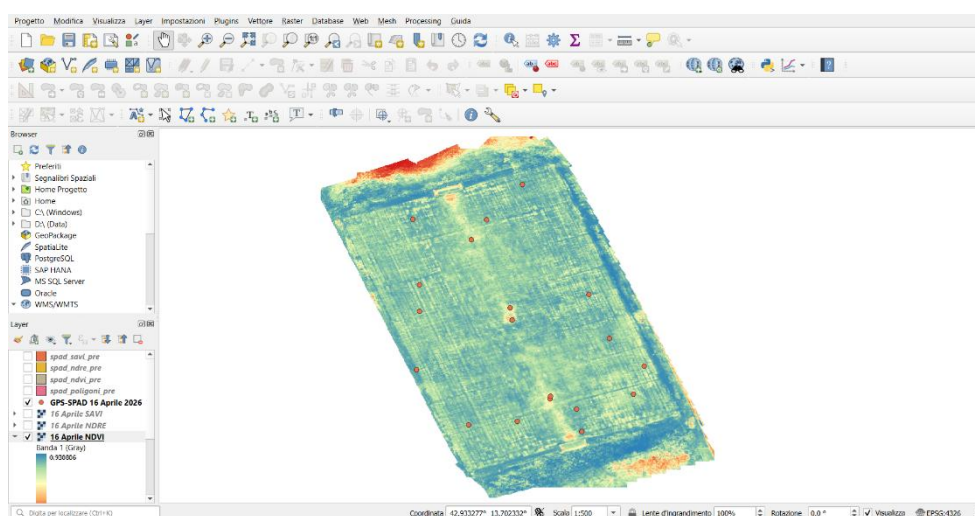


Figura 4-11: Visualizzazione e tematizzazione del raster NDVI del tappeto erboso mediante software QGIS. (Elaborazione propria)

Capitolo 5

RISULTATI

5.1 Analisi spaziale dell'NDVI

L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) è stato utilizzato per valutare lo stato vegetativo del tappeto erboso e la sua variabilità spaziale nelle due date di rilievo, effettuate rispettivamente prima e dopo l'evento sportivo. Le mappe ottenute consentono di evidenziare le differenze di vigore vegetativo all'interno della superficie di gioco attraverso una rappresentazione cromatica in cui i valori più bassi sono associati alle tonalità rosse e arancioni, mentre i valori più elevati corrispondono alle tonalità verdi e blu.

L'analisi della mappa acquisita nella fase pre-partita (Figura 5.1) evidenzia una distribuzione relativamente uniforme dell'indice sull'intera superficie di gioco. La maggior parte del campo presenta valori riconducibili alle classi intermedie e medio-alte, indicando uno stato vegetativo complessivamente buono del tappeto erboso. Le fasce laterali mostrano una buona omogeneità, mentre lungo la fascia centrale del terreno di gioco si osservano alcune aree caratterizzate da valori leggermente inferiori. Analogamente, in corrispondenza del cerchio di centrocampo e delle aree delle porte sono presenti limitate porzioni con valori ridotti dell'indice, probabilmente associate alle zone maggiormente soggette a calpestio e usura.

La mappa ottenuta nella fase post-partita (Figura 5.2) mostra una distribuzione spaziale generalmente analoga a quella osservata nel rilievo precedente, confermando il buono stato vegetativo complessivo del tappeto erboso. Si osserva tuttavia una maggiore estensione delle classi caratterizzate da valori elevati dell'indice, rappresentate dalle tonalità verdi e blu, distribuite in maniera abbastanza uniforme lungo gran parte della superficie di gioco. Le fasce laterali mantengono condizioni omogenee, mentre le aree di rigore, le zone di porta e la fascia centrale continuano a rappresentare le aree caratterizzate dalla maggiore variabilità spaziale. In particolare, in prossimità del centrocampo e delle aree immediatamente antistanti le porte persistono alcune zone con valori inferiori rispetto alle aree circostanti.

Il confronto tra i due rilievi evidenzia differenze contenute e una sostanziale stabilità delle condizioni vegetative del campo. Le variazioni osservate risultano localizzate principalmente nelle aree maggiormente interessate dall'attività di gioco, quali il centrocampo, le aree di

rigore e le zone di porta, mentre le fasce laterali e le aree prossime ai calci d'angolo mostrano una distribuzione dei valori pressoché invariata. Nel complesso, l'analisi dell'NDVI indica che il tappeto erboso mantiene un livello di vigore vegetativo elevato e sufficientemente uniforme in entrambe le date di monitoraggio, evidenziando soltanto lievi differenze spaziali riconducibili alle diverse condizioni di utilizzo della superficie sportiva.

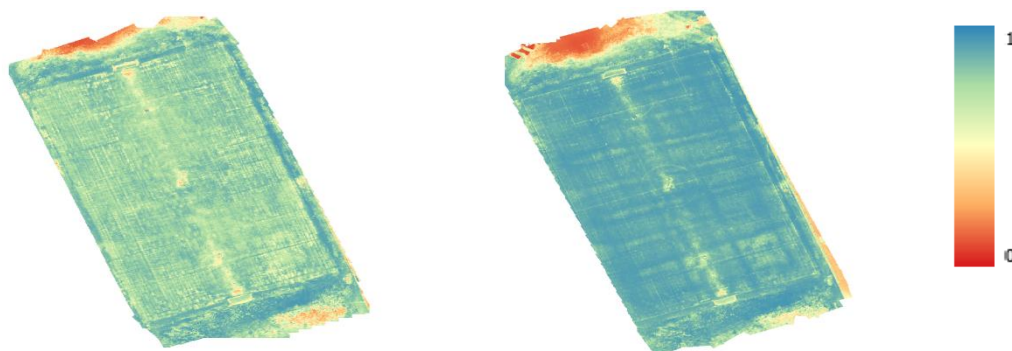


Figura 5-2: Mappa NDVI del tappeto erboso acquisita nella fase pre-partita

Figura 5-1: Mappa NDVI del tappeto erboso acquisita nella fase post-partita

Al fine di supportare quantitativamente le osservazioni derivanti dall'analisi visiva delle mappe, sono state calcolate le principali statistiche descrittive dell'indice, riportate nella Tabella 5.1.

Tabella 5-1: Confronto dei valori di media e deviazione standard tra i rilievi pre e post-partita dell'indicatore NDVI

	MEDIA	DEVIAZIONE STANDARD
NDVI PRE	0,749	0,130
NDVI POST	0,826	0,162

L'analisi statistica evidenzia un incremento del valore medio dell'NDVI, che passa da 0,749 nel rilievo pre-partita a 0,826 nel rilievo post-partita, accompagnato da un aumento della deviazione standard da 0,130 a 0,162. Sebbene il calpestio conseguente all'attività sportiva possa determinare una riduzione del vigore vegetativo nelle aree maggiormente sollecitate, il valore medio dell'indice risulta complessivamente più elevato nel rilievo successivo alla partita. Tale comportamento può essere attribuito al fatto che le alterazioni indotte dal gioco interessano prevalentemente porzioni limitate della superficie, mentre la restante parte del tappeto erboso mantiene condizioni vegetative elevate, influenzando positivamente la media complessiva. Inoltre, non si può escludere che lievi differenze nelle condizioni di acquisizione, quali l'illuminazione naturale, il contenuto idrico della vegetazione o il fisiologico stato della

coltura al momento del rilievo, abbiano contribuito alla variazione dei valori registrati. L'aumento della deviazione standard suggerisce invece una maggiore eterogeneità nella distribuzione spaziale dell'indice, indicando che, dopo la partita, il campo presenta differenze più marcate tra le aree maggiormente soggette al calpestio e quelle che hanno mantenuto condizioni vegetative migliori. Tale risultato conferma quanto osservato nell'analisi visiva, evidenziando come l'attività sportiva non abbia determinato un decadimento uniforme dell'intera superficie, ma abbia prodotto effetti localizzati nelle zone di maggiore utilizzo.

