



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SISTEMI AGRICOLI INNOVATIVI

# WORKFLOW AGRONOMICO PER LA MESSA A PUNTO DI MAPPE DI PRESCRIZIONE IN SISTEMI CEREALICOLO-ZOOTECNICI

TIPO TESI: Sperimentale

AGRONOMIC WORKFLOW FOR THE  
DEVELOPMENT OF PRESCRIPTION MAPS IN CEREALS AND  
LIVESTOCK SYSTEMS

Studente:  
MATTEO DI EGIDIO

Relatore:  
PROF. LUIGI LEDDA

Correlatore:  
DOTT. MARCO FIORENTINI

Correlatore:  
Prof.ssa PAOLA ANTONIA DE  
LIGIOS

ANNO ACCADEMICO 2025/2026

“Ricordatevi che solo con l’impegno  
e lo studio si possono raggiungere grandi risultati.  
Infatti solo chi ci crede combatte, solo chi ci crede supera tutti gli ostacoli  
solo chi crede Vince “  
A tutti quelli che hanno creduto in me

# Sommario

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| ELENCO DELLE TABELLE .....                                          | 6  |
| ELENCO DELLE FIGURE .....                                           | 7  |
| ACRONIMI E ABBREVIAZIONI .....                                      | 8  |
| INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI .....                               | 9  |
| CAPITOLO 1 AGRICOLTURA DI PRECISIONE E GESTIONE AGRONOMICA ...      | 11 |
| 1.1 Introduzione all'agricoltura di precisione.....                 | 11 |
| 1.1.1 Concetti di gestione sito-specifica .....                     | 11 |
| 1.2 AP nel mondo .....                                              | 13 |
| 1.3 AP in Italia.....                                               | 14 |
| 1.4 Tecnologie per la gestione agronomica .....                     | 15 |
| 1.4.1 Sistemi di monitoraggio remoto e prossimale .....             | 16 |
| 1.4.2 Sistemi di supporto alla decisione e attuazione (VRT).....    | 16 |
| CAPITOLO 2 FONTI DI DATI PER LA PRESCRIZIONE AGRONOMICA .....       | 18 |
| 2.1 Analisi del suolo.....                                          | 18 |
| 2.1.1 L'Azoto come motore della produttività .....                  | 20 |
| 2.2 Strategie di campionamento per la gestione sito-specifica ..... | 20 |
| 2.2.1 La precisione del geo-riferimento .....                       | 21 |
| 2.3 Conducibilità elettrica .....                                   | 22 |
| 2.3.1 Applicazioni pratiche: dalla mappatura alla gestione .....    | 23 |
| 2.4 Indici vegetazionali .....                                      | 24 |
| 2.4.1 NDVI .....                                                    | 26 |
| 2.4.2 Interpretazione agronomica.....                               | 26 |
| 2.5 Mappe di resa .....                                             | 27 |
| 2.6 La tecnologia di pesata continua (Yield Monitoring) .....       | 29 |
| CAPITOLO 3 BILANCI NUTRIZIONALI.....                                | 30 |
| 3.1 Bilancio dell'azoto .....                                       | 30 |
| 3.2 Bilancio degli asporti .....                                    | 31 |
| 3.2.1 La tecnologia di pesata continua (Yield Monitoring) .....     | 32 |
| 3.3 Fabbisogni colturali.....                                       | 33 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4 Normative e limiti agronomici .....                                             | 34 |
| CAPITOLO 4 WORKFLOW AGRONOMICO.....                                                 | 36 |
| 4.1 Raccolta dati.....                                                              | 36 |
| 4.2 Dati gestionali aziendali .....                                                 | 37 |
| 4.3 Analisi integrata .....                                                         | 38 |
| 4.4 Definizione delle zone di gestione .....                                        | 39 |
| 4.5 Calcolo delle dosi variabili.....                                               | 40 |
| 4.6 Generazione della mappa di prescrizione .....                                   | 42 |
| CAPITOLO 5 TECNOLOGIE DI APPLICAZIONE .....                                         | 44 |
| 5.1 ISOBUS .....                                                                    | 44 |
| 5.2 Spandiconcimi a rateo variabile .....                                           | 45 |
| 5.3 Validazione in campo.....                                                       | 46 |
| 5.4 Confronto tra dose fissa e dose variabile.....                                  | 47 |
| CAPITOLO 6 MATERIALI E METODI .....                                                 | 49 |
| 6.1 DESCRIZIONE DELL’AZIENDA.....                                                   | 49 |
| 6.2 DESCRIZIONE DEL SITO SPERIMENTALE.....                                          | 50 |
| 6.3 GESTIONE AGRONOMICA.....                                                        | 50 |
| 6.4 Metodologia e Sviluppo del Workflow Agronomico .....                            | 51 |
| 6.4.1 Rilievo con drone .....                                                       | 55 |
| 6.4.2 Mappatura del suolo .....                                                     | 56 |
| 6.4.3 Geostatistica & Zonizzazione.....                                             | 59 |
| 6.4.4 Pianificazione dei punti di campionamento del suolo & analisi del suolo ..... | 60 |
| 6.4.5 Interpretazione dei dati.....                                                 | 60 |
| 6.4.6 Bilancio sostanza organica & Mappa di prescrizione .....                      | 60 |
| CAPITOLO 7 RISULTATI .....                                                          | 65 |
| 7.1 Mappatura con drone.....                                                        | 65 |
| 7.2. Mappatura del suolo & Zone Omogenee.....                                       | 66 |
| 7.3 Analisi del suolo.....                                                          | 70 |
| 7.4 Bilancio della sostanza organica & mappa di prescrizione.....                   | 71 |
| 7.5 Calcolo (Campione 1) .....                                                      | 72 |
| 7.6 Applicazione ai restanti campioni .....                                         | 72 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| CAPITOLO 8 DISCUSSIONI.....  | 74 |
| 8.1 LIMITI DELLO STUDIO..... | 77 |
| CAPITOLO 9 CONCLUSIONI.....  | 79 |
| BIBLIOGRAFIA.....            | 81 |

## ELENCO DELLE TABELLE

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| Tabella 2 GESTIONE AGRONOMICA ERBA MEDICA ..... | 50 |
| Tabella 3 RISULTATI ANALISI DEL SUOLO.....      | 70 |
| Tabella 4 ANALISI CHIMICHE .....                | 71 |
| Tabella 5 DIFFERENZA TRA LE ZONE .....          | 71 |
| Tabella 6 DOSE DI LETAME PER CAMPIONE .....     | 72 |

## ELENCO DELLE FIGURE

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 mappa zone conducibilità elettrica .....                                                        | 23 |
| Figura 2 Monitor mietitrebbia 4.0 per la raccolta dati .....                                             | 33 |
| Figura 3 spandiconcime rateo variabile che effettua una distribuzione diversa in base alla zona.....     | 41 |
| Figura 4 mappa di prescrizione pronta da caricare sul trattore per la concimazione rateo-variabile ..... | 43 |
| Figura 5 gestione isobus dell'irroratrice .....                                                          | 45 |
| Figura 6 immagine satellitare del sito sperimentale .....                                                | 49 |
| Figura 7 Dettaglio satellitare del sito sperimentale.....                                                | 50 |
| Figura 8 Controllo dei parametri di volo e di rilievo .....                                              | 52 |
| Figura 9 Piano di volo svolto dal drone.....                                                             | 53 |
| Figura 10 mappatura della conducibilità elettrica del campo .....                                        | 54 |
| Figura 11 Campionamento del suolo.....                                                                   | 55 |
| Figura 12 Drone Multispettrale .....                                                                     | 56 |
| Figura 13 Strumento che misura la conducibilità elettrica .....                                          | 57 |
| Figura 14 Strumento assemblato .....                                                                     | 58 |
| Figura 15 Passate lungo il campo.....                                                                    | 59 |
| Figura 16 Ortofoto del sito .....                                                                        | 65 |
| Figura 17 Punti di rilievo della conducibilità elettrica.....                                            | 66 |
| Figura 18 Variogramma sperimentale della conducibilità e il modello spaziale Matern campo a.....         | 67 |
| Figura 19 variogramma sperimentale della conducibilità e il modello spaziale Matern, campo b.....        | 68 |
| Figura 20 Mappa conducibilità elettrica suolo .....                                                      | 69 |
| Figura 21 zone omogenee .....                                                                            | 70 |

## ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

|      |                                                |
|------|------------------------------------------------|
| PAC  | Politica Agricola Comune                       |
| AP   | Agricoltura di Precisione                      |
| ISPA | International society of precision agriculture |
| GPS  | Global Positioning System                      |
| SO   | Sostanza Organica                              |
| GNSS | Global Navigation Support System               |
| N    | Azoto                                          |

## INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Negli ultimi decenni, il settore agricolo ha affrontato sfide sempre più complesse, dovute a molteplici fattori, tra cui la crescente domanda di cibo, i cambiamenti climatici e la necessità di adottare pratiche più sostenibili. In particolare, l'agricoltura cerealicola zootecnica riveste un ruolo cruciale nella produzione alimentare globale, poiché non solo fornisce cereali essenziali per l'alimentazione umana, ma supporta anche la produzione di carne e latticini, contribuendo quindi a garantire la sicurezza alimentare e a soddisfare le esigenze nutrizionali della popolazione mondiale.

In questo contesto, la nuova PAC (Politica Agricola Comune) e il GREEN DEAL europeo hanno stabilito obiettivi ambiziosi, puntando alla sostenibilità e alla riduzione dell'impatto ambientale delle pratiche agricole. Queste politiche non solo richiedono un incremento della produttività, ma anche una radicale trasformazione dei metodi di coltivazione e allevamento, introducendo l'idea che l'agricoltura debba operare in armonia con l'ambiente. Per raggiungere tali obiettivi, si rende necessaria l'innovazione nelle pratiche agronomiche, mediante l'adozione di tecniche avanzate che possano migliorare l'efficienza e la sostenibilità del settore.

I sistemi cerealicolo zootecnici rappresentano una delle realtà produttive più diffuse e strategiche dell'agricoltura italiana, caratterizzati da un forte legame tra coltivazioni e allevamento.

In questa tesi si propone di sviluppare un workflow agronomico volto alla messa a punto di mappe di prescrizione specifiche per sistemi cerealicolo zootecnici. Utilizzando strumenti innovativi come la mappatura della conducibilità elettrica del suolo, insieme ad analisi dettagliate dei parametri agroambientali, si mira a ottimizzare l'uso degli input agricoli e a migliorare le pratiche di concimazione. L'obiettivo è quindi quello di fornire agli agricoltori strumenti pratici e basati su evidenze che possano migliorare l'efficienza nella gestione dei nutrienti, garantendo allo stesso tempo il rispetto delle normative ambientali.

Questa ricerca propone di rappresentare un passo fondamentale verso la realizzazione di sistemi agricoli sempre più sostenibili e produttivi. Essa intende rispondere a una domanda di

mercato in continua evoluzione e a un ambiente sempre più vulnerabile attraverso la validazione delle metodologie proposte. In questo modo, si intende dimostrare l'efficacia di strategie innovative nel promuovere la sostenibilità in agricoltura, favorendo un futuro più equilibrato e sostenibile per il settore cerealicolo zootecnico e contribuendo a una gestione più responsabile delle risorse naturali.

# Capitolo 1

## AGRICOLTURA DI PRECISIONE E GESTIONE AGRONOMICA

### 1.1 Introduzione all'agricoltura di precisione

L'ISPA, ovvero la "International Society of Precision Agriculture", descrive l'agricoltura di precisione come una strategia agronomica di gestione agricola che implica la raccolta, l'elaborazione, l'analisi e l'integrazione di dati insieme ad altre informazioni. Questa strategia consente di determinare la gestione agronomica più opportuna basata sulla variabilità spazio-temporale, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse, la produttività, la qualità, la redditività e la sostenibilità delle coltivazioni agricole (Fiorentini et al., 2022).

#### 1.1.1 *Concetti di gestione sito-specifica*

La gestione sito-specifica delle colture, chiamata comunemente in inglese, "Site-specific crop management" (SSCM) è un concetto di gestione agricola basato sull'osservazione, la misurazione e la risposta alla variabilità inter- e intra-campo delle colture. Essa è una componente chiave dell'agricoltura di precisione, ovvero una strategia di gestione agricola che utilizza le tecnologie dell'informazione per garantire che le colture e il suolo ricevano esattamente ciò di cui hanno bisogno per una salute e una produttività ottimali." (FAO. 2022).

La gestione sito-specifica rappresenta un cambio di paradigma fondamentale nell'agronomia moderna, segnando il passaggio da una gestione basata sui valori medi dell'intero appezzamento a una focalizzata sulla variabilità spaziale e temporale dei campi (Mulla, 2013). L'obiettivo primario di questo approccio è ottimizzare l'efficienza nell'uso degli input — quali nutrienti, prodotti fitosanitari e risorse idriche — per massimizzare le rese produttive e, contemporaneamente, minimizzare l'impatto ambientale derivante da perdite per lisciviazione o deriva (Robertson et al., 2012). Il concetto si fonda sulla premessa scientifica che un campo agricolo non costituisca un'entità uniforme, ma un complesso sistema dinamico: le significative variazioni nelle proprietà fisico-chimiche del suolo (tessitura, fertilità,

contenuto idrico) e nelle condizioni colturali richiedono interventi agronomici differenziati per garantire la sostenibilità del sistema (Pierce & Nowak, 1999; Shanahan et al., 2008). In tale contesto, la gestione sito-specifica si articola metodologicamente attraverso tre fasi chiave:"

-Monitoraggio e diagnosi: Utilizzo di sensori prossimali, remoti e tecniche di campionamento georeferenziato per mappare la variabilità spaziale delle caratteristiche fisico-chimiche del terreno e dello stato di salute della coltura. Questa fase è essenziale per superare il concetto di gestione uniforme, permettendo di quantificare l'eterogeneità intrinseca degli agroecosistemi (Mulla, 2013; Zude-Sasse et al., 2016).

-Decisione (Prescrizione): Elaborazione dei dati raccolti tramite sistemi di supporto alle decisioni (DSS - Decision Support Systems) che, integrando modelli agronomici e dati storici, generano mappe di prescrizione (Prescription Maps). Tali mappe forniscono istruzioni operative sito-specifiche, indicando la quantità esatta di input necessaria per ogni zona del campo, in coerenza con le reali esigenze nutrizionali o fitosanitarie identificate (Robert, 2002; Havlin et al., 2014).

-Esecuzione a tasso variabile (VRT - Variable Rate Technology): Implementazione operativa tramite macchine agricole connesse, dotate di sistemi di posizionamento GNSS e centraline di controllo elettronico (ECU). Questa tecnologia abilita la modulazione automatica e in tempo reale del dosaggio dei prodotti, permettendo di eseguire le operazioni colturali in modo sito-specifico durante il passaggio sul terreno, in piena conformità con le mappe di prescrizione generate nella fase decisionale (Stafford, 2000; Zhang et al., 2002). L'integrazione di questi sistemi con i protocolli di comunicazione standardizzati, come l'ISOBUS, garantisce la necessaria precisione di attuazione e la tracciabilità delle operazioni (AEF, 2026; Fountas et al., 2006).

L'adozione di queste tecniche riduce drasticamente gli sprechi, garantendo l'apporto dell'input ottimale nella quantità corretta e nel luogo specifico, evitando al contempo la sovrapposizione o l'eccesso di distribuzione in aree che non ne necessitano o che non sono in grado di assorbirlo. "Come sottolineato dalla Commissione Europea nel contesto della strategia Farm to Fork (F2F), l'agricoltura di precisione costituisce uno strumento imprescindibile per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità ambientale del Green Deal europeo (European Commission, 2020). L'adozione di tali soluzioni tecnologiche è stata formalmente riconosciuta come una leva chiave per ridurre l'impronta ambientale della produzione primaria, in particolare attraverso il target di riduzione del 20% nell'uso di

fertilizzanti entro il 2030 (European Commission, 2021). Attraverso il supporto fornito dalla Politica Agricola Comune (PAC) e dai programmi di digitalizzazione come Digital Europe, l'Unione Europea mira a colmare il divario tecnologico tra le diverse realtà produttive, promuovendo modelli di gestione in cui l'ottimizzazione degli input non è più solo una scelta aziendale, ma un requisito strategico per la salvaguardia delle risorse naturali e la resilienza del sistema alimentare dell'UE (European Commission, 2023)."

