



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

PRIME CORRELAZIONI TRA INDICI
VEGETAZIONALI E BIOMASSA MEDIANTE
RILIEVI DA DRONE SU BASILICO

FIRST CORRELATIONS BETWEEN
VEGETATION INDICES AND BIOMASS
THROUGH DRONE SURVEYS ON BASIL

TIPO TESI: SPERIMENTALE

Studente:
LUISA RAMADORI

Relatore:
PROF.SSA ESTER FOPPA PEDRETTI

Correlatore:
DOTT. ALESSIO ILARI

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

A mio nonno Giulio, a mio padre.

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	6
ELENCO DELLE FIGURE	7
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI.....	9
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	11
CAPITOLO 1 BASILICO (OCIMUM BASILICUM L.).....	13
1.1 Introduzione.....	13
1.2 Caratteristiche botaniche	13
1.2.1 Morfologia.....	13
1.2.2 Famiglia e genere di appartenenza	15
1.2.3 Cultivar principali di Ocimum basilicum	16
1.3 Principali usi e proprietà.....	17
1.4 Ambiente pedoclimatico.....	18
1.5 Tecnica colturale.....	19
1.5.1 Scelta varietale.....	19
1.5.2 Rotazione	19
1.5.3 Lavorazioni e gestione del terreno.....	19
1.5.4 Semina e sistema di impianto	20
1.5.5 Fertilizzazione	20
1.5.6 Controllo delle principali avversità	21
1.5.7 Irrigazione.....	25
1.5.8 Raccolta	26
CAPITOLO 2 AGRICOLTURA DI PRECISIONE	27
2.1 Definizione e obiettivi	27
2.2 Fasi fondamentali dell’Agricoltura di Precisione	28
2.2.1 Raccolta ed acquisizione dei dati.....	28
2.2.2 Processo decisionale ed esecuzione.....	28
2.3 Tecnologie utilizzate.....	29

2.3.1 Global Positioning System	29
2.3.2 Geographic Information System.....	30
2.3.3 Remote Sensing	31
2.3.4 Proximal Sensing	31
2.3.5 Variable Rate Application Technology	31
2.3.6 Big Data.....	32
2.3.7 Internet of Things	32
2.3.8 Artificial Intelligence.....	33
CAPITOLO 3 REMOTE SENSING E CAMERE SPETTRALI.....	34
3.1 Introduzione ai principi base del telerilevamento.....	34
3.1.1 Lo spettro elettromagnetico.....	34
3.1.2 Interazione della radiazione elettromagnetica con la superficie terrestre.....	36
3.1.3 Firma spettrale della vegetazione e del suolo.....	36
3.2 Sensori utilizzati nel remote sensing	38
3.2.1 Strumenti attivi	38
3.2.2 Strumenti passivi	39
3.3 Tipologie di risoluzione dei sensori.....	39
3.4 Telerilevamento con sensori ottici nel dominio del visibile, NIR e SWIR	39
3.4.1 Camere multispettrali	39
3.4.2 Camere iperspettrali.....	40
3.4.3 Camere RGB.....	41
3.5 Tipologie di piattaforme dei sensori	41
3.6 Indici di vegetazione.....	42
CAPITOLO 4 SPETTROSCOPIA DI CAMPO	43
4.1 Principio di base	43
4.2 Condizioni di misurazione da associare ai dati raccolti.....	44
4.3 Fattori che influenzano le misure	45
CAPITOLO 5 DRONI	47
5.1 Introduzione	47
5.2 Caratteristiche principali dei droni	47
5.2.1 Componenti dei droni	47
5.2.2 Tipologie di droni	48
5.2.3 Tipi di carichi utili e relative applicazioni.....	51
5.3 Applicazione dei droni in Agricoltura di Precisione	51

5.3.1 Analisi del suolo	51
5.3.2 Valutazione della salute delle colture	52
5.3.3 Valutazione dell'evapotraspirazione	52
5.3.4 Operazioni di irrorazione	52
CAPITOLO 6 MATERIALI E METODI	53
6.1 Sito sperimentale	53
6.1.1 Caratteristiche pedologiche	54
6.1.2 Gestione della coltura	54
6.2 Caso studio	56
6.2.1 Campionamento in campo	56
6.2.2 Drone Matrice 350 RTK	59
6.2.3 Sensore AltumPT	60
6.2.4 Rilievo con il drone	61
6.3 Processamento delle immagini	65
6.3.1 PIX4Dmapper	65
6.3.2 QGIS	65
6.3.3 Microsoft Excel	67
CAPITOLO 7 RISULTATI E DISCUSSIONI	69
7.1 Indici vegetazionali	69
7.2 Statistiche zonali	72
7.3 Grafici a dispersione o scatter plots	78
7.3.1 Correlazione tra altezza media delle piante di basilico e indici vegetazionali	78
7.3.2 Correlazione tra biomassa e indici vegetazionali	80
7.4 Matrice di correlazione	83
CONCLUSIONI	85
BIBLIOGRAFIA	86
SITOGRAFIA	92

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1-1: Varietà di basilico più comuni (Fonte: Shahrajabian, 2020).....	17
Tabella 1-2: Distanze e le densità d’impianto consigliate (Fonte: Disciplinare di produzione integrata Regione Marche, 2022).....	20
Tabella 3-1: Intervallo di lunghezze d’onda delle onde elettromagnetiche (Fonte: Zwinkels, 2015)	35
Tabella 5-1: Diverse applicazioni di sensori e droni (Fonte: Dutta, 2020)	51
Tabella 6-1: Formule degli indici vegetazionali inserite nel calcolatore raster	66
Tabella 7-1: Statistiche zonali dell’indice vegetazionale NDVI	72
Tabella 7-2: Statistiche zonali dell’indice vegetazionale GNDVI	73
Tabella 7-3: Statistiche zonali dell’indice vegetazionale NDRE	74
Tabella 7-4: Statistiche zonali dell’indice vegetazionale CVI	75
Tabella 7-5: Statistiche zonali dell’indice vegetazionale EVI.....	76
Tabella 7-6: Statistiche zonali dell’indice vegetazionale SAVI.....	77
Tabella 7-7: Matrice di correlazione.....	83

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: Morfologia della pianta di basilico	14
Figura 1-2: Fiore della pianta di basilico (Fonte: Prinsi, 2019).....	14
Figura 1-3: Infiorescenza della pianta di basilico (Fonte: Nurzyńska-Wierdak, 2012)	15
Figura 1-4: Semi della pianta di basilico (Fonte: Bravo, 2021)	15
Figura 1-5: Lamine superiori di foglie di basilico infette da peronospora. Le figure in alto indicano il livello di intensità della malattia su una scala visiva da 0 a 4 (Fonte: Ben-Naim, 2015).....	23
Figura 1-6: Clorosi del basilico dolce 'Nufar' infettato dalla peronospora del basilico a sinistra e <i>O. americanum</i> x <i>O. basilicum</i> 'Blue Spice' sano e non infettato a destra (Fonte: Wyenandt, 2010).....	23
Figura 1-7: Lamine inferiori di foglie di basilico infette da peronospora. Le figure in alto indicano il livello di intensità della malattia su una scala visiva da 0 a 4 (Fonte: Ben-Naim, 2015).....	24
Figura 3-1: Rappresentazione della radiazione elettromagnetica (Fonte: Zwinkels, 2015)...	35
Figura 3-2: Spettro elettromagnetico (Fonte: Cahyadi, 2020).....	35
Figura 3-3: Tipica firma spettrale della vegetazione (Fonte: Randive, 2019).....	37
Figura 3-4: Firme spettrali del suolo (Fonte: Chabrilat, 2019)	38
Figura 3-5: Imaging multispettrale (Fonte: Vines, 2022).....	40
Figura 3-6: Imaging iperspettrale (Fonte: Vines, 2022).....	41
Figura 4-1: Geometria dell'ambiente di campo (Fonte: Milton, 1986).....	44
Figura 5-1: Drone ad ala fissa.....	49
Figura 5-2: Drone quadricottero	49
Figura 5-3: Drone monorotore.....	50
Figura 6-1: Appezamento aziendale a Corridonia	53
Figura 6-2: Posizionamento dell'attività sperimentale	54
Figura 6-3: Posizione dei punti di campionamento	56
Figura 6-4: Cornice delimitante l'area dei singoli campionamenti	57
Figura 6-5: Operazione di misurazione dell'altezza delle piante con metro	57

Figura 6-6: Raccolta manuale delle piante di basilico contenute all'interno della cornice	58
Figura 6-7: Punto di rilievo successivamente allo sfalcio in dettaglio	59
Figura 6-8: Aeromobile Matrice 350 RTK.....	60
Figura 6-9: Camera AltumPT	61
Figura 6-10: Aeromobile matrice 350 RTK e Camera Altum-PT	61
Figura 6-11: Pannello bianco puro per calibrazione iniziale e finale del drone	62
Figura 6-12: Operazione di calibrazione della camera spettrale	63
Figura 6-13: Radiocomando raffigurante lo schema di volo	64
Figura 6-14: Volo del drone sul campo di basilico.....	64
Figura 6-15: Banda green ritagliata	66
Figura 6-16: Punti di campionamento (in nero) e area buffer campionata (in verde)	67
Figura 7-1: Indice vegetazionale NDVI	69
Figura 7-2: Indice vegetazionale GNDVI.....	70
Figura 7-3: Indice vegetazionale NDRE.....	70
Figura 7-4: Indice vegetazionale CVI.....	71
Figura 7-5: Indice vegetazionale EVI.....	71
Figura 7-6: Indice vegetazionale SAVI.....	72
Figura 7-7: Correlazione tra altezza e NDVI.....	78
Figura 7-8: Correlazione tra altezza e GNDVI.....	79
Figura 7-9: Correlazione tra altezza e NDRE.....	79
Figura 7-10: Correlazione tra altezza e CVI.....	79
Figura 7-11: Correlazione tra altezza ed EVI.....	80
Figura 7-12: Correlazione tra altezza e SAVI	80
Figura 7-13: Correlazione tra biomassa e NDVI.....	81
Figura 7-14: Correlazione tra biomassa e GNDVI.....	81
Figura 7-15: Correlazione tra biomassa e NDRE.....	81
Figura 7-16: Correlazione tra biomassa e CVI.....	82
Figura 7-17: Correlazione tra biomassa ed EVI	82
Figura 7-18: Correlazione tra biomassa e SAVI.....	82

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

AdP	Agricoltura di Precisione
AI	Artificial Intelligence
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
CIC	Capacità Idrica di Campo
CVI	Chlorophyll Vegetation Index
DSS	Decision Support System
ECe	Electrical Conductivity of a saturated soil Extract
EVI	Enhanced Vegetation Index
FIR	Far InfraRed
GIS	Geographic Information System
GLONASS	GLOBal NAVigation Satellite System
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IoT	Internet of Things
K ₂ O	Ossido di potassio
LiDAR	Light Detection and Ranging
LWIR	Long-Wave InfraRed
MIR	Mid InfraRed
ML	Machine Learning
N	Azoto
NDRE	Normalized Difference Red Edge

NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near InfraRed
P ₂ O ₅	Anidride fosforica
PAR	Photosynthetically Active Radiation
RADAR	Radio Detection and Ranging
RE	Red Edge
RGB	Red-Green-Blue
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index
SO	Sostanza Organica
SSCM	Site-Specific Crop Management
SWIR	Short-Wave InfraRed
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UR	Umidità Relativa
VI	Vegetation Index
VIS	Visible
VRT	Variable Rate application Technology

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Il basilico è una delle piante aromatiche più diffuse e coltivate al mondo. In Italia, nel 2022 la superficie coltivata a basilico era di circa 156 ettari, aumentata a circa 200 ettari nel 2023 (ISTAT, 2024). Questa crescita continua è trainata dalla crescente domanda dell'industria alimentare. La coltivazione del basilico è particolarmente concentrata in quattro regioni italiane: Lombardia, Emilia-Romagna, Marche e Campania (De Masi et al., 2006). Negli ultimi anni, l'introduzione delle tecnologie di agricoltura di precisione ha migliorato la gestione delle colture, promuovendo una maggiore sostenibilità economica, sociale e ambientale. In particolare, il telerilevamento consente un monitoraggio accurato delle colture. Tra le tecnologie più promettenti, i droni equipaggiati con sensori spettrali hanno dimostrato di essere strumenti efficaci per raccogliere dati dettagliati sullo stato di salute delle piante e sugli indici di vegetazione. Numerosi studi hanno dimostrato che gli indici di vegetazione ottenuti tramite telerilevamento possono essere correlati a parametri agronomici rilevanti. Tuttavia, la ricerca sull'applicazione di queste tecnologie alla coltivazione del basilico è ancora limitata. Diversi studi hanno indagato la gestione dell'irrigazione e la rilevazione di stress idrico nelle coltivazioni (Gorji et al., 2024), ma anche il rilevamento dello stato nutrizionale e sanitario. In diversi casi studio, è stata possibile anche la fenotipizzazione delle diverse cultivar di basilico (Tran et al., 2022). Un aspetto cruciale nella coltivazione del basilico è la fase di raccolta che ha due principali destinazioni: industria alimentare e consumo fresco da un lato, estrazione di oli essenziali per usi terapeutici o aromaterapici dall'altro. Nel primo caso, l'obiettivo principale è massimizzare la resa della coltura attraverso opportune pratiche agronomiche. Il basilico viene raccolto mediante più sfalci durante la stagione, grazie alla capacità della pianta di ricacciare. La gestione del numero di sfalci e della resa di ciascuno è determinante per la produttività complessiva. Una sfida importante per i coltivatori è individuare il momento ottimale per ogni raccolto, in modo da garantire una resa massima. Tradizionalmente, i coltivatori si sono affidati alla propria esperienza e al controllo visivo del campo per definire i tempi di sfalcio. Tuttavia, esiste una crescente necessità di strumenti decisionali che possano supportare e ottimizzare questa fase critica.

Il presente studio si avvale di droni e sensori multispettrali per estrarre informazioni utili ad esplorare gli indici di vegetazione. Successivamente, gli indici sono correlati con i principali parametri strutturali del basilico, quali biomassa e altezza. L'obiettivo è verificare se esiste una correlazione significativa tra parametri strutturali e indici vegetazionali, identificando quali indici siano maggiormente predisposti ad essere usati in modelli predittivi. Addestrare modelli di machine learning è il primo step per ottenere modelli previsionali capaci di prevedere la biomassa e, di conseguenza, la resa del basilico. Questo approccio potrebbe fornire ai coltivatori uno strumento prezioso per ottimizzare la raccolta e migliorare l'efficienza produttiva delle loro colture.

Capitolo 1

BASILICO (*OCIMUM BASILICUM* L.)

1.1 Introduzione

Il basilico (*Ocimum basilicum* L.) è una pianta erbacea aromatica appartenente al genere *Ocimum*, della famiglia delle *Lamiaceae*. L'appellativo del genere *Ocimum* deriva dalla parola greca *ozo*, che significa “odorare”, collegato al fatto che le piante appartenenti a questo genere sono aromatiche e sprigionano fragranze caratteristiche (Spence, 2024). Il basilico, nel corso dei secoli, si è sviluppato commercialmente in tutto il Mediterraneo, prendendo radici anche in Italia, soprattutto nella regione Liguria, dove attualmente è largamente incorporato nella cucina contemporanea di tutta la penisola. A conferma della sua rilevanza, spesso ci si riferisce al basilico come “re delle erbe”, dato che il termine basilico deriva dalla parola greca *basileus*, il cui significato è “re” (Spence, 2024). Il suo utilizzo come erba culinaria, però, è relativamente recente, dal momento che fino al XX secolo non era ancora molto diffusa in cucina, né in Italia, né in altri paesi come Regno Unito e Stati Uniti. Da allora, la sua popolarità è andata aumentando, ed attualmente riveste un ruolo importante in ambito gastronomico in tutto l'occidente. Oltre a quest'area, la pianta è utilizzata nelle cucine di Taiwan, dell'Africa tropicale e del sud-est asiatico, in Indonesia, Thailandia, Vietnam, Cambogia e Laos (Spence, 2024). Nel complesso, la pianta aromatica è ben conosciuta in tutto il mondo, raggiungendo ogni parte di esso ad eccezione dell'Antartico, e per questo motivo, con i suoi molteplici usi in cucina, ma anche in ambito medicinale e rituale, è un'erba assai apprezzata (Spence, 2024).

1.2 Caratteristiche botaniche

1.2.1 Morfologia

Il basilico è una pianta erbacea annuale che raggiunge un'altezza di circa 20-60 cm (Figura 1-1). Il fusto è eretto, a sezione quadrangolare, con tendenza a diventare legnoso alla base, molto ramificato. L'apparato radicale è fittonante. Le foglie sono decussate e picciolate, a lamina ovale-lanceolata, intera o sparsamente dentellata, glabre e lucide, di lunghezza pari a 3-5 cm; dimensioni, forma e colore dipendono dalle diverse varietà. Esse costituiscono la parte

commerciale della pianta, i cui successivi usi possono essere disparati. L'infiorescenza è formata da racemi molto allungati alla fine dell'antesi, in cui i fiori (Figura 1-2) sono riuniti in verticilli, da 4-6 fiori ciascuno, all'ascella delle brattee (Figura 1-3). Il frutto è un tetrachenio, da cui derivano quattro piccoli acheni ovali e bruno scuri (Figura 1-4), che a maturità si staccheranno.



Figura 1-1: Morfologia della pianta di basilico



Figura 1-2: Fiore della pianta di basilico (Fonte: Prinsi, 2019)



Figura 1-3: Infiorescenza della pianta di basilico (Fonte: Nurzyńska-Wierdak, 2012)



Figura 1-4: Semi della pianta di basilico (Fonte: Bravo, 2021)

1.2.2 Famiglia e genere di appartenenza

Il basilico appartiene al genere *Ocimum*, della famiglia delle *Lamiaceae*. Questa famiglia botanica conta circa 3500-4000 specie di piante, presenti principalmente nella regione calda e temperata dell'olartico, ed è distinta da un elevato interesse economico, in quanto comprende molte specie aromatiche, tra cui il basilico, e, tra le più rilevanti, lavanda, menta, origano, salvia, timo (Haas et al., 2024).

Il genere *Ocimum* comprende più di 30 specie aromatiche, sia erbacee che arbustive, sia annuali che perenni, native dell'Asia, dell'America centro-meridionale e dell'Africa

(Shahrajabian et al., 2020). Questo genere denota un'elevata variabilità a livello morfologico, chimico e genetico, soprattutto grazie alla facilità di impollinazione incrociata, determinando la presenza massiccia di ibridi inter-specifici, molte varietà, e notevoli morfo e chemio tipi all'interno dello stesso genere e specie (Spence, 2024).

A seconda delle specie e delle cultivar, a livello morfologico, si possono distinguere diversi fenotipi. Le diversità possono essere basate su dimensioni, forma, colore delle foglie; esse diversificano la loro texture, possibilmente variando da foglie lisce e lucide a foglie arricciate e pelose, e colore, dal verde al blu/viola (Spence, 2024). Altresì, i fiori delle diverse specie del genere *Ocimum* si differenziano in dimensioni, forma, e colore (dal bianco al lavanda/viola). Ancora, il range di altezza raggiunta da ciascuna specie è soggetto a variazioni all'interno dello stesso genere e specie. Infine, a livello chimico, si differenziano il tipo e il quantitativo di oli essenziali estraibili specialmente nelle foglie, ma anche nel resto della pianta, che giocano poi un ruolo fondamentale nella determinazione dei profumi e sapori caratteristici di ciascuna specie o cultivar, in quanto sono soggetti a una profonda chemio-diversità. Tuttavia, non è stata ritrovata una significativa correlazione tra caratteristiche morfologiche e biochimiche (Mulugeta et al., 2024). La composizione in oli essenziali, oltre a dipendere dalla specie e cultivar di appartenenza, può essere più o meno intensamente influenzata dalle condizioni pedo-climatiche, dalle diverse gestioni agronomiche, dai metodi di raccolta, essiccazione e lavorazione (Shahrajabian et al., 2020). Da recenti studi si è evidenziato come le caratteristiche morfologiche e chimiche possano essere influenzate dalla radiazione ultravioletta UV-A, con differenze significative nell'altezza della pianta, area fogliare e biomassa raccolta in seguito a trattamento con radiazione UV addizionale; questo avviene probabilmente in seguito al cambiamento dell'intensità di fotosintesi, in quanto la pianta, attivando meccanismi di protezione contro questa radiazione, aumenta il contenuto di clorofilla e carotenoidi (Semenova et al., 2022). Essendo il genere *Ocimum* così variegato, sia in termini morfologici che chimici, molto spesso la classificazione e nominazione delle varie specie e cultivar può mostrarsi complessa e confusionaria (Spence, 2024).

1.2.3 *Cultivar principali di Ocimum basilicum*

Esistono molte diverse cultivar di *Ocimum basilicum*, che sono raggruppate in diversi morfotipi e chemiotipi principali. Più nello specifico, si identificano sei morfotipi:

«“Basilico vero” contiene varietà a foglia verde come il basilico comune e il basilico genovese (la maggior parte delle cultivar commerciali di basilico rientra in questo gruppo); “basilico a foglia piccola” comprende cultivar verdi caratterizzate da foglie corte e strette e da un portamento di crescita arrotondato; “basilico a foglia di lattuga” comprende varietà verdi con foglie larghe e bollose; “basilico viola (A)” è caratterizzato

da piante a foglia verde con steli e fiori viola; “basilico viola (B)” consiste in cultivar in cui tutte le parti aeree (ad es, foglie, steli e fiori) sono di colore viola; “basilico viola (C)” è costituito da varietà con caratteristiche simili al basilico viola (B) che presentano anche foglie larghe e bollose.» (Bajomo et al., 2022)

Altresi, si distinguono quattro principali chemiotipi di basilico, a seconda di quale siano i composti chimici preponderanti negli oli essenziali della pianta; quindi, si distinguono rispettivamente cultivar maggiormente ricche in: estragolo, linalolo, metileugenolo, metilcinnamato (Klimankova et al., 2008). A livello commerciale, vi sono diverse varietà che sono più annoverate e maggiormente coltivate (Shahrajabian et al., 2020) (Tabella 1-1).

Tabella 1-1: Varietà di basilico più comuni (Fonte: Shahrajabian, 2020)

Nome italiano	Nome inglese	Nome scientifico	Morfotipo
Basilico comune	Sweet basil	<i>Ocimum basilicum</i>	Basilico vero
Basilico greco	Bush or Greek basil	<i>Ocimum basilicum minimum</i>	Basilico a foglia piccola
Basilico genovese	Genovese basil	<i>Ocimum basilicum genovese</i>	Basilico vero
Basilico viola	Purple basil	<i>Ocimum basilicum purpurascens</i>	Basilico viola (B)
Basilico lattuga	Lettuce-leaf basil	<i>Ocimum basilicum crispum</i>	Basilico a foglia di lattuga

Nuove varietà di *Ocimum basilicum* vengono introdotte continuamente sul mercato, selezionate o allevate da incroci tra cultivar diverse o specie strettamente correlate, col fine principale di creare nuova varietà dal punto di vista aromatico e di oli essenziali (Spence, 2024).

1.3 Principali usi e proprietà

Gli usi del basilico sono diversi. Il prodotto commerciale della pianta, come accennato, è la foglia. Il primo impiego delle foglie può avvenire in ambito culinario. La presenza di oli essenziali conferisce un distintivo aroma e le foglie vengono consumate in diverse culture in molteplici piatti per aggiungere sapore. Naturalmente, a seconda di quale cultivar si impiega, il risultato a livello organolettico risulterà differente e variegato. Esistono molte cultivar dai sapori e odori molto particolari e specifici, come ad esempio il basilico liquirizia (*Ocimum basilicum* var. *anise*) o il basilico limone (*Ocimum basilicum* var. *citriodorum*). Il consumo del basilico può avvenire come prodotto fresco, pratica molto diffusa tramite la commercializzazione della pianta in vaso, o come prodotto lavorato, con caratteristiche finali del bene differenti a seconda della destinazione d’uso. Per esempio, può comunemente essere

presente in zuppe, salse, insalate, passate di pomodoro, oli aromatici. La conservazione del basilico può realizzarsi come prodotto secco o congelato. La disidratazione delle foglie permette una conservazione molto prolungata del prodotto, fino a due anni in contenitori ermetici a temperatura ambiente, ma questo processo porta alla perdita delle note di profumi caratteristici. La congelazione rappresenta il miglior modo di preservare l'erba sebbene sia il sapore che l'odore non potranno mai eguagliare quelli del basilico usato fresco (Spence, 2024). Inoltre, il basilico è l'ingrediente principale del pesto. La varietà utilizzata tipicamente per la creazione della salsa è *Ocimum basilicum* cv. *Genovese gigante*, in aggiunta ad aglio, pinoli e Parmigiano-Reggiano (Spence, 2024). Infine, sempre a livello di industria alimentare, le varietà di basilico con morfotipo viola possono essere utilizzate anche come fonte di antocianine (Nadeem et al., 2021). Il secondo impiego principale della pianta è a livello medicinale. Precisamente, grazie alla presenza di oli essenziali, flavonoidi, polifenoli, componenti naturali della pianta, le proprietà del vegetale sulla salute umana sono numerose; prime fra tutte vengono annoverate le caratteristiche antiossidanti, antidiabetiche, antibatteriche, anti-infiammatorie, anti-ipertensive (Shikha and Kashyap, 2024). In aggiunta, il basilico è fonte di β -carotene, magnesio, calcio, potassio e vitamina C (Spence, 2024). Di conseguenza, non si esclude l'utilizzo potenziale di questa come pianta medicinale, per il trattamento di varie malattie (Nadeem et al., 2021). Un ulteriore impiego considerevole del basilico è nell'industria cosmetica e profumiera, con l'estrazione degli oli essenziali dalle foglie, per il successivo utilizzo tale e quale, o per la creazione di fragranze, spesso combinate con la pratica dell'aromaterapia (Shahrajabian et al., 2020). Infine, gli oli essenziali contenuti ed estratti dalla pianta possono essere utili nel controllo di alcuni parassiti, in quanto si conta che questi oli abbiano dimostrato proprietà insetticide e repellenti (Mulugeta et al., 2024).