5.2 Analisi spaziale dell'NDRE

L'indice NDRE (Normalized Difference Red Edge Index) è stato utilizzato per valutare lo stato fisiologico del tappeto erboso e le variazioni del contenuto di clorofilla all'interno dell'area di studio. Rispetto all'NDVI, l'NDRE sfrutta la banda Red Edge e risulta particolarmente sensibile a differenze vegetative che possono non essere immediatamente evidenti attraverso altri indici di vegetazione, consentendo una valutazione più approfondita delle condizioni fisiologiche del cotico erboso.

È opportuno evidenziare che i valori dell'NDRE risultano generalmente distribuiti in un intervallo più ristretto rispetto a quelli dell'NDVI. Per tale motivo, pur adottando la medesima scala cromatica di rappresentazione, le mappe mostrano una prevalenza delle classi cromatiche intermedie, senza che ciò debba essere interpretato come indice di condizioni vegetative scadenti. L'analisi deve pertanto essere condotta considerando principalmente la distribuzione spaziale relativa dei valori all'interno della superficie di gioco.

La mappa acquisita nella fase pre-partita (Figura 5.3) evidenzia una distribuzione complessivamente omogenea dell'indice sull'intera superficie del campo. Le fasce laterali presentano valori relativamente uniformi, mentre lungo la fascia centrale del terreno di gioco si osserva una lieve differenziazione rispetto alle aree circostanti. Tale andamento interessa in particolare il cerchio di centrocampo e le zone poste lungo l'asse principale del campo, che collega le due aree di porta. Le aree di rigore mostrano una distribuzione abbastanza regolare dei valori, con limitate variazioni localizzate.

La mappa post-partita (Figura 5.4) presenta una configurazione generale analoga a quella osservata nel rilievo precedente. Le fasce laterali mantengono una buona uniformità, mentre la fascia centrale del campo continua a rappresentare l'area caratterizzata dalla maggiore variabilità spaziale. Alcune differenze risultano visibili in corrispondenza del centrocampo e nelle zone antistanti le porte, dove l'indice evidenzia leggere variazioni riconducibili alle differenti condizioni fisiologiche della vegetazione.

Il confronto tra le due date di rilievo evidenzia una sostanziale stabilità dei valori dell'indice NDRE sull'intera superficie di gioco. Le differenze osservate risultano contenute e localizzate principalmente nelle aree maggiormente interessate dall'attività sportiva, quali il centrocampo, le aree di rigore e le zone prospicienti le porte. Le fasce laterali e le aree prossime ai calci d'angolo mostrano invece variazioni limitate tra i due rilievi. Nel complesso, l'analisi dell'NDRE conferma una buona uniformità dello stato fisiologico del tappeto erboso, evidenziando esclusivamente lievi differenze spaziali associate alle normali dinamiche di utilizzo della superficie sportiva.

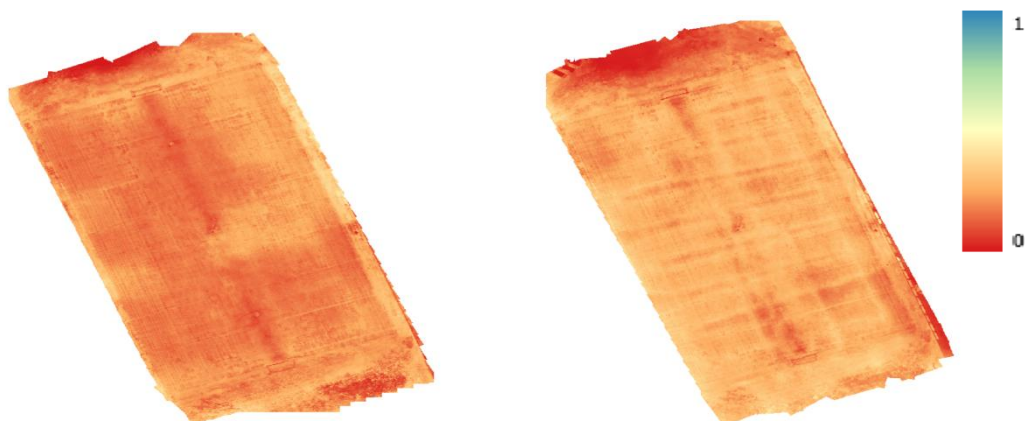


Figura 5-4: Mappa dell'indice NDRE del tappeto erboso acquisita nella fase pre-partita

Figura 5-3: Mappa dell'indice NDRE del tappeto erboso acquisita nella fase post-partita

Al fine di supportare quantitativamente le osservazioni derivanti dall'analisi visiva delle mappe, sono state calcolate le principali statistiche descrittive dell'indice, riportate nella Tabella 5.2.

Tabella 5-2: Confronto dei valori di media e deviazione standard tra i rilievi pre e post-partita dell'indicatore NDRE

	MEDIA	DEVIAZIONE STANDARD
NDRE PRE	0,199	0,062
NDRE POST	0,252	0,072

L'analisi statistica evidenzia un incremento del valore medio dell'NDRE da 0,199 nel rilievo pre-partita a 0,252 nel rilievo post-partita, accompagnato da un lieve aumento della deviazione standard, che passa da 0,062 a 0,072. Analogamente a quanto osservato per l'NDVI, l'incremento della media suggerisce che il tappeto erboso, considerato nel suo complesso, mantiene un buono stato vegetativo anche dopo l'attività sportiva. È plausibile ipotizzare che

gli effetti del calpestio abbiano interessato principalmente le aree maggiormente soggette al transito dei giocatori, mentre il resto della superficie abbia conservato caratteristiche vegetative tali da determinare un aumento del valore medio dell'indice. Va inoltre considerato che l'NDRE, essendo basato sulle bande Red Edge e Near Infrared, risulta particolarmente sensibile alle variazioni del contenuto di clorofilla e allo stato fisiologico della vegetazione, consentendo di evidenziare differenze non sempre rilevabili mediante il solo NDVI. Il lieve incremento della deviazione standard indica una maggiore variabilità spaziale dei valori nel rilievo post-partita, suggerendo una distribuzione meno uniforme dello stato vegetativo. Tale comportamento risulta coerente con quanto emerso dall'analisi delle mappe, nelle quali le variazioni cromatiche si concentravano principalmente nelle aree di maggiore utilizzo del campo, pur mantenendo valori complessivamente contenuti in relazione all'intervallo caratteristico dell'indice NDRE.

5.3 Analisi spaziale del SAVI

L'indice SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) è stato utilizzato per valutare il vigore vegetativo del tappeto erboso riducendo l'influenza della componente del suolo sul segnale spettrale acquisito dal sensore multispettrale. Rispetto all'NDVI, il SAVI introduce un fattore di correzione che consente di limitare gli effetti del terreno nudo, fornendo una valutazione più accurata della vegetazione soprattutto in condizioni di copertura non uniforme.