## 1.2 AP nel mondo

L'agricoltura di precisione si è evoluta da pratica di nicchia a pilastro fondamentale per la produttività agricola globale. "La diffusione delle tecnologie di precisione, tuttavia, presenta una marcata eterogeneità geografica, influenzata da complessi fattori economici, infrastrutturali e strutturali che caratterizzano le diverse realtà agricole (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). Mentre in alcune aree del Nord America e dell'Europa settentrionale l'adozione è supportata da grandi estensioni aziendali e un'elevata propensione all'investimento tecnologico, in altri contesti — specialmente dove predomina la piccola proprietà fondiaria e una scarsa connettività infrastrutturale — l'adozione risulta ancora frammentata (Barnes et al., 2019). Tale eterogeneità è ulteriormente accentuata dalle barriere all'ingresso legate alla curva di apprendimento necessaria per la gestione dei dati e dalla disponibilità di servizi di assistenza tecnica specializzata, fattori che condizionano profondamente il tasso di penetrazione delle soluzioni VRT a livello regionale (Reidsma et al., 2020)". Il mercato globale delle tecnologie di precisione è in una fase di forte espansione, con una crescita guidata dalla necessità di ottimizzare le risorse in un contesto di crescente domanda alimentare mondiale. Nel 2026, si stima che il mercato di riferimento raggiunga un valore di circa 13,3 miliardi di USD, con un tasso di crescita annuale composto (CAGR) che riflette l'integrazione sempre più profonda di sensori, sistemi GPS, droni e piattaforme basate sull'intelligenza artificiale. La penetrazione delle tecnologie varia significativamente tra le diverse macro-aree:

- **Nord America:** Rappresenta attualmente l'area leader nell'adozione, con una quota di mercato superiore al 47%. Qui, l'integrazione è consolidata: negli Stati Uniti, ad esempio, oltre il 70% delle grandi aziende agricole cerealicole utilizza sistemi di guida assistita e monitor di resa.

- **Europa:** Si posiziona come un mercato maturo, dove circa il 60% degli agricoltori ha già adottato soluzioni tecnologiche. L'attenzione europea è fortemente orientata verso la sostenibilità ambientale, con l'AdP utilizzata come strumento per la misurazione e la riduzione dell'impatto dei fertilizzanti e dei fitofarmaci.
- **Asia-Pacifico:** È considerata la regione a più rapida crescita. La spinta è fornita da iniziative governative per la sicurezza alimentare e da un massiccio impiego di droni agricoli per il monitoraggio delle colture e l'analisi del suolo, che superano il 50% dell'impiego totale di droni in ambito rurale in quest'area.

Nonostante i benefici, l'adozione su scala globale affronta ancora ostacoli significativi, in particolare nei paesi in via di sviluppo. Le principali barriere includono:

- **Costi di investimento:** Gli elevati costi iniziali per l'acquisto di macchinari connessi e software possono rappresentare un freno per le piccole e medie imprese.
- **Infrastrutture:** L'assenza di connettività a banda larga nelle zone rurali limita l'operatività dei sistemi basati su cloud e in tempo reale.
- **Competenze tecniche:** La necessità di formazione specialistica per gestire la mole di dati generata rimane una sfida per garantire un'adozione inclusiva.

### 1.3 AP in Italia

Il panorama agricolo italiano sta vivendo una fase di transizione profonda, passando da un approccio puramente sperimentale a una fase di strutturazione dell'Agritech. In un contesto segnato da instabilità climatica e necessità di ottimizzazione delle risorse, l'Agricoltura 4.0 è diventata una leva competitiva essenziale per il sistema agroalimentare nazionale. Nel 2026, l'agricoltura italiana si trova di fronte all'imperativo dell'efficienza: la gestione delle risorse non è più basata su una logica quantitativa, bensì qualitativa e data-driven. Il mercato italiano dell'Agricoltura 4.0 ha mostrato segnali di resilienza e crescita, con un incremento del settore

stimato intorno al 9% nel corso del 2025. Nonostante l'entusiasmo verso le tecnologie digitali, l'adozione rimane disomogenea:

Superficie digitalizzata: Attualmente, solo circa l'8% della Superficie Agricola Utilizzata (SAU) nazionale è gestita con logiche pienamente "4.0", sebbene questo dato rappresenti un incremento incoraggiante del 33% rispetto ai rilievi del 2021.

-Strumenti più diffusi: Le soluzioni digitali più adottate dalle imprese agricole italiane includono:

- Software gestionali aziendali: 47% delle aziende digitalizzate.

- Sistemi di monitoraggio macchine e attrezzature: 34%.

- Sistemi di supporto alle decisioni (DSS): 20%.

- Mappatura tramite dati satellitari e droni: 18% e 14% rispettivamente.

La sfida per il prossimo futuro riguarda l'accessibilità digitale e la formazione tecnica. Le principali criticità riscontrate includono:

- Costi di investimento: Gli elevati costi iniziali per l'acquisto di macchinari 4.0 rimangono un freno, specialmente per le aziende di piccole dimensioni. Però si può fare agricoltura di precisione anche semplicemente adottando buone pratiche dettate da professionisti che si possono basare su rilievi con droni o mappature della conducibilità e quindi pratiche di costi molto inferiori

- Gap di competenze: La necessità di nuove professionalità capaci di interpretare i dati (AI, blockchain, agronomia di precisione) è sempre più pressante.

- Normativa: A partire dal 1° gennaio 2027, l'adozione del Quaderno di Campagna Digitale (Qdca) diverrà obbligatoria in Italia, spingendo ulteriormente le aziende verso la digitalizzazione per garantire la conformità normativa e l'accesso ai contributi agricoli.

#### **1.4 Tecnologie per la gestione agronomica**

La transizione verso un'agricoltura sito-specifica poggia su un ecosistema di tecnologie abilitanti che consentono di colmare il divario tra la diagnosi dello stato del suolo/coltura e l'intervento operativo in campo. L'integrazione di questi strumenti permette di trasformare il dato grezzo in valore agronomico, ottimizzando l'impiego di input e massimizzando l'efficienza produttiva.

#### 1.4.1 *Sistemi di monitoraggio remoto e prossimale*

La comprensione della variabilità spaziale dell'appezzamento rappresenta il prerequisito fondamentale per ogni intervento. Tale fase si avvale di tre strumenti principali:

-Rilievi satellitari (Remote Sensing): Grazie a costellazioni come Sentinel-2 (programma Copernicus), è possibile monitorare vaste aree con una frequenza di rivisitazione elevata. Attraverso l'elaborazione di indici di vegetazione, come l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), gli operatori possono mappare il vigore delle colture, identificando precocemente carenze nutrizionali o stress idrici su scala aziendale.

-Droni (UAV - Unmanned Aerial Vehicles): Laddove sia necessaria una risoluzione centimetrica, l'impiego dei droni permette rilievi "on-demand" con sensori specifici (multispettrali, termici o RGB). Questi dispositivi sono determinanti per colture ad alto valore aggiunto, consentendo analisi dettagliate fino al singolo esemplare vegetale.

-Analisi del suolo (Proximal Sensing): La mappatura della conducibilità elettrica (CE) e l'analisi chimico-fisica geo-referenziata permettono di quantificare le differenze di tessitura, fertilità e capacità di ritenzione idrica. Ogni campione viene associato a coordinate GPS precise, fornendo la base per la creazione di mappe di fertilità dettagliate.

#### 1.4.2 *Sistemi di supporto alla decisione e attuazione (VRT)*

Una volta acquisiti i dati, la gestione agronomica si affida a sistemi di elaborazione e controllo automatico:

-Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS): Queste piattaforme rappresentano il "cervello" del sistema. Incrociando i dati ambientali (meteo), i rilievi remoti e le caratteristiche pedologiche, il software elabora mappe di prescrizione. Tali mappe definiscono la strategia operativa, indicando i dosaggi ottimali di concime, acqua o sementi per ogni specifica zona del campo.

-Tecnologie a Tasso Variabile (VRT): Rappresentano l'anello finale della catena. Le macchine agricole, dotate di sistemi GPS e interfacce ISOBUS, leggono le mappe di prescrizione e modulano in tempo reale il dosaggio degli input. Questa tecnologia garantisce che la coltura riceva esattamente ciò di cui ha bisogno (the right amount, at the right place, at the right time), riducendo drasticamente gli sprechi e l'impatto ambientale.

-Sistemi di Guida Automatica (GNSS): L'utilizzo di segnali satellitari ad alta precisione (RTK) consente alle macchine di mantenere traiettorie con errori di pochi centimetri, eliminando le sovrapposizioni nelle lavorazioni e riducendo il compattamento del suolo.

In sintesi, l'integrazione di queste tecnologie dal monitoraggio satellitare all'applicazione variabile permette il superamento della gestione convenzionale "a dose costante", delineando un modello di agricoltura tecnologicamente avanzato, sostenibile e interconnesso.

## Capitolo 2

# FONTI DI DATI PER LA PRESCRIZIONE AGRONOMICA

Le fonti dei dati per la prescrizione agronomica possono essere riconducibili a:

Analisi del suolo, i quali consentono l'applicazione dei bilanci agronomici dell'azoto, fosforo, potassio e organico

Indici vegetazionali, usando dati satellitari o da drone, consentono di identificare le zone su cui applicare diverse dosi di input agronomici

Mappe di resa, usando i dati di resa delle mietitrebbie, possiamo identificare delle zone a maggiore o minore produzione, e a partire da questi dati si possono applicare i bilanci agronomici dell'apporti e asporti.

### 2.1 Analisi del suolo

Le analisi del suolo non devono essere considerate un semplice adempimento burocratico o un'operazione isolata, bensì lo strumento conoscitivo di base per interpretare la complessità del sistema pedologico. Comprendere le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche di un terreno significa, di fatto, "leggere" le potenzialità e i limiti dell'ambiente in cui la coltura dovrà svilupparsi. In un'ottica di agricoltura moderna, queste indagini forniscono le fondamenta scientifiche necessarie per passare da una gestione convenzionale, spesso basata su interventi uniformi, a una gestione sito-specifica, capace di rispondere in modo chirurgico alle reali necessità del campo.

Un'indagine completa si articola su tre livelli di approfondimento, ciascuno fondamentale per delineare il profilo del terreno:

- L'analisi chimica fornisce una fotografia precisa dello stato nutrizionale del suolo. Oltre alla misurazione del pH e della dotazione di macroelementi

(azoto, fosforo, potassio) e microelementi, la determinazione della sostanza organica rappresenta un parametro fondamentale: essa agisce come il principale volano della fertilità biologica, migliorando la struttura del terreno, favorendo l'attività dei microrganismi e fungendo da riserva naturale di nutrienti prontamente assimilabili attraverso il processo di mineralizzazione. Parallelamente, la determinazione della Capacità di Scambio Cationico (CSC) risulta cruciale poiché rappresenta la "memoria" del suolo, ovvero la sua attitudine a trattenere e rilasciare nutrienti nel tempo, prevenendo fenomeni di lisciviazione. Comprendere questi equilibri chimici, in cui la sostanza organica e la CSC giocano un ruolo sinergico nel regolare la disponibilità di nutrienti, è indispensabile per prevenire fenomeni di salinizzazione, ottimizzare la nutrizione colturale e gestire correttamente la dinamica dei contaminanti all'interno del profilo pedologico.

- L'analisi biologica: Negli ultimi anni, l'attenzione scientifica si è spostata verso la componente vivente del suolo. Analizzare l'attività microbica e la biodiversità significa valutare il "motore" del terreno. La microflora, infatti, è la principale responsabile del ciclo della sostanza organica e della mineralizzazione dei nutrienti. Un suolo con un'alta attività biologica è intrinsecamente più fertile e resiliente, poiché mantiene una bio-disponibilità di nutrienti costante nel tempo (FAO, 2020).
- Analisi fisiche : Parametri quali tessitura, struttura, porosità e densità apparente definiscono l'architettura stessa del suolo, agendo come determinanti primari della sua fertilità fisica. La tessitura, essendo una proprietà intrinseca e immutabile su tempi brevi, condiziona profondamente la capacità di ritenzione idrica e la facilità di lavorazione (Hillel, 2004). Parallelamente, la struttura del suolo — definita dalla disposizione degli aggregati — governa il comportamento idrico e l'aerazione, influenzando direttamente la capacità delle radici di espandersi e di assorbire nutrienti (Brady & Weil, 2017). Una struttura ottimale, caratterizzata da una distribuzione equilibrata dei macro e micropori, non funge solo da supporto meccanico, ma opera come un sistema dinamico in grado di favorire un'infiltrazione idrica efficiente, mitigando al contempo i rischi di erosione

superficiale e di compattamento causato dal passaggio di mezzi meccanici pesanti (Dexter, 2004; Hamza & Anderson, 2005). La densità apparente, in particolare, viene oggi monitorata con attenzione crescente nel workflow di agricoltura di precisione, poiché un suo incremento eccessivo agisce come fattore limitante per l'accrescimento radicale e lo scambio gassoso (Lipiec et al., 2003). Comprendere queste proprietà fisiche è dunque indispensabile per modellare correttamente la dinamica dei fluidi nel suolo e ottimizzare gli interventi agronomici, garantendo la sostenibilità strutturale dell'agroecosistema sul lungo periodo.

### **2.1.1 L'Azoto come motore della produttività**

All'interno di questo quadro analitico, l'Azoto assume un ruolo di primo piano. Essendo un componente fondamentale delle proteine, degli enzimi e, soprattutto, della clorofilla, esso agisce come il principale catalizzatore del vigore vegetativo. In colture strategiche per l'economia agricola italiana, quali mais, frumento e riso, la gestione azotata rappresenta spesso il fattore determinante per la qualità e la quantità della granella finale (Havlin et al., 2014).

Tuttavia, l'azoto è un elemento estremamente mobile e soggetto a perdite significative per lisciviazione o volatilizzazione. Proprio per questo motivo, l'analisi del suolo — quando integrata con tecniche di agricoltura di precisione — permette di definire strategie di concimazione estremamente mirate. Conoscendo la dotazione specifica di ogni sotto-area, l'agricoltore può evitare l'eccesso di input azotato, riducendo l'impatto ambientale e massimizzando l'indice di efficienza d'uso (NUE). In questo senso, l'analisi del suolo cessa di essere una mera valutazione statica e diventa un atto dinamico di pianificazione, essenziale per coniugare l'efficienza produttiva con la tutela delle risorse naturali.

## **2.2 Strategie di campionamento per la gestione sito-specifica**

La validità delle analisi descritte in precedenza dipende strettamente dalla qualità del campionamento. In un'ottica di agricoltura di precisione, il tradizionale campionamento "a macchia di leopardo" o la semplice media dell'appezzamento risultano spesso insufficienti,

poiché non colgono la variabilità intrinseca del terreno. Per supportare una gestione sito-specifica, si ricorre a strategie di campionamento mirate e geo-referenziate.

#### 1. Campionamento a griglia (Grid Sampling)

Questa metodologia prevede la suddivisione del campo in una griglia regolare (quadrate o rettangolari). Ogni cella viene campionata individualmente, prelevando diversi campioni di terreno che vengono poi miscelati per ottenere un campione rappresentativo di quella specifica area. Questo approccio è estremamente rigoroso e permette di creare mappe di interpolazione geostatistica (come le mappe di kriging), che visualizzano la distribuzione spaziale dei nutrienti con estrema precisione. Sebbene richieda un impegno operativo maggiore, il campionamento a griglia è lo standard di riferimento per le applicazioni a tasso variabile (VRT), poiché fornisce una risoluzione spaziale costante e indipendente dalla soggettività dell'operatore.

#### 2. Campionamento basato su zone omogenee

Alternativa al campionamento a griglia, questa strategia mira a suddividere il campo in "zone di gestione" (Management Zones) che presentano caratteristiche agronomiche e pedologiche simili. La delimitazione di tali aree avviene incrociando diverse fonti dati, tra cui:

- Mappe di resa storiche: che evidenziano aree a produttività costante.

- Mappe di conducibilità elettrica (CE): che riflettono variazioni nella tessitura o nel contenuto idrico del suolo.

- Indici di vigore (NDVI) da satellite: che integrano l'andamento delle colture negli anni.

In questo caso, il numero di campioni viene ottimizzato concentrandosi solo sulle zone che presentano variazioni significative, riducendo i costi di analisi senza sacrificare l'accuratezza decisionale.

##### 2.2.1 *La precisione del geo-riferimento*

Indipendentemente dal metodo scelto, il fattore abilitante è l'uso del GPS. Ogni punto di prelievo viene archiviato con coordinate geografiche precise nel software gestionale aziendale (GIS - Geographic Information System). Questa storicizzazione dei dati permette, nel tempo, di monitorare l'evoluzione della fertilità del suolo in risposta alle pratiche agronomiche adottate, creando un circolo virtuoso tra diagnosi, intervento e monitoraggio dei risultati.

La combinazione tra campionamento georeferenziato e analisi di laboratorio consente infine la creazione delle "mappe di prescrizione" : il documento digitale che, caricato sul computer di bordo del trattore, permetterà alla macchina di dosare elementi nutritivi in modo puntuale, assecondando le reali necessità nutritive che le analisi del suolo hanno precedentemente rivelato.