1.4 Ambiente pedoclimatico

Il Disciplinare di Produzione Integrata della Regione Marche del 25 luglio 2022 definisce la vocazionalità pedoclimatica del basilico. Nella scelta dell'area di coltivazione, si deve tenere in considerazione che la temperatura ottimale di germinazione è di circa 20-25°C, con valore minimo di 15° e massimo di 30°C, mentre la temperatura minima di sviluppo non è inferiore a 2°C e la massima non è superiore a 40°C. Condizioni climatiche adeguate costituiscono un requisito sostanziale alla coltivazione del basilico in quanto la coltura è particolarmente sensibile; quindi, il ciclo di coltivazione in campo aperto richiede una stagione mite e la finestra temporale utile va da maggio a settembre nelle zone temperate (La Placa et al., 2024).

Per quanto riguarda la scelta del terreno, per soddisfare l'attitudine alla coltura, esso dovrebbe essere caratterizzato da tessitura fine o moderatamente fine e una profondità utile maggiore a 30 cm. Nei riguardi della reazione del terreno, la coltura ha una discreta adattabilità, ma vegeta bene a pH compreso tra 6.5-7.0. È indispensabile una buona capacità di drenaggio del terreno, in quanto il basilico, pur presentando elevati fabbisogni idrici, mal sopporta i ristagni di umidità che possono poi favorire anche malattie di tipo fogliare. Il basilico tollera poco la salinità del terreno, perciò la ECe deve essere < 2 mS/cm. Preferibilmente, il terreno dovrebbe essere dotato di un elevato tenore di S.O.

1.5 **Tecnica colturale**

Tutte le informazioni riportate sono estrapolate dal Disciplinare di Produzione Integrata della Regione Marche del 25 luglio 2022.

1.5.1 *Scelta varietale*

La scelta varietale deve tener conto degli aspetti produttivi e il comportamento della varietà nei confronti delle principali avversità. Difatti, la scelta di varietà resistenti o tolleranti nei confronti di alcune malattie, prime fra tutti la peronospora del basilico, è un metodo di controllo genetico potenzialmente efficace (Djalali Farahani-Kofoet et al., 2014). Non è ammesso ricorrere a varietà geneticamente modificate. Le varietà di basilico consigliate per la regione Marche sono la varietà *Di Genova grande verde* e la varietà *italiano*.

1.5.2 *Rotazione*

L'intervallo minimo di semina tra due cicli di basilico è di due anni e non è consentito praticare il ristoppio.

1.5.3 *Lavorazioni e gestione del terreno*

Come lavorazione principale si consiglia un'aratura profonda di 40-50 cm da effettuarsi prima del periodo invernale, seguita da un affinamento del terreno a garanzia di un'emergenza uniforme e sviluppo omogeneo. È fortemente consigliata la creazione di un'accurata sistemazione idraulica del terreno che permetta lo sgrondo delle acque, evitando ristagni idrici e fenomeni di asfissia radicale.

1.5.4 Semina e sistema di impianto

Si consiglia la semina in pieno campo a partire da aprile, mentre in serra a partire da febbraio-marzo. In presenza di terreni molto soffici si consiglia di effettuare una rullatura in presemina. Si rimanda alla tabella seguente per le distanze e le densità d'impianto consigliate (Tabella 1-2). Il sesto d'impianto non può prescindere dalla tipologia del terreno e delle caratteristiche varietali.

Tabella 1-2: Distanze e le densità d'impianto consigliate (Fonte: Disciplinare di produzione integrata Regione Marche, 2022)

Epoca di semina	Distanza (cm)		Densità (n. piante/ha)	Quantità di seme (kg/ha)
	Tra le file	Sulla fila		
Da febbraio a marzo (in serra)	20-30	3-5	660.000-1.800.000	30-50
Da aprile a maggio (in pieno campo)				

1.5.5 Fertilizzazione

Considerando una produzione media di 16-24 t/ha, il Disciplinare di Produzione integrata del 2018 della regione Emilia-Romagna fornisce indicazioni sostanziali nella fertilizzazione dei tre elementi principali: azoto, fosforo e potassio.

La fertilizzazione azotata è uno tra i fattori principali che influiscono sul risultato produttivo. Occorre distribuire l'azoto nelle fasi di maggior necessità della coltura e frazionarlo in più distribuzioni se i quantitativi per singolo intervento sono elevati (>100 kg/ha per colture erbacee ed orticole). Questo al fine di ridurre al minimo le perdite per lisciviazione e massimizzare l'efficienza della concimazione. Secondo il disciplinare, l'apporto di azoto standard in situazione normale per una produzione media è pari a 100 kg/ha. Da questo valore, il quantitativo di azoto può essere sottratto o addizionato, in funzione di eventuali diverse condizioni. Si realizzano decrementi, in valore variabile, nelle seguenti situazioni:

- 30 kg/ha: se si prevedono produzioni inferiori a 16 t/ha;
- 20 kg: in caso di successione a leguminosa annuale;
- 20 kg/ha: in caso di elevata dotazione di sostanza organica;
- 20 kg/ha: in caso di apporto di ammendanti alla precessione.

Al contrario, si eseguono incrementi alla dose standard di N nelle seguenti condizioni:

- 30 kg: se si prevedono produzioni superiori a 24 t/ha;
- 20 kg: in caso di scarsa dotazione di sostanza organica;
- 15 kg: in caso di forte dilavamento invernale (pioggia superiore a 300 mm nel periodo dal 1° ottobre al 28 febbraio);
- 30 kg: in caso di successione ad un cereale con paglia interrata.

La distribuzione di P_2O_5 viene effettuata localizzata alla semina. In caso sia necessario distribuire un quantitativo maggiore a 50 kg/ha, il 50% deve essere distribuito in presemina. Sempre secondo il disciplinare, l'apporto di fosforo standard in situazione normale per una produzione media può variare nel seguente range, a seconda della dotazione fosfatica dei terreni: 70 kg/ha in caso di terreni con dotazione normale; 90 kg/ha in caso di terreni con dotazione scarsa; 50 kg/ha in caso di terreni con dotazione elevata. I decrementi di P_2O_5 da attuare alla dose standard sono realizzati nelle seguenti condizioni:

- 15 kg/ha: se si prevedono produzioni inferiori a 16 t/ha;
- 10 kg/ha: con apporto di ammendante alla coltura in preceSSIONE.

Sono possibilmente previsti anche incrementi di P_2O_5 nelle seguenti situazioni:

- 15 kg/ha: se si prevedono produzioni superiori a 24 t/ha;
- 10 kg/ha: in caso di basso tenore di sostanza organica nel suolo.

Infine, la distribuzione di K_2O avviene sempre in presemina. Nel disciplinare è specificato che l'apporto di potassio standard in situazione normale per una produzione media si può differenziare, a seconda della dotazione potassica dei terreni, nel seguente intervallo: 80 kg/ha in caso di terreni con dotazione normale; 120 kg/ha in caso di terreni con dotazione scarsa; 40 kg/ha in caso di terreni con dotazione elevata. Devono essere effettuati decrementi alla dose standard di K_2O nei seguenti casi:

- 15 kg/ha: se si prevedono produzioni inferiori a 16 t/ha;
- 30 kg/ha: con apporto di ammendante alla coltura in preceSSIONE.

Mentre, si effettua un'aggiunta di 15 kg/ha alla dose standard di K_2O se si prevedono produzioni superiori a 24 t/ha.

1.5.6 Controllo delle principali avversità

Le avversità che possono colpire il basilico sono diverse, prime fra tutte si annoverano le malattie di tipo crittogamico. Fra queste, le principali sono: peronospora (*Peronospora belbahrii*), oidio (*Erysiphe cichoracearum*), moria delle piantine (*Pythium* spp.), fusariosi (*Fusarium oxysporum* f. sp. *basilici*), marciume del colletto (*Rhizoctonia solani*), marciumi molli (*Sclerotinia* spp. - *Botrytis cinerea*).

In particolare, la peronospora del basilico (in inglese Basil Downy Mildew) è la principale malattia che colpisce la produzione di basilico nel mondo, causando ingenti perdite qualitative (La Placa et al., 2024). Il problema è stato segnalato in molti Paesi del mondo, in seguito alla sua prima comparsa nel 1932 in Uganda (La Placa et al., 2024). La prima manifestazione in Italia della malattia è stata riportata nel 2004 (Cohen, 2013). Attualmente la peronospora del basilico è diffusa in tutte le parti del mondo dove la pianta è coltivata (Cohen

et al., 2017). Sebbene le lamine fogliari siano la principale area infettata da *Peronospora belbahrii*, anche altri organi della pianta possono ospitare il patogeno, come steli, piccioli e semi, che vanno a costituire un importante fonte di inoculo (La Placa et al., 2024). In effetti, è proprio la trasmissione via seme che potrebbe essere responsabile della rapida diffusione della malattia a livello globale (Cohen et al., 2017). *Peronospora belbahrii* è un patogeno obbligato, cioè ha bisogno di un ospite per sopravvivere. Il ciclo di infezione e le esigenze ecologiche di *Peronospora belbahrii* sono parzialmente noti. Si ritiene che si diffonda comunemente per via asessuata, mentre sono disponibili solo pochi dati relativi al suo ciclo di vita sessuale (Cohen et al. 2013b). Il ciclo di vita asessuato inizia con la germinazione delle spore che necessita categoricamente di bagnatura fogliare per verificarsi; in particolare, affinché l'infezione avvenga sono necessarie almeno 6 h di bagnatura fogliare ma, con temperature comprese tra 15 e 20°C, sono sufficienti 4 h (Cohen et al., 2017). Le spore germinano con un singolo tubo germinale che produce un appressorio in grado di penetrare nella pianta attraverso aperture stomatiche o direttamente nella parete cellulare di tessuti intatti (Cohen et al., 2017). In seguito alla penetrazione, si ha la colonizzazione degli organi fogliari da parte del fungo che sviluppa il proprio micelio. La temperatura minima, ottimale e massima per la colonizzazione con fotoperiodo di 12 ore è stata rispettivamente di 8.5, 20-25 e 30°C (Cohen et al., 2017). Piante sane non trattate mostrano sintomi di malattia dopo 9-10 giorni dalla vicinanza con piante infette (Cohen et al., 2017). La sintomatologia della peronospora del basilico è riportata di seguito. Inizialmente la malattia si manifesta tipicamente con un ingiallimento della lamina superiore dei tessuti fogliari del basilico, di solito nella zona centrale della nervatura, con aree ingiallite di solito delimitate dalle nervature della foglia (Figura 1-5) (La Placa et al., 2024). I sintomi della peronospora del basilico su una pianta infetta possono essere scambiati per una carenza di nutrienti (es. carenza di azoto) in quanto essi si assomigliano soprattutto nelle fasi iniziali (Figura 1-6) (Wyenandt et al., 2010). Progressivamente, si sviluppano ampie lesioni clorotiche che evolvono in necrotiche, portando a una leggera curvatura delle foglie (La Placa et al., 2024). Le condizioni ambientali favorevoli per la sporulazione di *Peronospora belbahrii* sono: prolungata bagnatura delle foglie, elevata umidità, bassa circolazione d'aria, temperatura mite idealmente attorno ai 15-20 °C (Wyenandt et al., 2010). In particolare, un'umidità fogliare di almeno 24 ore dopo la comparsa dei sintomi permette la sporulazione ed è stato dimostrato che il numero di spore prodotte su foglie di basilico infette aumenta all'aumentare dell'UR circostante (Cohen et al., 2017). Con il verificarsi dei precedenti presupposti favorevoli, *Peronospora belbahrii* sporula sulla superficie abassiale (inferiore) delle foglie infette (Wyenandt et al., 2010) e si possono osservare sporangiofori e sporangi, con un caratteristico

sviluppo da grigio scuro a viola (Figura 1-7) (La Placa et al., 2024). Le spore prodotte dal fungo sono numerose e di colore marrone scuro-violaceo (Wyenandt et al., 2010). In condizioni di campo in Israele, la sporulazione si è verificata solo nelle notti di rugiada, in particolare, in primavera e in estate, quando le temperature notturne erano comprese tra 15 e 22°C (Cohen et al., 2017). Difatti, è stato verificato che la luce abbia un effetto inibitore della sporulazione con piante infette non sporulanti esposte a 24 ore di luce (Cohen et al., 2017).



Figura 1-5: Lamine superiori di foglie di basilico infette da peronospora. Le figure in alto indicano il livello di intensità della malattia su una scala visiva da 0 a 4 (Fonte: Ben-Naim, 2015)



Figura 1-6: Clorosi del basilico dolce 'Nufar' infettato dalla peronospora del basilico a sinistra e *O. americanum* x *O. basilicum* 'Blue Spice' sano e non infettato a destra (Fonte: Wyenandt, 2010)



Figura 1-7: Lamine inferiori di foglie di basilico infette da peronospora. Le figure in alto indicano il livello di intensità della malattia su una scala visiva da 0 a 4 (Fonte: Ben-Naim, 2015)

Nuove strategie per il controllo della malattia sono state studiate e sono in corso di sviluppo negli ultimi anni e comprendono metodi di tipo agronomico, fisico e genetico, oltre che il classico approccio di tipo chimico. Effettivamente, negli ultimi anni il criterio dominante di controllo della malattia è stato di tipo chimico, attraverso l'utilizzo di fungicidi. Naturalmente, questo ha portato allo sviluppo di resistenza da parte delle popolazioni del patogeno nei riguardi dei principi attivi adoperati contro di esse; quindi, composti chimici prima efficienti hanno iniziato a perdere la propria efficacia (La Placa et al., 2024). Ad esempio, il mefenoxam è un fungicida che è stato largamente usato su basilico in Italia negli ultimi anni, in quanto dotato di notevole efficacia sia preventiva sia curativa; esso ha permesso il contenimento della malattia per molto tempo. A partire dal 2013, si è iniziato a verificare un calo di efficacia di tale prodotto riportato da numerosi basicoltori italiani, in particolare liguri, che non lo ritenevano causato da impiego errato o da una distribuzione non corretta. In seguito a diverse ricerche, è stata dimostrata la perdita di efficacia del mefenoxam in seguito alla comparsa di resistenza negli agenti di peronospora (Pintore et al., 2016). Metodi di tipo agronomico per il controllo della malattia sono volti a minimizzare l'umidità e la bagnatura fogliare, condizioni cruciali sia per l'infezione che per la sporulazione. Ad esempio, alcuni suggerimenti sono: garantire sempre un adeguato drenaggio del terreno, diminuire la densità di impianto in modo da ridurre l'umidità andando ad aumentare il distanziamento delle piantine e adottare un sistema di irrigazione a goccia per evitare la bagnatura fogliare (La Placa et al., 2024). In generale, possono essere adottate altre accortezze agronomiche, come l'adozione di ampie rotazioni e la distruzione dei residui delle colture infette. Per quanto concerne il controllo della malattia con mezzi di tipo fisico, i seguenti non sono applicabili in pieno campo ma possono essere d'aiuto nella coltivazione in serra del basilico. Ad esempio, l'illuminazione notturna delle piante, in particolare dalle 19.00 alle 7.00, sopprime la sporulazione di *Peronospora*

belbahrii, come già citato prima, diminuendo l'incidenza della malattia (Cohen et al., 2017). Inoltre, anche l'arieggiamento notturno riduce la deposizione di rugiada sul fogliame, creando condizioni meno favorevoli allo sviluppo della peronospora (Cohen et al., 2017). Infine, soluzioni a livello genetico sarebbero l'uso di varietà tolleranti o resistenti alla peronospora del basilico.

Affrontando altre avversità del basilico, tra le batteriosi, possono verificarsi attacchi di *Erwinia* spp. e *Pseudomonas* spp. Invece, tra i fitofagi si ritrovano alcune nottue fogliari (*Spodoptera* spp., *Autographa gamma*, *Helicoverpa armigera*), afidi (*Myzus persicae*, *Macrosiphum euphorbiae*) e tripidi (*Frankliniella occidentalis*).

1.5.7 Irrigazione

L'irrigazione deve soddisfare il fabbisogno idrico della coltura evitando di superare con le irrigazioni la capacità di campo allo scopo di contenere lo spreco di acqua, la lisciviazione dei nutrienti, lo sviluppo di avversità e l'asfissia radicale. Il basilico richiede irrigazioni giornaliere nella fase di germinazione e irrigazioni frequenti ma non abbondanti successivamente. Il mantenimento di un livello di umidità costante nel suolo, con un contenuto idrico pari alla capacità di campo, sembra essere la strategia di irrigazione più adatta per la produzione di basilico rispetto all'irrigazione fluttuante; infatti, l'allungamento dell'intervallo tra un'irrigazione e l'altra, con il verificarsi di condizioni intermedie più siccitose nel terreno, potrebbe avere ripercussioni negative in termini di quantità e qualità del basilico prodotto (Nam et al., 2020). In realtà, ci si può avvalere di strategie di irrigazione diverse a seconda della destinazione finale del prodotto. Infatti, per la crescita della pianta e sviluppo di un'elevata biomassa, fattore principale nella produzione di basilico da industria o da consumo fresco, è richiesta un'irrigazione adeguata e sufficiente (125% della CIC); mentre, nel caso si coltivi il basilico per i suoi oli essenziali, si è visto come condizioni di siccità da lievi a gravi (75% e 50% della CIC rispettivamente) possano migliorare il contenuto fenolico nelle foglie (Nam et al., 2020).

L'irrigazione, inoltre, come già menzionato precedentemente, svolge un ruolo chiave nella gestione della peronospora del basilico. L'irrigazione localizzata evita la bagnatura fogliare della pianta e determina una minore incidenza e gravità delle malattie fogliari, oltre a un uso più efficiente dell'acqua, senza effetti significativi sulla produzione di basilico in termini qualitativi e quantitativi rispetto all'irrigazione per aspersione (La Placa et al., 2024). Sebbene l'irrigazione a goccia possa garantire uno stato di salute migliore delle piante, essa è di difficile applicazione nel basilico coltivato a pieno campo, dove il metodo più realistico rimane l'irrigazione per aspersione.

1.5.8 *Raccolta*

La raccolta del basilico avviene di norma con più sfalci nell'arco del ciclo colturale. La prima raccolta si effettua generalmente quando la pianta ha raggiunto i 35-40 cm, circa a due mesi dalla semina corrispondenti indicativamente ai primi giorni di giugno. I tagli successivi avvengono a cadenza di 15-20 gg di distanza gli uni dagli altri in relazione alla rapidità di sviluppo. La raccolta è solitamente meccanica con un taglio a circa 20 cm da terra che dovrebbe garantire la raccolta delle sole foglie verdi e fresche; gli sfalci successivi sono mediamente più alti per evitare di raccogliere parti vecchie della pianta che tendono a lignificare.

Capitolo 2

AGRICOLTURA DI PRECISIONE

2.1 Definizione e obiettivi

L'*Agricoltura di Precisione* (AdP) è un settore in rapido sviluppo che si trova all'intersezione tra l'industria agricola e quella tecnologica ed è considerata un'opportunità "rivoluzionaria" per nutrire più persone, affrontare le crisi ambientali e creare nuovi mercati (Duncan et al., 2021). La definizione di AdP è ancora in evoluzione e non ne esiste un'unica. Una definizione generica considera l'AdP come "quel tipo di agricoltura che aumenta il numero di decisioni (corrette) per unità di superficie per unità di tempo, con i relativi benefici netti" (McBratney et al., 2005). Effettivamente, l'AdP è nota anche come *Site-Specific Crop Management* (SSCM), cioè la gestione delle colture sito-specifica (Muhie, 2022). Questo è in accordo con quanto menzionato da Pierce e Nowak nel 1999 che consideravano come obiettivo cardine "quello di adattare gli input e le pratiche agricole a condizioni localizzate all'interno di un campo per fare la cosa giusta, nel posto giusto, al momento giusto, nella giusta maniera" (Pierce and Nowak, 1999). La gestione sito-specifica dell'AdP si basa sull'osservazione, la misurazione e la risposta alla variabilità delle colture con il fondamentale utilizzo di tecnologie e strumenti di analisi (Muhie, 2022). Quindi, uno degli aspetti per cui l'AdP differisce dall'agricoltura tradizionale è per il suo grado di gestione, in quanto essa è personalizzata per piccole aree di suddivisione dei campi, in opposizione con la gestione convenzionale dei campi come uniche unità (Shirish and Bhalerao, 2013)

L'AdP si concentra sulla redditività tradizionale dell'azienda agricola, con il fine di aumentare la quantità e/o qualità della produzione agricola a fronte di input uguali o ridotti. Quindi, essa incoraggia una gestione dell'azienda agricola atta a massimizzare i rendimenti dei fattori produttivi conservando le risorse (Muhie, 2022). Ad esempio, attraverso una gestione sito-specifica si può ridurre il consumo di pesticidi, prodotti fitosanitari e fertilizzanti, circoscrivendoli alle sole aree dove sono necessari. Allo stesso tempo, essa è combinata allo sviluppo sostenibile, con benefici di tipo ambientale e sociale (McBratney et al., 2005). I nuovi approcci da parte dell'agricoltura, di fatto, sono volti a fronteggiare la necessità di aumentare la produzione agricola per nutrire una popolazione in crescita e, contemporaneamente, gestire

la diminuzione della disponibilità di risorse naturali (Pignatti et al., 2015). I concetti di agricoltura di precisione e i concetti di sostenibilità sono fortemente legati (Bongiovanni and Lowenberg-Deboer, 2004). L'agricoltura sostenibile è definita infatti come “un sistema agricolo in grado di soddisfare gli attuali bisogni alimentari e tessili delle persone, senza compromettere la capacità delle generazioni contemporanee o future di acquisire i loro bisogni” (Muhie, 2022). L'AdP ha come obiettivo una gestione delle risorse più responsabile. In particolare, il fine è efficientare l'uso della risorsa acqua, riducendo gli sprechi e migliorando l'efficienza dell'irrigazione, prevenire la degradazione del suolo e ridurre l'inquinamento derivante da un uso massiccio e indifferenziato di composti chimici (Mandal, 2013).

2.2 Fasi fondamentali dell'Agricoltura di Precisione

Nel complesso, l'Agricoltura di Precisione può essere considerata come “l'applicazione di tecnologie e principi per gestire la variabilità spaziale e temporale associata a tutti gli aspetti della produzione agricola per migliorare la produzione e la qualità ambientale” (Shirish and Bhalerao, 2013). L'AdP ha tre componenti principali: informazioni, tecnologie e gestione (Shaheb, et al., 2022).

2.2.1 Raccolta ed acquisizione dei dati

Il primo aspetto fondamentale è il rilevamento, cioè la raccolta di dati ed informazioni dettagliate georeferenziate, al fine di poter valutare la variabilità presente in campo (Shirish and Bhalerao, 2013). Difatti, per aumentare l'efficienza delle risorse agricole è fondamentale fare ampio uso di dati ed informazioni. Diverse tecnologie sono in grado di controllare la variazione spaziale e temporale degli elementi della produzione agricola (Muhie, 2022) e i dati sulle colture e sul suolo sono raccolti osservando, misurando e rilevando informazioni con diversi tipi di sensori (Karunathilake et al., 2023). Possono essere forniti dati sulle condizioni climatiche, le condizioni del suolo, il fabbisogno di fertilizzanti, la disponibilità di acqua, lo stress da parassiti e malattie e altri parametri del campo (Karunathilake et al., 2023).

2.2.2 Processo decisionale ed esecuzione

Le scelte decisionali intraprese vengono eseguite basandosi sui dati e informazioni collezionate. L'AdP si basa su una gestione delle colture sito-specifica, proprio perché nella maggior parte dei casi i campi non sono omogenei, né sotto il punto di vista delle caratteristiche pedologiche, né della vegetazione, né spesso a livello micro-climatico (Karunathilake et al.,

2023). Fondamentale è l'uso delle tecnologie a tasso variabile che distribuiscono gli input agronomici (come fertilizzanti, acqua, sementi, prodotti fitosanitari, diserbanti) a tassi variabili seguendo le esigenze specifiche di ciascuna area di campo. Dal momento che i fattori di produzione non sono applicati a copertura totale a tassi uniformi, ma solo dove necessari, si ha la riduzione dell'inquinamento, un minore spreco di risorse, e un guadagno dal punto di vista economico (Karunathilake et al., 2023).

2.3 Tecnologie utilizzate

L'aspetto comune dell'AdP è proprio l'uso della tecnologia atto a migliorare le prestazioni economiche, attraverso un migliore utilizzo degli input, e mitigare i danni ambientali. Difatti, è proprio lo sviluppo, l'uso e la promozione di strumenti digitali e intelligenti che potranno permettere di sostenere le aspirazioni di sostenibilità del regime agricolo (Wolf and Buttel, 1996).