Nel caso del tappeto erboso analizzato, caratterizzato da un'elevata densità vegetativa e da una limitata esposizione del suolo, le mappe ottenute mostrano una prevalenza delle classi di valore più elevate dell'indice, rappresentate dalla colorazione blu. Tale distribuzione conferma la buona copertura del cotico erboso e l'assenza di estese aree con ridotta presenza di vegetazione.

La mappa acquisita nella fase pre-partita (Figura 5.5) evidenzia una distribuzione generalmente uniforme del SAVI sull'intera superficie di gioco. Tuttavia, un'analisi più approfondita permette di individuare alcune variazioni localizzate, rappresentate da tonalità tendenti al verde e al giallo, principalmente lungo la fascia centrale del campo, in corrispondenza del cerchio di centrocampo e nelle zone antistanti le porte. Queste aree coincidono con le porzioni del terreno maggiormente interessate dall'attività calcistica e possono essere associate a una maggiore intensità di calpestio, la quale può determinare leggere variazioni nella densità e nella qualità del tappeto erboso.

La mappa post-partita (Figura 5.6) presenta una configurazione complessivamente analoga a quella osservata nel rilievo precedente, con una prevalenza di valori elevati e una buona

omogeneità spaziale dell'indice. Rispetto al pre-partita si osserva una minore evidenza delle differenze localizzate nella fascia centrale e nelle aree di porta, mentre il resto della superficie mantiene una distribuzione pressoché uniforme dei valori del SAVI.

Il confronto tra le due date di acquisizione evidenzia una sostanziale stabilità dell'indice sull'intera superficie di gioco. Le variazioni osservate risultano limitate e non indicano una perdita significativa di copertura vegetale in seguito all'evento sportivo. Nel complesso, il SAVI conferma l'elevata qualità del cotico erboso e mostra come l'effetto del suolo risulti trascurabile in un tappeto sportivo caratterizzato da elevata densità e continuità della copertura vegetale.

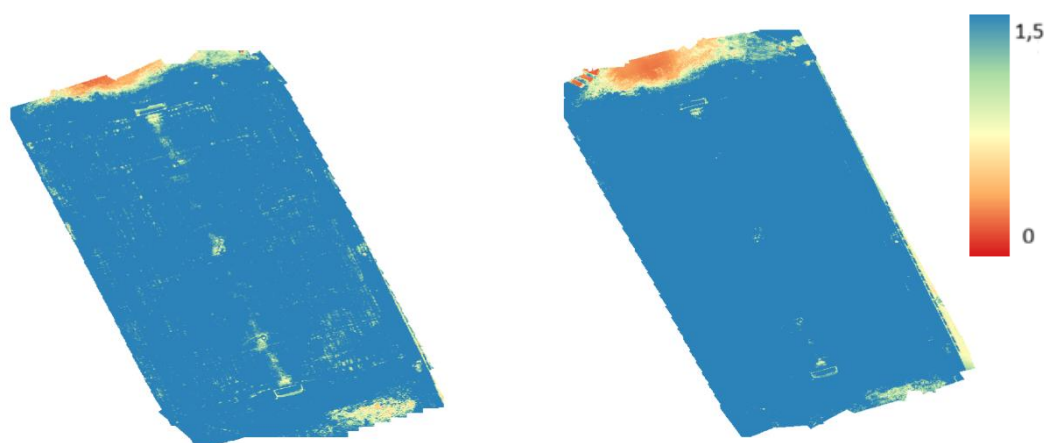


Figura 5-6: Mappa dell'indice SAVI del tappeto erboso acquisita nella fase pre-partita

Figura 5-5: Mappa dell'indice SAVI del tappeto erboso acquisita nella fase post-partita

Al fine di supportare quantitativamente le osservazioni derivanti dall'analisi visiva delle mappe, sono state calcolate le principali statistiche descrittive dell'indice, riportate nella Tabella 5.3.

Tabella 5-3: Confronto dei valori di media e deviazione standard tra i rilievi pre e post-partita dell'indicatore SAVI

	MEDIA	DEV. STANDARD
SAVI PRE	1,123	0,195
SAVI POST	1,240	0,243

L'analisi statistica evidenzia un incremento del valore medio del SAVI da 1,123 nel rilievo pre-partita a 1,240 nel rilievo post-partita, mentre la deviazione standard aumenta da 0,195 a 0,243. È opportuno sottolineare che tali valori risultano coerenti con l'intervallo di rappresentazione adottato per questo indice, il cui valore massimo è pari a 1,500.

L'aumento della media suggerisce che il tappeto erboso abbia mantenuto complessivamente un buon livello di copertura vegetale anche dopo l'attività sportiva. Tale comportamento può essere spiegato dal fatto che il SAVI, grazie all'introduzione del fattore di correzione del suolo, risulta meno influenzato dalla riflettanza del terreno rispetto all'NDVI e descrive in modo più stabile la vegetazione nelle superfici caratterizzate da una copertura erbosa continua, come un campo sportivo. Di conseguenza, le alterazioni provocate dal calpestio tendono a riflettersi principalmente nelle aree maggiormente sollecitate, senza determinare variazioni marcate sull'intera superficie analizzata.

L'incremento della deviazione standard indica, tuttavia, una maggiore variabilità spaziale dei valori nel rilievo post-partita, evidenziando come le differenze tra le zone sottoposte a maggiore usura e quelle rimaste in condizioni migliori risultino più accentuate. Tale comportamento è coerente con quanto osservato nell'analisi delle mappe, nelle quali le leggere riduzioni dell'indice risultavano concentrate soprattutto in corrispondenza delle aree di rigore e della fascia centrale del campo, mentre il resto della superficie manteneva valori elevati e distribuiti in maniera piuttosto uniforme.

5.4 Analisi spaziale del GNDVI

Il GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) è un indice di vegetazione ottenuto attraverso il rapporto tra la riflettanza della banda del vicino infrarosso (NIR) e quella della banda del verde. Rispetto all'NDVI, il GNDVI presenta una maggiore sensibilità alle variazioni del contenuto di clorofilla e dell'attività fotosintetica della vegetazione, permettendo di individuare variazioni fisiologiche anche in superfici caratterizzate da un'elevata copertura vegetale, come i tappeti erbosi sportivi.

La mappa acquisita nella fase pre-partita (Figura 5.7) evidenzia una distribuzione complessivamente uniforme dei valori dell'indice sull'intera superficie di gioco. La predominanza di tonalità verde chiaro, omogeneamente distribuite lungo il campo, indica una buona condizione generale del cotico erboso e un'elevata uniformità spaziale della risposta vegetativa. Sono tuttavia riconoscibili alcune aree caratterizzate da valori leggermente inferiori, rappresentate da tonalità tendenti al giallo, localizzate principalmente lungo la fascia centrale di gioco, nel cerchio di centrocampo e nelle aree di rigore. Tali variazioni possono essere ricondotte alla maggiore intensità di utilizzo di queste porzioni di campo, soggette a un maggiore stress dovuto al calpestio e alle dinamiche di gioco.