## **2.3 Conducibilità elettrica**

La conducibilità elettrica del suolo come indicatore di variabilità spaziale

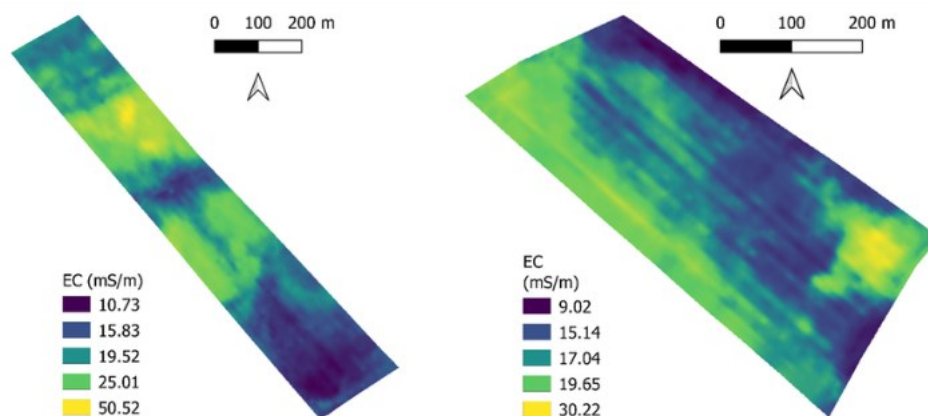
Tra le tecniche di monitoraggio prossimale, la misurazione della conducibilità elettrica (CE) si è affermata come uno degli strumenti più efficaci e meno invasivi per mappare la variabilità intrinseca di un appezzamento. La CE rappresenta la capacità di una soluzione o di un mezzo di condurre corrente elettrica; nel contesto pedologico, essa è influenzata da diversi fattori fisici e chimici che rendono questa misura un "proxy" (indicatore indiretto) estremamente prezioso per comprendere la struttura del terreno.

Principi e determinanti della conducibilità: La capacità del suolo di trasmettere corrente dipende principalmente da tre fattori: la tessitura (quantità di argilla), il contenuto idrico e la salinità.

-Argilla: Le particelle argillose, dotate di carica elettrica superficiale, favoriscono il movimento degli elettroni. Pertanto, suoli a tessitura più fine tendono a mostrare valori di CE più elevati rispetto a suoli sabbiosi.

-Acqua e sali: Poiché l'elettricità si muove attraverso la soluzione circolante nel suolo, la presenza di sali disciolti e il grado di umidità aumentano proporzionalmente la conducibilità rilevata.

Questa interdipendenza rende la CE uno strumento diagnostico "multidimensionale": una mappa di conducibilità elettrica non fornisce solo una misura isolata, ma descrive la configurazione spaziale delle proprietà fisiche del terreno, evidenziando zone con diversa capacità di ritenzione idrica o differente composizione granulometrica.



**Figura 1 mappa zone conducibilità elettrica**

### 2.3.1 Applicazioni pratiche: dalla mappatura alla gestione

L'impiego dei sensori di CE — tipicamente montati su appositi telai trainati o integrati in sistemi automatizzati — permette di mappare l'intero campo in tempi rapidi. Il risultato è una mappa di precisione che funge da "base cartografica" per diverse operazioni agronomiche:

- Ottimizzazione del campionamento: Invece di procedere con un campionamento casuale, la mappa di CE permette di identificare le zone omogenee del terreno. Si andranno a prelevare campioni di suolo solo dove la CE evidenzia variazioni significative, riducendo drasticamente il numero di analisi di laboratorio necessarie senza perdere in precisione.

- Gestione dell'irrigazione: Essendo strettamente legata alla capacità di ritenzione idrica, la CE aiuta a delineare le zone dove il suolo trattiene maggiormente l'acqua, permettendo di calibrare gli impianti di irrigazione a goccia o a pioggia in modo differenziato.

- Supporto al Variable Rate (VRT): La mappa di CE è spesso utilizzata come strato informativo (layer) fondamentale per la creazione delle mappe di prescrizione per la concimazione o la semina a rateo variabile, agendo da fattore di correzione per stimare il potenziale produttivo di ogni specifica area.

In definitiva, la misura della conducibilità elettrica trasforma la conoscenza del suolo da un dato puntuale e statico a una visione spaziale dinamica. Essa rappresenta, ad oggi, uno dei pilastri tecnologici per chiunque intenda approcciare l'agricoltura di precisione, offrendo una relazione costo-efficacia eccellente per la diagnostica agronomica su larga scala (Corwin & Lesch, 2005).

## 2.4 Indici vegetazionali

Nell'ambito dell'agricoltura di precisione, la capacità di valutare in tempo reale lo stato di salute e il vigore della coltura è resa possibile dall'utilizzo degli indici vegetazionali. Questi indicatori matematici si basano sul comportamento differenziato della vegetazione nei confronti della radiazione elettromagnetica, permettendo di trasformare dati spettrali in informazioni agronomiche concrete.

Le foglie delle piante sane possiedono una firma spettrale caratteristica:

Nel visibile (VIS): La clorofilla assorbe fortemente la radiazione rossa per il processo fotosintetico, mentre riflette una porzione della luce verde (da cui deriva il tipico colore delle piante).

Nel vicino infrarosso (NIR): La struttura cellulare interna delle foglie sane riflette in modo estremamente efficiente la radiazione, a differenza della radiazione rossa.

Gli indici vegetazionali sfruttano proprio il rapporto tra la riflettanza nel rosso e nel NIR. Maggiore è la differenza tra questi due valori, più elevato è il vigore fotosintetico della pianta.

Gli indici principali:

- EVI (Enhanced Vegetation Index): Simile all'NDVI, ma corretto per ridurre il "disturbo" causato dalla riflettanza del suolo nudo e dagli effetti atmosferici. Risulta particolarmente efficace in aree con elevata densità di biomassa, dove l'NDVI tenderebbe a "saturare" (ovvero a non distinguere più incrementi di crescita).
- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): È l'indice più diffuso e standardizzato nell'agricoltura di precisione. Viene calcolato come il rapporto tra la differenza e la somma delle riflettanze nel vicino infrarosso (NIR) e nel rosso visibile (Red): I suoi valori variano da -1 a +1; valori prossimi a 1 indicano una densa copertura vegetale e un'elevata attività fotosintetica. È lo strumento principe per il monitoraggio stagionale fornito dai satelliti come Sentinel-2 (Mulla, 2013). Tuttavia, è necessario considerare un limite tecnico intrinseco di questo indice, ampiamente documentato in letteratura: il fenomeno della saturazione. Diversi studi hanno dimostrato che quando la biomassa aumenta e l'indice di area fogliare (LAI - Leaf

Area Index) supera una soglia critica, situata generalmente attorno a  $LAI > 2$ , il segnale NDVI tende a saturare, perdendo sensibilità alle variazioni incrementali di biomassa o del contenuto di clorofilla (Tucker, 1979; Sellers, 1985). In tale condizione, l'indice non riesce più a distinguere efficacemente tra una coltura moderatamente vigorosa e una estremamente densa, poiché la riflettanza nel rosso raggiunge il minimo a causa del completo assorbimento da parte del complesso clorofilliano, mentre quella nel NIR subisce variazioni trascurabili (Haboudane et al., 2004). Per superare tali limitazioni, specialmente in fasi fenologiche avanzate o con colture a foglia larga, la ricerca scientifica raccomanda l'integrazione dell'NDVI con indici meno sensibili alla saturazione, come l'EVI (Enhanced Vegetation Index) o indici basati sul Red-Edge, che offrono una correlazione più lineare con lo sviluppo colturale anche ad alti valori di LAI (Gitelson et al., 2003).

- NDRE (Normalized Difference Red Edge): Utilizza la banda del "red edge" (la transizione tra il rosso e l'infrarosso) anziché il rosso puro. È estremamente sensibile alla clorofilla ed è considerato superiore all'NDVI per monitorare colture a ciclo avanzato o per identificare stress nutrizionali precoci che non sono ancora visibili all'occhio umano.

L'utilizzo di questi indici trasforma la visione del campo in una mappa di vigore, che consente all'agronomo di:

-Identificare zone di stress: Localizzare precocemente aree affette da carenze idriche, attacchi patogeni o stress nutrizionali.

-Ottimizzare la concimazione: Utilizzare la mappa dell'indice vegetazionale come base per la creazione di una mappa di prescrizione (VRT), distribuendo l'azoto in base all'effettiva domanda della pianta.

-Monitoraggio temporale: Confrontare indici di diverse annate per valutare l'efficacia delle pratiche agronomiche e pianificare strategie di lungo periodo.

L'integrazione costante di questi indici, estratti via satellite o tramite droni, rappresenta il passaggio definitivo verso un'agricoltura "proattiva" anziché "reattiva", dove la gestione della coltura segue il ritmo biologico effettivo del ciclo produttivo (Zude-Sasse et al., 2016).

### 2.4.1 NDVI

L'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, ovvero Indice di Vegetazione Differenza Normalizzata) è, il parametro più utilizzato nell'agricoltura di precisione per quantificare il vigore fotosintetico delle piante.

L'NDVI si fonda sulla peculiare interazione tra la radiazione solare e le strutture cellulari delle foglie. Mentre la clorofilla presente nel mesofillo fogliare assorbe selettivamente la radiazione nello spettro del Rosso (RED) per alimentare la fotosintesi, le pareti cellulari (il tessuto spugnoso della foglia) riflettono fortemente la radiazione nel Vicino Infrarosso (NIR).

L'indice viene calcolato mediante la seguente equazione:

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

NIR: Riflettanza nel vicino infrarosso.

RED: Riflettanza nel rosso visibile.

Il risultato è un valore compreso tra -1 e +1:

- Valori prossimi a -1: Tipici di superfici d'acqua o suoli saturi di umidità (che assorbono sia il rosso che il NIR).
- Valori intorno a 0: Tipici di suolo nudo o rocce, dove la riflettanza nel rosso e nel NIR è pressoché identica.
- Valori da 0.3 a 0.8+: Indicano una vegetazione attiva. Più il valore si avvicina a 1, maggiore è la biomassa e l'efficienza fotosintetica della coltura.

### 2.4.2 Interpretazione agronomica

L'NDVI non misura direttamente la salute della pianta, ma la sua densità fogliare (LAI - Leaf Area Index) e il contenuto di clorofilla.

Un agricoltore utilizza l'NDVI per:

- Mappatura del vigore: Una mappa NDVI permette di visualizzare immediatamente le "zone di sofferenza" del campo (colori caldi o tendenti al giallo/rosso sulla mappa), che possono essere dovute a carenze idriche, attacchi parassitari o compattamento del suolo.

- **Stima della biomassa:** Nelle colture cerealicole, esiste una forte correlazione tra il picco di NDVI durante la fase di levata/spigatura e la produzione finale di granella.
- **Applicazione differenziata:** La capacità dell'NDVI di distinguere tra zone a diverso vigore permette al sistema di guida del trattore di modulare la dose di concime (VRT): nelle zone con NDVI basso, il software può decidere di aumentare (se lo stress è nutrizionale) o diminuire (se lo stress è causato da ristagno idrico) l'apporto di input.

I limiti possono essere:

- **Saturazione:** In colture a ciclo avanzato o con una biomassa molto fitta, l'indice tende a "saturare", perdendo sensibilità: una volta che la copertura fogliare è totale, l'NDVI non riesce più a distinguere un ulteriore incremento di vigore.
- **Influenza del suolo:** Se la vegetazione è rada, la riflettanza del suolo nudo sottostante può influenzare drasticamente il valore dell'indice, portando a stime imprecise.

## 2.5 Mappe di resa

Se le analisi del suolo e gli indici di vegetazione forniscono una visione diagnostica e prospettica, le mappe di resa rappresentano la valutazione consuntiva del potenziale produttivo di un appezzamento. Esse costituiscono l'anello di congiunzione tra l'agronomia e l'analisi economica, trasformando i dati di raccolta in una rappresentazione spaziale dettagliata della performance colturale. La generazione di una mappa di resa richiede che la mietitrice sia equipaggiata con un sistema di pesatura in tempo reale, composto da tre componenti fondamentali:

- **Sensori di flusso e umidità:** Installati solitamente nel canale elevatore della trebbiatrice, misurano istantaneamente la quantità di granella che transita e il suo contenuto idrico.

- Ricevitore GNSS: Registra le coordinate geografiche esatte (longitudine e latitudine) -istante per istante durante la raccolta.
- Processore di bordo: Incrocia i dati di flusso, la larghezza della barra di taglio e la posizione GPS, generando un file geo-referenziato che visualizza graficamente la produzione espressa in tonnellate per ettaro (t/ha).

La mappa di resa non è solo un semplice contatore di produzione, ma uno strumento di analisi critica:

- Identificazione delle cause di variabilità: Sovrapponendo la mappa di resa con le mappe di conducibilità elettrica o con lo storico degli indici vegetazionali (NDVI), l'agronomo può comprendere perché alcune zone del campo producono sistematicamente meno di altre (es. zone di ristagno idrico, aree di scarsa fertilità o zone soggette a compattamento).
- Ottimizzazione della concimazione (VRT): Le mappe di resa sono essenziali per calibrare le strategie di fertilizzazione a tasso variabile. In un'ottica di economia circolare, si può decidere di apportare più nutrienti dove la resa è più alta (per sostenere l'asportazione di elementi nutritivi) o, al contrario, dove la resa è bassa per cercare di stimolare il potenziale produttivo della zona, previa analisi delle cause limitanti.
- Analisi reddituale: Queste mappe permettono di calcolare il "margine di contribuzione" per ogni zona del campo, distinguendo tra aree altamente profittevoli e aree in cui i costi di produzione superano il valore della produzione stessa.

Perché una mappa di resa sia scientificamente valida, deve essere sottoposta a un processo di pulizia dei dati (data cleaning). Errori comuni, come i tempi di ritardo nella lettura dei sensori (il tempo che intercorre tra l'ingresso della granella nella barra di taglio e il suo passaggio nei sensori) o sovrapposizioni nelle manovre di svolta, possono corrompere il dato. La corretta interpretazione delle mappe di resa richiede quindi competenze specifiche nell'uso di software GIS (Geographic Information System), capaci di filtrare il "rumore" di fondo per restituire un'informazione pulita e attendibile.

## **2.6 La tecnologia di pesata continua (Yield Monitoring)**

La quantificazione degli asporti colturali in un'ottica di precisione trova il suo fondamento tecnologico nei sistemi di monitoraggio della resa in tempo reale (Yield Monitoring Systems), integrati direttamente sulle macchine operatrici. La pesata continua avviene solitamente tramite l'installazione di sensori di carico (celle di carico) o sensori di flusso di massa (solitamente a impatto) posizionati nel canale di elevazione della mietitrebbia, che misurano il volume o il peso del prodotto in transito verso la tramoggia (Matese & Di Gennaro, 2020).

Il dato grezzo rilevato dai sensori richiede tuttavia un rigoroso processo di calibrazione e post-processing per essere convertito in una mappa di resa attendibile. Questo processo include la compensazione della variabilità dell'umidità della granella, che influenza significativamente la densità apparente del prodotto, e la correzione dei ritardi temporali dovuti al tempo di trasferimento del materiale dal sistema di trebbiatura al sensore di flusso (Blackmore et al., 2003). L'integrazione con sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System) ad alta precisione permette di georeferenziare ogni misura, trasformando il flusso di dati in una mappa vettoriale.

Questa tecnologia trasforma l'appezzamento da un'unità uniforme in un mosaico di diverse capacità produttive. La capacità di associare la variabilità del rendimento misurato alla variabilità del suolo (mappata tramite conducibilità elettrica) è il passaggio chiave per comprendere l'eterogeneità degli asporti. In questo modo, il bilancio dell'azoto non si basa più su stime teoriche regionali, ma sul comportamento reale della coltura in ogni metro quadro di terreno, fornendo la base oggettiva per la pianificazione dei futuri piani di concimazione (Zude-Sasse et al., 2016).

## Capitolo 3

# BILANCI NUTRIZIONALI

### 3.1 Bilancio dell'azoto

Il bilancio dell'azoto costituisce l'architettura logica su cui poggia l'intera gestione della fertilità minerale in un sistema agronomico moderno. In ambito di agricoltura di precisione, tale pratica supera la tradizionale applicazione di dosi medie aziendali, evolvendo verso un approccio dinamico che considera l'eterogeneità spaziale del campo come variabile fondamentale nel determinare la risposta produttiva (Mulla, 2013). Il calcolo si fonda sul principio di conservazione della massa, mirato a mantenere un equilibrio omeostatico tra gli input — rappresentati dai fertilizzanti minerali, dagli apporti organici e dal flusso netto di azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica — e gli output, costituiti primariamente dagli asporti colturali e dalle perdite per lisciviazione, volatilizzazione o denitrificazione (Havlin et al., 2014).

La complessità del sistema risiede nella natura stocastica della disponibilità di azoto nel suolo, influenzata da variabili pedologiche che operano su diverse scale spaziali. L'implementazione operativa richiede la scomposizione dell'appezzamento in unità gestionali omogenee (Management Zones), all'interno delle quali il bilancio viene eseguito in funzione delle specifiche caratteristiche pedologiche, quali la tessitura, il pH e la capacità di scambio cationico (CEC), spesso mappate tramite l'analisi della conducibilità elettrica apparente del suolo (Corwin & Lesch, 2005). Tale approccio permette di superare l'approccio empirico, integrando modelli di simulazione che mettono in relazione la disponibilità nutrizionale del suolo con le necessità fenologiche della coltura in ogni specifica sotto-area (Robert, 2002).