L'ingrediente chiave dell'AdP è l'informazione (Shirish and Bhalerao, 2013). La gestione agricola è essenzialmente resa più precisa grazie alle moderne tecnologie in quanto esse sono in grado di raccogliere dati sito-specifici e, di conseguenza, anche l'applicazione delle scelte gestionali è sito-specifica (Shirish and Bhalerao, 2013). L'uomo si è avvalso di tutta una serie di tecnologie che lo assistono nella raccolta dei dati (Karunathilake et al., 2023) e nel processo decisionale (Duncan et al., 2021), con lo sviluppo di un Sistema di Supporto alle Decisioni (Decision Support System o DSS) per la gestione dell'intera azienda agricola (Muhie, 2022). La ricerca tecnologica in ambito agricolo può portare ad una maggiore e graduale automazione dei processi di diagnosi e dei processi decisionali; ad esempio, nuove tecnologie in corso di sempre maggiore sviluppo nell'AdP sono *Big Data*, *Internet of Things (IoT)*, *Artificial Intelligence (AI)* e *Machine Learning (ML)* (Karunathilake et al., 2023).

Lo sviluppo del SSCM è stato reso possibile dalla combinazione del Global Positioning System (GPS) e del Geographic Information Systems (GIS), che hanno permesso di combinare la raccolta di dati in tempo reale con informazioni precise sulla posizione, portando alla manipolazione e all'analisi efficiente di grandi quantità di dati geospaziali.

2.3.1 *Global Positioning System*

Il GPS è un sistema di navigazione satellitare degli Stati Uniti. È uno dei sistemi globali di navigazione satellitare (*Global Navigation Satellite System* o GNSS) che fornisce informazioni di geolocalizzazione e di tempo a un ricevitore in qualsiasi punto della Terra. Il GPS fornisce informazioni continue sulla posizione in tempo reale mentre si è in movimento

(Mandal, 2013). È formato da una costellazione di 24 satelliti orbitanti intorno al pianeta, distribuiti in sei diverse orbite, ciascuna formata da quattro satelliti (Hofmann-Wellenhof, et al., 2012). La copertura globale è garantita in quanto qualunque punto terrestre è coperto da almeno quattro satelliti per 24 ore al giorno (Hofmann-Wellenhof, et al., 2012). Ogni satellite GPS è configurato per fornire agli utenti terrestri la loro posizione, espressa in latitudine, longitudine e altitudine (Hofmann-Wellenhof, et al., 2012). Ciascuno di essi trasmette segnali radio che forniscono la loro posizione, lo stato e l'ora precisa $\{t\}$, grazie agli orologi atomici di bordo; essi viaggiano nello spazio alla velocità della luce $\{c\}$, più di 299.792 km/secondo. Un dispositivo GPS sulla Terra riceve i segnali radio, annotando il loro esatto tempo di arrivo $\{t_2\}$. Poi calcola la sua distanza da ciascun satellite in vista applicando la formula $\text{distanza} = \text{velocità} \times \text{tempo}$, dove la velocità è $\{c\}$ e il tempo è la durata del viaggio del segnale nello spazio (la differenza tra l'ora di trasmissione del satellite $\{t_1\}$ e l'ora di ricezione del segnale $\{t_2\}$). Una volta che un dispositivo GPS conosce la sua distanza da almeno quattro satelliti, può utilizzare la geometria per determinare la sua posizione sulla Terra in tre dimensioni (“GPS Educational Poster,” 2013).

La disponibilità di informazioni precise sulla posizione in qualsiasi momento consente di mappare le misure del suolo e delle colture. Inoltre, i ricevitori GPS, portati sul campo o montati sugli attrezzi, consentono agli utenti di tornare in luoghi specifici per campionare o trattare quelle aree. Le principali applicazioni basate sul GPS in AdP sono: pianificazione delle aziende agricole, mappatura dei campi, guida dei trattori, campionamento del suolo, mappatura delle rese, applicazioni a tasso o rateo variabile (Mandal, 2013).

2.3.2 *Geographic Information System*

I sistemi informativi geografici (GIS) sono programmi informatici in grado di acquisire, archiviare, analizzare, visualizzare e gestire dati associati a una base cartografica. Sono in grado di assemblare e combinare in una serie di mappe stratificate dati geografici (spaziali) referenziati (coordinate, punti, linee, poligoni che rappresentano oggetti fisici sulla superficie terrestre) e dati attributivi, cioè tutte quelle informazioni non spaziali associate alle informazioni geografiche (Mandal, 2013). Le mappe digitali create dai GIS vengono utilizzate in numerosi campi applicativi, tra i quali anche l'ambito agricolo. Le principali funzioni dei GIS in agricoltura possono essere legate alla memorizzazione di vari strati di informazioni georeferenziate quali resa, caratteristiche pedologiche, stato della coltura, dati rilevati a distanza (Mandal, 2013).

2.3.3 *Remote Sensing*

Il remote sensing o telerilevamento, nel suo senso più ampio e generale, è l'acquisizione di dati su un oggetto senza toccarlo (Fussell and Rundquist, 1986). Una definizione molto più precisa ed esplicativa spiega il remote sensing come segue:

«Il telerilevamento è la registrazione senza contatto di informazioni dalle regioni ultraviolette, visibili, infrarosse e a onde medie dello spettro elettromagnetico per mezzo di strumenti come scanner e telecamere situati su piattaforme mobili, come aerei o veicoli spaziali, e l'analisi delle informazioni acquisite per mezzo di tecniche di fotointerpretazione, interpretazione delle immagini e sistemi di elaborazione delle immagini all'avanguardia.» (Fussell and Rundquist, 1986)

Attraverso questa tecnologia vengono raccolti dati di immagine da piattaforme di telerilevamento aereo come satelliti e velivoli, compresi gli UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), provvisti di telecamere e sensori (Shaheb, et al., 2022). I dati spettrali rilevati a distanza forniscono uno strumento per valutare il comportamento e le caratteristiche della vegetazione in campo e del suolo stesso. La tecnologia è molto importante soprattutto per la rilevazione di condizioni di stress per le piante che possono essere legate a risorse idriche, sostanze nutritive, presenza di malattie o altri problemi fitosanitari (Shirish and Bhalerao, 2013).

2.3.4 *Proximal Sensing*

Il proximal sensing è l'insieme di tecniche che consistono nel misurare le proprietà ottiche (radiazione elettromagnetica riflessa o emessa) della vegetazione e del suolo utilizzando dispositivi (sensori di campo) senza contatto posizionati vicino alla pianta o al suolo (Julitta, 2015). Per essere definito proximal sensing, il rilevatore del sensore deve essere in prossimità del terreno o della pianta ad una distanza non superiore ai 2 metri (Sparks, 2011).

2.3.5 *Variable Rate Application Technology*

Nella tecnologia di applicazione a rateo variabile (VRT), input come fertilizzanti, acqua, o prodotti fitosanitari sono applicati a tassi variabili. Significa che viene realizzato il tasso di applicazione ottimale per ciascuna area, in risposta a esigenze specifiche di ciascuna zona di campo (Karunathilake et al., 2023). Un'applicazione uniforme dei fattori di produzione non consente un'efficienza o redditività ottimale, in quanto nella maggior parte dei casi si verifica una notevole variabilità pedologica e colturale all'interno dello stesso campo (Sawyer, 1994).

2.3.6 *Big Data*

Le varie tecnologie equipaggiate con sensori sopra menzionate producono grandi quantità di informazioni. Questo implica la necessità di raccogliere, archiviare, modellare e analizzare su larga scala enormi quantità di dati provenienti da varie fonti eterogenee (Kamilaris et al., 2017). Tutto questo è permesso dalla scienza nota come “*Data science*”. L'analisi dei Big Data è già stata applicata con successo in diversi settori, come quello bancario, assicurativo o della comprensione del comportamento degli utenti online (Kamilaris et al., 2017). Se usata anche in agricoltura, può consentire la scoperta di correlazioni, schemi e tendenze da grandi quantità di dati, con creazioni di previsioni e raccomandazioni che possono aiutare gli agricoltori (Karunathilake et al., 2023).

2.3.7 *Internet of Things*

Una definizione comune ritiene l'*Internet of Things* (IoT) una vasta rete di dispositivi fisici di ogni tipo e dimensione (veicoli, smartphone, elettrodomestici, telecamere) interconnessi che raccolgono e scambiano dati e informazioni sulla base di vari protocolli stabiliti (Senoo et al., 2024) per ottenere riorganizzazioni intelligenti, posizionamento, tracciamento, sicurezza, controllo e persino monitoraggio e aggiornamento online in tempo reale (Patel et al., 2016). Quindi, l'IoT si occupa principalmente di raccolta dati e controllo remoto, facilitando la gestione a distanza di un'ampia gamma di applicazioni, comprese quelle per l'agricoltura (Senoo et al., 2024). Il monitoraggio in agricoltura deve essere idealmente costante, motivo per cui l'implementazione di questa tecnologia in agricoltura è considerata una soluzione ottima (Farooq et al., 2020). Le principali applicazioni in agricoltura di precisione fanno riferimento a monitoraggio del bestiame, serre intelligenti e monitoraggio delle condizioni meteorologiche (Karunathilake et al., 2023). Tutte queste applicazioni vengono monitorate con l'ausilio di diversi dispositivi di rilevamento basati sull'IoT che aiutano gli agricoltori a raccogliere dati che vengono poi caricati su sistemi di supporto informativo in cloud (Karunathilake et al., 2023). Questi dispositivi sono in grado di interagire tra loro e cooperare con altri, attraverso connessioni wireless e schemi di indirizzamento unici, per raggiungere obiettivi comuni (Patel et al., 2016). Ad esempio, esistono diversi sensori IoT per la temperatura, l'umidità, l'intensità della luce, la pressione, i livelli di CO₂, le infestazioni di insetti, il fogliame, l'intensità della luce solare e la velocità del vento (Karunathilake et al., 2023).

2.3.8 Artificial Intelligence

Secondo la definizione del Parlamento europeo, l'Intelligenza artificiale (AI) è “l'abilità di una macchina di mostrare capacità umane quali il ragionamento, l'apprendimento, la pianificazione e la creatività” (Guillot, 2023). Il sistema dell'AI prevede l'acquisizione ed elaborazione di dati ed informazioni, sulla base di opportuni modelli di obiettivi, e un ambiente hardware e software idonei a garantire l'esecuzione delle elaborazioni. L'AI è principalmente usata per previsioni e decision-making (Senoo et al., 2024) ma, come definito da Treccani, ha interesse anche nella percezione dell'ambiente (attraverso l'elaborazione di segnali provenienti da sensori di vario tipo per estrarre gli elementi utili alle decisioni o alla comprensione), nell'apprendimento, con modifica del comportamento nel corso del tempo, e nella risoluzione di problemi (Amigoni et al., 2008).

Dell'AI fa parte anche il Machine Learning (ML). Il ML è definito come “una tecnica scientifica in cui i computer imparano e migliorano autonomamente elaborando dati provenienti da interazioni del mondo reale” (Senoo et al., 2024). Quindi, le prestazioni dell'AI possono essere migliorate attraverso l'apprendimento automatico da parte del ML (Karunathilake et al., 2023). Le applicazioni del ML in AdP sono notevoli: previsione e stima del rendimento delle colture, rilevamento di parassiti e malattie, rilevamento e gestione di erbe infestanti, valutazione della salute del suolo, gestione dell'irrigazione, rilevamento, conteggio e raccolta dei frutti (Karunathilake et al., 2023).

Capitolo 3

REMOTE SENSING E CAMERE SPETTRALI

Come già accennato nel Capitolo 2, il remote sensing o telerilevamento è una tecnica che permette di raccogliere informazioni su un oggetto o un'area della superficie terrestre senza entrare in contatto diretto con essi. Questo è permesso dalla rilevazione e l'analisi della radiazione elettromagnetica riflessa o emessa dagli oggetti, utilizzando sensori installati su piattaforme aeree (come droni, aeroplani) o satellitari, ai quali giunge l'energia elettromagnetica dopo l'interazione con la superficie indagata (Khorram, et al., 2012). Difatti le applicazioni di telerilevamento in agricoltura si basano sull'interazione della radiazione elettromagnetica con il suolo o il materiale vegetale. I dati raccolti dai sensori sono trasformati in immagini digitali e interpretati per ricavare informazioni. È necessaria un'elaborazione sofisticata delle immagini per estrarre tutte le informazioni rilevanti contenute nelle bande spettrali. Le informazioni raccolte, successivamente alla loro elaborazione e processamento, consentono di ottenere mappe di prescrizione in cui le aree del campo sono suddivise in caratteristiche sito-specifiche.

3.1 Introduzione ai principi base del telerilevamento

3.1.1 *Lo spettro elettromagnetico*

Il principio base del telerilevamento è la radiazione elettromagnetica, ovvero un'onda che si propaga attraverso lo spazio alla velocità della luce ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s nel vuoto). Essa è così denominata in quanto formata sia da onde elettriche che magnetiche, sempre perpendicolari tra loro e perpendicolari alla direzione di propagazione delle onde (Figura 3-1) (Zwinkels, 2015). Lo spettro elettromagnetico è la rappresentazione grafica delle radiazioni elettromagnetiche a seconda della loro lunghezza d'onda (Figura 3-2). Per lunghezza d'onda si intende la distanza tra due creste successive di un'onda elettromagnetica, mentre con frequenza (Hz) si definisce il numero di onde che si registrano in un secondo. Le bande dello spettro elettromagnetico sono sette: raggi gamma, raggi X, raggi ultravioletti, luce visibile,

infrarosso, microonde e onde radio, tutte caratterizzate da specifiche lunghezze d'onda (Tabella 3-1).

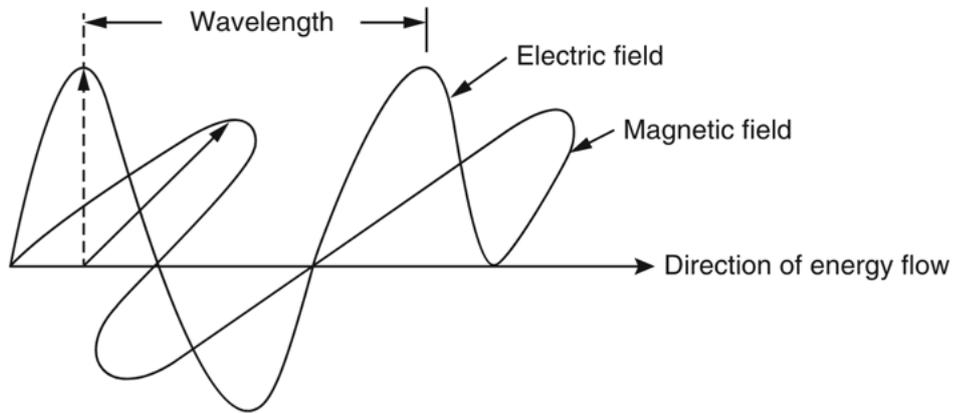


Figura 3-1: Rappresentazione della radiazione elettromagnetica (Fonte: Zwinkels, 2015)

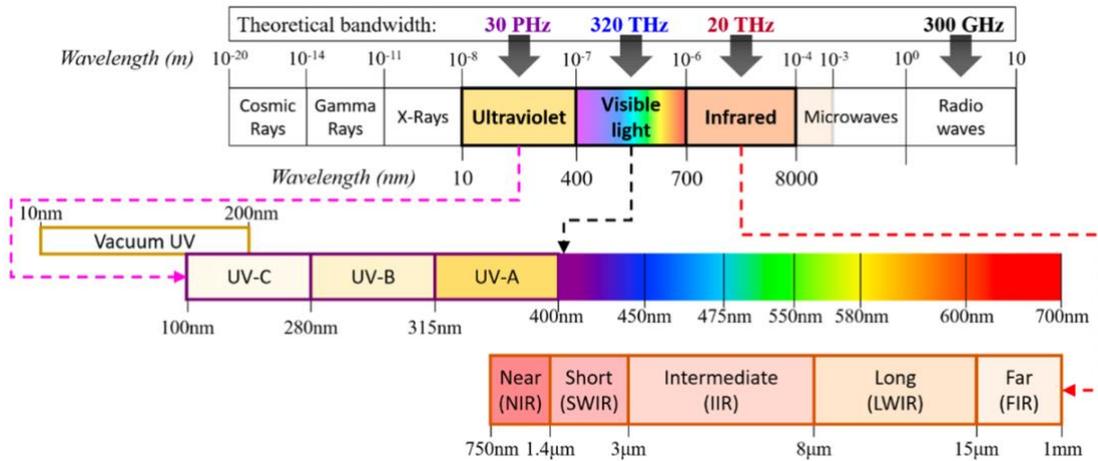


Figura 3-2: Spettro elettromagnetico (Fonte: Cahyadi, 2020)

Tabella 3-1: Intervallo di lunghezze d'onda delle onde elettromagnetiche (Fonte: Zwinkels, 2015)

Intervallo di lunghezza d'onda	Onda elettromagnetica
10^{-14} - 10^{-11} m	Raggi gamma
10^{-11} - 10^{-8} m	Raggi X
10-400 nm	Raggi ultravioletti
400-700 nm	Luce visibile
700 nm to 1 mm	Infrarosso
1 mm to 1 cm	Microonde
>1 cm	Onde radio

In particolare, la luce visibile (VIS), detta anche radiazione fotosinteticamente attiva (Photosynthetically Active Radiation, PAR), comprende tutti i colori visibili all'occhio umano. Vi sono intervalli di lunghezza d'onda per ciascun colore: violetto (390-450 nm),

indaco (450-475 nm), blu (476-495 nm), verde (495-570 nm), giallo (470-590 nm), arancione (590-620 nm) e rosso (620-760 nm). Inoltre, anche la regione spettrale dell'infrarosso (IR) è ulteriormente suddivisa in: IR vicino o NIR (*Near InfraRed*) con lunghezze d'onda comprese tra 0.78 e 2.5 μm ; IR medio o MIR (*Mid InfraRed*) con lunghezze d'onda comprese tra 2.5 e 50 μm ; IR lontano o FIR (*Far InfraRed*) con lunghezze d'onda comprese tra 50 e 1000 μm .

3.1.2 *Interazione della radiazione elettromagnetica con la superficie terrestre*

La luce solare che colpisce le colture o il suolo può essere riflessa, assorbita o trasmessa, a seconda della lunghezza d'onda della luce e delle caratteristiche del corpo a contatto (Li et al., 2010). L'assorbimento è la capacità da parte di un materiale di assorbire l'energia associata alla radiazione elettromagnetica che si propaga all'interno di esso. L'assorbanza o coefficiente di assorbimento è il rapporto tra radiazione assorbita e radiazione incidente. Nel caso della trasmissione, la radiazione fuoriesce dal materiale dopo averlo attraversato. La radiazione riflessa viene assorbita in maniera selettiva su determinate lunghezze d'onda e riemessa in lunghezze d'onda diverse. La riflettanza o coefficiente di riflessione è il rapporto tra radiazione riflessa e radiazione incidente; il valore varia da 0 a 1 dove un valore pari a "0" indica che la superficie assorbe completamente la radiazione, mentre un valore pari a "1" indica che la luce viene completamente riflessa.

3.1.3 *Firma spettrale della vegetazione e del suolo*

Ogni superficie ha particolari proprietà di riflessione della radiazione magnetica a seconda della composizione e della natura dei materiali. La tecnica di telerilevamento più comunemente usata si basa proprio sulla misurazione della riflettanza spettrale di un corpo in funzione di diverse lunghezze d'onda. Le immagini delle curve di riflettanza dipendenti dalla lunghezza d'onda costituiscono la "firma spettrale" di ciascun corpo, considerata come un'impronta digitale unica, in quanto ciascuna superficie si comporta diversamente nei confronti della radiazione elettromagnetica (Li et al., 2010). È possibile discriminare in un'immagine un gran numero di elementi (suolo, vegetazione, acqua ecc.) e di riconoscere le loro caratteristiche analizzando il diverso comportamento spettrale nelle varie lunghezze d'onda. Oltre che dal materiale, l'insieme dei valori di riflettanza dipende dall'irraggiamento (flusso solare in entrata), dalla geometria di osservazione del sensore e dai fattori ambientali (Prithvish, et al., 1998).

La Figura 3-3-3 rappresenta una tipica firma spettrale della vegetazione verde. Nella regione del visibile, forti assorbimenti sono evidenti a circa 450 nm e 660 nm, cioè corrispettivamente le regioni del blu e del rosso, corrispondenti alle lunghezze d'onda

assorbite dalla clorofilla. Mentre è visibile un picco di riflettanza in corrispondenza della lunghezza d'onda del verde (490-550 nm) (Prithvish, et al., 1998). Successivamente, vi è un marcato aumento della riflettanza nel passaggio dalla regione del visibile a quella del vicino infrarosso a circa 700nm. In tutta la regione del NIR, si osserva un caratteristico plateau nella firma spettrale, arrivando a circa il 45-50% di riflettanza, controllata in larga misura dalla struttura interna delle foglie delle piante. Essendo le strutture interne diverse per ogni specie, si può manifestare una diversa quantità di riflettanza nel NIR a seconda del diverso tipo di vegetazione. La risposta spettrale della vegetazione verde nella regione dell'infrarosso medio è dovuta principalmente alle bande di assorbimento dell'acqua (Prithvish, et al., 1998). Quindi, le firme spettrali sono indicatrici importanti dello stato della pianta. Se la pianta è in stress, fa registrare una maggior riflettanza, soprattutto nelle regioni del rosso e blu dello spettro del visibile, dal momento che sono presenti meno pigmenti nella foglia. In stress idrico si ha un innalzamento generale dei valori di radiazione riflessa, maggiore nelle bande di assorbimento dell'acqua.

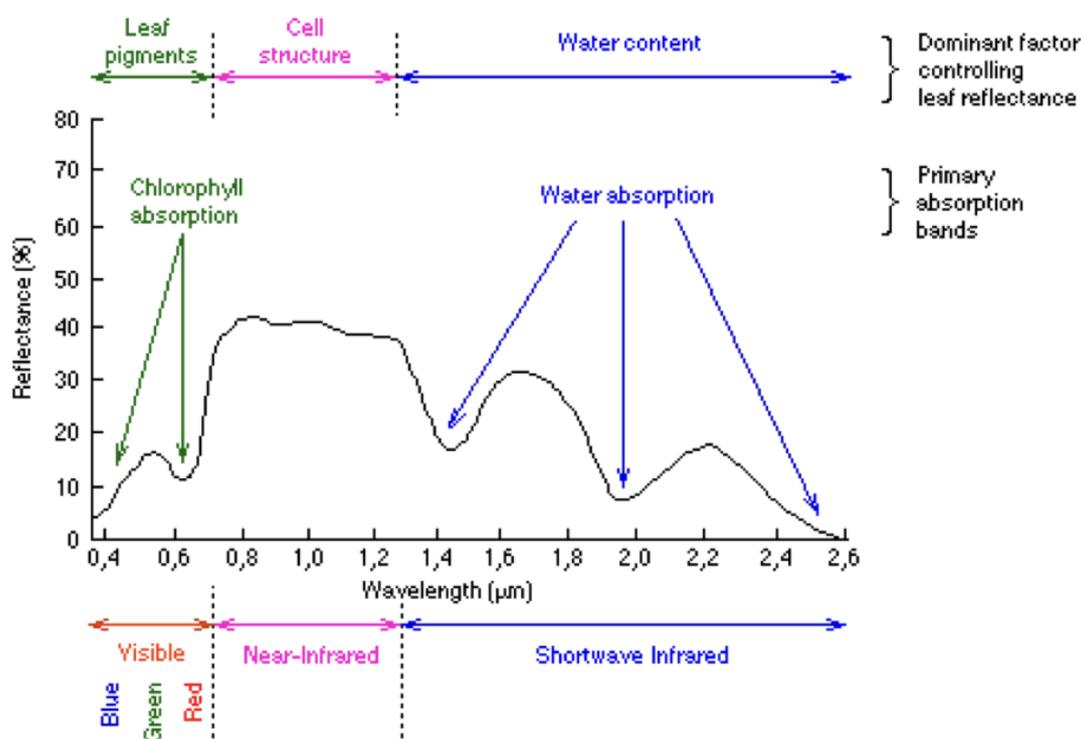


Figura 3-3: Tipica firma spettrale della vegetazione (Fonte: Randive, 2019)

Anche il suolo possiede una propria firma spettrale (Figura 3-4). La tendenza generale e la natura della firma del suolo sono simili, ma le proprietà del suolo influenzano l'ampiezza della curva di riflettanza. Le proprietà del suolo più importanti che influenzano le caratteristiche spettrali sono la tessitura del suolo, il contenuto di umidità, il contenuto di materia organica, il colore, i minerali argillosi dominanti ecc. (Prithvish, et al., 1998).

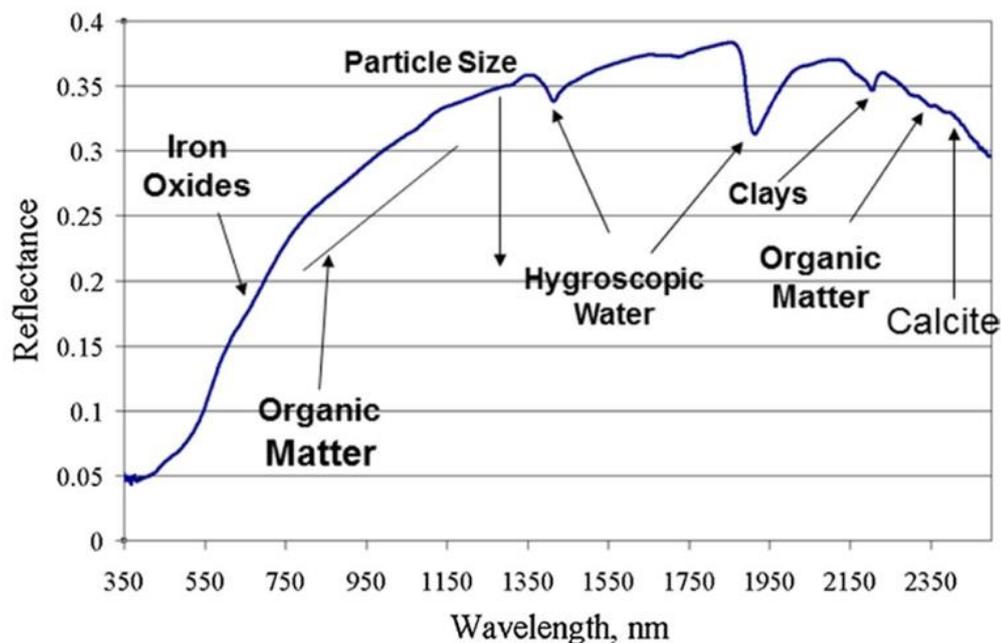


Figura 3-4: Firme spettrali del suolo (Fonte: Chabrilat, 2019)

3.2 Sensori utilizzati nel remote sensing

I sensori permettono il telerilevamento attraverso la rilevazione della radiazione elettromagnetica riflessa o emessa dagli oggetti o dalle superfici. I dati raccolti dai sensori sono trasformati in immagini digitali e interpretati per ricavare informazioni. In particolare, questi sensori creano immagini spettrali che sono rappresentazioni tridimensionali (3D), con due dimensioni spaziali e una dimensione spettrale.