La mappa post-partita (Figura 5.8) mantiene nel complesso valori elevati dell'indice, ma mostra una distribuzione spaziale meno omogenea rispetto al rilievo precedente. In particolare,

si osserva la comparsa di numerose fasce longitudinali con tonalità più scure tendenti al blu, distribuite lungo l'intero campo e alternate ad aree con valori leggermente inferiori. Considerando la scala cromatica adottata, tali tonalità corrispondono a valori più elevati del GNDVI e non devono quindi essere interpretate come zone degradate. La presenza di questa maggiore variabilità spaziale suggerisce una diversa risposta del tappeto erboso alle sollecitazioni meccaniche causate dall'attività sportiva, con una riduzione dell'uniformità generale del segnale vegetativo.

L'analisi evidenzia inoltre come le aree maggiormente interessate dal gioco, quali la fascia centrale del campo, il cerchio di centrocampo e le zone antistanti le porte, continuino a rappresentare i punti di maggiore variabilità anche nel rilievo successivo alla partita, confermando la loro maggiore suscettibilità alle condizioni di stress generate dal calpestio.

Il confronto tra le due date di acquisizione evidenzia quindi una variazione nella distribuzione spaziale dei valori del GNDVI più che una reale riduzione dello stato vegetativo complessivo. Il rilievo pre-partita mostra infatti un tappeto erboso caratterizzato da una risposta più uniforme, mentre il rilievo post-partita presenta una maggiore eterogeneità dei valori dell'indice. Nel complesso, il GNDVI conferma il buono stato del cotico erboso, ma risulta particolarmente sensibile nell'evidenziare modifiche nella distribuzione spaziale dell'attività vegetativa conseguenti all'utilizzo del campo da gioco.

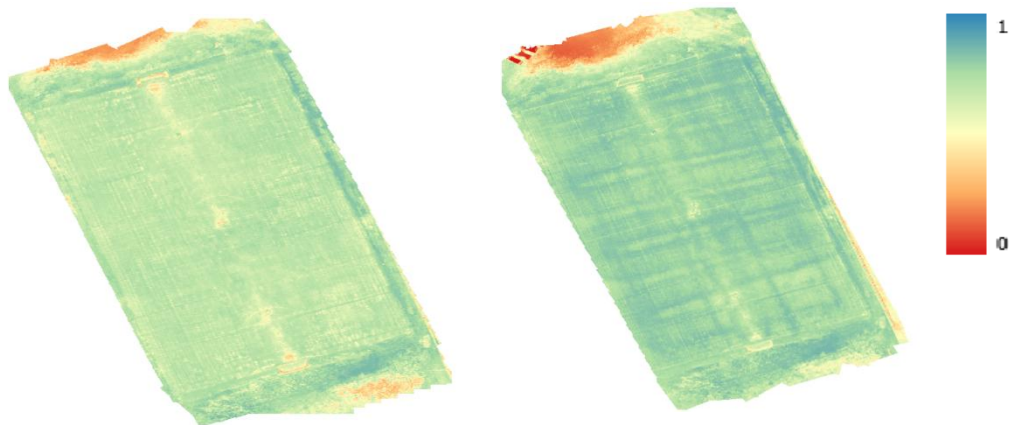


Figura 5-8: Mappa dell'indice GNDVI del tappeto erboso acquisita nella fase pre-partita

Figura 5-7: Mappa dell'indice GNDVI del tappeto erboso acquisita nella fase post-partita

Al fine di supportare quantitativamente le osservazioni derivanti dall'analisi visiva delle mappe, sono state calcolate le principali statistiche descrittive dell'indice, riportate nella Tabella 5.4.

Tabella 5-4: Confronto dei valori di media e deviazione standard tra i rilievi pre e post-partita dell'indicatore GNDVI

	MEDIA	DEVIAZIONE STANDARD
GNDVI PRE	0,669	0,093
GNDVI POST	0,728	0,126

L'analisi statistica mostra un incremento del valore medio del GNDVI da 0,669 nel rilievo pre-partita a 0,728 nel rilievo post-partita, accompagnato da un aumento della deviazione standard da 0,093 a 0,126. L'incremento della media indica che, considerando l'intera superficie del campo, il livello medio dell'indice rimane elevato anche dopo l'attività sportiva. Tale andamento può essere ricondotto al fatto che le alterazioni causate dal calpestio risultano concentrate nelle aree maggiormente utilizzate durante il gioco, mentre la restante parte del tappeto erboso conserva condizioni vegetative soddisfacenti, contribuendo a mantenere elevato il valore medio complessivo.

Dal punto di vista agronomico, il GNDVI è particolarmente sensibile al contenuto di clorofilla e all'efficienza fotosintetica della vegetazione, risultando quindi utile nell'individuare variazioni fisiologiche anche in prati caratterizzati da un buon vigore generale. L'incremento della deviazione standard evidenzia una maggiore dispersione dei valori nel rilievo post-partita, indicando che le differenze tra le diverse zone del campo risultano più marcate rispetto alla situazione iniziale. Tale risultato trova riscontro nell'analisi delle mappe, nelle quali il rilievo post-partita mostrava una distribuzione meno omogenea dei valori, con la comparsa di fasce cromatiche più scure alternate ad aree che mantenevano valori elevati. Questo comportamento suggerisce che l'attività sportiva abbia determinato una risposta differenziata del tappeto erboso, influenzando maggiormente le aree sottoposte a un'intensità di utilizzo più elevata, senza compromettere in maniera uniforme l'intera superficie del campo.

5.5 Analisi termica

L'analisi termografica del tappeto erboso è stata effettuata mediante i dati acquisiti dal sensore termico integrato sul drone DJI Mavic 3T. Le acquisizioni pre e post-partita sono state effettuate nella medesima fascia oraria, intorno alle ore 11:00, al fine di ridurre l'influenza delle variazioni giornaliere della temperatura superficiale e rendere più affidabile il confronto tra i due rilievi. Per consentire una corretta interpretazione delle immagini termiche, entrambe le mappe sono state rappresentate utilizzando la medesima scala cromatica, compresa tra 0 e 44 °C, nella quale le tonalità rosse identificano temperature inferiori mentre le tonalità tendenti al blu corrispondono a temperature più elevate.

La mappa termica acquisita nella fase pre-partita (Figura 5.9) evidenzia una distribuzione della temperatura generalmente omogenea all'interno della superficie di gioco. Il tappeto erboso presenta prevalentemente tonalità comprese tra il giallo chiaro e il verde, indicative di temperature intermedie, con la presenza di alcune zone più fredde rappresentate da tonalità aranciate localizzate soprattutto nelle aree periferiche del campo. Si osservano inoltre leggere differenze lungo la fascia centrale di gioco e nelle zone antistanti le porte, dove la distribuzione termica appare meno uniforme. Le aree caratterizzate da tonalità blu più intense sono principalmente localizzate ai margini dell'ortomosaico e sono presumibilmente riconducibili a superfici esterne al campo o a elementi non direttamente appartenenti al tappeto erboso; pertanto, non sono state considerate rappresentative delle condizioni termiche del cotico erboso.

La mappa post-partita (Figura 5.10) mostra una configurazione differente, caratterizzata da una maggiore omogeneità della temperatura superficiale sull'intero terreno di gioco. La superficie erbosa presenta una predominanza di tonalità giallo-arancioni, indice di temperature più uniformi e mediamente inferiori rispetto alle aree rappresentate in verde nel rilievo precedente. La fascia centrale del campo, le aree di rigore e le zone maggiormente interessate dal gioco risultano ancora distinguibili, ma con differenze termiche meno marcate rispetto alla fase pre-partita.