In questo paradigma, l'ottimizzazione della Nitrogen Use Efficiency (NUE) diviene l'obiettivo cardine della strategia di concimazione. La precisione tecnica consente di sincronizzare il rilascio o l'apporto di azoto con le fasi critiche di massimo assorbimento radicale, riducendo drasticamente il rischio di accumulo di nitrati nel profilo profondo del

suolo e minimizzando le inefficienze legate a una distribuzione non uniforme. In ultima analisi, la modellazione del bilancio dell'azoto in un contesto di agricoltura di precisione non rappresenta solo un esercizio di ottimizzazione agronomica per la massimizzazione delle rese, ma si configura come un imperativo tecnico per garantire la sostenibilità del sistema suolo-pianta e il rispetto dei vincoli ambientali definiti dalle direttive europee (European Parliament, 2016).

### **3.2 Bilancio degli asporti**

Il bilancio degli asporti rappresenta la componente in uscita del modello di fertilizzazione, definendo la quota di nutrienti effettivamente rimossa dal sistema suolo-pianta a seguito della raccolta della biomassa. In un approccio di agricoltura di precisione, la quantificazione di tale parametro non può più basarsi su stime tabellari medie, che trascurano l'importante variabilità spaziale della produttività all'interno di uno stesso appezzamento (Blackmore et al., 2003). La determinazione accurata dell'azoto asportato richiede invece un'analisi di dettaglio che correli la resa georeferenziata, ottenuta mediante sistemi di pesata continua (yield monitoring), con il contenuto di azoto specifico dei tessuti vegetali al momento del raccolto.

Il calcolo dell'asportazione specifica per unità di superficie è strettamente dipendente dal potenziale produttivo della Management Zone (MZ). Studi consolidati indicano che la variazione spaziale della resa è il principale fattore determinante della domanda di nutrienti nel lungo periodo (Mulla, 2013). La metodologia applicata prevede la mappatura della produzione attraverso mietitrebbie equipaggiate con sensori di flusso e sistemi di posizionamento GNSS, i cui dati, sottoposti a processi di pulizia e normalizzazione (rimozione di artefatti e correzione dei lag temporali dei sensori), forniscono una base informativa solida per la stima degli asporti.

L'integrazione tra le mappe di resa e le analisi chimiche del prodotto (granella o biomassa epigea) consente di calcolare il coefficiente di asportazione reale, inteso come la quantità di azoto rimossa per unità di prodotto ottenuto. Questo valore è soggetto a variazioni in funzione della varietà colturale, della disponibilità idrica e dello stress biotico o abiotico riscontrato durante il ciclo fenologico (Havlin et al., 2014). Pertanto, la conoscenza precisa dell'azoto effettivamente rimosso dal sistema è il prerequisito necessario per la chiusura del bilancio nutrizionale dell'annata successiva, permettendo di correggere le dosi di fertilizzante in

funzione del reale consumo della coltura precedente (Robert, 2002). Tale accuratezza è essenziale per evitare fenomeni di sovra-fertilizzazione in aree a bassa resa, dove gli asporti limitati renderebbero inutile, se non dannoso, un apporto elevato di azoto, aumentando di fatto il rischio di perdite per lisciviazione.

### *3.2.1 La tecnologia di pesata continua (Yield Monitoring)*

La quantificazione degli asporti culturali in un'ottica di precisione trova il suo fondamento tecnologico nei sistemi di monitoraggio della resa in tempo reale (Yield Monitoring Systems), integrati direttamente sulle macchine operatrici. La pesata continua avviene solitamente tramite l'installazione di sensori di carico (celle di carico) o sensori di flusso di massa (solitamente a impatto) posizionati nel canale di elevazione della mietitrebbia, che misurano il volume o il peso del prodotto in transito verso la tramoggia (Matese & Di Gennaro, 2020).

Il dato grezzo rilevato dai sensori richiede tuttavia un rigoroso processo di calibrazione e post-processing per essere convertito in una mappa di resa attendibile. Questo processo include la compensazione della variabilità dell'umidità della granella, che influenza significativamente la densità apparente del prodotto, e la correzione dei ritardi temporali dovuti al tempo di trasferimento del materiale dal sistema di trebbiatura al sensore di flusso (Blackmore et al., 2003). L'integrazione con sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System) ad alta precisione permette di georeferenziare ogni misura, trasformando il flusso di dati in una mappa vettoriale. Questa tecnologia trasforma l'appezzamento da un'unità uniforme in un mosaico di diverse capacità produttive. La capacità di associare la variabilità del rendimento misurato alla variabilità del suolo (mappata tramite conducibilità elettrica) è il passaggio chiave per comprendere l'eterogeneità degli asporti. In questo modo, il bilancio dell'azoto non si basa più su stime teoriche regionali, ma sul comportamento reale della coltura in ogni metro quadro di terreno, fornendo la base oggettiva per la pianificazione dei futuri piani di concimazione (Zude-Sasse et al., 2016).



*Figura 2 Monitor mietitrebbia 4.0 per la raccolta dati*

### **3.3 Fabbisogni culturali**

La definizione del fabbisogno culturale in agricoltura di precisione rappresenta la fase conclusiva della pianificazione nutrizionale, in cui l'obiettivo primario è la perfetta sincronizzazione tra l'apporto di elementi nutritivi e le dinamiche di assorbimento della pianta (nutrient uptake curves). Tale necessità deriva dalla consapevolezza che l'assorbimento dell'azoto non è un processo lineare, ma varia significativamente in funzione dello stadio fenologico e delle condizioni pedoclimatiche (Havlin et al., 2014).

Il calcolo dei fabbisogni si basa sull'equazione fondamentale del bilancio, che mette in relazione la produzione obiettivo, prefissata in funzione della yield potential della zona, e il coefficiente di assorbimento specifico, ovvero la quantità di azoto che quella coltura può assorbire in quel dato stadio fenologico necessaria alla pianta per produrre un'unità di biomassa o granella (Robert, 2002). In un sistema sito-specifico, questo calcolo viene applicato a ciascuna Management Zone, permettendo di differenziare la strategia di fertilizzazione non solo tra campi diversi, ma all'interno del medesimo appezzamento. L'integrazione di sensori di prossimità, come i sensori ottici a lettura variabile (Crop Sensors), permette inoltre di monitorare lo stato nutrizionale della coltura durante il ciclo vegetativo, consentendo aggiustamenti dinamici alla dose calcolata inizialmente (Zude-Sasse et al., 2016).

L'adozione di tale metodologia mira a colmare il gap esistente tra la disponibilità naturale del suolo — stimata attraverso il monitoraggio del nitrogen mineralization potential — e le necessità della coltura. La gestione precisa dei fabbisogni permette di ridurre lo stress da eccesso o carenza nutrizionale, fattori che, oltre a limitare la resa finale, possono compromettere la qualità qualitativa del prodotto (es. tenore proteico nel frumento duro) e favorire l'insorgenza di patologie fungine o la suscettibilità agli stress abiotici (Fiorentini et

al., 2022). In sintesi, la determinazione dei fabbisogni colturali non è più un processo statico basato su medie storiche, ma un'attività predittiva che sfrutta l'integrazione di dati agronomici, modelli colturali e tecnologie di monitoraggio per massimizzare la Nitrogen Use Efficiency (NUE).

### **3.4 Normative e limiti agronomici**

La gestione degli apporti azotati in agricoltura non è un'attività esclusivamente agronomica, ma deve necessariamente inserirsi in un quadro normativo volto alla protezione delle risorse idriche e alla riduzione dell'impatto ambientale. Il riferimento principale è costituito dalla Direttiva Nitrati (91/676/CEE), che impone limiti stringenti alle quantità di azoto distribuibili, specialmente nelle aree designate come vulnerabili ai nitrati (ZVN). In tali contesti, l'agricoltura di precisione si trasforma da opzione tecnica a strumento di conformità normativa: la capacità di distribuire l'azoto in modo sito-specifico permette di rispettare i tetti massimi regionali per ettaro, ottimizzando al contempo la distribuzione spaziale per non eccedere le capacità di assorbimento del suolo e della coltura (European Parliament, 2016).

L'integrazione del digitale nei processi decisionali agronomici risponde inoltre alla necessità di documentazione e tracciabilità imposta dalla Politica Agricola Comune (PAC). L'impiego di sistemi ISOBUS e di piattaforme di Farm Management Information Systems (FMIS) consente di registrare in modo automatico e georeferenziato ogni intervento di concimazione, garantendo la creazione di un registro delle operazioni colturali conforme alle direttive europee sulla transizione ecologica (European Commission, 2025). Questo rigore metodologico assicura che il bilancio azotato aziendale — calcolato come differenza tra input e output — si mantenga entro i limiti di legge, prevenendo il rischio di lisciviazione dei nitrati nelle falde acquifere, un fenomeno che rimane una delle principali cause di inquinamento diffuso in agricoltura (Havlin et al., 2014).

Infine, l'adozione di standard tecnologici, come le linee guida per l'interoperabilità dei macchinari (AEF, 2026), garantisce che il dato raccolto — sia esso relativo alla resa o allo stato nutrizionale — possa essere utilizzato per scopi di certificazione e controllo ambientale. In questo senso, l'agricoltura di precisione non rappresenta solo un metodo per migliorare l'efficienza economica, ma costituisce il fondamento tecnologico indispensabile per una gestione sostenibile e trasparente dell'agroecosistema, in linea con gli obiettivi di riduzione

dell'uso dei fertilizzanti fissati dalle recenti strategie comunitarie per la tutela della biodiversità e del suolo (FAO, 2020).

## Capitolo 4 WORKFLOW AGRONOMICO

### 4.1 Raccolta dati

La fase di raccolta dati costituisce il prerequisito fondamentale dell'intero workflow di precisione, definendo la qualità, la risoluzione e l'accuratezza del processo decisionale agronomico. In questa fase, l'acquisizione non si limita alla semplice raccolta di parametri isolati, ma mira alla creazione di un data-set multistrato che descriva lo stato fisico, chimico e biologico dell'appezzamento con elevata risoluzione spaziale e temporale. L'integrazione di sensori prossimali, quali i conduttivimetri per la mappatura della conducibilità elettrica apparente del suolo, risulta indispensabile per interpretare la variabilità della tessitura, della salinità e della capacità di ritenzione idrica (Corwin & Lesch, 2005). Questi dati, definiti "statici" per la loro ridotta variabilità temporale, delineano le caratteristiche strutturali del terreno, costituendo la base geomorfologica su cui si innesta l'analisi agronomica.

Parallelamente, l'approccio moderno integra il monitoraggio dinamico garantito dalla sensoristica remota e di prossimità. Il ricorso a immagini multispettrali ad alta risoluzione, fornite da missioni satellitari come Sentinel-2, permette di monitorare in tempo reale l'evoluzione degli indici di vigore vegetativo, come l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), fondamentale per quantificare lo sviluppo della biomassa durante le fasi fenologiche critiche (ESA, 2026). La frequenza di rivisitazione del satellite consente di costruire serie storiche utili a comprendere la risposta della coltura alle variabili meteorologiche dell'annata, trasformando il dato in una variabile predittiva. A queste si aggiungono le informazioni storiche derivanti dai sistemi di monitoraggio della resa (Yield Monitoring), che offrono una misura diretta della produttività pregressa, integrando il feedback del sistema produttivo (Blackmore et al., 2003).

La sfida tecnologica in questa fase risiede nell'integrazione di sorgenti eterogenee che operano su scale temporali e spaziali differenti. In questo contesto, il software GIS (Geographic Information System) open-source QGIS assume un ruolo di architrave

tecnologica per l'elaborazione dei dati raccolti. Grazie a un ecosistema altamente modulare basato su plugin specializzati (come QGIS Agri o strumenti per la gestione di dati raster e vettoriali), il software permette l'importazione, la georeferenziazione precisa e la pulizia dei dataset provenienti da diverse sorgenti. QGIS facilita l'applicazione di algoritmi di interpolazione spaziale, quali il Kriging ordinario o l>IDW (Inverse Distance Weighting), trasformando rilievi puntiformi in superfici continue che rappresentano la variabilità intrinseca del suolo.

## **4.2 Dati gestionali aziendali**

Il tassello conclusivo che permette di trasformare una serie di strumenti tecnologici isolati in un vero e proprio sistema di agricoltura 4.0 è rappresentato dai dati gestionali aziendali e dalle piattaforme software dedicate. Se i sensori e le mappe di resa forniscono il "dato grezzo", il software gestionale funge da centrale operativa dove le informazioni vengono archiviate, analizzate e trasformate in direttive operative.

L'obiettivo dei moderni gestionali è superare la frammentazione informativa. All'interno di queste piattaforme, l'imprenditore agricolo può incrociare:

- Dati agronomici storici: Analisi del suolo geo-referenziate, mappe di conducibilità elettrica e dati sulle rese pluriennali.

- Dati operativi in tempo reale: Monitoraggio della flotta in campo, consumi di carburante, ore di lavoro delle macchine e tracciabilità delle operazioni (es. data di semina, trattamenti fitosanitari, concimazioni).

- Dati ambientali ed esterni: Previsioni meteorologiche e dati satellitari (NDVI) aggiornati costantemente.

In un contesto normativo sempre più stringente, come l'obbligo del Quaderno di Campagna digitale in Italia, il software gestionale non è più solo una scelta di efficienza, ma un requisito necessario per la conformità normativa e l'accesso ai contributi della PAC (Politica Agricola Comune). Il dato gestionale permette inoltre di calcolare in modo puntuale il costo di produzione per singola coltura e per singola particella catastale, consentendo all'imprenditore di operare scelte basate su evidenze economiche oggettive e non solo sull'esperienza empirica.

La sfida tecnologica del presente risiede nell'interoperabilità: la capacità del software gestionale di dialogare automaticamente con le macchine in campo tramite protocolli standardizzati (come l'ISOBUS). Questo flusso bidirezionale consente di inviare le mappe di prescrizione direttamente al computer di bordo del trattore e, viceversa, di ricevere in cloud i dati effettivi dell'operazione appena conclusa

In conclusione, la gestione dei dati aziendali rappresenta il cuore pulsante dell'agricoltura moderna. L'agricoltura di precisione, intesa come ciclo che parte dall'analisi del suolo e si conclude con la mappa di resa, trova la sua piena espressione solo quando ogni dato prodotto diventa un'informazione utile per migliorare la redditività, la sostenibilità e la resilienza dell'intero sistema agroalimentare.

### **4.3 Analisi integrata**

Una volta completata la fase di raccolta e normalizzazione, i dati geospaziali vengono sottoposti a un processo di analisi integrata, finalizzato a distillare l'enorme mole di informazioni grezze in conoscenza agronomica operativa. L'analisi integrata non si limita alla semplice sovrapposizione visiva di layer informativi su QGIS (es. mappe di conducibilità elettrica e mappe di resa), ma utilizza avanzati approcci di modellazione statistica, geostatistica e apprendimento automatico per identificare le relazioni causali che governano la variabilità spaziale dell'appezzamento. In questa fase, l'obiettivo primario è discernere la variabilità strutturale — determinata da fattori intrinseci e permanenti del suolo, quali la tessitura, il contenuto di sostanza organica, il pH e la profondità utile del profilo — da quella temporale, influenzata invece dalle dinamiche stagionali, dagli eventi meteorologici estremi e dalle scelte agronomiche adottate nelle annate precedenti (Mulla, 2013).

L'integrazione analitica sfrutta tecniche di data fusion per creare modelli predittivi del potenziale produttivo reale. Attraverso l'impiego di funzioni avanzate di analisi spaziale, è possibile eseguire operazioni di zonal statistics e calcoli di correlazione tra differenti dataset per identificare le aree dove il fattore limitante è di natura nutrizionale, idrica o strutturale. Ad esempio, l'unione tra la mappa della conducibilità elettrica apparente (che fornisce una proxy spaziale della tessitura e della capacità di scambio cationico) e le serie storiche di indici di vigore (NDVI o EVI) permette di identificare zone "stabili" in cui la coltura manifesta risposte

consistenti nel tempo, distinguendole nettamente da zone dove la variabilità appare erratica o legata a stress transitori (Blackmore et al., 2003).

Un ulteriore livello di approfondimento è rappresentato dalla normalizzazione dei dati storici di resa. Poiché il potenziale di ogni annata è influenzato da un diverso andamento climatico, l'analisi integrata prevede spesso la trasformazione dei valori assoluti di produzione in indici di resa relativa (yield index). Tale procedura permette di confrontare annate diverse, livellando le fluttuazioni meteorologiche e isolando l'effetto della gestione agronomica e delle caratteristiche del suolo. Serve l'inserimento però di variabili termo-pluviometriche per far sì che il modello generalizzi

Il valore aggiunto di questa fase risiede nella capacità di trasformare dati eterogenei in una base decisionale unitaria e oggettiva. Tale approccio riduce drasticamente il rischio di interpretazioni soggettive o dettate dall'intuizione, garantendo che le decisioni operative — come la definizione delle strategie di concimazione a rateo variabile — siano supportate da un'analisi quantitativa solida. In ultima analisi, l'integrazione analitica funge da "ponte" critico: senza un'accurata sintesi dei dati, le successive fasi di definizione delle zone di gestione risulterebbero viziate da un eccessivo rumore statistico, compromettendo l'efficienza complessiva del sistema di agricoltura di precisione (Havlin et al., 2014).