3.2.1 Strumenti attivi

I sensori di riflettanza sono classificati come *attivi* se possiedono una fonte di luce propria. Essi, quindi, emettono un segnale luminoso verso il bersaglio di interesse e ne misurano la radiazione riflessa. Essi possono essere usati in qualsiasi condizione di luce, in quanto sono in grado di distinguere la radiazione riflessa dalla propria sorgente di luce da quella riflessa dalla radiazione ambientale. Un esempio di strumenti attivi sono il RADAR e il LiDAR.

Il sistema RADAR (Radio Detection and Ranging) consiste nell'utilizzare le onde radio per rilevare la presenza di oggetti e individuarne la posizione; attualmente, può classificare o identificare bersagli e persino produrre immagini di oggetti, ad esempio la mappatura del terreno da un satellite (Kingsley, et al., 1999). Il principio del radar è che un trasmettitore invia un segnale radio che si disperde su tutto ciò che incontra e una piccola quantità di energia viene dispersa verso un ricevitore radio.

Il sistema LiDAR (Light Detection and Ranging) consente di misurare la distanza tra il punto di emissione di un impulso di luce laser (piano di luce pulsata) e un bersaglio. Si possono ottenere la posizione e le misure (come altezza massima, diametro, area, estensione superficiale) dell'elemento, e si possono creare modelli tridimensionali degli oggetti.

3.2.2 *Strumenti passivi*

I sensori di riflettanza sono classificati come *passivi* nel caso in cui la fonte di radiazione incidente, al fine di acquisire immagini al di sopra di una superficie, provenga dalla radiazione elettromagnetica solare. Essi hanno solitamente due fotorivelatori, uno misura la radiazione incidente sopra la coltura, e l'altro misura la radiazione riflessa dalla copertura vegetale.

Gli strumenti di telerilevamento passivi sono sistemi ottici e termici. Gli strumenti ottici, al fine di collezionare immagini o dati provenienti dalla superficie terrestre, catturano la radiazione elettromagnetica solare riflessa dalla superficie terrestre, nelle lunghezze d'onda del visibile, vicino infrarosso (NIR) e infrarosso a onde corte (SWIR). I sensori termici, invece, rilevano la radiazione elettromagnetica nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso termico. Questa radiazione termica, tipicamente nella banda dell'infrarosso (tra 8 e 14 micrometri), è emessa da tutti gli oggetti che abbiano una temperatura superiore allo zero assoluto, secondo la legge di Stefan-Boltzmann.

3.3 **Tipologie di risoluzione dei sensori**

Gli strumenti che compiono telerilevamento sono caratterizzati da una risoluzione spaziale, spettrale e temporale. La risoluzione spaziale si riferisce all'area più piccola che può essere distinta nell'immagine ed è direttamente correlata alla dimensione del pixel dell'immagine. La risoluzione spettrale si riferisce al numero e all'ampiezza delle porzioni dello spettro elettromagnetico misurate dal sensore. La risoluzione temporale si riferisce alla frequenza con cui una piattaforma di telerilevamento può fornire misurazioni di un'area.

3.4 **Telerilevamento con sensori ottici nel dominio del visibile, NIR e SWIR**

A seconda della risoluzione spettrale degli strumenti, esistono diversi tipi di sensori ottici spettrali.

3.4.1 *Camere multispettrali*

Questi sensori ottici acquisiscono immagini con poche bande (generalmente meno di 10) discrete e solitamente non contigue. Quindi, la risoluzione spettrale di questi sensori è data da

un numero inferiore di bande larghe. Esse creano un insieme di punti di dati isolati per ogni pixel in quanto acquisiscono informazioni solamente in lunghezze d'onda specifiche (Figura 3-5).

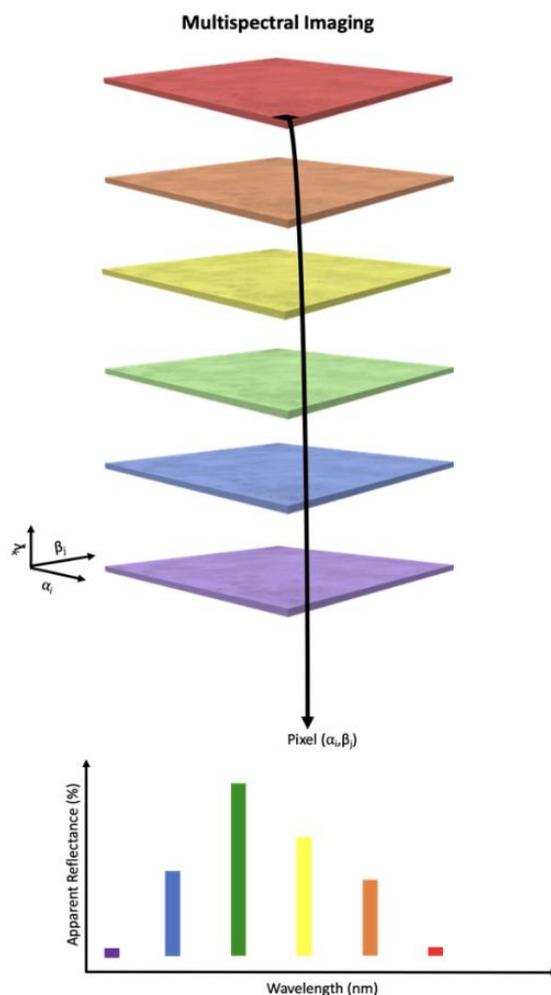


Figura 3-5: *Imaging multispettrale* (Fonte: Vines, 2022)

3.4.2 Camere iperspettrali

I sensori ottici iperspettrali acquisiscono immagini con decine o centinaia di bande d'onda contigue più o meno strette, definite "narrow band". La risoluzione spettrale di questi sensori è data da tantissime bande ma con ampiezza ridotta. Esse creano uno spettro quasi continuo per ogni pixel (Figura 3-6) e forniscono informazioni più aderenti allo spettro completo. L'alta risoluzione spettrale del sistema produce dati spettrali dettagliati che possono essere utilizzati per ottenere informazioni approfondite e accurate sulle caratteristiche delle colture o dei campi (Li et al., 2010).

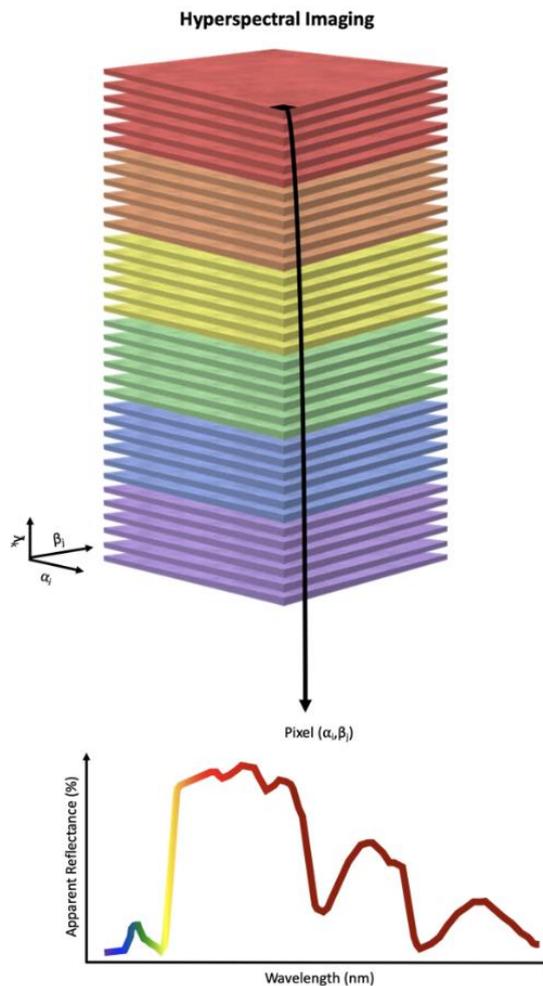


Figura 3-6: *Imaging iperspettrale* (Fonte: Vines, 2022)

3.4.3 Camere RGB

L'imaging RGB si basa sulla misurazione primaria della riflettanza nelle bande spettrali rosso (R), verde (G) e blu (B). Tecnicamente è più semplice e ampiamente accessibile, tuttavia, il telerilevamento delle piante basato sulla misurazione della riflettanza in entrambe le bande spettrali NIR e della luce visibile è spesso in grado di mostrare meglio le caratteristiche della pianta rispetto al rilevamento basato solo sulle bande spettrali visibili (Kior et al., 2024).

3.5 Tipologie di piattaforme dei sensori

I sensori ottici possono essere montati su satelliti, per monitorare grandi aree agricole, o su UAV, come droni, per l'acquisizione di immagini ad alta risoluzione di aree specifiche. Sebbene le prime misurazioni siano state effettuate dai satelliti, i droni stanno iniziando a dominare questa applicazione. Possono essere equipaggiati con una varietà di carichi utili come

telecamere visibili, NIR e termiche, immagini multispettrali e iperspettrali e ricevitori GPS (Bogue, 2017). Oltre ai sistemi specializzati considerati in precedenza, la maggior parte delle macchine agricole è oggi equipaggiata con una serie di sensori. Ad esempio, alcune aziende hanno sviluppato sistemi di sensori “on-the-go” per il monitoraggio e la mappatura di vari parametri chiave del suolo (Bogue, 2017).

3.6 Indici di vegetazione

Gli indici di vegetazione (Vegetation Index o VI) sono indici che permettono di definire una serie di relazioni quantitative fra dati telerilevati e parametri della vegetazione, successivamente allo studio del comportamento spettrale della vegetazione. Le immagini e i dati acquisiti tramite telerilevamento sono alla base del calcolo degli indici vegetazionali. Essi possono essere classificati in due gruppi: *slope-based* VI o basati sulla pendenza e *distance-based* VI o basati sulla distanza. I *slope-based* VI sono combinazioni aritmetiche che si concentrano sulla risposta spettrale della vegetazione nelle porzioni di lunghezze d’onda del rosso e del NIR e sono espressi generalmente come rapporti di somme e differenze di misure di riflettanza a diverse lunghezze d’onda. I *distance-based* VI definiscono il grado di vegetazione presente misurando la differenza della riflettanza di ogni pixel rispetto alla riflettanza del terreno nudo, in base al fatto che con l’aumento della vegetazioni il suolo viene progressivamente oscurato (Silleos et al., 2006).

Uno degli indici vegetazionali più utilizzato è l’NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), il quale descrive il livello di vigoria della coltura. In base alla classificazione fatta in precedenza, esso è basato sulla pendenza e viene calcolato come il rapporto tra la differenza e la somma delle radiazioni riflesse nel vicino infrarosso (NIR o R_{810}) e nel rosso (R_{660}). Assume valori tra -1 e 1, in particolare inferiori a 0 per l’acqua, poco superiori a 0 per i suoli e tra 0.4 e 0.7 per la vegetazione, mentre solo vegetazioni molto dense arrivano a 0.8.

$$NDVI = \frac{NIR - R_{660}}{NIR + R_{660}}$$

L’NDVI è ampiamente utilizzato nella stima della resa delle colture (Panda et al., 2010). Molti altri indici spettrali diversi dall’NDVI sono disponibili per l’uso nell’agricoltura di precisione e per la stima della biomassa vegetale. Alcuni indici vegetazionali sono in grado di compensare gli effetti dei fattori di disturbo, come il fondo del suolo e le condizioni atmosferiche, che incidono sulla riflettanza spettrale della vegetazione (Panda et al., 2010).

Capitolo 4

SPETTROSCOPIA DI CAMPO

4.1 Principio di base

La spettroscopia di campo è la tecnica che raccoglie dati spettrali direttamente in campo, occupandosi dello studio delle relazioni tra le informazioni spettrali degli oggetti e i loro attributi biofisici nel loro ambiente naturale. L'applicazione più importante di questa tecnica è nel telerilevamento, dove viene utilizzata per calibrare o verificare i dati rilevati. La tecnica evita il prelievo di campioni e la successiva analisi in laboratorio, mentre essa avviene direttamente in situ, fornendo una visione accurata delle condizioni reali. Difatti, spesso le condizioni ricreate in laboratorio non riescono a simulare la radiazione naturale efficientemente. Inoltre, spesso può essere complicato prelevare campioni effettivamente rappresentativi della popolazione, trasportarli in laboratorio e conservarli in maniera ottimale.

Nella Figura 4-1 è mostrata la geometria dell'ambiente di campo. Le posizioni della sorgente di radiazione, generalmente il Sole, e del sensore ottico sono determinate da due angoli ciascuno. Un angolo è quello zenitale, formato con la normale al piano e un secondo angolo, detto angolo azimutale, è contenuto nel piano orizzontale ed è definito da una direzione di riferimento. Questi angoli sono importanti perché da essi dipende la radianza, cioè la quantità di radiazione elettromagnetica riflessa da una superficie di area unitaria e diretta verso un angolo solido unitario in una direzione indicata.

La *funzione di distribuzione bidirezionale della riflettanza (BRDF)* descrive come la luce viene riflessa da una superficie al variare della direzione del raggio incidente e di osservazione. Il termine bidirezionale in questo contesto si riferisce alle due direzioni coinvolte nella misura, una che identifica la posizione della sorgente e una per la posizione del sensore. La BRDF è una funzione a quattro variabili, due variabili sono l'angolo azimutale e zenitale del raggio incidente e le altre due sono l'angolo azimutale e zenitale del raggio riflesso. Per ottenere la misura della radianza, l'obiettivo sarebbe ottenere la misura della BRDF ma sarebbe

necessario misurare la riflettanza in tutte le possibili posizioni della sorgente e del sensore, non possibile nell'ambiente di campo. Per questo motivo, nella pratica, viene utilizzato un pannello standard, cioè un pannello bianco assunto come diffusore perfetto. Per prima cosa viene misurata la radianza del pannello, di seguito viene misurata la radianza del bersaglio tramite una proporzione che considera la radianza del pannello. Essa viene misurata nelle stesse condizioni di illuminazione e nella stessa geometria del bersaglio.

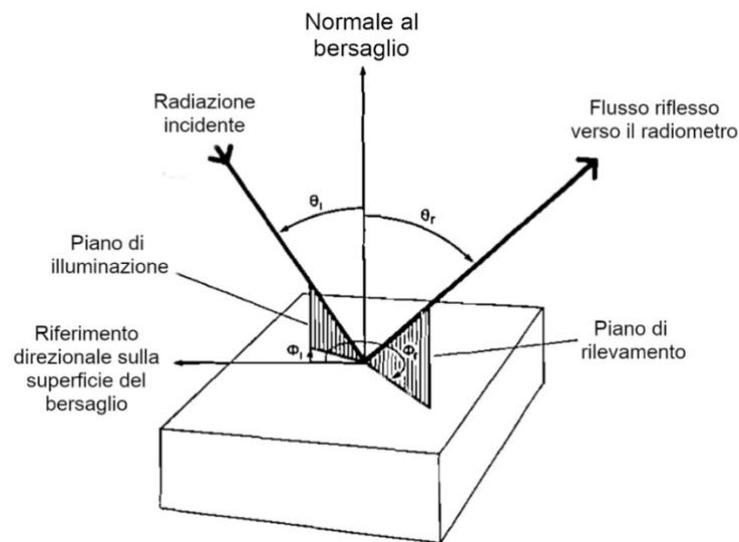


Figura 4-1: Geometria dell'ambiente di campo (Fonte: Milton, 1986)

4.2 Condizioni di misurazione da associare ai dati raccolti

I dati che vengono raccolti durante la misurazione devono essere associati a delle informazioni e condizioni di misurazione (Edward J. Milton, 2009).

- posizione del sito (latitudine e longitudine) e posizione dei singoli punti di campionamento;
- altitudine del sito (m);
- ora della misurazione, con precisione almeno del minuto;
- condizioni del cielo nel momento delle misure, in particolare il tipo e la quantità di copertura nuvolosa, se presente;
- nome dello strumento utilizzato e numero di serie;
- presenza di ombre e le caratteristiche dello sfondo come la riflettanza del suolo;
- il tipo di pannello di riferimento, i dettagli della sua calibrazione (spettrale e angolare) e la relazione tra questa e uno standard nazionale riconosciuto;
- la geometria di osservazione e se lo strumento è stato tenuto in mano o sostenuto da un palo o treppiede;

- l'altezza dello strumento dal suolo;
- l'altezza dello strumento sopra la superficie superiore dell'obiettivo al suolo;
- la dimensione effettiva dell'area di campionamento sulla superficie del bersaglio;
- le curve di risposta spettrale di ogni banda campionata;
- l'intervallo di campionamento e la larghezza di banda istantanea.

4.3 Fattori che influenzano le misure

Alcuni elementi devono essere tenuti in considerazione in campo, al fine di garantire una migliore interpretazione dei valori di riflettanza di una copertura vegetale. Difatti, la variabilità introdotta nei dati di riflettanza da fattori non vegetativi riduce l'utilità delle tecniche.

Per prima cosa, si deve tenere conto delle caratteristiche architettoniche delle singole piante, poiché, sulla base di questo, si verificano diversi valori di riflettanza della copertura vegetale (PINTER Jr. et al., 1985). Piante con livelli simili di biomassa verde e somiglianze nell'area delle foglie verdi, hanno dimostrato livelli di riflettanze notevolmente diverse in campo, dal momento in cui le piante variano notevolmente nell'inclinazione e nelle dimensioni delle foglie. Si è visto come le riflettanze in tutte le bande erano solitamente più alte per le chiome planofile, con foglie disposte orizzontalmente al terreno, che per quelle erettofile, con foglie quasi perpendicolari al suolo. Gli spettri di una singola foglia misurati in laboratorio con uno spettrofotometro non hanno rivelato differenze legate alla cultivar e hanno sostenuto la tesi che le riflettanze fossero fortemente influenzate dalle caratteristiche architettoniche della chioma.

Inoltre, altri cambiamenti nella radiazione sono dovuti all'atmosfera. Effetti importanti si registrano quando le nuvole passano davanti al Sole. Per analizzare e correggere qualsiasi anomalia nei dati del sensore può essere utilizzato un solarimetro al centro dell'area del campo durante il tempo delle misurazioni, in modo da quantificare la variabilità atmosferica. In aggiunta, con effetti inferiori, anche flussi di particolato atmosferico causano fluttuazioni di brevissimo periodo, che portano a un errore nella misura della radiazione di circa l'1%.

Un altro fattore che influenza la misura della riflettanza è il vento, con una riflettanza media di una chioma che ha sovrastimato la riflettanza reale del 2-4%. Si è visto come il vento ha un effetto trascurabile sulle riflettanze di una chioma corta come l'erba medica tagliata, mentre ha un effetto significativo sulle riflettanze delle chiome con una struttura verticale più alta, in particolare durante le raffiche (D. Lord, 1985).

Successivamente, anche l'abbigliamento di chi effettua le misure influenza la raccolta dei dati. Si è visto come gli errori nella misurazione della radianza nelle lunghezze d'onda del

rosso e del vicino infrarosso possono avvicinarsi al 10% e al 12% rispettivamente a causa della presenza di una persona in abiti bianchi inginocchiata a mezzo metro dal bersaglio, mentre una persona in abiti neri inginocchiata alla stessa distanza comporterebbe un errore inferiore al 2% in entrambe le bande.

Capitolo 5

DRONI

5.1 Introduzione

Un *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) è un velivolo senza pilota umano a bordo che può essere pilotato a distanza (Mohindru, et al., 2021) o volare autonomamente attraverso piani di volo controllati da software nei loro sistemi, che lavorano in combinazione con i sensori di bordo e il GPS (Debangshi, 2021). “Drone” è il termine generale per individuare gli UAV, mentre di quest’ultimo termine se ne fa uso soprattutto in ambito militare (Mohindru, et al., 2021). Gli UAV stanno diventando sempre più famosi per le loro numerose e valide applicazioni in vari campi e ambiti (Mohindru, et al., 2021). Nelle aziende agricole più moderne, gli UAV sono già utilizzati per il monitoraggio e le previsioni in agricoltura, nell’ambito dell’Agricoltura di Precisione (Debangshi, 2021).

5.2 Caratteristiche principali dei droni

In generale, i droni possono essere suddivisi in diverse componenti. L’elemento primario è la piattaforma aerea stessa, che a sua volta è formata da diversi sistemi. Oltre al drone stesso, il sistema è formato anche da una stazione di controllo remoto (radiocomando) e un sistema di comunicazione che permette il collegamento tra il radiocomando e il drone stesso (Mohindru, et al., 2021). In aggiunta, al drone può essere addizionato il carico utile, cioè l’attrezzatura collegata alla piattaforma, che è costituita dai dispositivi che permettono di esplicitare diverse funzioni e raggiungere specifici obiettivi (Vergouw et al., 2016).

5.2.1 Componenti dei droni

Il drone o piattaforma volante è la parte aerea del sistema senza equipaggio che comprende il telaio, i sistemi di propulsione, i sistemi di alimentazione, i sistemi di navigazione e quelli di controllo (Debangshi, 2021).

Il telaio è lo scheletro del drone, quindi, supporta tutti gli equipaggiamenti di bordo e sostiene le sollecitazioni aerodinamiche durante il volo. Per essere funzionale, deve essere

leggero ma allo stesso tempo robusto. I sistemi di propulsione sono costituiti dai motori, che generano forza propulsiva che permettono il volo del drone, e dalle eliche che, ruotando, forniscono portanza al drone. Solitamente ogni motore ha una o due eliche che insieme costituiscono il gruppo propulsore, ma a seconda della tipologia di drone, motori ed eliche sono presenti in numero diverso e varia anche la fonte energetica sfruttata per il funzionamento. I sistemi di alimentazione forniscono energia al motore e gli altri componenti per permettere il proprio funzionamento; le fonti energetiche possono essere diverse. I sistemi di navigazione consentono al drone di possedere un posizionamento preciso durante tutto il volo; questo è possibile grazie all'uso di uno o più GNSS, come GPS, GALILEO, GLONASS (Sheridan, 2020). Il sistema di controllo è responsabile del volo del drone, della sua reazione alle forze emergenti e della sua stabilità, atti a garantire il massimo livello di sicurezza (Kardasz and Doskocz, 2016). I droni sono dotati di sensori/telecamere per scansionare l'ambiente circostante, al fine di prevedere ogni possibile collisione ed evitare gli ostacoli su tutti i lati.

5.2.2 Tipologie di droni

Le principali classificazioni in base alle quali i droni possono essere suddivisi sono le dimensioni (peso) e il tipo di piattaforma aerea (Mohindru, et al., 2021). Inoltre, essi possono possedere caratteristiche diverse a seconda del tipo di autonomia e fonte di energia utilizzata per il funzionamento (Vergouw et al., 2016). Tutta questa serie di proprietà sono fattori fondamentali nell'uso dei droni, in quanto influenzano l'altitudine massima, la durata del volo e il carico utile massimo (Vergouw et al., 2016).

In base al peso, i droni possono essere classificati come segue (Mohindru, et al., 2021):

- Micro: Meno di due chilogrammi (<2 kg);
- Mini: Superiore a 2 kg e inferiore a 20 kg;
- Small: superiore a 20 kg e inferiore a 150 kg;
- Grande: Superiore a 150 kg.

In base alla piattaforma aerea, esistono quattro diversi tipi di droni (Mohindru, et al., 2021). Il primo tipo sono i droni ad ala fissa, che utilizzano un'ala fissa come i normali aeroplani (Figura 5-1), in combinazione con velocità dell'aria in avanti per permettere il volo. Le principali caratteristiche sono che si muovono in aria in avanti e non usano mai la loro energia per il volo stazionario; per il lancio e l'atterraggio è necessaria una "pista" o una rete per l'atterraggio; se alimentati a carburante liquido o a gas hanno un'elevata resistenza di volo (fino a dieci ore o più). Essi, quindi, sono ottimi per la mappatura aerea su larga scala e alle

ispezioni a lungo raggio in vari ambienti operativi, grazie al loro tempo di volo elevato, ma va considerato che è richiesta un'elevata abilità per le manovre di volo (Mohindru, et al., 2021).



Figura 5-1: Drone ad ala fissa

La seconda tipologia di droni, quella più utilizzata sia dai professionisti che dagli hobbisti, sono i multirotori che utilizzano ali rotanti per il volo. Questa tipologia di droni è costituita da bracci che dipartono dal telaio al termine dei quali sono presenti i rotori e le eliche. Le capacità più apprezzate di questi droni sono il decollo verticale e la possibilità di stazionare in aria, ma vi sono alcuni aspetti svantaggiosi, come resistenza e velocità limitate, e, soprattutto, il basso tempo di volo; difatti, la maggior parte dei droni multirotori è alimentata a batterie e, dal momento che la maggior parte dell'energia viene spesa per stabilizzarsi in aria e sfidare la gravità, essi sono in grado di volare per circa 20-30 minuti, con alcuni casi eccezionali che arrivano a 50 minuti (Mohindru, et al., 2021). In base al numero dei rotori presenti possono essere ulteriormente suddivisi in:

- *Bicopter* (bicottero) con due rotori;
- *Tricopter* (tricottero) con tre rotori;
- *Quadcopter* (quadricottero) con quattro rotori;
- *Hexacopter* (esacottero) con sei rotori;
- *Octocopter* (ottocottero) con otto rotori.