Il confronto tra le due acquisizioni evidenzia quindi una modifica della distribuzione spaziale della temperatura superficiale del tappeto erboso in seguito allo svolgimento dell'attività sportiva. In particolare, il rilievo pre-partita mostra una maggiore variabilità termica, con la presenza di aree caratterizzate da differenti livelli di temperatura, mentre il rilievo post-partita evidenzia una distribuzione più uniforme, con una prevalenza di temperature appartenenti alle classi cromatiche intermedie. È importante sottolineare che le differenze osservate non possono essere attribuite esclusivamente all'attività di gioco, in quanto la temperatura superficiale della vegetazione è influenzata anche dalle condizioni ambientali al momento del rilievo, come radiazione solare, velocità del vento e umidità atmosferica. Tuttavia, l'analisi termografica ha permesso di evidenziare come il monitoraggio UAV possa fornire informazioni complementari rispetto agli indici multispettrali, consentendo di valutare la variabilità termica del tappeto erboso e individuare eventuali anomalie non immediatamente osservabili attraverso il solo stato vegetativo.

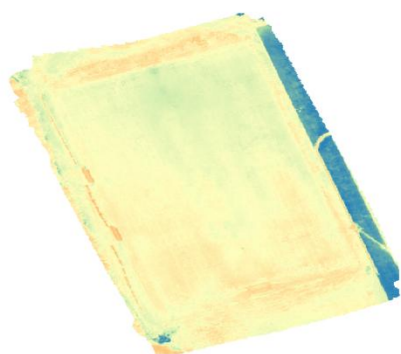


Figura 5-10: Mappa dell'indice TERMICO del tappeto erboso acquisita nella fase pre-partita

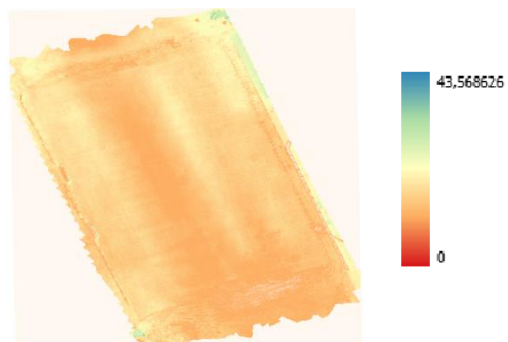


Figura 5-9: Mappa dell'indice TERMICO del tappeto erboso acquisita nella fase post-partita

Capitolo 6

DISCUSSIONE

6.1 Interpretazione agronomica e confronto tra gli indici di vegetazione e i dati termici

L'integrazione dei dati ottenuti attraverso gli indici di vegetazione derivati dalle immagini multispettrali e delle informazioni provenienti dall'analisi termica ha permesso di effettuare una valutazione più completa dello stato vegetativo e fisiologico del tappeto erboso sportivo oggetto di studio. L'utilizzo combinato di differenti parametri ha consentito infatti di analizzare aspetti complementari della risposta della vegetazione, quali il vigore vegetativo, l'attività fotosintetica, il contenuto di clorofilla e la distribuzione della temperatura superficiale, fornendo una visione più approfondita delle condizioni del cotico erboso rispetto a una semplice valutazione visiva.

Gli indici NDVI e SAVI hanno evidenziato come il tappeto erboso presentasse, sia nella condizione precedente sia successiva alla partita, un livello qualitativo generalmente elevato e una copertura vegetale nel complesso omogenea. Le differenze rilevate dopo l'evento sportivo sono risultate prevalentemente localizzate nelle aree soggette a maggiore intensità di calpestio, come la fascia centrale del campo, il centrocampo e le zone antistanti le porte. Tali variazioni sono riconducibili all'azione meccanica esercitata dai giocatori durante la partita, che può provocare una temporanea riduzione dell'efficienza vegetativa e una maggiore disomogeneità della superficie erbosa. Tuttavia, l'entità delle variazioni osservate non evidenzia un deterioramento significativo del tappeto erboso, suggerendo una buona capacità del cotico di mantenere le proprie caratteristiche funzionali anche dopo l'utilizzo sportivo.

L'analisi degli indici NDRE e GNDVI ha consentito di approfondire maggiormente lo stato fisiologico della vegetazione, essendo tali indici particolarmente sensibili alle variazioni del contenuto di clorofilla e dell'attività fotosintetica. In particolare, il confronto tra le mappe pre e post-partita ha evidenziato una maggiore eterogeneità spaziale dopo l'attività sportiva, con la comparsa di aree caratterizzate da una diversa risposta spettrale soprattutto lungo la fascia centrale del terreno di gioco e nelle zone maggiormente interessate dal passaggio e dallo stazionamento dei giocatori. Questo comportamento suggerisce che gli indici più sensibili alle

variazioni fisiologiche siano in grado di rilevare alterazioni del tappeto erboso anche in assenza di evidenti modificazioni visive.

I risultati ottenuti dall'indice SAVI assumono inoltre un particolare interesse considerando che tale indice riduce l'influenza del suolo sul segnale spettrale acquisito. La presenza di valori generalmente elevati e di una distribuzione relativamente uniforme conferma che il tappeto erboso garantiva una buona copertura della superficie, limitando l'effetto del terreno sottostante sulla risposta spettrale. Le lievi variazioni osservate in prossimità delle aree di maggiore utilizzo confermano comunque l'esistenza di una risposta localizzata agli stress derivanti dall'attività di gioco.

L'analisi termografica ha fornito informazioni complementari rispetto agli indici multispettrali, consentendo di valutare la variabilità della temperatura superficiale del tappeto erboso. Il confronto tra i rilievi pre e post-partita ha evidenziato una modifica nella distribuzione spaziale della temperatura, con una maggiore omogeneità della risposta termica nella fase successiva alla partita. Tali variazioni possono essere associate a cambiamenti dello stato idrico superficiale, agli scambi energetici tra vegetazione e ambiente e alle modificazioni della struttura del cotico causate dal calpestio. È tuttavia necessario considerare che la temperatura superficiale è influenzata anche da fattori ambientali esterni, come radiazione solare, condizioni atmosferiche e ventilazione, che possono contribuire alle differenze osservate tra i due rilievi.

Un aspetto particolarmente rilevante nell'interpretazione dei risultati riguarda le caratteristiche agronomiche del campo oggetto di studio. La risposta degli indici vegetazionali e dei dati termici è infatti strettamente influenzata non soltanto dall'attività sportiva, ma anche dalla struttura del terreno, dalla composizione del substrato e dalle pratiche manutentive adottate. Nel caso specifico, il terreno e le lavorazioni eseguite non rappresentavano una condizione ottimale per un tappeto erboso destinato ad applicazioni di monitoraggio di precisione, determinando una naturale variabilità spaziale del campo. Di conseguenza, alcune differenze riscontrate nelle mappe non possono essere attribuite esclusivamente allo svolgimento della partita, ma devono essere interpretate considerando anche le condizioni pregresse del cotico erboso e la gestione agronomica adottata.

Nel complesso, l'analisi integrata dei diversi indici multispettrali e dei dati termici ha dimostrato come l'impiego di sensori UAV rappresenti uno strumento efficace per il monitoraggio non distruttivo dei tappeti erbosi sportivi. La possibilità di individuare differenze spaziali anche di lieve entità consente di riconoscere precocemente zone soggette a maggiore stress, supportando una gestione più mirata degli interventi di manutenzione, irrigazione e

recupero del manto erboso. I risultati ottenuti evidenziano inoltre l'importanza di integrare più fonti informative, poiché ciascun indice fornisce indicazioni differenti e complementari sullo stato di salute del tappeto erboso.