#### **4.4 Definizione delle zone di gestione**

La definizione delle Management Zones (MZ) costituisce il fulcro operativo del workflow di precisione, rappresentando il processo di sintesi in cui l'eterogeneità del campo viene tradotta in un numero finito di unità gestionali differenziabili. Una Management Zone è definita come una sotto-area dell'appezzamento che presenta caratteristiche pedologiche e produttive sufficientemente omogenee da richiedere un trattamento agronomico uniforme, ma distinto da quello applicato alle aree circostanti (Mulla, 2013). La segmentazione dello spazio non è arbitraria, ma si basa su tecniche di classificazione che integrano i layer di dati precedentemente analizzati e normalizzati tramite software GIS.

Il processo di delimitazione avviene tipicamente attraverso algoritmi di apprendimento non supervisionato (unsupervised clustering), come l'algoritmo k-means o la Fuzzy C-Means clustering, disponibili all'interno di ambienti di analisi geospaziale come QGIS. Questi algoritmi operano analizzando simultaneamente le variabili inserite nel modello — ad

esempio, la conducibilità elettrica, le mappe di resa normalizzate, l'altimetria e l'indice di vigore vegetativo — raggruppando i pixel del campo in cluster che minimizzano la variabilità interna e massimizzano la differenza tra i gruppi (Robert, 2002). La scelta del numero ottimale di zone è un passaggio critico: un numero eccessivo di zone comporterebbe una complessità operativa tale da rendere inefficace la gestione in campo, mentre un numero troppo esiguo non permetterebbe di cogliere l'effettiva variabilità agronomica del suolo (Blackmore et al., 2003).

La validazione delle zone così definite richiede un approccio critico da parte dell'agronomo, che deve sovrapporre la classificazione algoritmica con le osservazioni agronomiche di campo e con i limiti strutturali (es. confini, infrastrutture o diverse destinazioni d'uso). Una volta validate, le zone di gestione diventano la base per la pianificazione delle strategie a rateo variabile (VRT). È fondamentale che queste aree siano stabili nel tempo o che, qualora la variabilità sia legata a fattori dinamici, vengano ricalibrate periodicamente sulla base dei dati raccolti nelle annate successive. Questo processo di zonazione permette di superare la pratica della "dose media aziendale", ottimizzando l'impiego dei fattori produttivi in funzione del reale potenziale di risposta di ogni specifica porzione di terreno (Havlin et al., 2014). In definitiva, le MZ rappresentano l'interfaccia tra l'intelligenza analitica basata sui dati e l'attuazione fisica delle pratiche colturali, garantendo un'applicazione delle risorse mirata ed efficiente.

#### **4.5 Calcolo delle dosi variabili**

Una volta stabilite le Management Zones (MZ), la fase successiva prevede la determinazione della strategia di concimazione a tasso variabile (Variable Rate Technology - VRT). Il calcolo delle dosi non è una mera applicazione di formule statiche, bensì il risultato di un bilancio nutrizionale dinamico, calibrato specificamente per le potenzialità espresse da ciascuna zona. Il principio cardine di questa fase è la sincronizzazione tra la disponibilità degli elementi nutritivi e le reali esigenze di assorbimento della coltura, al fine di massimizzare la Nitrogen Use Efficiency (NUE) e minimizzare le perdite per lisciviazione o volatilizzazione (Havlin et al., 2014).

Il calcolo della dose variabile si basa sull'equazione di bilancio, che sottrae alla domanda teorica della coltura — definita in base al potenziale produttivo atteso per quella specifica MZ — l'offerta reale fornita dal suolo. Quest'ultima viene stimata integrando la dotazione minerale residua, l'azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica e il contributo di

eventuali concimazioni organiche pregresse (Robert, 2002). La variabile chiave in questo calcolo è il potenziale produttivo di ogni zona: nelle aree con un'elevata capacità di scambio cationico e una buona disponibilità idrica, la pianta ha una maggiore capacità di conversione dell'azoto in biomassa, giustificando dosi più elevate; al contrario, nelle zone limitate da fattori pedologici o morfologici, la riduzione degli apporti azotati è necessaria per evitare l'accumulo di nitrati e migliorare l'efficienza economica dell'investimento (Mulla, 2013).

L'operatività del calcolo si avvale spesso di modelli di simulazione colturale o di algoritmi basati sulla risposta attesa alla fertilizzazione. Questi modelli, integrati nei software di gestione (FMIS), permettono di generare scenari di fertilizzazione diversi in base agli obiettivi agronomici: massimizzazione del rendimento, ottimizzazione della qualità (ad esempio il contenuto proteico nel frumento) o riduzione dell'impatto ambientale (European Commission, 2025). Il calcolo delle dosi deve inoltre integrare i vincoli agronomici e normativi, come i limiti stabiliti dalle direttive regionali nelle Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN). In questo modo, la dose calcolata per ogni singola zona diventa un valore oggettivo, vincolato non solo dalla teoria agronomica, ma anche dai dati storici e dai requisiti di sostenibilità imposti dal quadro legislativo vigente, garantendo un equilibrio tra produttività e tutela delle risorse naturali (European Parliament, 2016).



***Figura 3 spandiconcime rateo variabile che effettua una distribuzione diversa in base alla zona***

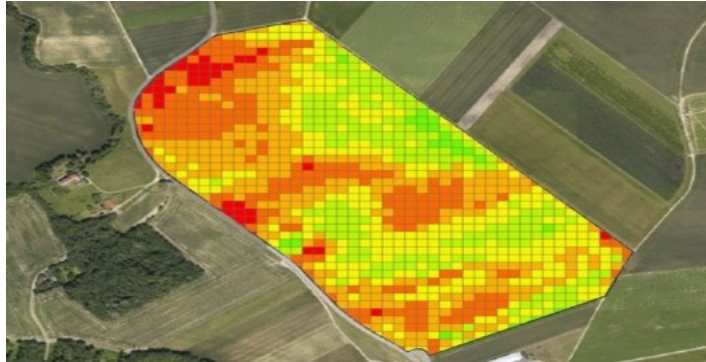
## 4.6 Generazione della mappa di prescrizione

La fase finale del workflow agronomico è la traduzione del bilancio nutrizionale calcolato in una mappa di prescrizione (Prescription Map), un file geospaziale che impartisce istruzioni operative precise alle macchine a rateo variabile (Variable Rate Application - VRA). Una volta determinate le dosi sito-specifiche per ciascuna Management Zone, il software GIS (come QGIS) viene utilizzato per esportare tali informazioni in formati standardizzati, quali lo Shapefile o il file ISO-XML. Questi formati sono progettati per essere interpretati dai computer di bordo (Terminali Universali) dei moderni spandiconcime, tramite il protocollo di comunicazione universale ISOBUS (AEF, 2026).

Il processo di generazione richiede estrema attenzione alla precisione geometrica e alla compatibilità dei metadati: la mappa di prescrizione deve essere allineata al medesimo sistema di coordinate (es. WGS84) utilizzato dal sistema di guida GNSS del trattore per evitare errori di posizionamento che vanificherebbero l'applicazione sito-specifica. Il software permette di definire una griglia o un insieme di poligoni per ogni zona, associando a ciascuno il valore della dose di nutriente da distribuire (es. kg N/ha). In fase di esecuzione, il computer di bordo interroga la mappa in tempo reale, leggendo la posizione del mezzo via satellite e modulando istantaneamente l'apertura delle paratie dosatrici o la velocità di rotazione dei dischi distributori dello spandiconcime. Questa modulazione dinamica del flusso garantisce che la quantità di fertilizzante rilasciata sia coerente con quanto pianificato, indipendentemente dalla variazione della velocità di avanzamento del trattore (Zude-Sasse, 2016).

L'importanza di questa fase non si esaurisce nell'applicazione, ma prosegue nella generazione della "mappa di applicazione" (As-Applied Map). Questa rappresenta il record digitale dell'intervento reale: ogni volta che il mezzo attraversa l'appezzamento, il sistema registra la posizione e la quantità effettiva di prodotto distribuito. Questo feedback è fondamentale per due ragioni principali. In primo luogo, permette la chiusura del bilancio aziendale, confrontando il "prescritto" con l'"eseguito" per valutare eventuali scostamenti tecnici. In secondo luogo, costituisce un documento di tracciabilità indispensabile per la conformità normativa, particolarmente nelle Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN), dove è necessario rendicontare con precisione millimetrica gli apporti azotati per soddisfare i requisiti della Politica Agricola Comune (PAC) e della direttiva 91/676/CEE (European Commission, 2025).

L'integrazione di questi dati all'interno del sistema informativo aziendale (FMIS) consente di affinare ulteriormente i modelli previsionali per le campagne successive, creando un ciclo continuo di miglioramento basato su evidenze empiriche. In sintesi, la mappa di prescrizione non è un prodotto statico, ma un elemento vivo del workflow digitale, che trasforma l'analisi pedologica complessa in un'azione meccanica, razionale, documentata e pienamente in linea con gli standard tecnologici dell'agricoltura 4.0 (AEF, 2026).



*Figura 4 mappa di prescrizione pronta da caricare sul trattore per la concimazione rateo-variabile*

## Capitolo 5

# TECNOLOGIE DI APPLICAZIONE

### 5.1 ISOBUS

Il protocollo ISOBUS (norma ISO 11783) rappresenta il pilastro tecnologico che ha consentito il superamento delle barriere proprietarie nel settore delle macchine agricole, permettendo la piena interoperabilità tra trattori, attrezzature, computer di bordo e sistemi di gestione aziendale (FMIS). Prima dell'adozione di questo standard, ogni combinazione trattore-attrezzo richiedeva terminali di controllo specifici, creando una frammentazione tecnologica che ostacolava l'adozione delle pratiche di agricoltura di precisione. Grazie all'ISOBUS, un unico terminale universale (UT) installato in cabina può comunicare con diverse attrezzature, indipendentemente dal produttore, visualizzando i parametri operativi e gestendo le funzioni di controllo (AEF, 2026).

Dal punto di vista dell'architettura di sistema, l'ISOBUS trasforma l'attrezzatura in un nodo intelligente della rete. Il sistema utilizza un bus dati (CAN bus) per trasmettere in tempo reale le informazioni tra la centralina dell'attrezzo (ECU - Electronic Control Unit) e il trattore. Per quanto concerne l'applicazione a tasso variabile, il protocollo ISOBUS abilita la funzione TC-GEO (Task Controller Geo-Based), che permette al terminale di bordo di ricevere la mappa di prescrizione in formato ISO-XML. Attraverso questa interfaccia, il sistema è in grado di inviare comandi di modulazione al dosatore dell'attrezzatura in funzione della posizione del mezzo, determinando con esattezza millimetrica la quantità di prodotto distribuito (AEF, 2026).

Questa integrazione non solo semplifica l'interfaccia utente, ma garantisce anche l'affidabilità del dato, poiché ogni operazione viene registrata digitalmente nel formato standard, facilitando la successiva fase di analisi della As-Applied Map e garantendo la piena tracciabilità delle operazioni colturali richiesta dalle normative vigenti.



*Figura 5 gestione isobus dell'irroratrice*

## 5.2 Spandiconcimi a rateo variabile

Gli spandiconcimi a rateo variabile (Variable Rate Application - VRA) rappresentano l'estremità operativa dell'intera filiera tecnologica dell'agricoltura di precisione. A differenza dei modelli a dose fissa, che erogano una quantità costante di prodotto basandosi esclusivamente sulla velocità di avanzamento, gli spandiconcimi VRA sono progettati per modulare il dosaggio istantaneamente in risposta ai segnali ricevuti dal sistema ISOBUS, in base alle coordinate GNSS rilevate sul campo. Questa capacità di modulazione si traduce meccanicamente in una variazione dinamica della portata del distributore, garantendo che la densità di distribuzione (es. Kg/Ha) sia coerente con le prescrizioni agronomiche definite per la specifica Management Zone in cui il mezzo sta operando.

La tecnologia di dosaggio si articola principalmente in due tipologie costruttive: gli spandiconcimi a centrifuga (a dischi) e quelli a distribuzione pneumatica. Nel primo caso, la variazione della dose è ottenuta agendo simultaneamente sulla velocità di rotazione dei dischi distributori e sulla posizione della paratia di dosaggio. I sistemi VRA di ultima generazione integrano anche sensori di pesatura dinamica (load cells) che monitorano costantemente il peso del prodotto all'interno della tramoggia, permettendo al sistema di controllo (ECU) di correggere in tempo reale la portata in funzione della densità granulometrica e delle caratteristiche reologiche del concime, riducendo gli errori di dosaggio legati alla qualità del prodotto (Zude-Sasse, 2016).

Negli spandiconcimi pneumatici, la precisione è ancora più elevata, poiché il prodotto viene distribuito mediante flussi d'aria attraverso barre di distribuzione, consentendo il controllo indipendente di sezioni della barra. Questa architettura permette non solo una modulazione longitudinale della dose, ma anche una gestione trasversale, minimizzando le sovrapposizioni e le mancanze, specialmente in appezzamenti con geometrie irregolari o in presenza di colture a file. L'interoperabilità di questi apparati con il terminale ISOBUS garantisce che la risposta meccanica sia precisa, con tempi di latenza ridotti al minimo, assicurando che la variazione di dose avvenga esattamente in corrispondenza del confine tra le diverse zone di gestione (AEF, 2026). Questa capacità di attuazione precisa è ciò che trasforma il piano di concimazione digitale in un reale beneficio agronomico, riducendo gli sprechi e garantendo una nutrizione ottimale per ogni centimetro quadrato del campo.

### **5.3 Validazione in campo**

La validazione in campo rappresenta la fase di verifica imprescindibile per chiudere il ciclo dell'agricoltura di precisione. Essa si esplica in una duplice funzione: in primo luogo, la verifica tecnica, che attesta come la macchina abbia operato esattamente secondo quanto prescritto; in secondo luogo, la valutazione della profittabilità, essenziale per determinare se l'applicazione sito-specifica sia stata corretta anche sotto il profilo economico.

Dal punto di vista tecnico, il controllo qualità utilizza le As-Applied Maps (mappe di applicazione) prodotte dal sistema ISOBUS per confrontarle con le mappe di prescrizione originali. Questo confronto permette di identificare eventuali discrepanze causate da errori di posizionamento GNSS, latenze negli attuatori meccanici dello spandiconcime, o variazioni impreviste nelle caratteristiche fisiche del prodotto. Un metodo di verifica efficace consiste nell'impiego di sensori di prossimità o satellitari post-intervento per monitorare la risposta della coltura al trattamento: ad esempio, analizzando l'evoluzione dell'indice NDVI subito dopo la distribuzione, è possibile osservare in tempi brevi l'effetto della concimazione sito-specifica sulle diverse Management Zones. Parallelamente, protocolli di campionamento fisico, come l'uso di vaschette di raccolta per misurare la distribuzione trasversale effettiva, confermano la precisione meccanica dell'intervento.

Tuttavia, il vero salto di qualità per l'imprenditoria agricola moderna è rappresentato dalle mappe di profittabilità. Queste costituiscono, metaforicamente, l'Ave Maria del gestore

agricolo: integrando i dati di resa, i costi operativi (inclusi quelli dei fertilizzanti a rateo variabile) e i ricavi, permettono di verificare se l'applicazione ha garantito l'apporto dell'input ottimale, nella quantità corretta e nel luogo giusto. Se la verifica tecnica conferma la corretta esecuzione operativa, la mappa di profittabilità conferma la validità economica della strategia adottata. Questa validazione "a ciclo chiuso" consente di affinare progressivamente i parametri di configurazione del macchinario e le soglie algoritmiche, garantendo che la tecnologia VRT non sia solo un'opzione teorica, ma un asset in grado di tradurre il potenziale del suolo in un reale incremento dell'efficienza nutrizionale ed economica (Fiorentini et al., 2022).

#### **5.4 Confronto tra dose fissa e dose variabile**

Il confronto tra la fertilizzazione a dose fissa (Uniform Rate Application - URA) e quella a dose variabile (Variable Rate Application - VRA) costituisce la cartina di tornasole per valutare la sostenibilità economica e ambientale dell'agricoltura di precisione. Nella gestione a dose fissa, l'apporto nutritivo è uniformato su tutto l'appezzamento basandosi sul valore medio delle analisi del suolo o sulla produzione storica attesa. Questo approccio, sebbene semplificato, ignora intrinsecamente l'eterogeneità spaziale del campo, portando inevitabilmente a fenomeni di sovra-fertilizzazione nelle zone a basso potenziale produttivo — con conseguente spreco di fattori produttivi e rischio di lisciviazione dei nitrati — e sotto-fertilizzazione nelle aree ad alto potenziale, limitando il raggiungimento della massima resa possibile (Robert, 2002).

Al contrario, l'approccio VRA si fonda sul principio della massimizzazione dell'efficienza dell'uso dei nutrienti (Nitrogen Use Efficiency - NUE). Il confronto diretto tra le due metodologie evidenzia come, a parità di output produttivo, il sistema VRA permetta una riduzione significativa degli input azotati, spesso stimata tra il 10% e il 20% a seconda della variabilità del suolo (Mulla, 2013). Oltre al risparmio diretto sui costi dei fertilizzanti, l'agricoltura a rateo variabile garantisce una maggiore uniformità qualitativa del prodotto finale, un parametro sempre più richiesto dalle filiere agroalimentari di qualità. Tuttavia, il confronto deve necessariamente considerare il bilancio economico complessivo: l'adozione di tecnologie VRA richiede investimenti iniziali in sensoristica, software FMIS e macchinari ISOBUS, oltre a una curva di apprendimento non trascurabile per l'operatore.