Come regola generale, minore è il numero di rotori, minore è la rotazione di un oggetto, per cui, ad esempio, i quadricotteri sono molto più stabili degli octocotteri. Tra i droni multirottore, il *Quadcopter* o quadricottero è la variante più utilizzata (Figura 5-2).



Figura 5-2: Drone quadricottero

La terza categoria di droni sono quelli monorotori. A livello di design e struttura sono identici ad un elicottero vero e proprio, in quanto sono costituiti da un rotore di grandi dimensioni con uno più piccolo sulla coda del drone per il controllo della direzione (Figura 5-3). Essi sono molto più stabili dei droni multirotori e hanno tempi di volo più elevati rispetto ad essi, soprattutto se implementati con motore a benzina o a gas. Tuttavia, hanno un costo molto elevato e richiedono un'elevata formazione e abilità per farli volare correttamente (Mohindru, et al., 2021).



Figura 5-3: Drone monorotore

La quarta categoria di droni sono i droni ibridi ad ala fissa, indicati con la sigla VTOL (*Vertical Take-Off & Landing*). Questa tipologia ha le caratteristiche del design ad ala fissa e multirottore combinate assieme. La coppia di rotori è collocata all'estremità delle ali o al centro di esse, e viene disposta perpendicolarmente durante il decollo e l'atterraggio verticale, mentre è disposta parallelamente durante il volo. Attualmente questa tecnologia non è molto diffusa, gli altri tipi di rotori sono più diffusi in commercio, ed è ancora in fase di sperimentazione e di prova (Mohindru, et al., 2021).

Inoltre, i droni possono essere diversamente caratterizzati in base al proprio livello di autonomia. Sono definiti "automatici" i droni che non hanno "libertà di scelta", quindi, il sistema può eseguire da solo esclusivamente compiti pre-programmati. Al contrario, i droni con sistemi "autonomi" sono in grado di effettuare delle scelte di fronte a situazioni impreviste (Vergouw et al., 2016). Il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti distingue quattro livelli di autonomia (Vergouw et al., 2016). Il livello più elementare è quello in cui il sistema è completamente gestito dall'operatore umano, che prende tutte le decisioni, senza alcun controllo autonomo da parte del sistema. Il livello superiore di autonomia è rappresentato da un sistema che è in grado di eseguire in maniera indipendente alcuni compiti, che però sono delegati dall'operatore. Il terzo livello di autonomia è un sistema con supervisione umana, che è in grado di eseguire vari compiti quando riceve determinate autorizzazioni e indicazioni da parte dell'uomo. Infine, l'ultimo livello di autonomia è un sistema completamente autonomo, in quanto il sistema è in grado di tradurre in compiti specifici i comandi impartiti dall'uomo.

Infine, esistono diverse tipologie di droni a seconda delle fonti energetiche utilizzate per il funzionamento, che sono principalmente quattro: il carburante tradizionale per aerei, le batterie, le celle a combustibile e le celle solari (Vergouw et al., 2016). Il carburante per aerei (cherosene) è utilizzato principalmente nei grandi droni ad ala fissa, in quanto spesso richiedono tempi di funzionamento elevati. Le batterie sono utilizzate soprattutto nei droni multirotori, in quanto sono droni a corto raggio e richiedono un tempo di funzionamento inferiore. Una cella a combustibile è un dispositivo elettrochimico che converte l'energia chimica del combustibile direttamente in energia elettrica, senza conversioni in energia termica e meccanica. Attualmente questa fonte energetica è poco utilizzata nei droni, ma, eventualmente, i droni ad ala fissa potrebbero essere equipaggiati con essa. Infine, i droni che utilizzano celle solari sono al momento rari.

5.2.3 Tipi di carichi utili e relative applicazioni

Il carico utile viene posizionato a bordo del veicolo aereo, ma è riconosciuto come un sottosistema indipendente che spesso può essere facilmente scambiato con veicoli aerei diversi (Paul G., et al., 2022). Diversi tipi di carichi utili possono essere attaccati alla piattaforma del drone, a seconda degli obiettivi specifici per cui si sta utilizzando il mezzo aereo (Vergouw et al., 2016). I carichi utili includono spesso videocamere e sensori, che possono compiere diversi tipi di compiti specifici (Paul G., et al., 2022).

5.3 Applicazione dei droni in Agricoltura di Precisione

Nel complesso, diversi tipi di sensori, utilizzati come carichi utili nei droni, possono essere utilizzati per varie applicazioni (Dutta and Goswami, 2020) (Tabella 5-1).

Tabella 5-1: Diverse applicazioni di sensori e droni (Fonte: Dutta, 2020)

Sensori	Monitoraggio
Multispettrale	Stress idrico - Stress nutritivo – Malattie - Evapotraspirazione
Iperspettrale	Stress idrico - Stress nutritivo – Malattie - Erbe infestanti
RGB	Stress idrico - Stress nutritivo – Malattie - Erbe infestanti
Infrarosso termico	Stress idrico - Evapotraspirazione

5.3.1 Analisi del suolo

Dati sul terreno possono essere raccolti attraverso telerilevamento con droni dotati di telecamere apposite come carico utile (Debangshi, 2021). Le osservazioni ottiche di telerilevamento e in particolare l'imaging iperspettrale hanno dimostrato di essere tecniche potenti per la determinazione quantitativa di una serie di proprietà del suolo, come la

composizione mineralogica, il contenuto di carbonio organico del suolo, la tessitura, il contenuto di ferro o di carbonati (Chabrilat et al., 2019).

5.3.2 Valutazione della salute delle colture

I droni possono essere usati per il monitoraggio delle condizioni delle colture, in modo tale da poter intervenire tempestivamente, e, soprattutto, in base alle necessità sito-specifiche (Dutta and Goswami, 2020). Solitamente i carichi utili alla piattaforma aerea sono sensori termici o ottici che catturano la radiazione elettromagnetica solare riflessa dalla copertura vegetale nelle lunghezze d'onda del visibile, vicino infrarosso (NIR) e infrarosso a onde corte (SWIR).

Dai dati spettrali raccolti è possibile calcolare diversi indici di vegetazione che vengono utilizzati per valutare le condizioni delle colture, come stress idrico, stress nutritivo, attacco di insetti e parassiti, malattie, ecc. (Dutta and Goswami, 2020). Come accennato in precedenza, uno degli indici più comunemente utilizzati è l'NDVI che è indicativo della salute della vegetazione.

5.3.3 Valutazione dell'evapotraspirazione

Per la valutazione dello stress idrico e la verifica di eventuali problemi di evapotraspirazione della superficie fogliare, inoltre, possono essere utilizzati sensori ad infrarosso termico. In effetti, hanno dimostrato un elevato potenziale per il rilevamento dello stress idrico nelle colture, grazie all'aumento della temperatura della vegetazione stressata (Daponte et al., 2019). Normalmente, la vegetazione ha una temperatura inferiore rispetto al suolo perché le foglie traspirano, e, di conseguenza, l'acqua passa da liquido a vapore e la superficie fogliare si raffredda (Debangshi, 2021).

5.3.4 Operazioni di irrorazione

La distribuzione di fertilizzanti, pesticidi, erbicidi, regolatori della crescita delle piante, può avvenire attraverso droni che sono forniti di serbatoi appositi come carico utile (Debangshi, 2021). L'aspetto fondamentale di questa pratica è che la distribuzione è accurata e precisa in quanto viene effettuata basandosi sulla variabilità spaziale della coltura e del suolo; quindi, la distribuzione non è uniforme in tutto il campo ma è effettuata in quantità diverse, ad esempio, in base alla presenza/assenza di infestazione e gravità di quest'ultima (Dutta and Goswami, 2020).

Capitolo 6

MATERIALI E METODI

6.1 Sito sperimentale

Le attività sperimentali sono state condotte presso l'azienda agricola biologica "Il Colle delle Spighe", situata ad Urbisaglia, in provincia di Macerata. L'azienda nel complesso possiede circa 145 ettari distribuiti in diversi paesi limitrofi alla sede aziendale quali Tolentino, Loro Piceno, Corridonia. In particolare, le sperimentazioni sono state effettuate nel comune di Corridonia. Il campo preso in considerazione per la sperimentazione ha un'estensione di 9.21 ha totali (Figura 6-1). In particolare, l'area utile al fine dei campionamenti si estende per 0.3 ha circa ed è posizionata nella parte sud-est dell'intero appezzamento (Figura 6-2).

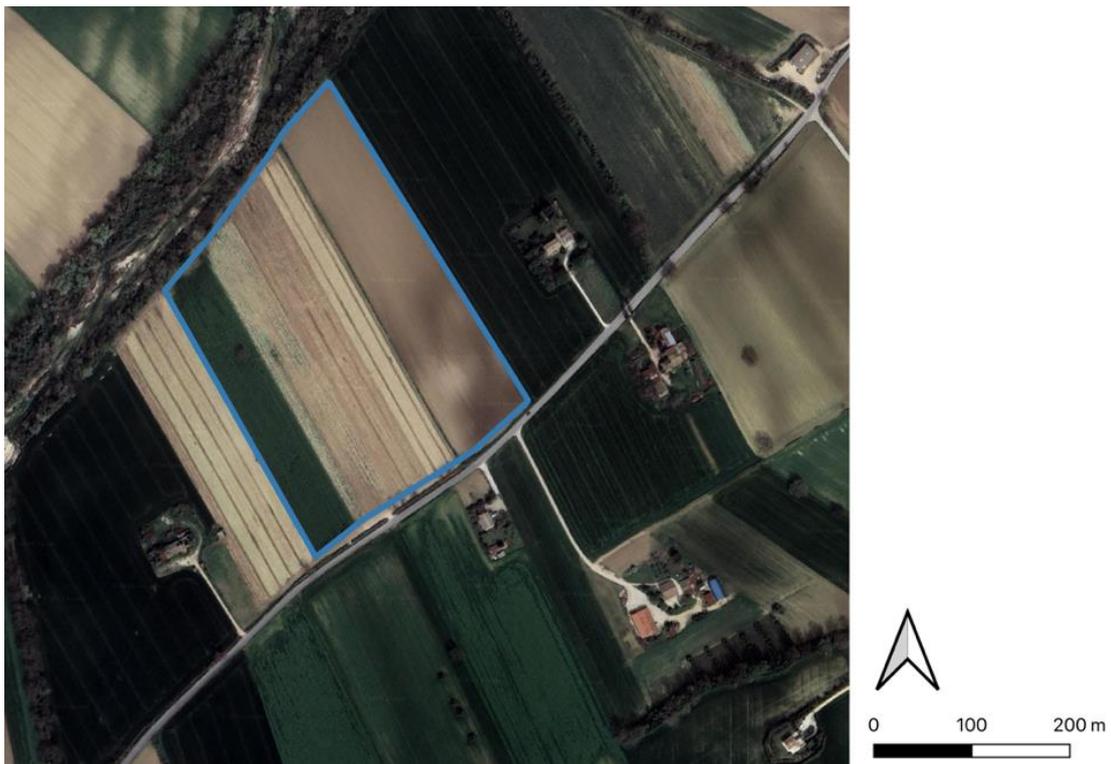


Figura 6-1: Appezzamento aziendale a Corridonia



Figura 6-2: Posizionamento dell'attività sperimentale

6.1.1 Caratteristiche pedologiche

Il terreno interessato al caso studio è caratterizzato da una tessitura a medio impasto. La sostanza organica è pari al 1,8% circa. La dotazione di fosforo assimilabile è bassa, mentre quella di potassio scambiabile è alta.

6.1.2 Gestione della coltura

Il basilico è stato coltivato in successione al prezzemolo. Come lavorazione principale del terreno è stata effettuata un'aratura a 30 cm di profondità in data 20/10/2023. Per la preparazione del letto di semina sono state effettuate quattro operazioni di erpicatura con erpici a denti elastici rispettivamente nel mese di gennaio, marzo, aprile e ad inizio maggio.

La scelta varietale effettuata è Noga F1 dell'azienda sementiera Fenix, cioè un ibrido di basilico resistente alla peronospora del basilico che si distingue per la foglia a cucchiaio caratteristica della tipologia di basilico genovese. La semina della coltura è stata fatta in data 06/05/24 attraverso una seminatrice a righe meccanica. La larghezza di lavoro della macchina è di 150 cm e la distanza interfilare è di 18 cm circa per un totale di 8 file di basilico all'interno della larghezza di lavoro. La distanza tra una passata e l'altra è di 20 cm. La densità di semina è pari a 8,5 kg/ha.

Il basilico è stato raccolto attraverso più sfalci avvenuti indicativamente nelle seguenti date: 1-17 luglio, 6-26 agosto, 12 settembre, 7 ottobre. Si precisa “indicativamente” dal momento che i 9 ha di basilico aziendali non vengono sfalciati in un unico tempo, bensì frazioni del campo vengono raccolte in tempi diversi a seconda dei contratti stipulati dall’azienda e delle richieste di mercato. La porzione di appezzamento preso in considerazione per il caso studio è stata sfalciata il 12 agosto.

Per la rimozione delle erbe infestanti è stata effettuata la sarchiatura e la scerbatura manuale in quanto l’azienda agricola è gestita secondo i principi del biologico. La sarchiatura è una lavorazione consecutiva che va ad operare esclusivamente nello spazio interfilare ed è stata compiuta due volte tra la semina e il primo sfalcio, dopodiché questa lavorazione non viene più eseguita in quanto il basilico risulta ben sviluppato e gli organi lavoranti lo danneggerebbe. La scerbatura manuale serve a rimuovere le erbe infestanti ed è stata effettuata prima di ogni sfalcio.

Gli interventi irrigui in seguito alla semina sono programmati ogni due giorni per due settimane. Nei mesi di giugno e luglio, il turno è stato di 3 giorni circa; ad agosto, grazie alle precipitazioni verificatesi, il turno è stato allungato a 4 giorni. Per lo stesso motivo, a settembre è stato effettuato un unico intervento irriguo. Nel mese di ottobre, l’irrigazione non è risultata necessaria.

Per quanto riguarda la concimazione, sono stati effettuati due interventi di concimazione di fondo del terreno nel mese di marzo con concime organico NP 4-9 e concime organico 6N. Invece, in copertura è stata effettuata una concimazione con concime organico N11 successivamente al secondo taglio.

I trattamenti fitosanitari e le fertilizzazioni effettuati sono stati molteplici. All’inizio di giugno, a distanza di due settimane l’uno dall’altro, sono stati eseguiti due trattamenti con chitosano cloridrato (sostanza di base), impiego come induttore delle naturali resistenze delle piante contro funghi e batteri. Nello stesso periodo, è stato eseguito un trattamento con inoculo di funghi micorrizici, con molteplici azioni positive. Tra uno sfalcio e l’altro, per la nutrizione delle piante sono state effettuate le seguenti fertilizzazioni: miscela di microelementi (Mn e Zn), filtrato di crema di alghe con manganese e zinco, estratto puro di alghe con N1. Inoltre, è stato effettuato il trattamento con rame, come anticrittogamico protettivo, e un trattamento con gel di silice, ad azione corroborante con miglioramento della resistenza delle piante agli stress biotici e abiotici.

6.2 Caso studio

6.2.1 Campionamento in campo

Il campionamento su basilico è avvenuto in due giornate consecutive (08/08/2024 e 09/08/2024). All'interno dell'area, sono state campionate dieci file di basilico e, per ciascuna fila, sono stati acquisiti 4 punti di campionamento (40 in totale). Ogni campione è distante circa 5 metri dal successivo.

Per ogni punto di campionamento sono state salvate le coordinate GPS attraverso un dispositivo cellulare per georeferenziare i dati (Figura 6-3). Inoltre, sono state registrate altezza e biomassa.



Figura 6-3: Posizione dei punti di campionamento

L'inizio dei campionamenti è avvenuto in data 08/08/2024. Gli strumenti utilizzati per ciascun rilievo sono: un metro, un dispositivo cellulare per il posizionamento GPS e una cornice di cartone di dimensioni 50 cm x 50 cm. Il protocollo prevede i seguenti step: posizionare la cornice al di sopra delle piante presenti nella fila per delimitare una superficie di 0.25 m² (Figura 6-4). Quindi, scegliere tre piante random per misurarne l'altezza in centimetri (Figura 6-5).



Figura 6-4: Cornice delimitante l'area dei singoli campionamenti



Figura 6-5: Operazione di misurazione dell'altezza delle piante con metro

In data 09/08/2024, sono stati utilizzati i seguenti strumenti: cornice utilizzata nel giorno precedente, coltello, dispositivo cellulare e sacchetti di plastica. Il campionamento è consistito nella raccolta della biomassa delle piante di basilico dei punti di campionamento effettuati nel giorno precedente. In particolare, il riposizionamento negli stessi punti di campionamento è stato garantito dalle coordinate GPS di ciascuno segnate il giorno precedente. Una volta collocati negli stessi punti, si è proceduto al posizionamento della cornice e alla raccolta manuale della biomassa delle piante di basilico nell'area di 0.25 m² (Figura 6-6). Lo sfalcio è stato effettuato attraverso la lama di un coltello e la resa di ciascun punto di rilievo è stata raccolta all'interno di un sacchetto di plastica, numerato con il riferimento progressivo del campione. Lo sfalcio è stato effettuato cercando di riprodurre la raccolta meccanica effettuata normalmente dalla raccogliitrice industriale per piante aromatiche, motivo per cui è stato effettuato circa 4-6 cm al di sopra del punto di sfalcio della raccolta precedente (Figura 6-7). Successivamente, i campioni sono stati pesati singolarmente.



Figura 6-6: Raccolta manuale delle piante di basilico contenute all'interno della cornice



Figura 6-7: Punto di rilievo successivamente allo sfalcio in dettaglio

6.2.2 Drone Matrice 350 RTK

Nella prova è stato utilizzato il drone Matrice 350 RTK (Shenzhen DJI Sciences and Technologies Ltd.) (Figura 6-8). Si tratta di un quadricottero del peso di 6.5 kg composto da quattro bracci (6) che portano i rotori all'estremità (7) e le eliche (8). Il sistema di alimentazione è garantito da due batterie (13). Il sistema di visione (3) del drone è a sei direzioni e i componenti sono situati su tutti i lati dell'aeromobile. Questo sistema consente stazionamenti in volo precisi in ambienti chiusi in cui non è disponibile il segnale GNSS. Quando il segnale GNSS è disponibile, il sistema di visione offre informazioni ausiliari sul miglioramento della precisione del posizionamento dell'aeromobile. Il sistema di visione funziona bene quando si trova entro 30 m di distanza dal terreno e a 20 m di distanza in orizzontale da una parete o da altri oggetti posti sul lato, e necessita di superfici a trama definita e illuminazione adeguata. Il drone è dotato anche di un sistema di rilevamento a infrarossi (2),

costituito da due sensori a infrarossi posti su ciascun lato dell'aeromobile. Il sistema è in grado rilevare gli ostacoli per consentire all'aeromobile di mantenere la posizione corrente e di stazionare in volo in modo preciso. Il sistema di rilevamento a infrarossi può essere usato esclusivamente per evitare oggetti grandi, diffusi e riflettenti (riflettività >10%) compresi entro 8 m. I sistemi di navigazione GNSS utilizzati dal drone sono GPS, Galileo, GLONASS e BeiDou, grazie ai quali ottiene dati sul posizionamento accurati; le antenne GNSS si trovano al termine dei bracci posteriori (16). Inoltre, il modulo RTK (Real Time Kinematic) è integrato nell'aeromobile ed è necessario per misurare i dati satellitari applicando ad essi i messaggi di correzione delle stazioni a terra. Questo consente agli utenti di ottenere un'accuratezza della posizione a livello centimetrico in tempo reale. Inoltre, il drone può sopportare un carico utile (26) non superiore a 960 g.

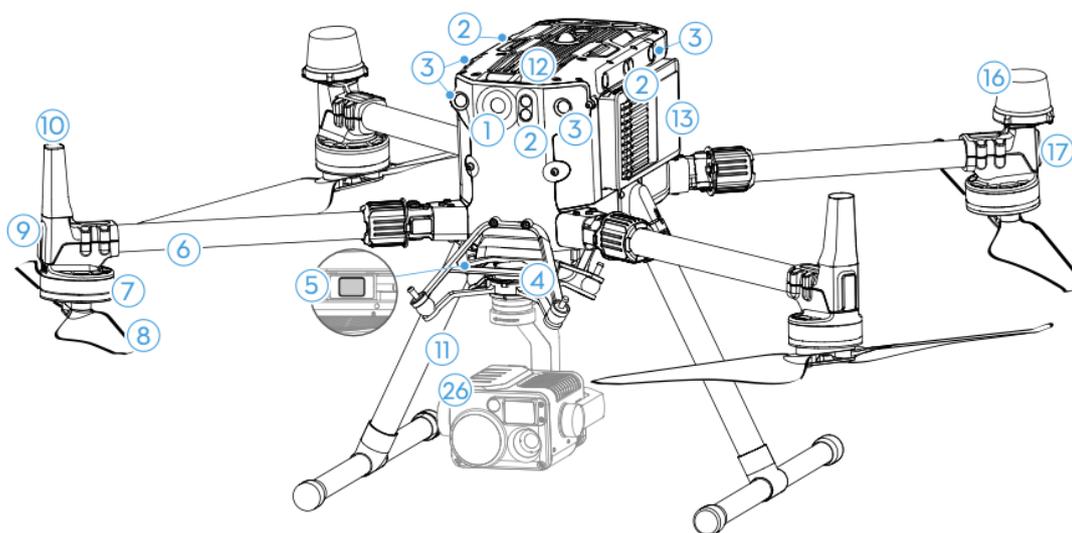


Figura 6-8: Aeromobile Matrice 350 RTK

6.2.3 Sensore AltumPT

La camera Altum-PT (MicaSense®, AgEagle Aerial System Inc.) è un sensore multispettrale, pancromatico e termico (Figura 6-9). Il sensore multispettrale è composto da cinque bande: R (*Red*), G (*Green*), B (*Blue*), RE (*Red Edge*) e NIR (*Near InfraRed*). Nello specifico sono riportate rispettivamente le lunghezze d'onda centrali e la larghezza di banda: B (475 nm - 32 nm), G (560 nm - 27 nm), R (668 nm - 16 nm), RE (717 nm - 12 nm) e NIR (842 nm - 57 nm). Il sensore pancromatico possiede una lunghezza d'onda centrale pari a 634.5 nm e una larghezza di banda di 463 nm. Il sensore termico cattura la banda del LWIR (*Long-Wave InfraRed*), con una lunghezza centrale d'onda pari a 10.5 μm e una larghezza di banda di 6 μm .



Figura 6-9: Camera AltumPT

6.2.4 Rilievo con il drone

In data 08/08/2024 è stato effettuato il rilievo su basilico con il drone. Il primo step è la preparazione del drone in campo: in primis, sono stati inseriti i carrelli di atterraggio, poi il drone è stato posizionato a terra per poter aprire i bracci. Dopo aver inserito il blocco di sicurezza dei bracci, sono state aperte le eliche. È importante assicurarsi che i bracci siano serrati e le eliche montate in modo sicuro, senza parti danneggiate o deformate. A questo punto, è stata montata la camera AltumPT nello stabilizzatore. È stato verificato il livello di carica della coppia di batterie collocate nell'aeromobile e del radiocomando. Inoltre, è stato effettuato un controllo affinché gli obiettivi del sistema di visione, le fotocamere, il vetro dei sensori a infrarosso e le luci ausiliarie fossero puliti e funzionanti. Nel complesso l'aeromobile ed il carico utile risultano come riportati nell'immagine (Figura 6-10).



Figura 6-10: Aeromobile matrice 350 RTK e Camera Altum-PT

Prima del volo, è stata effettuata la calibrazione del sensore di luminosità con un pannello di calibrazione (Figura 6-11). L'operazione consiste nel posizionare il drone al di sopra del pannello per alcuni secondi ad una distanza di circa 1 m per scattare manualmente 2 fotografie al pannello stesso (Figura 6-12). Questo passaggio è fondamentale per il successivo preprocessing dei dati. Per considerare le eventuali minime variazioni intercorse tra l'inizio e la fine della missione, la calibrazione viene effettuata all'inizio e alla fine. È di cruciale importanza perché permette l'automatizzazione della correzione delle immagini acquisite dalla camera.



Figura 6-11: Pannello bianco puro per calibrazione iniziale e finale del drone

A questo punto, dopo aver verificato la sicurezza dell'ambiente di volo, l'aeromobile è stato posizionato su una superficie aperta, pianeggiante e priva di ostacoli. È stato acceso il radiocomando e successivamente l'aeromobile. Prima di procedere al volo, è stato verificato che il led di stato e il comando Aircraft Authority del radiocomando fossero verde fisso, il che significa che sono collegati e il radiocomando ha il controllo dell'aeromobile.