6.2 Applicabilità pratica delle tecnologie UAV nella gestione dei tappeti erbosi sportivi

L'impiego di piattaforme UAV equipaggiate con sensori multispettrali e termici rappresenta una tecnologia sempre più interessante per la gestione moderna dei tappeti erbosi sportivi, poiché consente di ottenere informazioni dettagliate e spazialmente distribuite sullo stato della vegetazione attraverso metodologie rapide e non distruttive. A differenza delle tradizionali valutazioni visive, spesso influenzate dall'esperienza dell'operatore e limitate a osservazioni puntuali, il telerilevamento da drone permette di analizzare l'intera superficie di gioco, evidenziando differenze anche minime nella risposta vegetativa del cotico erboso.

L'utilizzo degli indici vegetazionali, come NDVI, NDRE, GNDVI e SAVI, consente di monitorare diversi aspetti della qualità del tappeto erboso, tra cui il vigore vegetativo, il contenuto di clorofilla, la densità della copertura e la presenza di eventuali condizioni di stress. L'integrazione con i dati termici permette inoltre di ottenere informazioni relative alla distribuzione della temperatura superficiale, fornendo indicazioni indirette sullo stato idrico della vegetazione e sulla presenza di eventuali anomalie legate alla gestione irrigua o alle condizioni del suolo.

In ambito professionale e nella gestione ordinaria degli impianti sportivi, tali informazioni possono essere utilizzate per pianificare interventi di manutenzione mirati, evitando trattamenti uniformi sull'intera superficie quando le criticità interessano solamente specifiche zone del campo. Ad esempio, l'individuazione delle aree maggiormente soggette a stress può supportare interventi localizzati di irrigazione, concimazione, trasemina, arieggiatura o decompattazione del terreno, permettendo una gestione più efficiente delle risorse disponibili.

L'approccio basato sul monitoraggio UAV risulta particolarmente vantaggioso in campi caratterizzati da una maggiore variabilità del substrato o da condizioni agronomiche non completamente ottimali, come osservato nel caso di studio analizzato. In queste situazioni, la possibilità di realizzare mappe ad alta risoluzione consente di individuare con precisione le aree maggiormente problematiche, fornendo al manutentore informazioni oggettive per la definizione delle strategie di recupero e miglioramento del cotico erboso.

Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla rapidità di acquisizione dei dati e dalla possibilità di ripetere periodicamente i rilievi nel corso della stagione sportiva. Il confronto temporale delle mappe consente infatti di valutare l'evoluzione del tappeto erboso nel tempo,

verificare l'efficacia degli interventi di manutenzione effettuati e individuare precocemente eventuali situazioni di degrado prima che risultino visibili a occhio nudo.

Nonostante l'elevato potenziale applicativo, l'impiego operativo dei sistemi UAV richiede competenze specifiche sia nella pianificazione dei voli sia nell'elaborazione e nell'interpretazione dei dati acquisiti. La corretta gestione delle immagini multispettrali e termiche, l'utilizzo di software dedicati e la conoscenza delle dinamiche agronomiche del tappeto erboso sono infatti elementi fondamentali per trasformare le informazioni raccolte in decisioni gestionali efficaci.

In conclusione, i risultati ottenuti confermano come l'integrazione tra rilievi UAV multispettrali e termici possa rappresentare un valido strumento di supporto alla gestione sostenibile dei tappeti erbosi sportivi. L'approccio di precisione permette di intervenire in maniera più mirata, riducendo sprechi di acqua, fertilizzanti e altre risorse, migliorando al tempo stesso la qualità della superficie di gioco e contribuendo a una manutenzione più razionale ed efficiente.

6.3 Limiti della metodologia adottata

Sebbene l'approccio basato sull'utilizzo integrato di sensori multispettrali e termici montati su piattaforma UAV abbia permesso di ottenere informazioni dettagliate sullo stato del tappeto erboso, il presente studio presenta alcuni limiti che devono essere considerati nella corretta interpretazione dei risultati ottenuti.

Un primo aspetto riguarda il numero limitato di rilievi effettuati, circoscritti a due sole acquisizioni, una precedente e una successiva allo svolgimento dell'evento sportivo. Tale approccio ha consentito di valutare le variazioni a breve termine associate all'utilizzo del campo, ma non permette di descrivere l'evoluzione stagionale del tappeto erboso né di distinguere completamente gli effetti del calpestio da quelli legati alla normale variabilità ambientale e fisiologica della vegetazione.

Un ulteriore limite è rappresentato dalle caratteristiche agronomiche del sito di studio. La struttura del terreno, la composizione del substrato e le lavorazioni eseguite nel corso della gestione del campo non corrispondevano alle condizioni ottimali di un tappeto erboso sportivo altamente specializzato. Questa situazione può aver contribuito a generare una variabilità spaziale del cotico indipendente dall'evento calcistico, rendendo più complessa l'attribuzione delle differenze osservate esclusivamente all'attività di gioco.

Per quanto riguarda i dati termici, nonostante le acquisizioni siano state effettuate nella stessa fascia oraria al fine di aumentare la confrontabilità dei rilievi, la temperatura superficiale

della vegetazione rimane fortemente influenzata dalle condizioni meteorologiche del momento, come intensità della radiazione solare, umidità relativa dell'aria e ventilazione. Pertanto, eventuali differenze termiche osservate tra i due rilievi devono essere interpretate considerando anche il possibile contributo dei fattori ambientali esterni.

Infine, l'interpretazione degli indici vegetazionali e delle mappe termiche, sebbene supportata da dati ad elevata risoluzione spaziale, non è stata accompagnata da un numero elevato di misure dirette sul campo riguardanti parametri fisiologici e fisici del terreno. Una maggiore integrazione tra dati da telerilevamento e rilievi agronomici tradizionali avrebbe consentito una validazione più completa delle informazioni ottenute dai sensori UAV.

Nel complesso, tali limitazioni non compromettono la validità del lavoro svolto, ma evidenziano la necessità di interpretare i risultati all'interno dello specifico contesto sperimentale analizzato. Al contrario, esse rappresentano un punto di partenza per il miglioramento delle future attività di monitoraggio, orientando lo sviluppo di protocolli sperimentali più estesi e completi.

6.4 Prospettive future di sviluppo

I risultati ottenuti nel presente studio evidenziano il potenziale delle tecnologie UAV equipaggiate con sensori multispettrali e termici per il monitoraggio dello stato qualitativo dei tappeti erbosi sportivi. Tuttavia, ulteriori sviluppi metodologici e applicativi potrebbero incrementare l'affidabilità delle analisi e ampliare le possibilità di utilizzo di tali strumenti nella gestione ordinaria delle superfici sportive.

Un primo sviluppo futuro potrebbe riguardare l'esecuzione di campagne di monitoraggio più frequenti e distribuite lungo l'intera stagione sportiva. La realizzazione di una serie temporale più estesa consentirebbe infatti di comprendere meglio l'evoluzione del tappeto erboso in relazione ai diversi periodi dell'anno, alle condizioni climatiche, all'intensità di utilizzo del campo e agli interventi di manutenzione effettuati.