Il vantaggio competitivo del VRA emerge chiaramente in contesti di elevata variabilità pedologica, dove la gestione sito-specifica permette di "mettere l'azoto dove serve", mitigando le zone di stress e potenziando quelle fertili. Al contrario, in terreni caratterizzati da una spiccata omogeneità, l'incremento di efficienza della tecnologia VRA potrebbe risultare inferiore ai costi di implementazione (Blackmore et al., 2003). In conclusione, mentre la dose fissa rimane una pratica agronomica valida in contesti di agricoltura estensiva o su superfici estremamente omogenee, il passaggio alla dose variabile rappresenta il salto qualitativo necessario per un'agricoltura che ambisce a essere simultaneamente produttiva, economicamente efficiente e conforme ai rigorosi standard di tutela ambientale previsti per il 2026 e oltre.

## Capitolo 6

# MATERIALI E METODI

### 6.1 DESCRIZIONE DELL'AZIENDA

L'azienda agricola Di Egidio ha sede a Sant'Omero in provincia di Teramo, è a conduzione familiare e gestisce 60 ettari situati nei comuni di Sant'Omero e Mosciano Sant'Angelo (Figura 1). Gli ettari in conduzione sono 50 di proprietà e i restanti 10 ettari in affitto. L'indirizzo produttivo dell'azienda è cerealicolo-zootecnico, infatti, i terreni sono coltivati a supporto della stalla da latte con circa 100 capi di razza frisona italiana.

L'azienda coltiva i suoi terreni principalmente con colture cerealicole e foraggere. Non mancano come l'ultimo acquisto di una trattrice da 150 cv con isobus e sistema satellitare. L'agricoltura di precisione è presente anche nell'allevamento con l'ultimo acquisto di un robot di mungitura che gestisce gli animali singolarmente e li monitora 24ore su 24 tutti i giorni.



*Figura 6 immagine satellitare del sito sperimentale*

## 6.2 DESCRIZIONE DEL SITO SPERIMENTALE

Il campo analizzato in questa tesi si trova nel comune di Sant'Omero in via fosso grande (Figura 2), ha un'estensione di 4,5 ettari prevalentemente collinari, con esposizione a nord.



*Figura 7 Dettaglio satellitare del sito sperimentale*

## 6.3 GESTIONE AGRONOMICA

Nelle ultime tre annate agrarie, il campo è stato coltivato a prato-erba medica. Di seguito (Tabella 1) è riportata la gestione agronomica svolta per la coltivazione dell'erba medica.

### GESTIONE AGRONOMICA ERBA MEDICA

*Tabella 1 GESTIONE AGRONOMICA ERBA MEDICA*

| LAVORAZIONI                       | STADIO FENOLOGICO |
|-----------------------------------|-------------------|
| Lavorazione terreno (aratura)     | Suolo nudo        |
| Primo affinamento con estirpatore | Suolo nudo        |
| Preparazione letto di semina      | Suolo nudo        |
| Semina erba medica                | Suolo nudo        |
| Rullatura                         | Suolo nudo        |
| Sfalci per i successivi anni      | Fioritura         |

## 6.4 Metodologia e Sviluppo del Workflow Agronomico

Il workflow agronomico sviluppato in questa ricerca si articola in quattro step sequenziali, strutturati con l'obiettivo di mappare la variabilità spaziale del terreno e convertire i dati raccolti in decisioni agronomiche mirate. Poiché l'analisi è stata avviata su un campo a suolo nudo, il focus iniziale si è concentrato sulle proprietà intrinseche del terreno piuttosto che sullo stato vegetativo delle colture. Il processo metodologico ha seguito le seguenti fasi operative:

1. **Ortofoto & Satellite:** La prima fase ha previsto l'utilizzo del telerilevamento tramite immagini satellitari e ortofoto ad alta risoluzione. Operando su suolo nudo, l'analisi si è focalizzata sulla riflettanza spettrale della superficie terrestre, un parametro utile a identificare le variazioni visive, fisiche e chimiche del suolo legate principalmente alla tessitura, ai gradienti di umidità e al contenuto di sostanza organica superficiale.
2. **Zone omogenee:** Nel secondo step, i dati di riflettanza raccolti sono stati elaborati per suddividere l'appezzamento in zone omogenee. Questa segmentazione ha permesso di raggruppare il perimetro aziendale in macro-aree con caratteristiche pedologiche uniformi, individuando la variabilità potenziale del campo prima della semina.
3. **Punti GPS & Analisi del suolo:** La terza fase ha previsto il trasferimento delle informazioni digitali sul campo. Sulla base delle zone omogenee precedentemente individuate, sono stati definiti i punti GPS esatti per l'esecuzione di un campionamento geo-riferito del terreno. Successivamente alla caratterizzazione chimico-fisica in laboratorio, si è proceduto all'interpretazione dei certificati analitici al fine di quantificare l'effettiva dotazione di elementi nutritivi e le specificità strutturali di ciascuna zona.
4. **Bilancio concimazione organica & Mappa di prescrizione:** L'ultimo step ha riguardato la sintesi operativa dei dati. Incrociando i fabbisogni nutrizionali della coltura prevista con i risultati delle analisi del terreno, è stato elaborato il bilancio della concimazione organica di fondo. Tale processo ha portato alla redazione finale della mappa di prescrizione, l'output

digitale necessario per guidare le macchine agricole nella distribuzione dell'emendante a rateo variabile (VRA), ottimizzando l'apporto di input chimico-agrari solo dove necessario.

Il programma delle attività di ricerca è stato:

- Rilievo con drone, in data 26/02/2026, si è provveduto a svolgere un rilievo multispettrale e RGB sull'intero campo mediante l'uso del drone DJI Mavic 3M.



*Figura 8 Controllo dei parametri di volo e di rilievo*



***Figura 9 Piano di volo svolto dal drone***

- Mappatura della conducibilità elettrica del suolo in data 26/02/2026 con passate distanti 10 mt ciascuna



*Figura 10 mappatura della conducibilità elettrica del campo*

- Prelievo campioni suolo sulle zone omogenee ricavate dalla mappa di variabilità della conducibilità elettrica del suolo in data 08/05/2026, con una trivella da campionamento.



*Figura 11 Campionamento del suolo*

#### *6.4.1 Rilievo con drone*

Il rilievo con il drone è stato svolto il 26/02/2026 con l'utilizzo del drone DJI Mavic 3M (Multispectral). Il drone consente di poter acquisire delle immagini RGB & Multispettrali in

maniera sincrona, le quali sono state acquisite in modalità RTK per consentire una maggiore accuratezza spaziale.



*Figura 12 Drone Multispettrale*

Il drone consente di acquisire:

- Immagini RGB con una fotocamera da 20 Mega Pixel (MP)
- Immagini multispettrali invece ricadono nel Green, Red, Red-Edge e NIR dello spettro del visibile con una risoluzione di 5 MP

A seguito del rilievo svolto si è provveduto ad usare Metashape Agisoft Software per eseguire l'elaborazione fotogrammetrica, la quale è costituita dai seguenti step:

- Allineamento delle foto
- Generazione nuvola di punti
- Creazione del modello in 3D
- Creazione del DEM
- Creazione dell'ortomosaico

#### *6.4.2 Mappatura del suolo*

La mappatura del suolo è stata svolta il 26 febbraio 2026 con l'ausilio del sensore prossimale CMD Mini Explorer in modalità di acquisizione LOW, che indica che i dati di conducibilità elettrica si riferiscono a 0-30 cm.



***Figura 13 Strumento che misura la conducibilità elettrica***

Lo strumento consente di misurare, ogni tre secondi, i seguenti parametri:

- 1) Coordinate X e Y;
- 2) Elevazione;
- 3) Conducibilità elettrica;
- 4) In-phase.

Lo strumento è custodito in una valigetta ed è composto da due parti assemblabili tramite un manico. È dotato di: un braccio verticale; una piastra orizzontale alla base per l'analisi; un

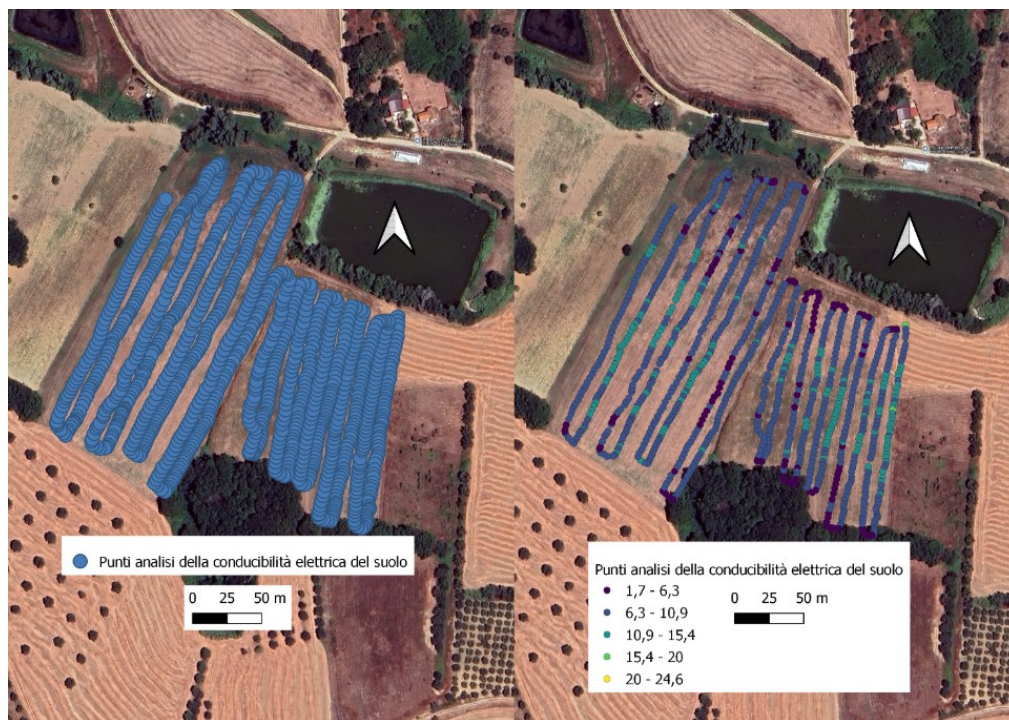
monitor per la visualizzazione dei dati in tempo reale. Dopo l'assemblaggio, lo strumento viene acceso e agganciato ai satelliti disponibili. Sul monitor vengono impostati: il nome del file, in base al luogo del rilievo; la frequenza di monitoraggio. Successivamente, è possibile scegliere tra tre modalità di rilievo: continuous management (misurazioni continue senza GPS); GPS manual (misurazioni con posizionamento manuale); GPS continuous management (metodo scelto per questo rilievo, con punti registrati automaticamente ad ogni misura).

I dati acquisiti con il CMD Tiny explorer, nel sito sperimentale, sono 1088 e per ciascun punto è stato acquisito il dato GPS e la conducibilità elettrica.



*Figura 14 Strumento assemblato*

La misurazione è stata svolta camminando lungo l'appezzamento ad una distanza di 10 metri per ogni passaggio. Di seguito viene riportata l'immagine delle traiettorie delle misurazioni eseguite lungo l'appezzamento Figura 15 :



**Figura 15** *Passate lungo il campo*

#### 6.4.3 Geostatistica & Zonizzazione

In una fase preliminare dell'analisi geostatistica, è stata valutata la distribuzione dei dati attraverso il calcolo degli indici di Skewness e Kurtosis, al fine di verificare il rispetto delle condizioni di simmetria della distribuzione dei dati. In particolare, i valori di Skewness compresi tra  $-1$  e  $+1$  e di Kurtosis compresi tra  $-3$  e  $+3$  sono stati considerati accettabili. Una volta verificato che tali parametri rientravano nei range stabiliti, si è proceduto al calcolo del variogramma sperimentale, necessario per descrivere la struttura di dipendenza spaziale della variabile analizzata. Successivamente, al variogramma sono stati adattati diversi modelli spaziali teorici (ad esempio sferico, esponenziale e gaussiano), valutandone le prestazioni attraverso il confronto tra i valori stimati e quelli misurati. Il modello spaziale caratterizzato dall'errore minimo è stato selezionato come il più idoneo e utilizzato come input per la fase di interpolazione. L'interpolazione spaziale è stata effettuata mediante la tecnica di ordinary kriging, che richiede la definizione dei parametri del modello di variogramma selezionato. Infine, i risultati dell'interpolazione sono stati utilizzati per la creazione di mappe omogenee.

Esistono diverse metodologie per determinare il numero e la posizione delle zone omogenee. In questo lavoro è stato applicato l'algoritmo k-means dove però il suo parametro "centers" è stato definito dal metodo silhouette. ([https://doi.org/10.1002/agg2.20422\\_2022](https://doi.org/10.1002/agg2.20422_2022))

#### *6.4.4 Pianificazione dei punti di campionamento del suolo & analisi del suolo*

I punti dei campionamenti del suolo sono stati identificati analizzando la mappa di conducibilità interpolata. In questo caso sono stati valutati almeno un punto di campionamento del suolo per ciascuna zona omogenea.

In seguito, si è provveduto ad eseguire il campionamento del suolo e i campioni sono stati portati al laboratorio anali Bucciarelli Laboratori s.r.l.

Le analisi del suolo sono state svolte per misurare le seguenti variabili:

- 1) La tessitura del terreno ovvero la quantità di sabbia (2 mm - 0,02 mm), limo (0,02 mm - 0,002 mm) e argilla (< 0,002 mm) e lo scheletro (> 2mm)
- 2) Fosforo assimilabile (mg/kg)
- 3) C/N
- 4) Sostanza organica (g/kg)
- 5) Azoto totale (g/kg)
- 6) Carbonio organico (g/kg)
- 7) Capacità di scambio cationico (meq/100 g)
- 8) pH

#### *6.4.5 Interpretazione dei dati*

La fase successiva del workflow, dopo le analisi del suolo, è stata l'interpretazione dei dati basandosi sul disciplinare di produzione integrata della regione Marche

#### *6.4.6 Bilancio sostanza organica & Mappa di prescrizione*

L'ultimo step ha riguardato la sintesi operativa dei dati. Seguendo i bilanci agronomici della sostanza organica all'interno di ciascuna zona omogenea, si è proceduto alla stima del deficit o del fabbisogno di mantenimento della sostanza organica.

Tale bilancio agronomico ha permesso di convertire i dati analitici del terreno in dosaggi reali di ammendante, portando alla redazione finale della mappa di prescrizione. L'output

digitale così generato è predisposto per guidare le macchine agricole nella distribuzione a rateo variabile (VRA), garantendo un apporto di input organico mirato e rispondente alle reali esigenze strutturali di ogni specifica porzione di suolo nudo.

Un valore di  $BSO > 0$  indica un incremento della sostanza organica del terreno, mentre un valore di  $BSO = 0$  corrisponde ad una situazione di equilibrio. Al contrario, un valore  $BSO < 0$  evidenzia un progressivo impoverimento della fertilità organica del suolo.

Per il calcolo si è provveduto ad usare la seguente formula

$$\text{Stock SO} = \text{SO}\% \times Da \times P \times 100$$

Dove:

SO%: è il valore che abbiamo della sostanza organica in %

Da: è la densità apparente

P: è la profondità di lavorazione

100 = coefficiente di conversione per ottenere lo stock in  $\text{t ha}^{-1}$ .

Una volta calcolato lo stock di SO calcolando le perdite per mineralizzazione riusciamo ad ottenere un bilancio di SO:

$$\text{Bilancio sostanza organica: } Hr - Hp$$

Dove:

Hr: sarebbero gli apporti ma non sono considerati ora quindi è pari a 0

Hp: è l'humus perso per mineralizzazione

Per svolgere l'equazione abbiamo svolto il seguente calcolo:

$$Hp = \text{Stock So} \times Km$$

Dove:

Km: è il coefficiente di mineralizzazione annuale, dipendente dalle condizioni pedoclimatiche e dalla gestione agronomica.

Nel presente studio è stato adottato un valore di Km compreso tra 0,030 e 0,035, coerente con terreni coltivati intensivamente e caratterizzati da frequenti lavorazioni.

Una volta effettuato il bilancio, se negativo, calcoliamo i kg di letame da apportare per avere un bilancio positivo, sempre facendo riferimento ai limiti presenti nel disciplinare di produzione integrata, in cui c'è un limite di azoto in base al tipo di ZVN (zone nitrato vulnerabili) che ci troviamo. Quindi questo aspetto dipenderà anche dal tipo di letame che abbiamo e dal suo contenuto di azoto. L'humus restituito mediante il letame è stato stimato considerando il contenuto medio di sostanza secca e il coefficiente isoumico dell'ammendante:

$$H_r = L \times SS \times K_h$$

dove:

- **L** = quantità di letame distribuita ( $t\ ha^{-1}$ );
- **SS** = frazione di sostanza secca del letame;
- **K<sub>h</sub>** = coefficiente isoumico, ovvero la quota di sostanza secca che viene trasformata in humus stabile.