Figura 6-12: Operazione di calibrazione della camera spettrale

La missione del volo consiste nella mappatura dell'area campionata. È stata impostata la traiettoria di navigazione (Figura 6-13) ed è stata prevista l'acquisizione di immagini da parte del sensore per ciascuna banda. In particolare, le caratteristiche del volo sono state le seguenti:

- Altitudine: 20 m
- Velocità: 2 m/s
- 0.86 cm/pixel
- Frontal overlap: 75%
- Side overlap: 75%

Il volo è stato effettuato in mattinata, tra le 11.00 e 12.00. Le condizioni meteorologiche erano adatte al volo, in quanto la giornata era soleggiata, in totale assenza di nubi, il vento era assente e la temperatura buona. La Figura 6-14 mostra il drone in opera in volo al di sopra del campo di basilico.



Figura 6-13: Radiocomando raffigurante lo schema di volo



Figura 6-14: Volo del drone sul campo di basilico

6.3 Processamento delle immagini

6.3.1 PIX4Dmapper

PIX4Dmapper è un software di elaborazione fotogrammetrica per la mappatura con droni. L'output 2D che questo programma è in grado di creare è l'ortomosaico, cioè una composizione di fotogrammi geometricamente corretti e georeferenziati. Tutte le immagini acquisite da parte del sensore *AltumPT* durante il volo del drone e le immagini ottenute durante la calibrazione iniziale e finale del sensore vengono consegnate al software. Vengono settate le opzioni desiderate di elaborazione delle immagini e viene indicato il sistema geografico di riferimento. Automaticamente il programma è in grado di restituire un ortomosaico per ciascuna banda spettrale catturata dal sensore.

6.3.2 QGIS

QGIS è un sistema informativo geografico open source che permette l'acquisizione, la registrazione, l'analisi, la visualizzazione e la restituzione di informazioni derivanti da dati geografici. Questo strumento è stato sfruttato per il passaggio successivo di processamento delle immagini. Sono stati importati come file raster gli ortomosaici di ciascuna banda catturata dal sensore (Red, Green, Blue, NIR, RE, Panchro e LWIR). I file raster sono stati ritagliati con una maschera in modo da sottendere solamente l'area campionata. Come esempio, viene riportata la banda Green ritagliata (Figura 6-15). Successivamente, è stato importato il file CSV contenente le coordinate geografiche (latitudine e longitudine) di ciascun punto di rilevamento. Il layer riportante le posizioni dei campionamenti è stato riproiettato, per ottenere un sistema di coordinate metrico per una gestione semplificata. Alcuni punti di campionamento si scostano dalla posizione effettiva in cui è avvenuto il rilievo dal momento che la precisione del GPS del dispositivo mobile non è elevata. Di conseguenza, con l'ausilio della mappa raffigurante il campo, è stata aggiustata la posizione dei punti di campionamento all'interno delle file di basilico. È stato poi creato un buffer di 30 cm attorno ai punti di campionamento per ricreare l'area campionata delimitata dalla cornice (Figura 6-16). Sono stati calcolati gli indici di vegetazione attraverso il tool del calcolatore raster. In particolare, gli indici di vegetazione per la stima della biomassa calcolati sono i seguenti: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), GNDVI (*Green NDVI*), NDRE (*Normalized Difference Red Edge*), CVI (*Chlorophyll Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*). Di seguito vengono riportate le formule degli indici di vegetazione inserite nel calcolatore raster (Tabella 6-1).

Tabella 6-1: Formule degli indici vegetazionali inserite nel calcolatore raster

VI	Formula	Riferimenti
NDVI	$NDVI = NIR - RED / NIR + RED$	(Tucker, 1979)
GNDVI	$GNDVI = NIR - GREEN / NIR + GREEN$	(Gitelson et al., 1996)
NDRE	$NDRE = NIR - RE / NIR + RE$	(Barnes et al., 2000)
CVI	$CVI = (NIR \times RED) / (GREEN)^2$	(Datt et al., 2003)
EVI	$EVI = G \times [(NIR - RED) / (NIR + C1 \times RED - C2 \times BLUE + L)] *$	(Huete et al., 2002)
SAVI	$SAVI = [(NIR - RED) / (NIR + RED + L)] \times (1 + L) **$	(Huete, 1988)

*I coefficienti adottati sono L = 1, C1 = 6, C2 = 7.5 e G = 2.5 (Huete et al., 2002).

** L è un fattore di correzione pari a 1 per densità di vegetazione molto basse, 0,5 per densità intermedie e 0,25 per densità superiori; nella formula è stato adottato L = 0,25 (Huete, 1988).

Infine, attraverso il tool dell'analisi raster sono state calcolate per ciascun indice vegetazionale le statistiche zonali dei punti di campionamento. Il tool cioè permette il calcolo delle statistiche di media, mediana e deviazione standard dei pixel del raster che si trovano all'interno dell'area del buffer di ciascun punto di campionamento. Tutti questi valori sono stati poi esportati come file Excel.



Figura 6-15: Banda green ritagliata

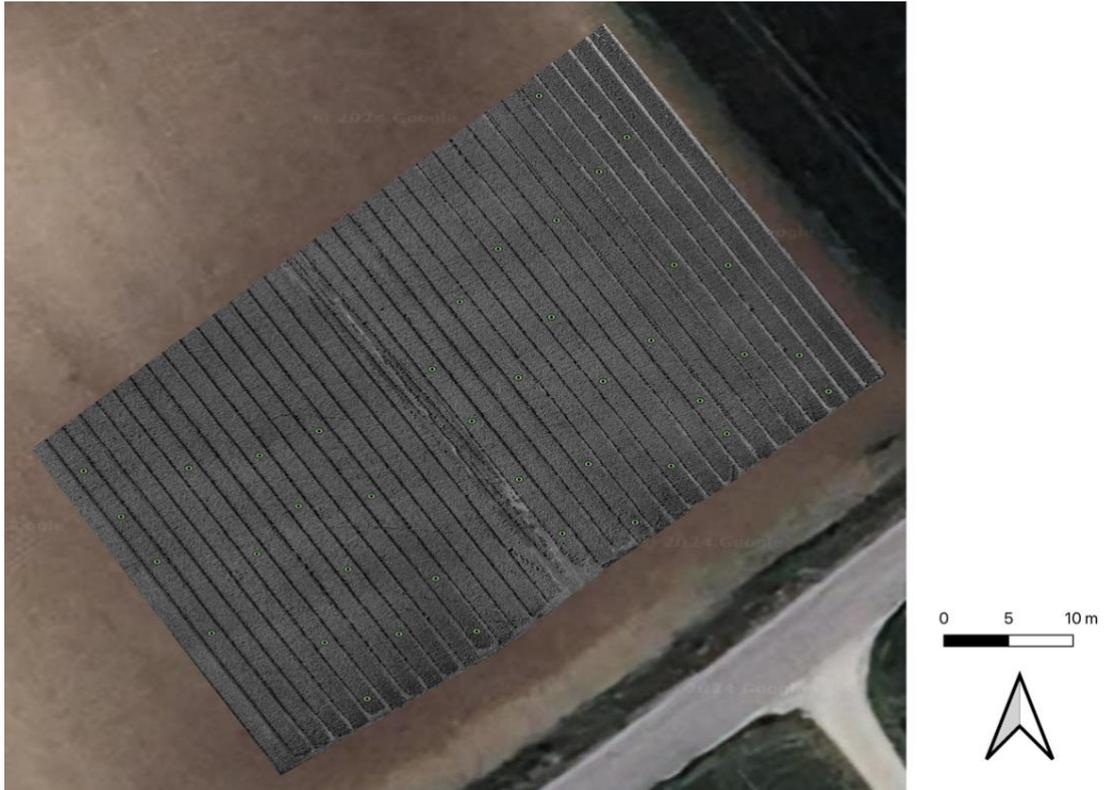


Figura 6-16: *Punti di campionamento (in nero) e area buffer campionata (in verde)*

6.3.3 Microsoft Excel

L'analisi dei dati successiva è stata effettuata su Excel. Tramite il tool di analisi dati è stata creata la matrice di correlazione, ossia uno strumento statistico che permette di comprendere quanto le coppie di valori considerate siano correlate tra loro. La correlazione è una misura statistica che esprime la relazione lineare tra due variabili. Quindi si ottiene una tabella con i coefficienti di correlazione (r) dei valori degli indici di vegetazione, biomassa e altezza media delle piante messi tutti in relazione tra loro. Il coefficiente r può assumere valori che vanno da -1.00 (correlazione perfetta negativa) e +1.00 (correlazione perfetta positiva); un valore pari a 0 indica che tra le due variabili non vi è alcuna relazione lineare.

Successivamente, sono stati creati grafici a dispersione che hanno lo scopo di mettere in relazione le variabili continue. In pratica, i due parametri strutturali (biomassa e altezza) sono stati messi in relazione ad ognuno degli indici di vegetazione. Le variabili sono in correlazione se descrivono una retta quando rappresentate su assi cartesiane in quanto caratterizzate da relazione lineare. Ci possono essere diversi tipi di relazione a seconda della direzione e dell'entità della correlazione. La direzione può essere positiva, se all'aumentare di una variabile aumenta proporzionalmente anche l'altra, o negativa, se all'aumentare di una variabile l'altra diminuisce proporzionalmente, a seconda della proporzionalità diretta e

inversa che lega le variabili. L'entità si riferisce alla forza della relazione esistente tra due variabili; quanto più i punteggi sono raggruppati attorno ad una retta, tanto più forte è la relazione tra due variabili. Ciascun grafico a dispersione riporta anche il coefficiente di determinazione (R^2), che ha la funzione di misurare l'ammontare di variabilità di una variabile spiegato dalla sua relazione con un'altra variabile (la variazione nei valori di y che può essere giustificata dalla variazione di x).

Capitolo 7

RISULTATI E DISCUSSIONI

7.1 Indici vegetazionali

Attraverso il calcolatore raster di QGis sono stati ottenuti gli indici vegetazionali dell'area presa in considerazione durante il caso studio. Le mappe ottenute riguardano i seguenti indici vegetazionali: NDVI (Figura 7-1), GNDVI (Figura 7-2), NDRE (Figura 7-3), CVI (Figura 7-4), EVI (Figura 7-5) e SAVI (Figura 7-6). La scala di colore utilizzata per la raffigurazione degli indici di vegetazione è la scala RdYlGn (Red-Yellow-Green), dove il colore verde è associato ai valori più alti dell'indice, mentre il rosso ai valori più bassi. In tutte le mappe è possibile osservare la differenza di colore tra le file occupate dalle piante di basilico e lo spazio interfila corrispondente al suolo nudo.

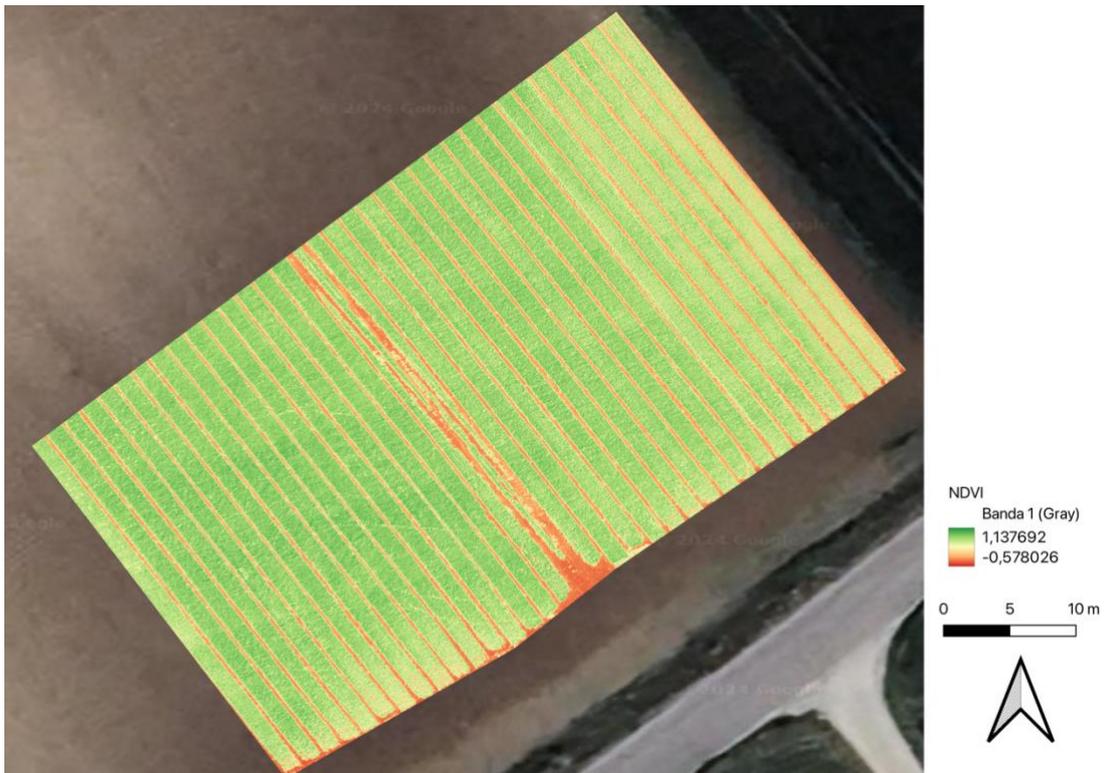


Figura 7-1: Indice vegetazionale NDVI

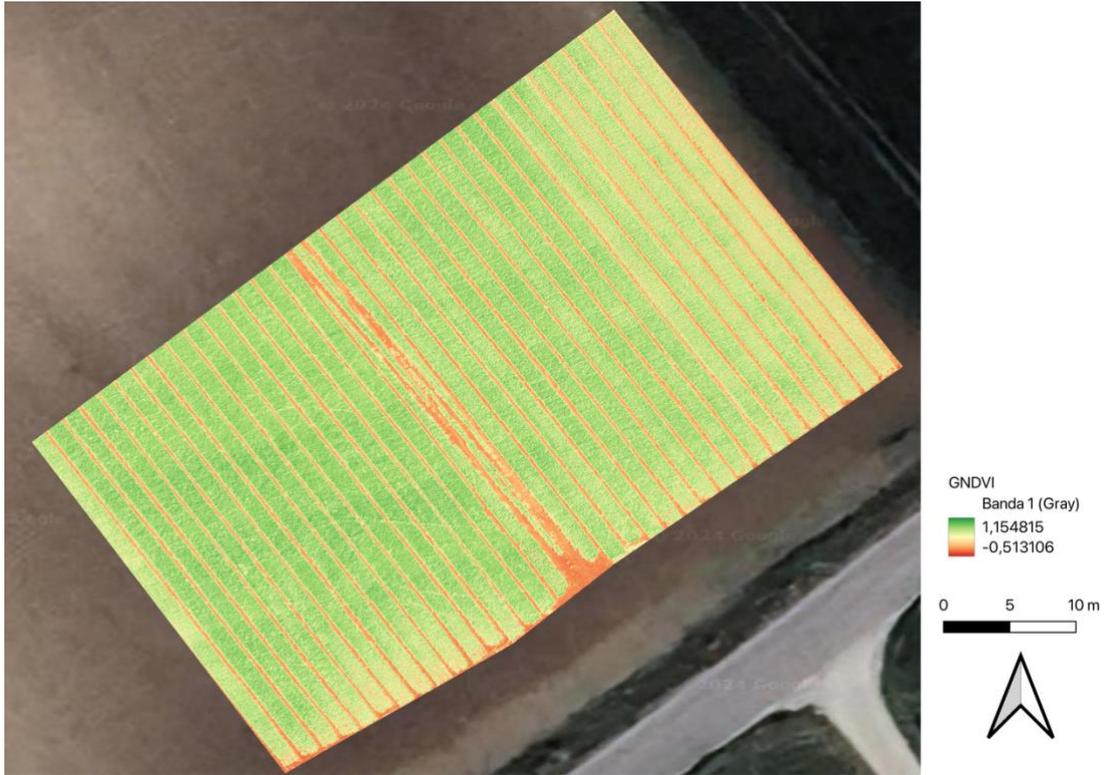


Figura 7-2: Indice vegetazionale GNDVI

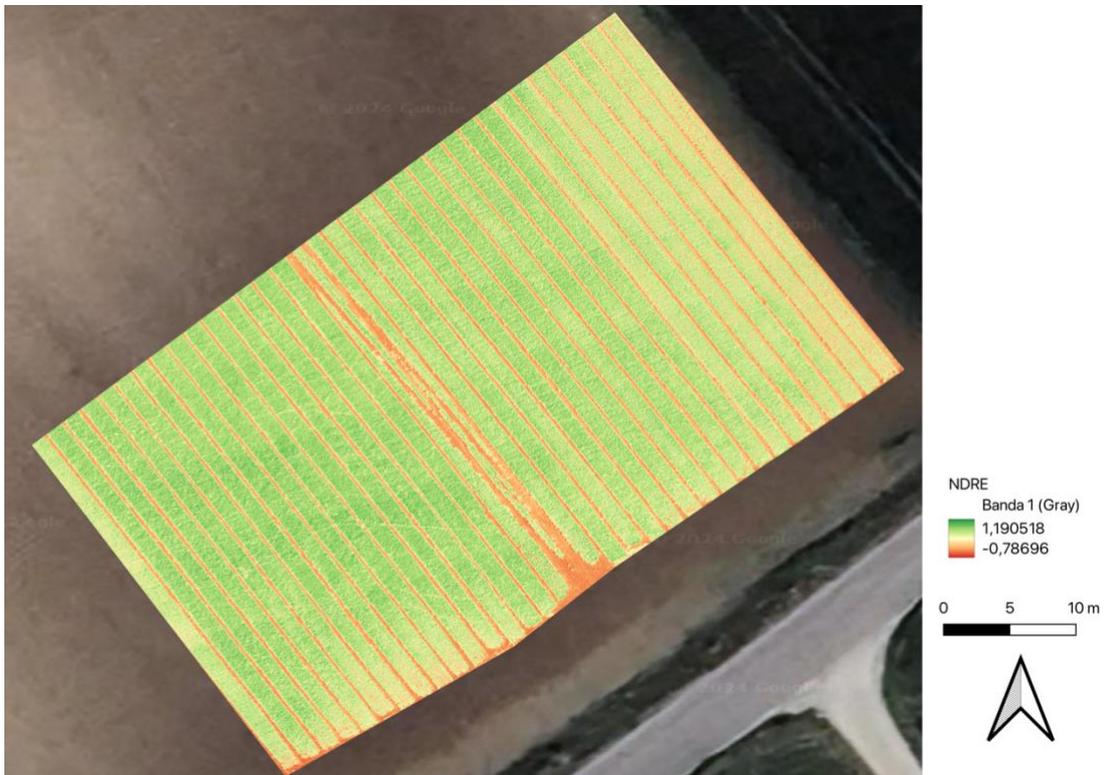


Figura 7-3: Indice vegetazionale NDRE

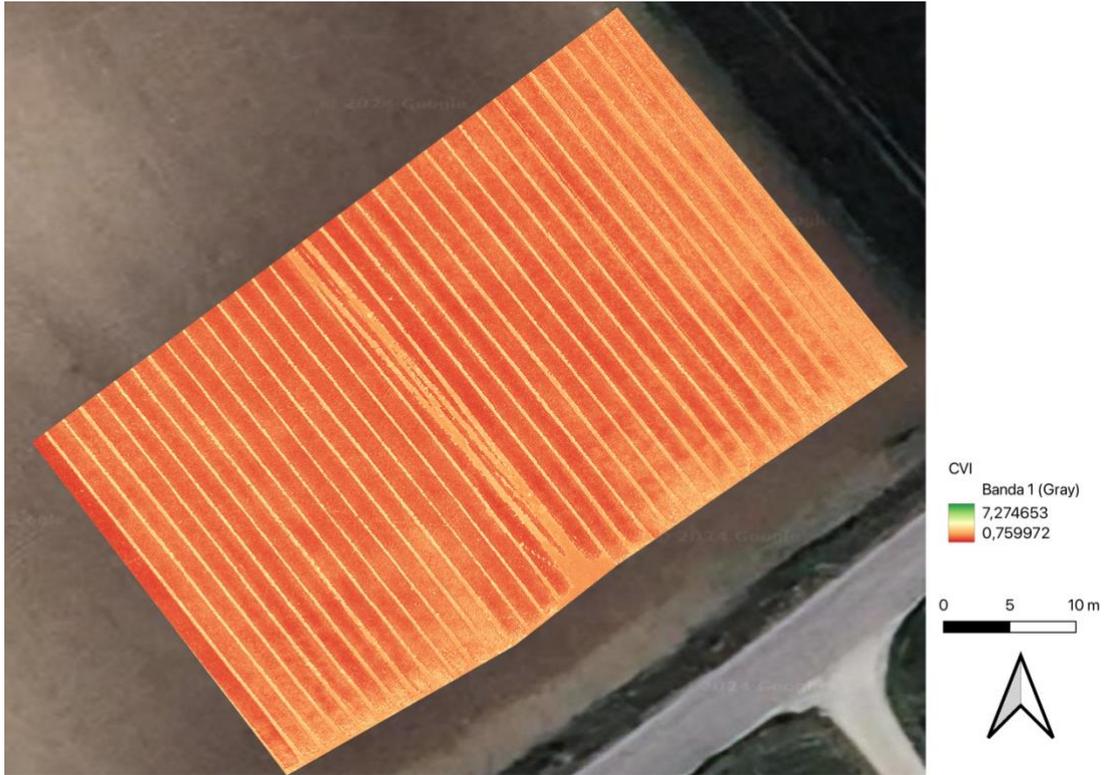


Figura 7-4: Indice vegetazionale CVI

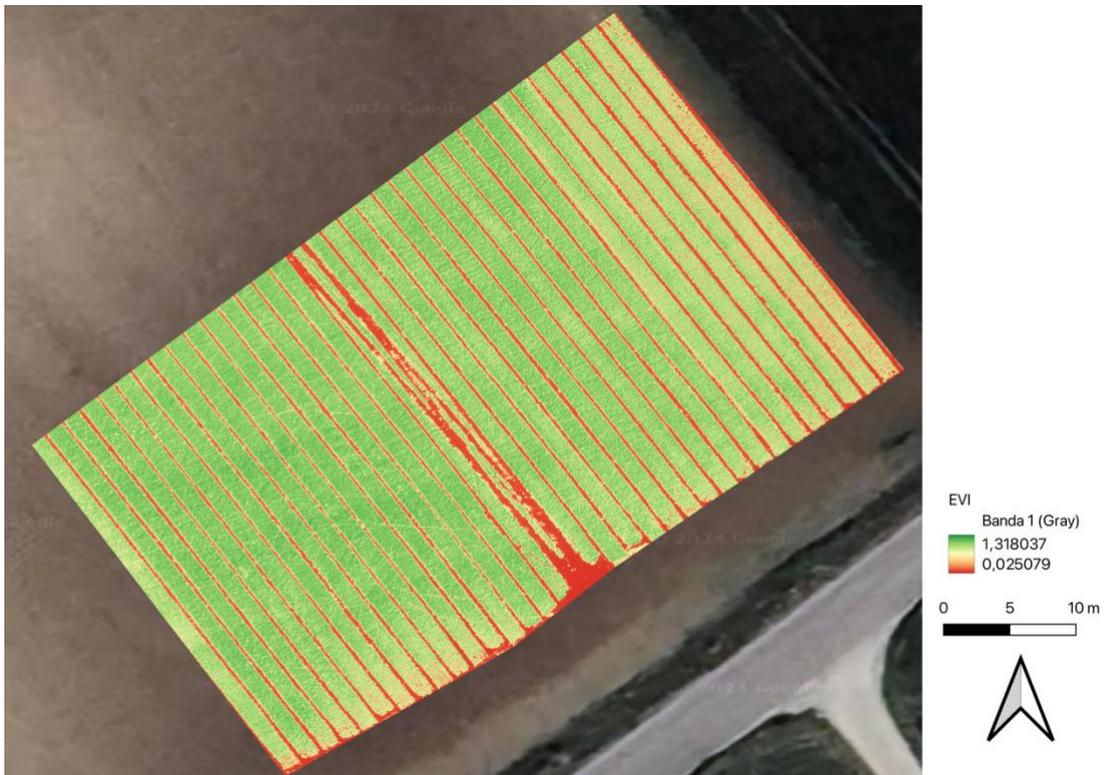


Figura 7-5: Indice vegetazionale EVI

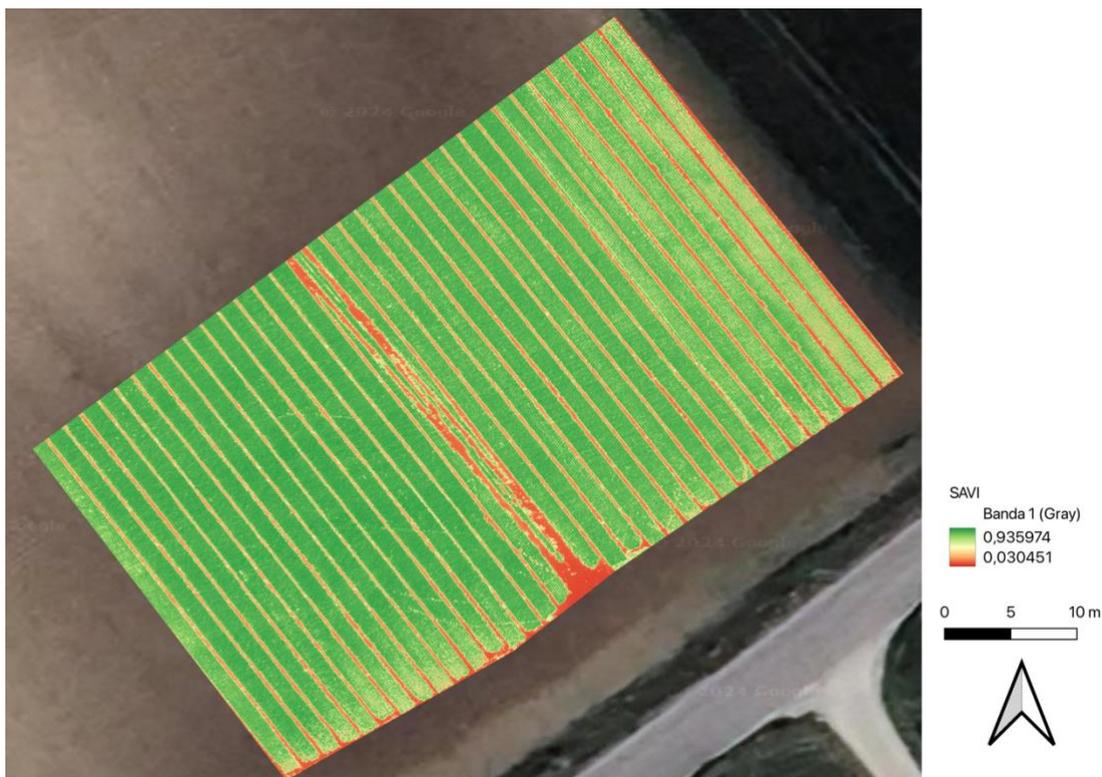


Figura 7-6: Indice vegetazionale SAVI

7.2 Statistiche zonali

Sono state ottenute le statistiche zonali di ciascun indice vegetazionale nei 40 punti di campionamento. Tutte le tabelle con i valori di media, mediana e deviazione standard per ciascun indice vegetazionale sono riportate di seguito (Tabella 7-1, Tabella 7-2, Tabella 7-3, Tabella 7-4, Tabella 7-5, Tabella 7-6).