Un ulteriore miglioramento potrebbe derivare dall'integrazione dei dati ottenuti mediante telerilevamento con ulteriori rilievi diretti in campo, come misure dell'umidità del terreno, della compattazione del suolo, delle caratteristiche fisico-chimiche del substrato e dello stato nutrizionale della vegetazione. L'associazione tra dati da sensori UAV e misurazioni agronomiche tradizionali permetterebbe una validazione più approfondita dei risultati e una migliore comprensione delle cause delle variazioni spaziali osservate.

In prospettiva, lo sviluppo di sistemi di analisi automatizzata basati su algoritmi avanzati e tecniche di intelligenza artificiale potrebbe consentire una gestione sempre più precisa e

tempestiva dei tappeti erbosi. L'elaborazione automatica dei dati multispettrali e termici potrebbe infatti permettere l'individuazione precoce di anomalie, la classificazione delle aree a differente stato vegetativo e il supporto alle decisioni del manutentore attraverso la definizione di strategie di intervento mirate.

Infine, l'integrazione del monitoraggio UAV all'interno di programmi di gestione di precisione rappresenta una prospettiva particolarmente interessante per il settore dei tappeti erbosi sportivi. L'utilizzo continuativo di informazioni spazialmente dettagliate potrebbe favorire una manutenzione più sostenibile, consentendo una maggiore efficienza nell'impiego di risorse come acqua, fertilizzanti ed energia, con benefici sia economici sia ambientali.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la valutazione dell'impiego di tecnologie UAV equipaggiate con sensori multispettrali e termici per il monitoraggio dello stato qualitativo di un tappeto erboso sportivo. L'attività sperimentale svolta presso il campo comunale "Alessio Piccioni" di Offida ha permesso di acquisire dati ad elevata risoluzione spaziale mediante l'utilizzo dei droni DJI Mavic 3M e DJI Mavic 3T, successivamente elaborati attraverso tecniche di fotogrammetria digitale e analisi GIS.

L'elaborazione dei dati multispettrali ha consentito la generazione di differenti indici vegetazionali, tra cui NDVI, NDRE, GNDVI e SAVI, attraverso i quali è stato possibile ottenere informazioni complementari sullo stato del cotico erboso. Il confronto tra i rilievi effettuati prima e dopo lo svolgimento dell'evento sportivo ha evidenziato come il campo mantenesse complessivamente buone condizioni vegetative, pur mostrando variazioni spaziali localizzate nelle aree maggiormente interessate dal calpestio, quali il centrocampo e le aree di rigore.

In particolare, gli indici più sensibili alle variazioni fisiologiche della vegetazione, come NDRE e GNDVI, hanno evidenziato una maggiore variabilità della risposta spettrale nel rilievo successivo alla partita, suggerendo la capacità di individuare alterazioni del tappeto erboso non sempre rilevabili attraverso una semplice osservazione visiva. Al contrario, gli indici NDVI e SAVI hanno confermato la presenza di una copertura vegetale generalmente uniforme e una buona capacità del cotico erboso di mantenere le proprie caratteristiche funzionali anche in seguito all'attività di gioco.

L'analisi termografica ha fornito informazioni aggiuntive riguardanti la distribuzione della temperatura superficiale del campo, evidenziando differenze nella variabilità termica tra le due acquisizioni. L'integrazione tra dati multispettrali e termici ha quindi permesso di ottenere una valutazione più completa delle condizioni del tappeto erboso, dimostrando come l'approccio multi-sensore rappresenti un valido strumento di supporto per il monitoraggio e la gestione delle superfici sportive.

È importante sottolineare come i risultati ottenuti debbano essere interpretati considerando le specifiche condizioni del sito di studio. Le caratteristiche del terreno e le lavorazioni

agronomiche effettuate non rappresentavano una situazione ideale per un tappeto erboso sportivo altamente specializzato e possono aver contribuito alla variabilità spaziale osservata. Inoltre, il numero limitato di campagne di rilievo non consente di estendere le conclusioni all'intera stagione sportiva, ma rappresenta una fotografia delle condizioni del campo nel periodo analizzato.

Nonostante tali limitazioni, il lavoro svolto conferma le elevate potenzialità delle tecnologie UAV applicate alla gestione di precisione dei tappeti erbosi sportivi. La possibilità di acquisire dati rapidi, non distruttivi e ad elevata risoluzione spaziale consente di individuare precocemente eventuali condizioni di stress, supportando interventi manutentivi più mirati e sostenibili dal punto di vista economico e ambientale.

In conclusione, l'integrazione tra rilievi multispettrali e termici mediante piattaforme UAV rappresenta un approccio innovativo e promettente per la gestione moderna dei tappeti erbosi sportivi. Un ulteriore sviluppo della metodologia, attraverso campagne di monitoraggio più frequenti e l'integrazione con misure agronomiche dirette, potrà contribuire alla definizione di strategie sempre più efficaci nell'ambito della gestione sostenibile delle superfici sportive.

BIBLIOGRAFIA

- Pierce, F.J. & Nowak, P., 1999. Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, 67, pp.1–85.
- Gebbers, R. & Adamchuk, V.I., 2010. Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), pp.828–831.
- Zhang, N., Wang, M. & Wang, N., 2002. Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), pp.113–132.
- Bahri, A. & El Aissaoui, A., 2022. *Precision agriculture: Concepts and simple approaches for managing spatial variability in soils and crops*. African and Mediterranean Agricultural Journal – Al Awamia, (132), pp.1–19.
- ISPA, 2024. *Precision Agriculture Definition*. International Society of Precision Agriculture. Available at: <https://www.ispag.org/resources/definition>.
- Laveglia, S. et al., 2024. *Advances in Sustainable Crop Management: Integrating Precision Agriculture and Proximal Sensing*. AgriEngineering, 6(3), pp.3084–3120.
- Lu, X. et al., 2025. *Delineation and evaluation of management zones for site-specific nutrient management using geostatistical and fuzzy C mean cluster approach*. Scientific Reports.
- McBratney, A.B. & Whelan, B.M., 2001. *Precision Agriculture definitions and concepts*. In: Precision Ag. – Oz style. Sydney: NSW Agriculture. pp.274–282.
- Precision Agriculture Lab, 2026. *What is precision agriculture?*. Precision Agriculture Laboratory. Available at: <https://precision-agriculture.sydney.edu.au/home/what-is-precision-agriculture/>.
- Ruralab CREA, 2024. *Cos'è l'Agricoltura di Precisione – Variabilità spaziale e temporale*. CREA Ruralab. Available at: <https://ruralab.crea.gov.it/ruralab/lezioni/AdP/1.2a/>.
- San Emeterio de la Parte, M. et al., 2023. *Big Data and precision agriculture: a novel spatio-temporal semantic IoT data management framework for improved interoperability*. Journal of Big Data, 10, 52.
- Hunt, E.R., Hively, W.D. & Fujikawa, S.J., 2018. *UAV remote sensing for agriculture: techniques, applications, and opportunities*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 84(4), pp.263–274.
- Maes, W.H. & Steppe, K., 2019. *Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture*. Trends in Plant Science, 24(2), pp.152–164.
- Mulla, D.J., 2013. *Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps*. Biosystems Engineering, 114(4), pp.358–371.
- Torres-Sánchez, J., Peña, J.M., de Castro, A.I. & López-Granados, F., 2014. *Assessing UAV-based imagery for quantitative monitoring of field-crop phenotyping: A comparison with satellite imagery*. Precision Agriculture, 15(6), pp.792–807.
- Zhang, N., Wang, M. & Wang, N., 2002. *Precision agriculture — a worldwide overview*. Computers and Electronics in Agriculture, 36(2–3), pp.113–132.