La perdita annuale di sostanza organica è stata calcolata a partire dallo stock di sostanza organica presente nello strato lavorato del terreno.

Per il letame bovino maturo sono stati assunti i seguenti valori medi:

- sostanza secca (**SS**) = 0,25;
- coefficiente isoumico (**K<sub>h</sub>**) = 0,35.

Al fine di mantenere costante il contenuto di sostanza organica del terreno è necessario che il bilancio risulti almeno nullo:

$$BSO=0$$

ossia:

$$H_r=H_p$$

Da questa condizione è possibile ricavare direttamente la quantità di letame necessaria:

$$L = \frac{H_p}{SS \times kh}$$

SS = sostanza secca del letame (0,25 per letame bovino)

Kh = coefficiente isoumico (0,35)

La dose ottenuta rappresenta la quantità minima di letame necessaria a compensare le perdite annuali di sostanza organica dovute alla mineralizzazione. Valori superiori determinano un bilancio positivo della sostanza organica, favorendo nel tempo l'accumulo di carbonio organico nel suolo e il miglioramento della fertilità.

È opportuno sottolineare che la dose teorica derivante dal bilancio della sostanza organica deve essere verificata rispetto ai limiti imposti dalla normativa vigente relativa all'utilizzazione agronomica degli effluenti zootecnici. Nelle **Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN)**, individuate ai sensi della **Direttiva 91/676/CEE (Direttiva Nitrati)** e recepite dalla normativa nazionale, l'apporto di azoto di origine zootecnica non può superare **170 kg N ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>**. Nelle aree non vulnerabili il limite ordinariamente applicato è pari a **340 kg N ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>**, salvo eventuali disposizioni regionali più restrittive.

Di conseguenza, la dose finale di letame distribuibile deve soddisfare contemporaneamente due condizioni:

1. garantire un bilancio della sostanza organica non negativo;
2. rispettare il limite massimo di azoto organico consentito dalla normativa.

Qualora la quantità di letame necessaria per il mantenimento della sostanza organica ecceda il limite imposto nelle ZVN, il fabbisogno residuo della coltura dovrà essere soddisfatto mediante altre pratiche agronomiche, quali l'impiego di colture di copertura, la restituzione dei residui colturali, l'utilizzo di ammendanti a maggiore coefficiente umigeno oppure una parziale integrazione con fertilizzanti minerali nel rispetto del piano di concimazione aziendale.

L'approccio adottato consente quindi di integrare la conservazione della fertilità del suolo con il rispetto della normativa ambientale, individuando per ciascun appezzamento la dose di letame in grado di mantenere o incrementare nel tempo il patrimonio di sostanza organica senza eccedere gli apporti massimi di azoto previsti dalla legislazione vigente.

Il bilancio della sostanza organica è stato calcolato per ciascun campione considerando lo stock di sostanza organica presente nello strato lavorato del terreno, la perdita annuale dovuta alla mineralizzazione e la quantità di letame necessaria a compensare tali perdite.

## Capitolo 7 RISULTATI

### 7.1 Mappatura con drone

Il rilievo svolto ha permesso lo svolgimento dell'intero workflow fotogrammetrico, anche considerando la pendenza del suolo, il quale può limitare in alcuni casi lo svolgimento del processo fotogrammetrico.

Di seguito viene riportato l'ortomosaico (Fig. XX) derivante dal processo fotogrammetrico.

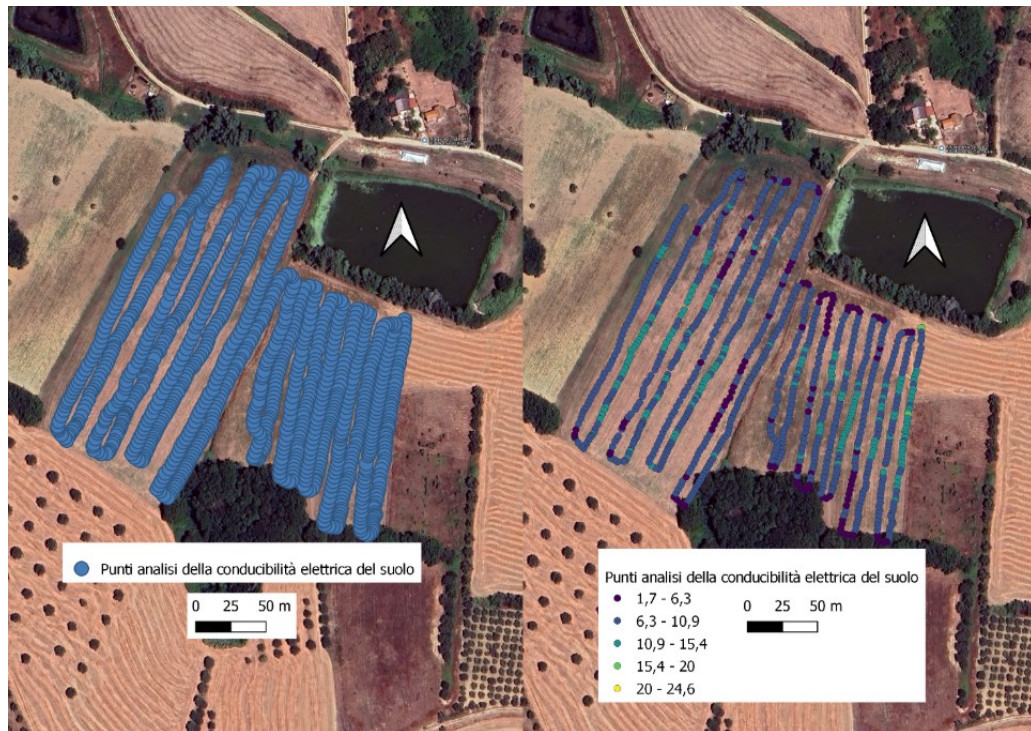


*Figura 16 Ortofoto del sito*

L'ortofoto mostra la presenza di almeno due aree con diverso colore cromatico, il quale indica la potenziale presenza di due tipologie di suoli differenti.

## 7.2. Mappatura del suolo & Zone Omogenee

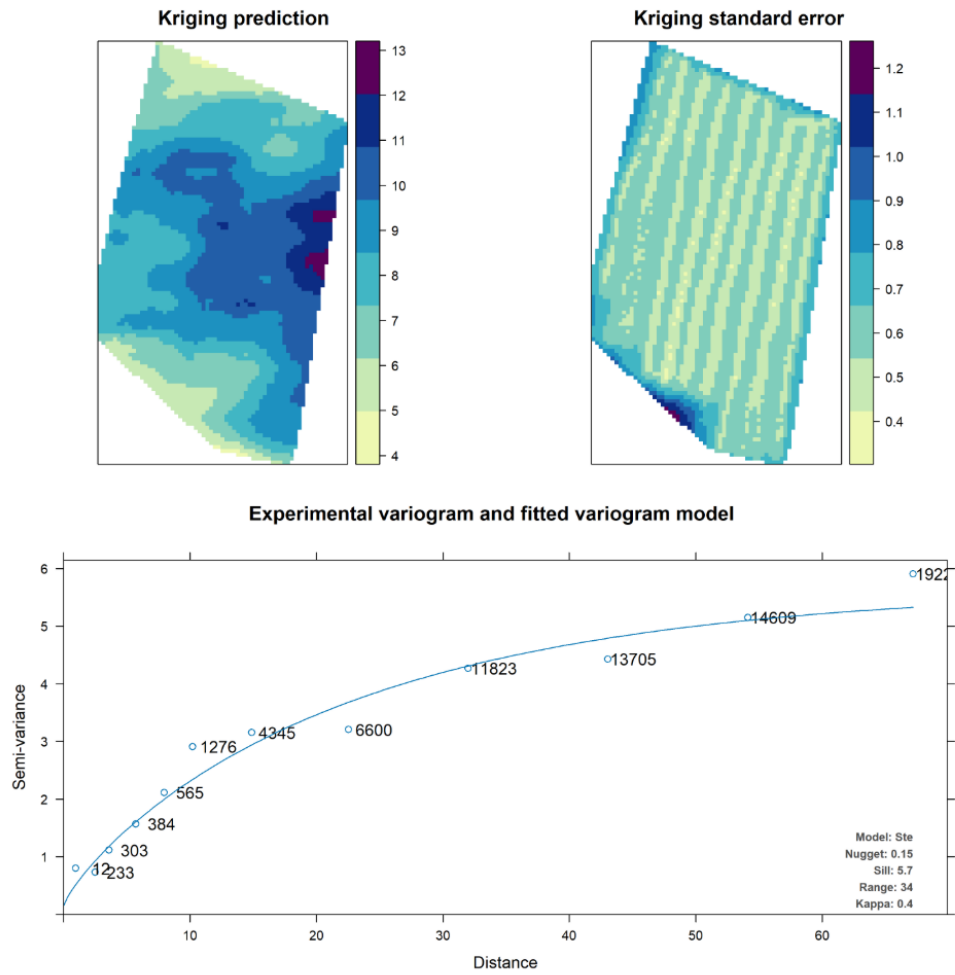
Di seguito viene riportata l'immagine relativa ai punti di analisi della conducibilità elettrica:



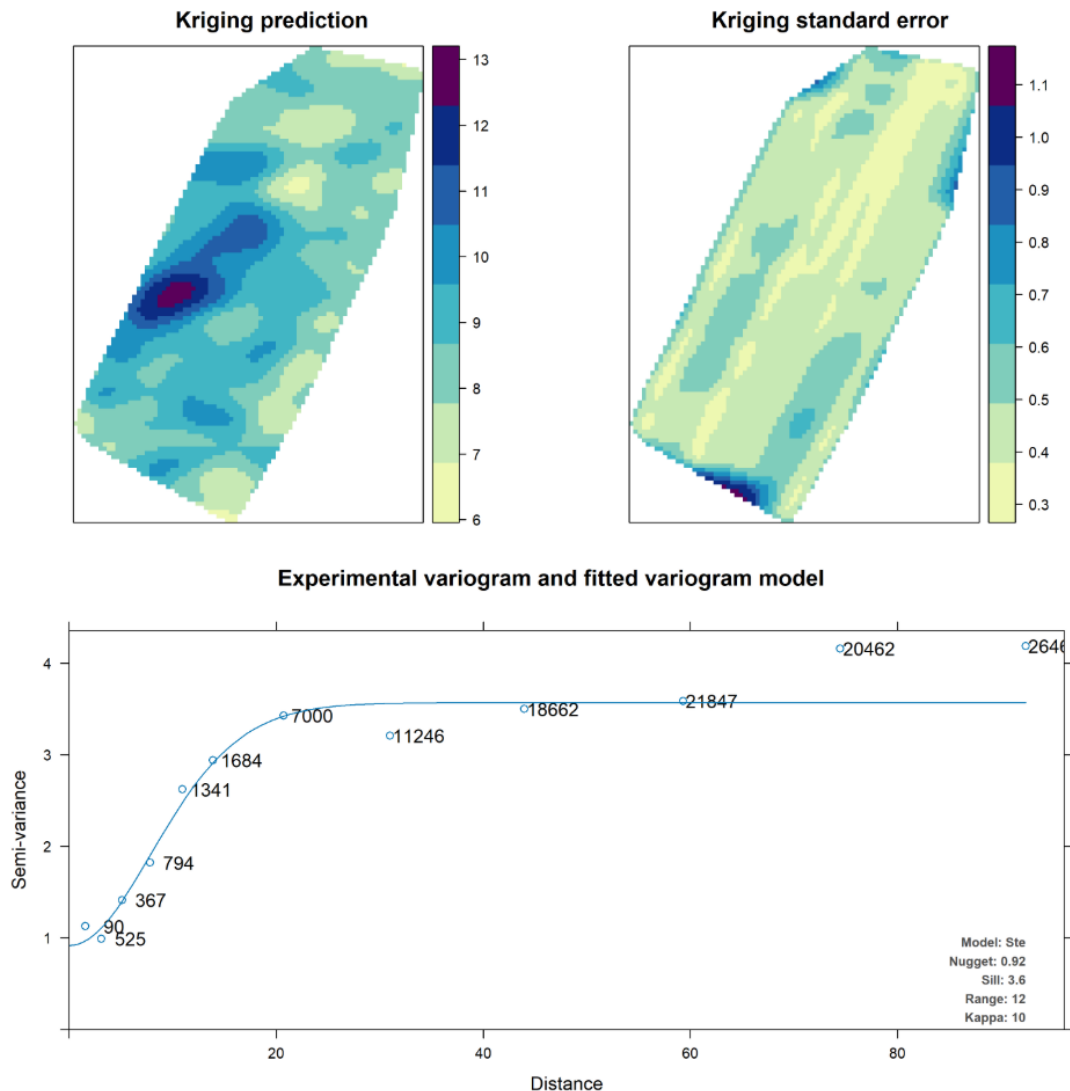
***Figura 17 Punti di rilievo della conducibilità elettrica***

Analizzando la mappa si nota una differenza di conducibilità che varia da 1.7 S/cm fino a 24.6 S/cm, evidenziato anche dalla scala dei colori da blu/viola a giallo.

Grazie all'ausilio di SmartMap QGIS Plugin è stato possibile svolgere tutta la procedura di creazione del variogramma e interpolazione. Di seguito viene riportata la mappa interpolata della conducibilità elettrica, l'errore relativo e il variogramma.



**Figura 18** Variogramma sperimentale della conducibilità e il modello spaziale Matern  
campo a



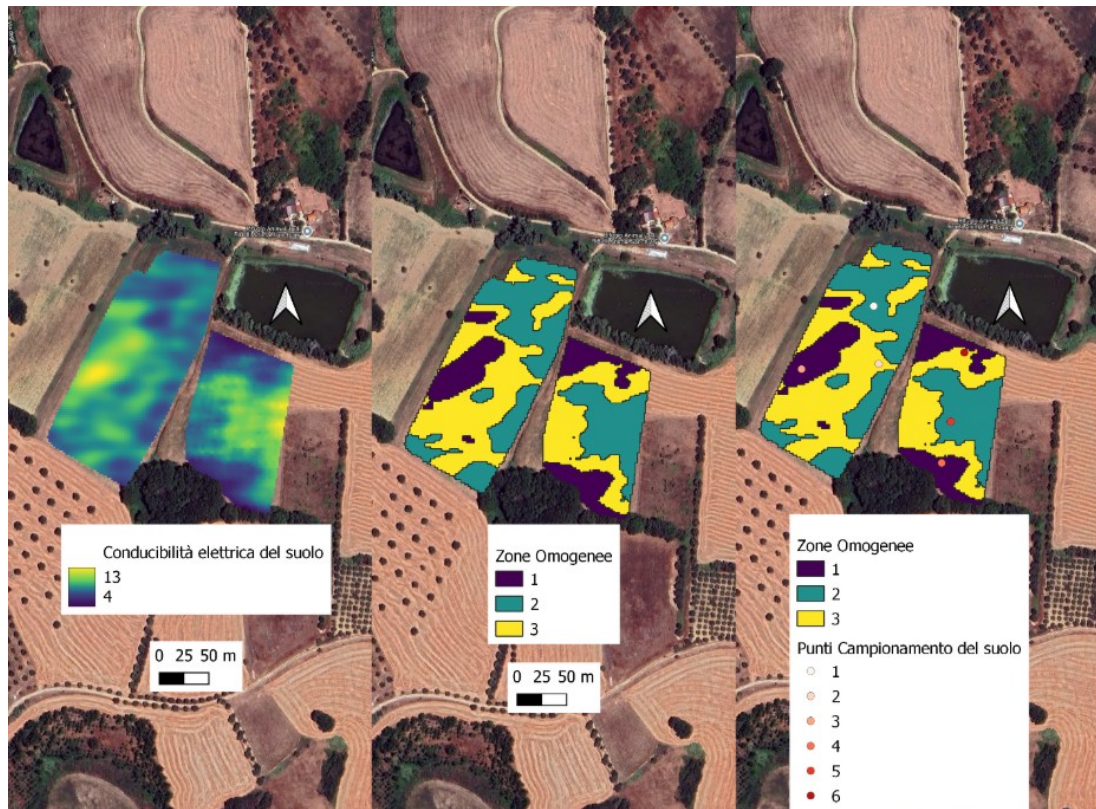
**Figura 19 variogramma sperimentale della conducibilità e il modello spaziale Matern, campo b**

Dalla mappa in alto a sinistra ovvero kriging prediction vengono evidenziate le zone dove la conducibilità risulta essere più alta o più bassa. Da quella a destra ovvero kriging standard error invece si evidenzia l'errore relativo per ogni stima eseguita dal kriging e che varia da 4,6 a 6. Per cui per ogni punto abbiamo un valore stimato e un range di errore tra +4.6 e +6.

La figura sottostante ovvero il variogramma è un grafico geostatistico che rappresenta la variabilità spaziale dei dati in funzione della distanza tra le osservazioni. Mostra come la

semivarianza (differenza tra punti) asse y aumenta all'aumentare della distanza (lag) asse x, permettendo di capire la correlazione tra dati vicini. Qualora la distanza tra punti supera 40 m essi non sono più dipendenti.