Tabella 7-1: Statistiche zonali dell'indice vegetazionale NDVI

Punto di campionamento	Media	Mediana	Deviazione standard
1	0,524834505	0,556159139	0,213306277
2	0,597937888	0,635693282	0,182379675
3	0,4534026	0,533718675	0,271610976
4	0,504308631	0,5698753	0,227145759
5	0,611842784	0,651683927	0,195208453
6	0,543478069	0,591709375	0,232451374
7	0,451591199	0,521211028	0,264578159
8	0,574936501	0,610363603	0,177363944
9	0,617019554	0,63900882	0,157700578
10	0,666982201	0,693179548	0,140276936
11	0,679666469	0,706861317	0,165493624
12	0,674069572	0,693836391	0,137490017
13	0,665354493	0,688739896	0,145147213

14	0,669854058	0,691242337	0,141952661
15	0,651452569	0,69289887	0,170651644
16	0,5662387	0,582027614	0,162971886
17	0,6226097	0,641605854	0,169853704
18	0,73239817	0,748489529	0,136680974
19	0,700018141	0,719613969	0,148826372
20	0,74570783	0,765409946	0,134402286
21	0,666988781	0,685681969	0,136518058
22	0,683046282	0,693137974	0,117800565
23	0,675829078	0,707435191	0,163610554
24	0,659658607	0,700771868	0,18551588
25	0,586323971	0,607716411	0,171018576
26	0,755323571	0,764742017	0,127972315
27	0,761396782	0,770631909	0,119004025
28	0,735764029	0,745593041	0,118368054
29	0,79924688	0,810020804	0,118050335
30	0,728495619	0,74497655	0,140043241
31	0,733713938	0,745219767	0,134070229
32	0,635157131	0,660968542	0,14639512
33	0,339195002	0,385063946	0,254142293
34	0,68665769	0,704044044	0,140031359
35	0,76812071	0,786154091	0,13325148
36	0,777024132	0,792246044	0,127992411
37	0,774404159	0,788016438	0,134852507
38	0,733238088	0,740192056	0,120565822
39	0,772004566	0,780770272	0,119784744
40	0,76141101	0,770745158	0,121462884

Tabella 7-2: Statistiche zonali dell'indice vegetazionale GNDVI

Punto di campionamento	Media	Mediana	Deviazione standard
1	0,48416634	0,513246983	0,22287453
2	0,554214598	0,593708485	0,196733806
3	0,41025919	0,47941336	0,268021996
4	0,458195897	0,51698786	0,227615166
5	0,567642909	0,608673632	0,212983221
6	0,496269152	0,542070687	0,243610402
7	0,405351844	0,46441038	0,264984611
8	0,522796502	0,56133616	0,195044242
9	0,569485837	0,592905104	0,173973756
10	0,62482046	0,652816951	0,156506348
11	0,638017785	0,667721391	0,185758686
12	0,631510375	0,652419925	0,153383976
13	0,623738	0,647696674	0,161313851
14	0,625290945	0,648148179	0,159017919
15	0,604935871	0,648717403	0,189805589
16	0,516741769	0,532078028	0,178135348
17	0,586912025	0,605451375	0,182878607
18	0,702990786	0,717896849	0,149405218
19	0,664599649	0,683990121	0,162374076

20	0,716059211	0,735944033	0,147135062
21	0,623786297	0,642013669	0,15000922
22	0,638951507	0,6482732	0,131438429
23	0,632509395	0,666350693	0,182342071
24	0,615468523	0,658808112	0,205927636
25	0,548719273	0,56954366	0,182111702
26	0,73170641	0,739634335	0,137786047
27	0,734942272	0,742131948	0,129296009
28	0,70641734	0,714818776	0,127943983
29	0,777017598	0,786952138	0,128708625
30	0,698608763	0,713510871	0,150689031
31	0,703751668	0,714233339	0,14565337
32	0,593090086	0,620372236	0,16119255
33	0,284234636	0,317114353	0,252243712
34	0,646087919	0,665765643	0,155887645
35	0,740814465	0,758506536	0,145837809
36	0,752430835	0,766621292	0,139330633
37	0,750777326	0,763409764	0,145858922
38	0,701990239	0,708633661	0,131932634
39	0,74689007	0,755387127	0,130565821
40	0,736347713	0,744585901	0,131492496

Tabella 7-3: Statistiche zonali dell'indice vegetazionale NDRE

Punto di campionamento	Media	Mediana	Deviazione standard
1	0,36715448	0,405768901	0,276969902
2	0,448944538	0,500826955	0,247724353
3	0,269744224	0,357348397	0,33454843
4	0,326021505	0,401717067	0,286618129
5	0,461783467	0,51583463	0,27041338
6	0,376001719	0,436515808	0,305233956
7	0,266936429	0,340374634	0,325391996
8	0,407823912	0,455578923	0,245115333
9	0,468100318	0,496360347	0,214988171
10	0,534531677	0,571253836	0,198079907
11	0,550989486	0,58882457	0,233626374
12	0,543838781	0,56842649	0,189408404
13	0,535037801	0,564248681	0,20074735
14	0,534970888	0,562723935	0,198581247
15	0,50767578	0,563881278	0,239923794
16	0,403973724	0,423862934	0,221969039
17	0,495937887	0,519260883	0,224137991
18	0,634911299	0,655896842	0,184581128
19	0,587485711	0,6119349	0,199918081
20	0,652290681	0,676204652	0,179740654
21	0,534594774	0,557111084	0,184429934
22	0,55194236	0,564239353	0,163862205
23	0,544512775	0,586443156	0,227571606
24	0,522800101	0,576373518	0,258508823
25	0,45149481	0,475003079	0,2216773

26	0,674591179	0,684017837	0,16635433
27	0,676071499	0,685161173	0,157216805
28	0,641411731	0,651793063	0,155367904
29	0,727822596	0,740202129	0,156566357
30	0,630189667	0,646773994	0,184370896
31	0,637834359	0,649632275	0,176672688
32	0,497769193	0,532263219	0,202075145
33	0,114828182	0,152874067	0,309621014
34	0,558654116	0,582788169	0,197191003
35	0,680483743	0,701977551	0,180204877
36	0,696355739	0,713245571	0,170737106
37	0,696228314	0,709440678	0,176355294
38	0,634004662	0,641097277	0,16096724
39	0,690679992	0,700420558	0,158998726
40	0,677524291	0,688655198	0,161321906

Tabella 7-4: Statistiche zonali dell'indice vegetazionale CVI

Punto di campionamento	Media	Mediana	Deviazione standard
1	2,442136533	2,350075841	0,46680592
2	1,920444659	1,858794868	0,332363132
3	2,086442442	1,975986719	0,451412289
4	1,946619005	1,811272383	0,449701932
5	1,822496937	1,759297013	0,342248911
6	1,902969963	1,795264959	0,468241377
7	2,083603891	1,931804717	0,528806359
8	1,71070704	1,655336261	0,308501152
9	1,645903205	1,582879186	0,320281881
10	1,58209997	1,559633851	0,238830437
11	1,538935692	1,487497091	0,292018712
12	1,517998717	1,467998981	0,299664867
13	1,629220468	1,596390367	0,266727405
14	1,452769907	1,4247787	0,22185666
15	1,456552435	1,403216243	0,269950305
16	1,833593894	1,726026535	0,434449704
17	2,30810306	2,192102909	0,531283235
18	1,828460936	1,759679973	0,348636273
19	1,63887454	1,56136024	0,36824216
20	1,652627165	1,617829442	0,288488228
21	1,447087215	1,388828754	0,300950008
22	1,34581181	1,31472975	0,225561843
23	1,421352548	1,387635767	0,235128644
24	1,474976683	1,399394393	0,308290577
25	2,416270043	2,272295833	0,615101781
26	2,066000673	1,961543322	0,455126533
27	1,679456493	1,619401038	0,324820574
28	1,700632365	1,646286786	0,349572839
29	1,654691133	1,589521527	0,339117625
30	1,68082764	1,565948069	0,415892209
31	1,637103127	1,588226318	0,309110191

32	1,741077753	1,690211773	0,278144147
33	2,185770015	1,988325119	0,628915805
34	1,421956432	1,379908681	0,228785956
35	1,525801799	1,468482494	0,315083308
36	1,710363209	1,668033123	0,337817911
37	1,800597917	1,743185282	0,373776716
38	1,622500316	1,578398407	0,30080193
39	1,759707745	1,722901404	0,331322977
40	1,86684391	1,820820451	0,37431015

Tabella 7-5: Statistiche zonali dell'indice vegetazionale EVI

Punto di campionamento	Media	Mediana	Deviazione standard
1	0,834194523	0,887675881	0,218578095
2	0,908179311	0,957424074	0,181120462
3	0,756470591	0,853159666	0,27501146
4	0,805220022	0,888684869	0,234917809
5	0,91363032	0,965766788	0,190582496
6	0,842709081	0,914357722	0,232823787
7	0,753052644	0,835108966	0,268823959
8	0,887958083	0,936229169	0,178080836
9	0,929912475	0,963307858	0,146612982
10	0,977901751	1,008222342	0,127847497
11	0,982262253	1,016915917	0,150993558
12	0,97904336	1,005413175	0,118981578
13	0,973709388	1,002622604	0,127103368
14	0,977283498	1,005607128	0,126390451
15	0,958239364	1,006158233	0,159524301
16	0,885317567	0,914874077	0,16028258
17	0,933613945	0,967886329	0,161405002
18	1,03281055	1,05209893	0,111165076
19	1,003110138	1,028025985	0,123654012
20	1,044964374	1,065842092	0,105166654
21	0,974909759	1,001049161	0,116991196
22	0,991056909	1,006078303	0,10036821
23	0,9784358	1,019023359	0,145548422
24	0,961132943	1,008486509	0,169609752
25	0,908534123	0,94636479	0,172921923
26	1,060411281	1,075069308	0,099215177
27	1,057687965	1,070540786	0,088964948
28	1,038210814	1,051800907	0,092234999
29	1,087467453	1,1000278	0,083219051
30	1,027585586	1,048459113	0,111602983
31	1,033264396	1,048637867	0,104163313
32	0,954921824	0,990186572	0,140090205
33	0,644177246	0,696697414	0,267888166
34	0,990297076	1,014695883	0,122102613
35	1,061057118	1,079982758	0,101891428
36	1,069050147	1,085394025	0,095369038
37	1,063596889	1,08132714	0,098740276

38	1,030984237	1,042790771	0,091732425
39	1,063623589	1,076490819	0,08754371
40	1,056446733	1,071533024	0,091240875

Tabella 7-6: Statistiche zonali dell'indice vegetazionale SAVI

Punto di campionamento	Media	Mediana	Deviazione standard
1	0,734588447	0,77563715	0,117870152
2	0,776624032	0,807425916	0,093233581
3	0,672804829	0,752505213	0,175033453
4	0,709525843	0,773471951	0,145171331
5	0,777473134	0,808706701	0,091228616
6	0,726583741	0,777726352	0,12795465
7	0,671424383	0,742031276	0,161186828
8	0,763676954	0,793896079	0,085776571
9	0,790924791	0,807902902	0,060846029
10	0,814426956	0,827464819	0,053667764
11	0,814454882	0,830854237	0,068033107
12	0,817629734	0,828071117	0,043889558
13	0,81260659	0,824290574	0,048268187
14	0,812844377	0,824114025	0,050839294
15	0,803813857	0,824058712	0,067520582
16	0,77691939	0,797102749	0,073888356
17	0,794167073	0,813138455	0,067519858
18	0,842376505	0,848885864	0,035604064
19	0,829748247	0,836664081	0,039276881
20	0,845818372	0,850177974	0,032197146
21	0,823989147	0,831446558	0,04190702
22	0,827428086	0,833002329	0,036745439
23	0,817609533	0,83341074	0,058035681
24	0,809631133	0,830264449	0,073714099
25	0,783504388	0,803809851	0,07665788
26	0,859285811	0,862836242	0,027128418
27	0,862397177	0,86443755	0,026994243
28	0,85452387	0,856758446	0,028693583
29	0,872334076	0,874468565	0,023202999
30	0,850028929	0,856121182	0,035197663
31	0,852640024	0,856934249	0,030936737
32	0,812904198	0,829347253	0,059225746
33	0,619992718	0,687272191	0,175658096
34	0,83471525	0,846358001	0,049397601
35	0,863045761	0,86645782	0,033983438
36	0,860002815	0,861256182	0,026637272
37	0,861100715	0,863766074	0,026068233
38	0,849948539	0,852213353	0,02833184
39	0,859471807	0,861456245	0,025947756
40	0,856716638	0,85942784	0,028308825

7.3 Grafici a dispersione o scatter plots

7.3.1 Correlazione tra altezza media delle piante di basilico e indici vegetazionali

Tutti i grafici a dispersione che mostrano la relazione tra l'altezza media e il valore medio di ciascun indice vegetazionale sono riportati di seguito (Figura 7-7, Figura 7-8, Figura 7-9, Figura 7-10, Figura 7-11, Figura 7-12). Dai grafici è possibile vedere come essi tendono a descrivere una relazione lineare, in quanto su assi cartesiane la relazione è di tipo lineare se si avvicina alla forma di una retta. La correlazione tra le due variabili però non è uniforme nei vari indici vegetazionali. In tutti gli indici la correlazione è positiva, in quanto all'aumentare della variabile altezza media, tendenzialmente il valore medio dell'indice vegetazionale aumenta più o meno proporzionalmente. L'unica eccezione si verifica con l'indice vegetazionale CVI che non descrive una correlazione positiva, ma, piuttosto, negativa e poco lineare. Anche l'entità, cioè la forza della relazione esistente tra le due variabili, è diversa a seconda degli indici; più i punti sono raggruppati attorno alla retta e più forte è la relazione tra le variabili. I grafici caratterizzati da un'entità più elevata sono quelli degli indici vegetazionali EVI e SAVI. È stato ottenuto anche il coefficiente di determinazione o R^2 . I valori più elevati di R^2 sono quelli dell'indice vegetazionale GNDVI ($R^2_{\text{GNDVI}} = 0.5229$) e NDRE ($R^2_{\text{NDRE}} = 0.5328$). Dal momento che il coefficiente di determinazione ha la funzione di rappresentare la variazione nei valori dell'indice vegetazionale che può essere giustificata dalla variazione dell'altezza media, rispettivamente il 52.29% della variazione dell'GNDVI e il 53.28% della variazione del NDRE è legata alla variazione dell'altezza media delle piante. Anche per gli altri indici il valore di R^2 è discreto ($R^2_{\text{NDVI}} = 0.4962$, $R^2_{\text{EVI}} = 0.4758$, $R^2_{\text{SAVI}} = 0.4684$), con l'esclusione dell'indice vegetazionale CVI il cui R^2 è pari a 0.026, che quindi non descrive una correlazione.

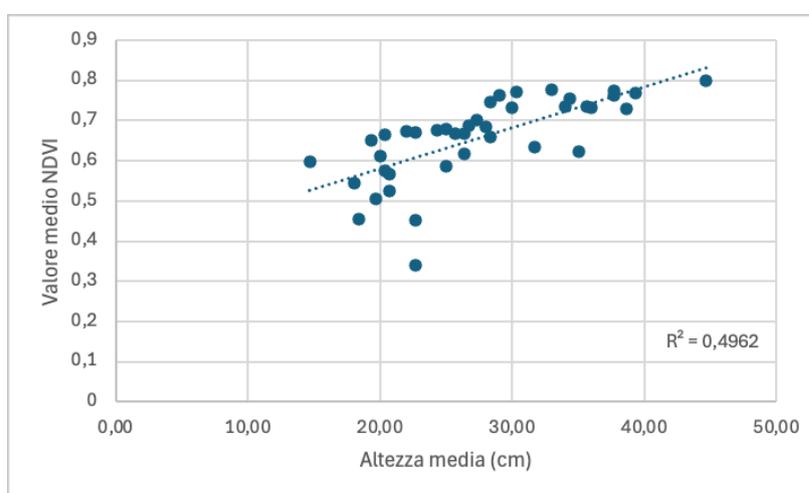


Figura 7-7: Correlazione tra altezza e NDVI

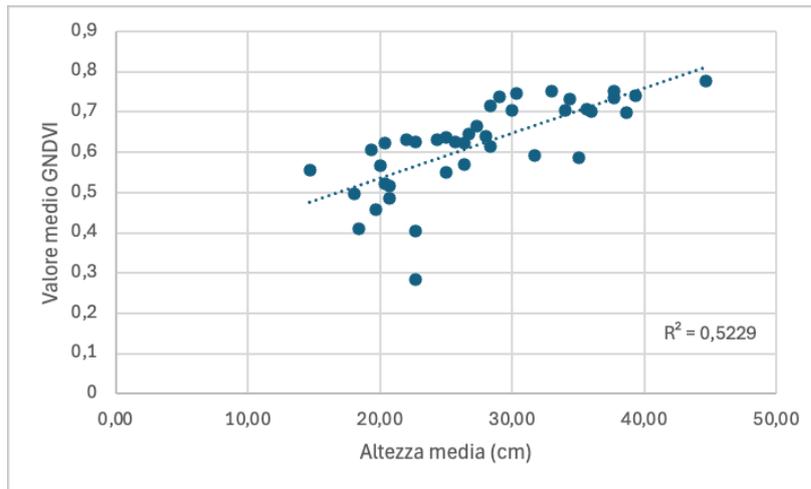


Figura 7-8: Correlazione tra altezza e GNDVI

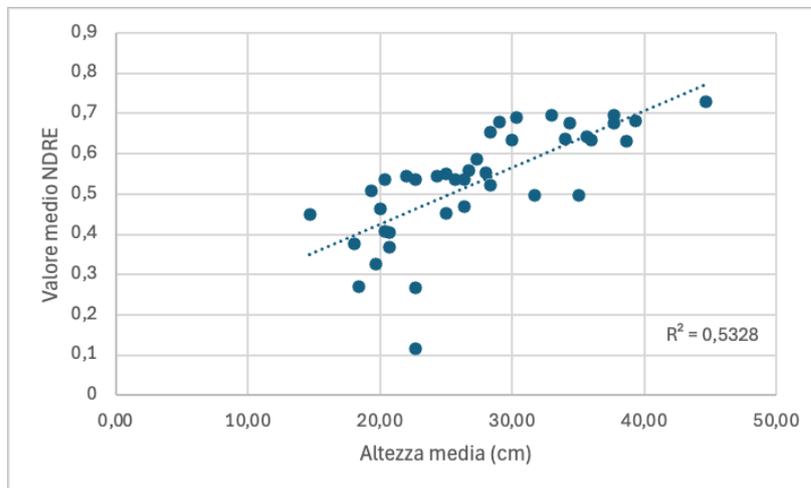


Figura 7-9: Correlazione tra altezza e NDRE

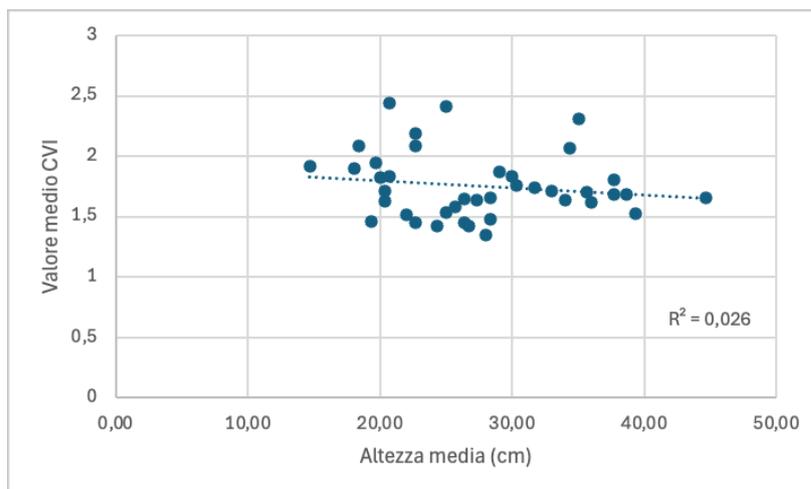


Figura 7-10: Correlazione tra altezza e CVI

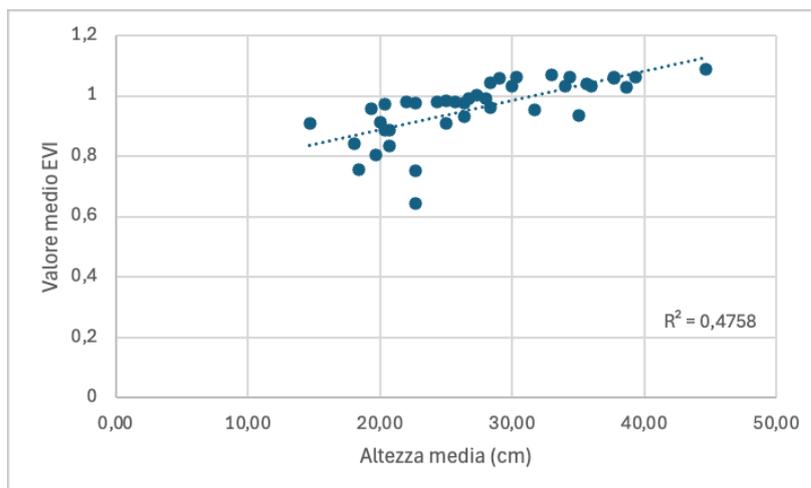


Figura 7-11: *Correlazione tra altezza ed EVI*

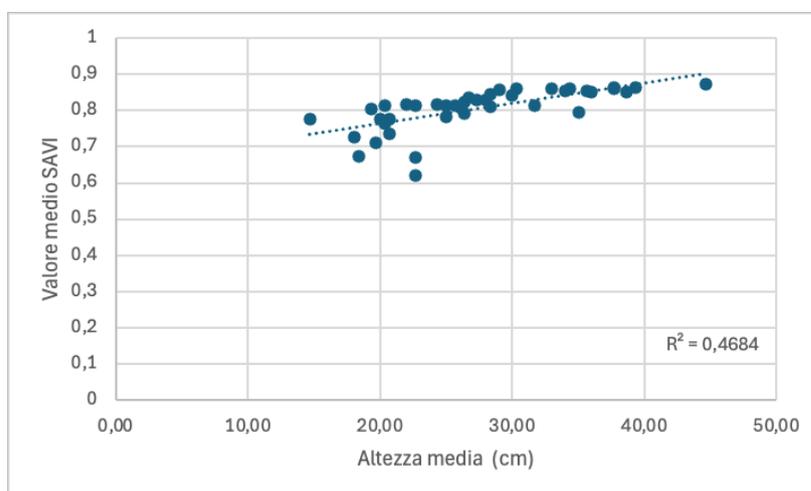


Figura 7-12: *Correlazione tra altezza e SAVI*

7.3.2 Correlazione tra biomassa e indici vegetazionali

Tutti i grafici a dispersione che mostrano la relazione tra la biomassa e il valore medio di ciascun indice vegetazionale sono riportati di seguito (Figura 7-13, Figura 7-14, Figura 7-15, Figura 7-16, Figura 7-17, Figura 7-18). Dai grafici è possibile vedere come anche essi tendono a descrivere una relazione lineare. Anche in questo caso, in tutti gli indici la correlazione è positiva, ad eccezione dell'indice vegetazionale CVI. È possibile notare come anche con la biomassa le entità più forti si registrano con gli indici EVI e SAVI. Per quanto riguarda i coefficienti di determinazione, i valori più alti sono sempre quelli dell'indice vegetazionale GNDVI ($R^2_{\text{GNDVI}} = 0.4576$) e NDRE ($R^2_{\text{NDRE}} = 0.4659$). Quindi, rispettivamente, il 45.76% della variazione dell'GNDVI e il 46.59% della variazione del NDRE è legata alla variazione della biomassa delle piante. Anche per gli altri indici il valore di R^2 è abbastanza elevato

($R^2_{NDVI} = 0.4362$, $R^2_{EVI} = 0.4261$, $R^2_{SAVI} = 0.4317$), con l'esclusione dell'indice vegetazionale CVI il cui R^2 è pari a 0.0318, che quindi non descrive una correlazione.