- Campbell, J.B. & Wynne, R.H., 2011. *Introduction to Remote Sensing*. 5th ed. New York: Guilford Press.
- Jensen, J.R., 2015. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 4th ed. Pearson.
- Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), pp.127–150.
- Roman, A. & Ursu, T., 2016. Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks.
- Govender, M., Chetty, K.T. & Bulcock, H., 2007. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies.
- Jensen, J.R., 2007. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Upper Saddle River: Pearson.
- Zhang, C. & Kovacs, J.M., 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13, pp. 693–712.
- Zhang, Y., Li, Z. & Chen, X., 2019. Applications of UAV remote sensing in precision agriculture: a review. *Sensors*, 19.
- Beard, J.B., 2001. *Turfgrass Management for Golf Courses*. Ann Arbor Press.
- Beard, J.B., Green, R.L., 1994. The role of turfgrasses in environmental protection and their benefits to humans. *Journal of Environmental Quality*, 23, 452–460.
- Carrow, R.N., Petrovic, A.M., 1992. Effects of traffic on turfgrass. *Agronomy Journal*, 84, 189–195.
- Puhalla, J., Krans, J., Goatley, M., 2010. *Sports Fields: Design, Construction and Maintenance*. Wiley.
- Smiley, R., Dernoeden, P., Clarke, B., 2005. *Compendium of Turfgrass Diseases*. APS Press.
- Stier, J., Horgan, B., Bonos, S., 2013. *Turfgrass: Biology, Use and Management*. ASA-CSSA-SSSA.
- Turgeon, A.J., 2011. *Turfgrass Management*. Prentice Hall.
- Xue, J., Su, B., 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices. *Journal of Sensors*.
- Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., & Thompson, T., 2000. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*. American Society of Agronomy, Madison, USA.
- Mukiibi, E., Yu, L., Zhang, J., & Li, X., 2024. Advances in UAV-based remote sensing for precision agriculture: Applications and future perspectives. *Remote Sensing*, 16, 1123.
- Radočaj, D., Jurišić, M., & Gašparović, M., 2023. The role of remote sensing data and methods in precision agriculture: A review. *Agriculture*, 13(3), 623.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite Symposium*. NASA SP-351, Washington DC.
- Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Xue, J., & Su, B., 2017. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017.
- Carrow, R.N., Duncan, R.R., 2012. *Best Management Practices for Salin and Sodic Turfgrass Soils*. CRC Press.

- Google, 2026. Comune di Offida, stadio comunale "Alessio Piccioni". Google Maps. Available at: <https://www.google.com/maps>
- Beard, J.B., 2002. *Turf Management for Golf Courses*. Ann Arbor Press.
- Carrow, R.N., & Duncan, R.R., 2003. *Turfgrass Site Assessment and Management*. Wiley.
- James, I.T., 2011. *Sports Turf Management*. CABI Publishing.
- Turgeon, A.J., 2011. *Turfgrass Management*. Prentice Hall.
- Stier, J.C., Horgan, B.P., & Bonos, S.A., 2013. *Turfgrass: Biology, Use, and Management*. ASA, CSSA, and SSSA.
- Beard, J.B., & Green, R.L., 1994. The role of turfgrasses in environmental protection and their benefits to humans. *Journal of Environmental Quality*.
- Puhalla, J., Krans, J., & Goatley, M., 2010. *Sports Fields: Design, Construction, and Maintenance*. John Wiley & Sons.
- FIFA Quality Programme., 2023. *Handbook of Requirements for Football Turf Surfaces*. Fédération Internationale de Football Association.
- Colomina, I., & Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.
- Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C., 2016. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution UAV imagery. *Remote Sensing*, 8(1), 1–19.
- Topcon Positioning Systems., 2025. HiPer HR – Ricevitore GNSS multifunzione. Brochure tecnica ufficiale. Disponibile online: www.topconpositioning.com.
- Konica Minolta., 2025. SPAD-502 Plus – Misuratore di clorofilla portatile. Documentazione tecnica ufficiale. Disponibile online: www.konicaminolta.eu.
- Markwell, J., Osterman, J.C., & Mitchell, J.L. 1995. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, 46, 467–472.
- Agisoft LLC., 2025. Utilizzo di Agisoft Metashape con dati termici, multispettrali e LiDAR. Disponibile online: www.agisoftmetashape.com.
- GeoPro., 2025. Meridiana – Software topografico professionale. Disponibile online: www.geopro.it.
- Mussi, M., 2020. Applicazioni UAV e fotogrammetria multispettrale per il monitoraggio del territorio. Politecnico di Milano.
- QGIS Development Team., 2025. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponibile online: www.qgis.org.
- DJI., 2025. DJI Mavic 3 Multispectral – Technical Specifications. Disponibile online: www.dji.com.
- DJI., 2025. DJI Mavic 3 Thermal – Technical Specifications. Disponibile online: www.dji.com.
- Paneque-Gálvez, J., McCall, M.K., Napoletano, B.M., Wich, S.A., & Koh, L.P., 2014. Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas. *Forests*, 5(6), 1481–1507.
- Traini Ecoservices SRL., 2026. Preventivo di manutenzione annuale del campo sportivo comunale di Offida. Documentazione tecnica fornita dal Comune di Offida.
- DJI., 2024. DJI Mavic 3 Multispectral – Specifications. Disponibile su: <https://ag.dji.com/mavic-3-m/specs>
- DJI., 2024. DJI Mavic 3 Multispectral – Product Information. Disponibile su: <https://enterprise.dji.com/it/mavic-3-m>

- DJI., 2024. DJI Mavic 3 Thermal – Technical Specifications. Disponibile su:
<https://enterprise.dji.com/it/mavic-3-enterprise>
- Hexagon., 2024. SmartNet Italy – Network RTK Services. Disponibile su:
<https://hxgnsmartnet.com/en-gb/coverage-worldwide/italy>
- Agisoft., 2024. DJI Phantom 4 Multispectral Data Processing. Disponibile su:
<https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000159853-dji-phantom-4-multispectral-data-processing>
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., & Merzlyak, M.N., 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289–298.
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309.

RINGRAZIAMENTI

Al Dott. Stefano Chiappini e ai miei correlatori,
per la disponibilità, la pazienza e la professionalità dimostrate durante lo sviluppo di
questo lavoro.

Alla mia famiglia,
per non avermi mai messo pressioni e avermi dato la possibilità di affrontare questo
percorso con un sostegno costante.

Ai miei amici, quelli di sempre,
che, con la loro presenza, la loro allegria e quella spensieratezza capace di alleggerire
anche i momenti più impegnativi, mi hanno accompagnato in questo viaggio.
Ricordandomi ogni giorno l'importanza delle persone che camminano al tuo fianco.

Ad Alice,
grazie per essere stata al mio fianco in ogni momento di questo percorso, nei giorni più
semplici come in quelli più difficili. Hai saputo sostenermi, incoraggiarmi e ricordarmi,
anche quando ne avevo più bisogno, di credere nelle mie capacità.
“Perché siamo io e te, il resto è storia, storia, storia”