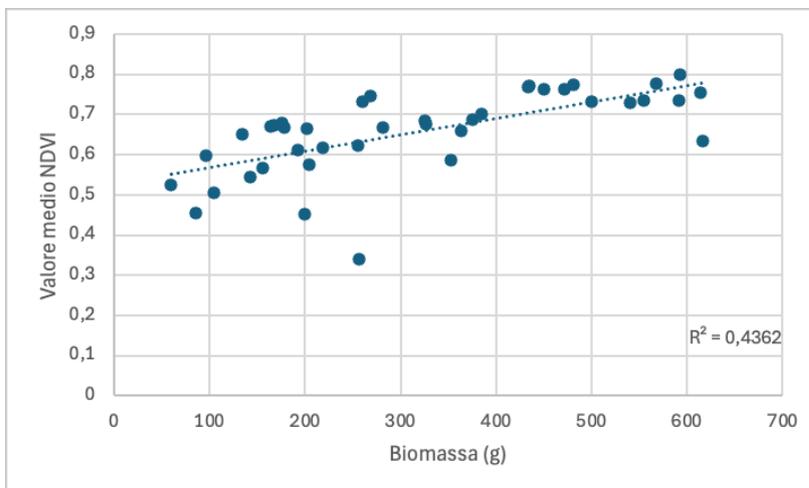


Figura 7-13: Correlazione tra biomassa e NDVI

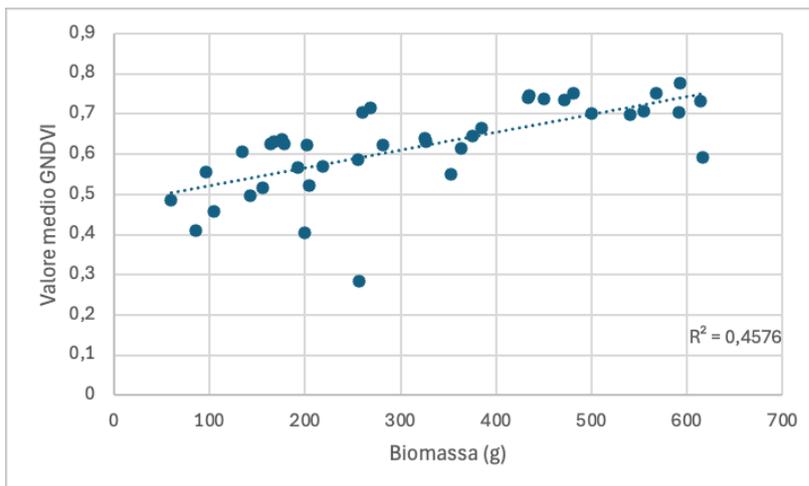


Figura 7-14: Correlazione tra biomassa e GNDVI

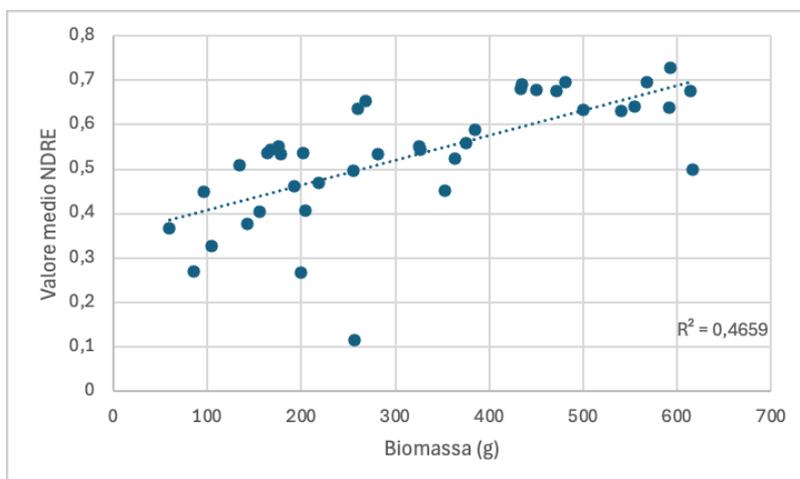


Figura 7-15: Correlazione tra biomassa e NDRE

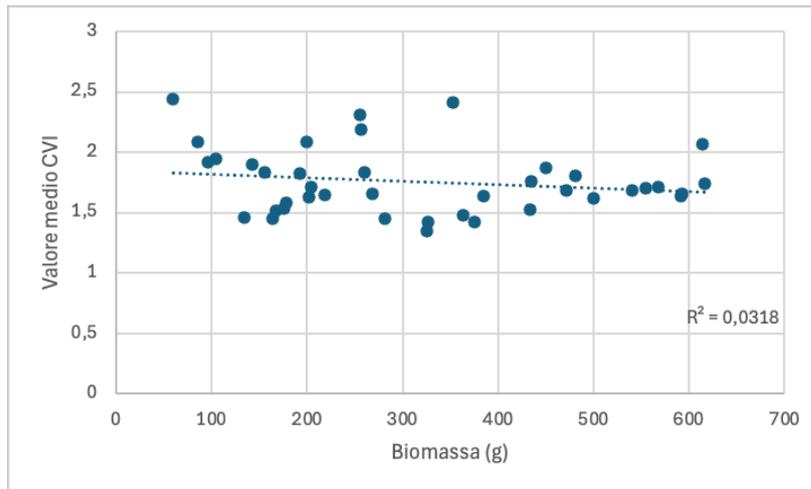


Figura 7-16: Correlazione tra biomassa e CVI

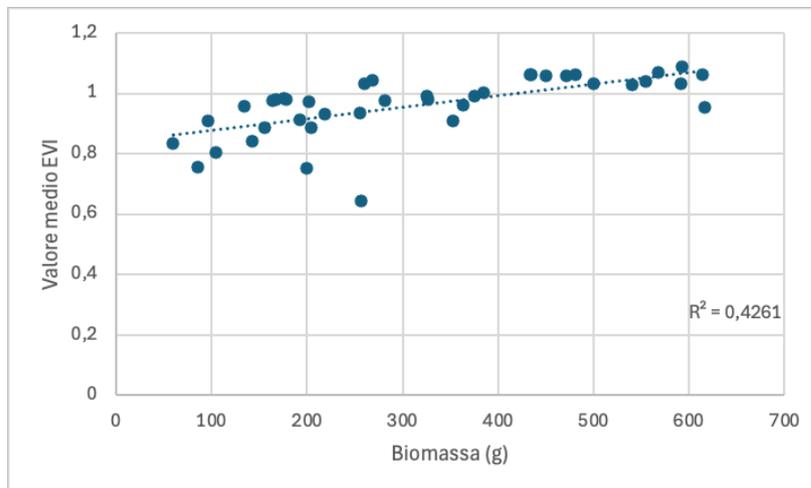


Figura 7-17: Correlazione tra biomassa ed EVI

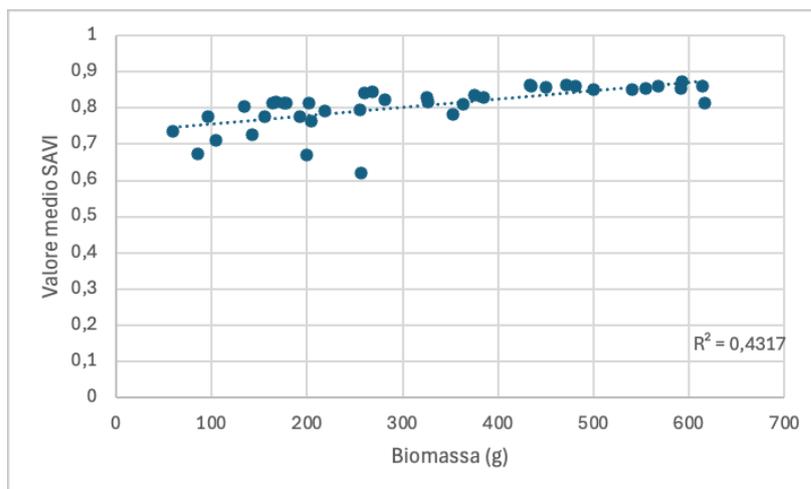


Figura 7-18: Correlazione tra biomassa e SAVI

7.4 Matrice di correlazione

È stata estratta la matrice di correlazione, che riporta i coefficienti di correlazione (r) delle diverse coppie di variabili, al fine di descriverne la reciproca correlazione. Dalla tabella (Figura 7-7) è possibile notare che i colori aiutano a visualizzare l'intensità della correlazione: verde scuro usato per un'alta correlazione positiva (vicina a 1), rosso per una correlazione negativa, giallo/arancio per una correlazione positiva ma più debole. Dalla matrice si nota che la correlazione è perfettamente positiva per ciascun valore correlato con sé stesso. Si hanno correlazioni positive molto alte tra gli indici vegetazionali messi in relazione tra loro (ad esclusione del CVI); difatti, il coefficiente di correlazione è sempre maggiore a 0.98. Queste elevate correlazioni sono un segnale di coerenza nei dati relativi alla salute delle piante e possono essere spiegate dal fatto che gli indici vegetazionali vengono calcolati utilizzando bande molto simili. Tuttavia, le correlazioni elevate tra indici di vegetazione non sono importanti ai fini del caso di studio e per questo non serve prenderle in considerazione. I coefficienti di correlazione più elevati sono quelli del GNDVI e del NDRE. In particolare, il GNDVI ha $r \approx 0.72$ con l'altezza media e $r \approx 0.68$ con la biomassa, mentre l'NDRE ha $r \approx 0.73$ con l'altezza media e $r \approx 0.68$ con la biomassa. Il terzo indice vegetativo che esplica una buona correlazione con altezza e biomassa è l'NDVI, i cui coefficienti di correlazione sono rispettivamente $r \approx 0.70$ con l'altezza media e $r \approx 0.66$ con la biomassa. Anche gli indici EVI e SAVI hanno una buona simile correlazione pari a $r \approx 0.68$ con l'altezza media e $r \approx 0.65$ con la biomassa.

Tabella 7-7: Matrice di correlazione

	Altezza media	Biomassa	NDVI	GNDVI	NDRE	CVI	EVI	SAVI
Altezza media	1							
Biomassa	0,855920	1						
NDVI	0,704427	0,660471	1					
GNDVI	0,723144	0,676465	0,998826	1				
NDRE	0,729898	0,682589	0,997861	0,999769	1			
CVI	-0,161116	-0,178370	-0,525228	-0,491392	-0,475354	1		
EVI	0,689781	0,652773	0,997624	0,994827	0,994030	-0,526258	1	
SAVI	0,684376	0,657021	0,986257	0,981141	0,980397	-0,536637	0,993884	1

Tenendo conto dei risultati ottenuti attraverso gli scatter plots e attraverso la matrice di correlazione, il GNDVI e l'NDRE sono gli indici vegetazionali che hanno dimostrato la migliore correlazione con l'altezza media e la biomassa delle piante di basilico. In particolare, hanno coefficienti di correlazione (r) e di determinazione (R^2) buoni con entrambi le variabili.

Da questa lettura dei dati ottenuti, si può definire che i due indici vegetazionali possono essere utilizzati come predittori della biomassa e della resa e per questo potrebbero permettere l'addestramento di modelli attraverso il machine learning per la previsione del momento ideale di raccolta del basilico.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro illustra alcune applicazioni dell'agricoltura di precisione basate sull'uso di droni e sensori spettrali, evidenziando il grande potenziale di questi strumenti per il settore agricolo. Durante il caso studio, è stato effettuato un volo di mappatura dell'apezzamento di basilico utilizzando un drone dotato di sensore multispettrale, pancromatico e termico. I dati raccolti dal sensore sono stati elaborati mediante procedure fotogrammetriche automatizzate, permettendo la creazione di ortomosaici da cui sono stati estratti gli indici vegetazionali desiderati. In particolare, sono stati calcolati sei indici vegetazionali – NDVI, GNDVI, NDRE, CVI, EVI e SAVI. Successivamente, i dati di biomassa e altezza media delle piante di basilico raccolti in ciascun punto di campionamento in campo sono stati correlati con il valore medio di ogni indice vegetazionale calcolato per la corrispondente area di campionamento. Questa analisi dei dati ha evidenziato una correlazione positiva significativa tra gli indici vegetazionali e le variabili di biomassa e altezza, ad eccezione del CVI. Tra questi, GNDVI e NDRE hanno mostrato la correlazione più forte, con i coefficienti di determinazione (R^2) e correlazione (r) più elevati. L'obiettivo dello studio è stato quindi raggiunto, confermando una correlazione significativa tra la biomassa e gli indici vegetazionali considerati. Il GNDVI ed il NDRE potrebbero essere impiegati per addestrare modelli di machine learning, capaci di sviluppare sistemi predittivi per la biomassa e la resa del basilico. Tali modelli offrirebbero un supporto decisionale tempestivo e accurato, ottimizzando i tempi e le modalità di raccolta. In definitiva, l'approccio adottato in questa ricerca rappresenta un contributo significativo all'ottimizzazione delle pratiche agricole, fornendo uno strumento che può migliorare l'efficienza produttiva. Questo studio arricchisce il campo di ricerca sull'applicazione delle tecnologie di agricoltura di precisione nella coltivazione del basilico, dimostrando come l'uso di droni e sensori spettrali possa supportare le decisioni di raccolta.

BIBLIOGRAFIA

- Amigoni, F., Schiaffonati, V., Somalvico, M., 2008. *Intelligenza artificiale*. Treccani.
- Bajomo, E.M., Aing, M.S., Ford, L.S., Niemeyer, E.D., 2022. Chemotyping of commercially available basil (*Ocimum basilicum* L.) varieties: Cultivar and morphotype influence phenolic acid composition and antioxidant properties. *NFS Journal* 26, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2022.01.001>
- Barnes, E.M., Clarke, T.R., Richards, S.E., Colaizzi, P.D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R.J., Li, H., Moran, M.S., 2000. COINCIDENT DETECTION OF CROP WATER STRESS, NITROGEN STATUS AND CANOPY DENSITY USING GROUND-BASED MULTISPECTRAL DATA.
- Bogue, R., 2017. Sensors key to advances in precision agriculture. *SR* 37, 1–6. <https://doi.org/10.1108/SR-10-2016-0215>
- Calderón Bravo, H., Vera Céspedes, N., Zura-Bravo, L., Muñoz, L.A., 2021. Basil Seeds as a Novel Food, Source of Nutrients and Functional Ingredients with Beneficial Properties: A Review. *Foods* 10, 1467. <https://doi.org/10.3390/foods10071467>
- Chabrillat, S., Ben-Dor, E., Cierniewski, J., Gomez, C., Schmid, T., Van Wesemael, B., 2019. Imaging Spectroscopy for Soil Mapping and Monitoring. *Surv Geophys* 40, 361–399. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09524-0>
- Cohen, 2013. First Report of the Occurrence and Resistance to Mefenoxam of *Peronospora belbahrii*, Causal Agent of Downy Mildew of Basil (*Ocimum basilicum*) in Israel, in: *Plant Disease*. p. 692.
- Cohen, Y., Ben Naim, Y., Falach, L., Rubin, A.E., 2017. Epidemiology of Basil Downy Mildew. *Phytopathology*® 107, 1149–1160. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-17-0017-FI>
- Daponte, P., De Vito, L., Glielmo, L., Iannelli, L., Liuzza, D., Picariello, F., Silano, G., 2019. A review on the use of drones for precision agriculture. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 275, 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/275/1/012022>

- Datt, B., McVicar, T.R., Van Niel, T.G., Jupp, D.L.B., Pearlman, J.S., 2003. Preprocessing eo-1 hyperion hyperspectral data to support the application of agricultural indexes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 41, 1246–1259. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.813206>
- De Masi, L., Siviero, P., Esposito, C., Castaldo, D., Siano, F., Laratta, B., 2006. Assessment of agronomic, chemical and genetic variability in common basil (*Ocimum basilicum* L.). *Eur Food Res Technol* 223, 273–281. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0201-0>
- Debangshi, U., 2021. Drones - Applications in Agriculture.
- Djalali Farahani-Kofoet, R., Römer, P., Grosch, R., 2014. Selecting basil genotypes with resistance against downy mildew. *Scientia Horticulturae* 179, 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.036>
- Duncan, E., Glaros, A., Ross, D.Z., Nost, E., 2021. New but for whom? Discourses of innovation in precision agriculture. *Agric Hum Values* 38, 1181–1199. <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10244-8>
- Dutta, G., Goswami, P., 2020. Application of drone in agriculture: A review. *Int. J. Chem. Stud.* 8, 181–187. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i5d.10529>
- Farooq, M.S., Riaz, S., Abid, A., Umer, T., Zikria, Y.B., 2020. Role of IoT Technology in Agriculture: A Systematic Literature Review. *Electronics* 9, 319. <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>
- Fussell, J., Rundquist, D., 1986. On Defining Remote Sensing. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*.
- 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, 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gorji, R., Skvaril, J., Odlare, M., 2024. Determining Moisture Content of Basil Using Handheld Near-Infrared Spectroscopy. *Horticulturae* 10, 336. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040336>
- GPS Educational Poster [WWW Document], 2013. . GPS.com. URL <https://www.gps.gov/multimedia/poster/>

- Guillot, J.D., 2023. Che cos'è l'intelligenza artificiale? [WWW Document]. URL <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20200827STO85804/che-cos-e-l-intelligenza-artificiale-e-come-viene-usata>
- Haas, R.A., Crişan, I., Vârban, D., Vârban, R., 2024. Aerobiology of the Family Lamiaceae: Novel Perspectives with Special Reference to Volatiles Emission. *Plants* 13, 1687. <https://doi.org/10.3390/plants13121687>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83, 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- ISTAT, 2024. Coltivazioni industriali [WWW Document]. ISTAT. URL <http://dati.istat.it/Index.aspx?QueryId=33707>
- Julitta, T., 2015. Optical proximal sensing for vegetation monitoring. Department of Earth and Environmental Sciences University of Milano-Bicocca.
- Kamilaris, A., Kartakoullis, A., Prenafeta-Boldú, F.X., 2017. A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 143, 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>
- Kardasz, P., Doskocz, J., 2016. Drones and Possibilities of Their Using. *J Civil Environ Eng* 6. <https://doi.org/10.4172/2165-784x.1000233>
- Karunathilake, E.M.B.M., Le, A.T., Heo, S., Chung, Y.S., Mansoor, S., 2023. The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. *Agriculture* 13, 1593. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081593>
- Kior, A., Yudina, L., Zolin, Y., Sukhov, V., Sukhova, E., 2024. RGB Imaging as a Tool for Remote Sensing of Characteristics of Terrestrial Plants: A Review. *Plants* 13, 1262. <https://doi.org/10.3390/plants13091262>
- Klimankova, E., Holadova, K., Hajslova, J., Poustka, J., Koudela, M., 2008. Aroma profiles of five basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivars grown under conventional and organic conditions. *Food Chemistry*.

- La Placa, L., Cornali, S., Bertinaria, F., Rossetti, A., Marchini, M., Reggiani, R., Battilani, P., 2024. Cropping system support in downy mildew control in basil in organic farming: a two-year open field experiment. *J Plant Pathol*. <https://doi.org/10.1007/s42161-024-01651-x>
- Li, S., Simonian, A., Chin, B.A., 2010. Sensors for Agriculture and the Food Industry. *Electrochem. Soc. Interface* 19, 41–46. <https://doi.org/10.1149/2.F05104if>
- Mandal, S., 2013. Precision Farming for Small Agricultural Farm: Indian Scenario. *AJEA* 3, 200–217. <https://doi.org/10.9734/AJEA/2013/2326>
- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., Mcbratney, A., Bouma, J., 2005. Future Directions of Precision Agriculture.
- Moore, C.E., Brown, T., Keenan, T.F., Duursma, R.A., Van Dijk, A.I.J.M., Beringer, J., Culvenor, D., Evans, B., Huete, A., Hutley, L.B., Maier, S., Restrepo-Coupe, N., Sonnentag, O., Specht, A., Taylor, J.R., Van Gorsel, E., Liddell, M.J., 2016. Reviews and syntheses: Australian vegetation phenology: new insights from satellite remote sensing and digital repeat photography. *Biogeosciences* 13, 5085–5102. <https://doi.org/10.5194/bg-13-5085-2016>
- Muhie, S.H., 2022. Novel approaches and practices to sustainable agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research* 10, 100446. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100446>
- Mulugeta, S.M., Gosztola, B., Radácsi, P., 2024. Diversity in morphology and bioactive compounds among selected *Ocimum* species. *Biochemical Systematics and Ecology* 114, 104826. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2024.104826>
- Nadeem, M.A., Çilesiz, Y., Korkmaz, E., Mustafa, Z., Baloch, F.S., Karaköy, T., Aasim, M., 2021. An Overview of *O. Basilicum* (L.) in Turkey, in: *Ocimum Basilicum: Taxon., Cultiv. and Uses*. Nova Science Publishers, Inc., pp. 51–71.
- Nam, S., Kang, S., Kim, J., 2020. Maintaining a constant soil moisture level can enhance the growth and phenolic content of sweet basil better than fluctuating irrigation. *Agricultural Water Management* 238, 106203. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106203>
- Panda, S.S., Ames, D.P., Panigrahi, S., 2010. Application of Vegetation Indices for Agricultural Crop Yield Prediction Using Neural Network Techniques. *Remote Sensing* 2, 673–696. <https://doi.org/10.3390/rs2030673>
- Patel, K.K., Patel, S.M., Scholar, P., 2016. Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges.

- Pierce, F.J., Nowak, P., 1999. Aspects of Precision Agriculture, in: Advances in Agronomy. Donald L. Sparks, pp. 1–85.
- Pignatti, E., Carli, G., Canavari, M., 2015. What really matters? A qualitative analysis on the adoption of innovations in agriculture. JAI 6. <https://doi.org/10.17700/jai.2015.6.4.212>
- PINTER Jr., P.J., JACKSON, R.D., ELAINE EZRA, C., GAUSMAN, H.W., 1985. Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. International Journal of Remote Sensing 6, 1813–1825. <https://doi.org/10.1080/01431168508948330>
- Pintore, I., Gilardi, G., Gullino, M.L., Garibaldi, A., 2016. Risposta di popolazione di *Peronospora belbahrii* a concentrazioni crescenti di metalaxyl-M.
- Semenova, N.A., Smirnov, A.A., Ivanitskikh, A.S., Izmailov, A.Yu., Dorokhov, A.S., Proshkin, Y.A., Yanykin, D.V., Sarimov, R.R., Gudkov, S.V., Chilingaryan, N.O., 2022. Impact of Ultraviolet Radiation on the Pigment Content and Essential Oil Accumulation in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). Applied Sciences 12, 7190. <https://doi.org/10.3390/app12147190>
- Senoo, E.E.K., Anggraini, L., Kumi, J.A., Karolina, L.B., Akansah, E., Sulyman, H.A., Mendonça, I., Aritsugi, M., 2024. IoT Solutions with Artificial Intelligence Technologies for Precision Agriculture: Definitions, Applications, Challenges, and Opportunities. Electronics 13, 1894. <https://doi.org/10.3390/electronics13101894>
- Shahrajabian, M.H., Sun, W., Cheng, Q., 2020. Chemical components and pharmacological benefits of Basil (*Ocimum basilicum*): a review. International Journal of Food Properties 23, 1961–1970. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1828456>
- Sheridan, I., 2020. Drones and global navigation satellite systems: current evidence from polar scientists. R. Soc. open sci. 7, 191494. <https://doi.org/10.1098/rsos.191494>
- Shikha, D., Kashyap, P., 2024. *Ocimum* species, in: Harvest. Food from Weeds. wiley, pp. 183–215. <https://doi.org/10.1002/9781119793007.ch6>
- Shirish, P., Bhalerao, S., 2013. Precision farming: The most scientific and modern approach to sustainable agriculture 1.
- Silleos, N.G., Alexandridis, T.K., Gitas, I.Z., Perakis, K., 2006. Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years. Geocarto International 21, 21–28. <https://doi.org/10.1080/10106040608542399>

- Spence, C., 2024. Sweet basil: An increasingly popular culinary herb. *International Journal of Gastronomy and Food Science*.
- Tran, T., Keller, R., Trinh, V., Tran, K., Kaldenhoff, R., 2022. Multi-Channel Spectral Sensors as Plant Reflectance Measuring Devices—Toward the Usability of Spectral Sensors for Phenotyping of Sweet Basil (*Ocimum basilicum*). *Agronomy* 12, 1174. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051174>
- Vergouw, B., Nagel, H., Bondt, G., Custers, B., 2016. Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments, in: Custers, B. (Ed.), *The Future of Drone Use, Information Technology and Law Series*. T.M.C. Asser Press, The Hague, pp. 21–45. https://doi.org/10.1007/978-94-6265-132-6_2
- Wolf, S.A., Buttel, F.H., 1996. The Political Economy of Precision Farming. *American Journal of Agricultural Economics* 78, 1269–1274. <https://doi.org/10.2307/1243505>
- Wyenandt, C.A., Simon, J.E., McGrath, M.T., Ward, D.L., 2010. Susceptibility of Basil Cultivars and Breeding Lines to Downy Mildew (*Peronospora belbahrii*). *horts* 45, 1416–1419. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.9.1416>
- Zwinkels, J., 2015. Light, Electromagnetic Spectrum.

SITOGRAFIA

<http://difesafitosanitaria.ersa.fvg.it/difesa-e-produzione-integrata/produzione-integrata-volontaria/disciplinari-produzione-Integrata-fvg/difesa-produzione-integrata-fvg-anno-2023/difesa-2023/fvg-orticole-2023/Basilico.pdf/view>

<https://www.gps.gov/multimedia/poster/>

[https://www.treccani.it/enciclopedia/intelligenza-artificiale_\(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/intelligenza-artificiale_(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica)/)

<https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20200827STO85804/che-cos-e-l-intelligenza-artificiale-e-come-viene-usata>