Di seguito l'immagine della mappatura del suolo generata dall'ordinary kriging:

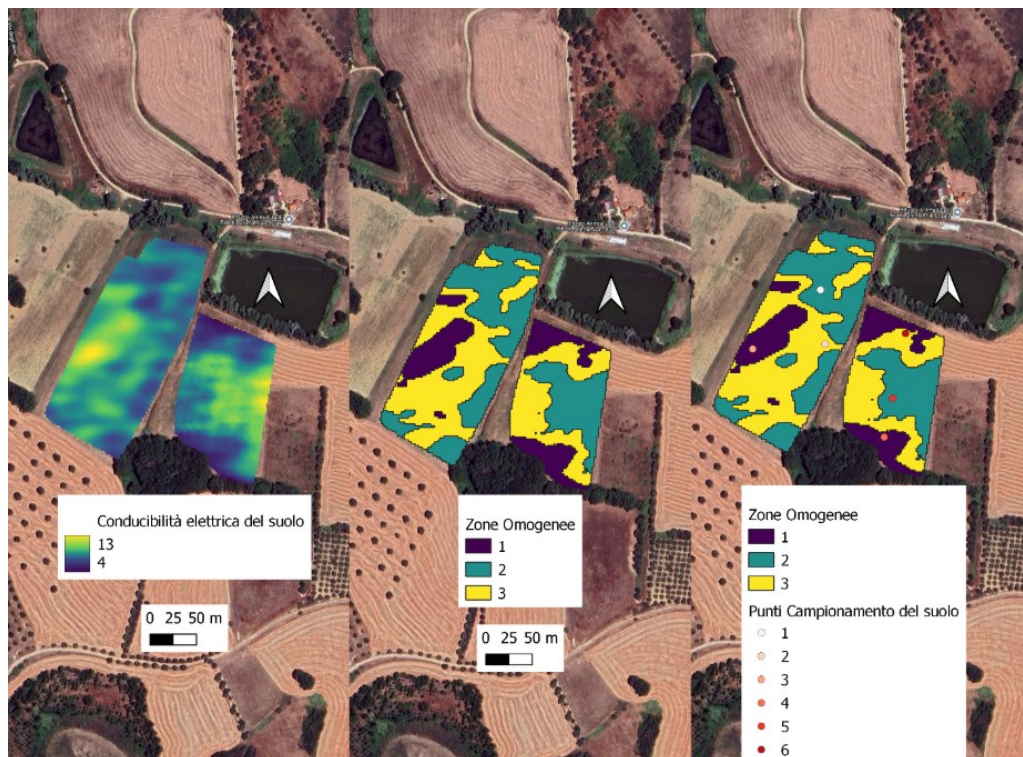


**Figura 20 Mappa conducibilità elettrica suolo**

Dalla mappatura della conducibilità elettrica del suolo interpolata è deducibile che ci sono aree con valori di resistività più alti mentre altre aree con valori più bassi. Questi valori variano da 14 a 65 S/cm. Nella mappa abbiamo una scala che varia da blu/viola al giallo. Si può ipotizzare che le aree marcate di giallo abbiano un contenuto più alto in azoto, fosforo e sostanza organica, viceversa in quelle marcate in blu. Tale ipotesi può o meno essere confermata solamente attraverso il campionamento e analisi del suolo.

### 7.3 Analisi del suolo

Nella seguente figura sono stati riportati i punti del campionamento del suolo, i quali sono stati posizionati nelle due diverse zone omogenee per caratterizzare al meglio la superficie.



**Figura 21 zone omogenee**

I campionamenti del suolo sono stati eseguiti nei punti indicati in mappa.

Il campo risulta abbastanza omogeneo dalle analisi del suolo e dalla conducibilità.

**Tabella 2 RISULTATI ANALISI DEL SUOLO**

| Campo | Zona | Campione | sabbia | limo | argilla | carbonio organico | azoto totale |
|-------|------|----------|--------|------|---------|-------------------|--------------|
| 1     | 1    | 1        | 38,6   | 24,9 | 36,5    | 11,77             | 0,65         |
| 1     | 2    | 2        | 39,9   | 28,2 | 31,9    | 12,58             | 0,52         |
| 1     | 3    | 3        | 37,1   | 29,3 | 33,6    | 10,26             | 0,55         |
| 2     | 1    | 4        | 37,9   | 26,5 | 35,6    | 14,38             | 1,19         |
| 2     | 2    | 5        | 39     | 26,7 | 34,3    | 13,16             | 0,95         |
| 2     | 3    | 6        | 38,8   | 28,5 | 32,7    | 15,42             | 0,68         |

**Tabella 3 ANALISI CHIMICHE**

| Campo | Zona | Campione | C/N  | sostanza organica | ph   | fosforo assimilabile | cec  |
|-------|------|----------|------|-------------------|------|----------------------|------|
| 1     | 1    | 1        | 18,1 | 20,3              | 7,99 | 50,6                 | 11,3 |
| 1     | 2    | 2        | 24,2 | 21,7              | 7,96 | 53,2                 | 10,1 |
| 1     | 3    | 3        | 18,7 | 17,7              | 7,95 | 46,8                 | 11,3 |
| 2     | 1    | 4        | 12,1 | 24,8              | 8,08 | 58,2                 | 9,7  |
| 2     | 2    | 5        | 13,9 | 22,7              | 8,05 | 49,3                 | 8,3  |
| 2     | 3    | 6        | 22,7 | 26,6              | 8,02 | 56,3                 | 10,4 |

Tra il campo 1 e il campo 2 si è notato una differenza importante per l'azoto totale (Campo 1: 0,57 ; Campo 2: 0,94) per C/N (Campo 1:20,3 ; Campo 2: 16,3) e Sostanza organica (Campo 1: 19,9 ; Campo 2: 16,2).

**Tabella 4 DIFFERENZA TRA LE ZONE**

| Elemento analizzato | Campo 1 |        |        | Campo 2 |        |        | Differenza percentuale Campo 1 | Differenza percentuale Campo 2 |
|---------------------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------------------------------|--------------------------------|
|                     | Zona 1  | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4  | Zona 5 | Zona 6 |                                |                                |
| P assimilabile      | 50,6    | 53,2   | 46,8   | 58,2    | 49,3   | 56,3   | 13%                            | 18%                            |
| S.O.                | 20,3    | 21,7   | 17,7   | 24,8    | 22,7   | 26,6   | 22%                            | 17%                            |
| Carbonio organico   | 11,77   | 12,58  | 10,26  | 14,38   | 13,16  | 15,42  | 22%                            | 15%                            |
| N tot               | 0,65    | 0,52   | 0,55   | 1,19    | 0,95   | 0,68   | 25%                            | 75%                            |

#### 7.4 Bilancio della sostanza organica & mappa di prescrizione

Per il calcolo sono stati adottati i seguenti parametri:

- densità apparente (Da): **1,30 t m<sup>-3</sup>**;
- profondità lavorata (P): **0,45 m**;
- coefficiente di mineralizzazione (Km): variabile da 0,030 a 0,035 in funzione del campione;
- sostanza secca del letame bovino (SS): **25%**;
- coefficiente isoumico del letame bovino (Kh): **0,35**.

## 7.5 Calcolo (Campione 1)

Di seguito è riportato a titolo di esempio il calcolo del campione 1, mentre per gli altri campioni ci si può riferire alla Tabella 6 .

Per il Campione 1 il contenuto di sostanza organica è risultato pari a **20,3 g kg<sup>-1</sup>**, corrispondente a **2,03%**. Lo stock di sostanza organica presente nei primi 45 cm di terreno è stato calcolato come segue:

$$Stock\ SO = 2,03 \times 1,30 \times 0,45 \times 100 = 118,76\ t\ ha^{-1}$$

La perdita annuale dovuta alla mineralizzazione è risultata:

$$Hp = 118,76 \times 0,030 = 3,56\ t\ ha^{-1}$$

Considerando un contenuto di sostanza secca del letame pari al 25% ed un coefficiente isoumico di 0,35, la dose necessaria di letame bovino è stata calcolata mediante:

$$L = 3,56 \times 0,25 \times 0,35 = 40,7\ t\ ha^{-1}$$

Tale quantità rappresenta la dose teorica necessaria per compensare completamente la perdita annua di sostanza organica e mantenere il bilancio in condizioni di equilibrio.

## 7.6 Applicazione ai restanti campioni

Lo stesso procedimento è stato applicato a tutti i campioni analizzati.

**Tabella 5 DOSE DI LETAME PER CAMPIONE**

| Campione | SO (%) | Stock SO (t ha <sup>-1</sup> ) | Km   | Hp (t ha <sup>-1</sup> ) | Dose di letame (t ha <sup>-1</sup> ) |
|----------|--------|--------------------------------|------|--------------------------|--------------------------------------|
| 1        | 2,03   | 118,76                         | 0,03 | 3,56                     | 40,7                                 |
| 2        | 2,17   | 126,95                         | 0,03 | 3,94                     | 45,1                                 |
| 3        | 1,77   | 103,55                         | 0,03 | 3,31                     | 37,8                                 |
| 4        | 2,48   | 145,08                         | 0,03 | 4,79                     | 54,7                                 |
| 5        | 2,27   | 132,80                         | 0,03 | 4,52                     | 51,6                                 |
| 6        | 2,66   | 155,61                         | 0,03 | 5,45                     | 62,3                                 |

L'analisi evidenzia una progressiva crescita dello stock di sostanza organica passando dal Campione 3 (103,55 t ha<sup>-1</sup>) al Campione 6 (155,61 t ha<sup>-1</sup>). Parallelamente aumentano anche le perdite annuali per mineralizzazione, con valori compresi tra **3,31 e 5,45 t ha<sup>-1</sup>**, determinando un incremento della dose teorica di letame necessaria al mantenimento dell'equilibrio organico del terreno.

La dose stimata varia, infatti, da **37,8 t ha<sup>-1</sup>** nel Campione 3 fino a **62,3 t ha<sup>-1</sup>** nel Campione 6. Tali valori devono tuttavia essere considerati come **dosi teoriche**, in quanto la distribuzione effettiva di letame deve rispettare i limiti imposti dalla normativa vigente, in particolare nelle Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN), individuate ai sensi della Direttiva 91/676/CEE, l'apporto massimo consentito di azoto di origine zootecnica è pari a 170 kg N ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>. Pertanto, nei casi in cui la dose teorica ecceda tale limite, il mantenimento della sostanza organica dovrà essere perseguito attraverso una combinazione di pratiche agronomiche, comprendenti la restituzione dei residui colturali, l'impiego di ammendanti organici ad elevato coefficiente umigeno e l'eventuale integrazione con fertilizzanti minerali.

## Capitolo 8

### DISCUSSIONI

I risultati ottenuti dalle analisi del suolo evidenziano una sostanziale omogeneità delle caratteristiche tessiturali dei sei campioni prelevati. Tutti i terreni possono essere classificati come franco-argillosi, con un contenuto di sabbia compreso tra il 37,1 e il 39,9%, limo tra il 24,9 e il 29,3% e argilla tra il 31,9 e il 36,5%. Questa tessitura rappresenta una condizione favorevole per la coltivazione del mais, in quanto garantisce un buon compromesso tra capacità di ritenzione idrica, aerazione e disponibilità degli elementi nutritivi. Il contenuto di sostanza organica è risultato compreso tra 1,77% e 2,66%, valori che possono essere considerati medio-alti per terreni agricoli destinati a colture erbacee intensive nell'Italia centrale e, in particolare, nel contesto pedoclimatico della Regione Abruzzo. La presenza di un discreto patrimonio organico costituisce un importante indicatore della fertilità del suolo, poiché contribuisce alla stabilità della struttura, alla capacità di trattenere l'acqua e al mantenimento dell'attività biologica. Tuttavia, il contenuto di sostanza organica, se considerato isolatamente, non è sufficiente a descrivere l'effettiva capacità del terreno di fornire nutrienti alla coltura. L'analisi del rapporto carbonio/azoto (C/N) ha infatti evidenziato valori compresi tra 12,1 e 24,2, generalmente superiori a quelli considerati ottimali per una rapida mineralizzazione della sostanza organica. Un rapporto C/N elevato indica la presenza di materiale organico relativamente stabile e caratterizzato da una lenta degradazione biologica. In tali condizioni i microrganismi del suolo utilizzano parte dell'azoto minerale disponibile per completare la decomposizione della sostanza organica, determinando fenomeni di immobilizzazione temporanea dell'azoto e riducendo la quantità immediatamente disponibile per la coltura del mais (Kuzyakov et al., 2000). Questo aspetto assume particolare rilevanza poiché il mais è una specie caratterizzata da elevate esigenze nutrizionali, soprattutto durante le fasi di rapido accrescimento vegetativo. Pertanto, pur in presenza di un contenuto soddisfacente di sostanza organica, la disponibilità di azoto per la coltura può risultare inferiore a quella attesa, rendendo necessario un attento bilanciamento della fertilizzazione.

L'interpretazione dei dati è ulteriormente supportata dai valori della capacità di scambio cationico (CSC), compresi tra 8,3 e 11,3. Tali valori possono essere considerati medio-bassi e indicano una limitata capacità del terreno di trattenere i nutrienti cationici, quali ammonio, potassio, calcio e magnesio. Sebbene la CSC non influenzi direttamente la velocità di mineralizzazione della sostanza organica, essa condiziona la capacità del suolo di conservare gli elementi nutritivi nella zona esplorata dalle radici, aumentando il rischio di perdite e riducendo l'efficienza complessiva della fertilizzazione (Sparks, 2003). Anche il valore di pH, compreso tra 7,95 e 8,08, merita particolare attenzione. La reazione debolmente alcalina del terreno rappresenta generalmente una condizione favorevole per la maggior parte delle colture agrarie; tuttavia, valori prossimi a 8 possono ridurre nel tempo la disponibilità del fosforo attraverso fenomeni di precipitazione con il calcio. Sebbene il contenuto di fosforo assimilabile risulti elevato in tutti i campioni (46,8–58,2) è opportuno considerare che non tutta la quantità analiticamente determinata sarà necessariamente disponibile per la coltura durante il ciclo vegetativo. Il bilancio della sostanza organica ha consentito di quantificare le perdite annuali dovute ai processi di mineralizzazione e di stimare la quantità teorica di letame necessaria per mantenere costante il patrimonio organico del terreno. Le perdite calcolate risultano comprese tra 3,31 e 5,45 mentre le dosi teoriche di letame bovino necessarie per compensare integralmente tali perdite variano da 37,8 a 62,3. I risultati ottenuti evidenziano come, nei terreni caratterizzati da un maggiore contenuto di sostanza organica, aumentino anche le perdite annuali dovute alla mineralizzazione. Di conseguenza, il mantenimento di un bilancio positivo richiede apporti organici progressivamente più elevati. Nel caso specifico della coltura del mais, il mantenimento di un bilancio positivo della sostanza organica assume un ruolo particolarmente importante, poiché le elevate produzioni di biomassa e le frequenti lavorazioni determinano un'intensa attività di mineralizzazione (Lal, 2004). Dal punto di vista pratico, tuttavia, tali dosi non risultano sempre distribuibili. L'azienda oggetto di studio è situata in Regione Abruzzo e la gestione della fertilizzazione deve rispettare le prescrizioni previste dalla normativa sulle Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN). In tali aree l'apporto massimo di azoto proveniente da effluenti zootecnici non può superare 170 kg N. Pertanto, in alcuni appezzamenti la quantità teorica di letame necessaria per mantenere il bilancio della sostanza organica risulta superiore alla dose effettivamente distribuibile. Per questo motivo è stata individuata una strategia gestionale che prevede, nei primi anni, la distribuzione della massima dose di letame consentita dalla normativa, pur consapevoli che tale quantitativo non sarà

sufficiente a compensare completamente le perdite annuali di sostanza organica. Successivamente, dopo alcuni cicli colturali, verrà effettuata una nuova campagna di campionamento e analisi del terreno, al fine di valutare l'evoluzione del contenuto di sostanza organica e degli altri principali indicatori di fertilità. Tale approccio consentirà di aggiornare il piano di concimazione sulla base dell'effettiva risposta del terreno, adottando una gestione dinamica e sostenibile della fertilizzazione organica. La scelta di monitorare periodicamente le caratteristiche del suolo appare particolarmente importante, poiché la sostanza organica rappresenta una componente dinamica, influenzata non soltanto dagli apporti di letame, ma anche dalla restituzione dei residui colturali, dalle lavorazioni, dall'attività biologica e dalle condizioni climatiche. L'evoluzione del contenuto di carbonio organico dovrà quindi essere valutata nel medio-lungo periodo piuttosto che su base annuale. Nel complesso, i risultati ottenuti dimostrano come la fertilità di un terreno non possa essere valutata esclusivamente sulla base del contenuto di sostanza organica. Nel caso in esame, la reale disponibilità degli elementi nutritivi risulta influenzata contemporaneamente dal rapporto carbonio/azoto, dalla capacità di scambio cationico e dalla reazione alcalina del terreno, fattori che limitano la disponibilità dell'azoto e possono ridurre l'efficienza della fertilizzazione. L'approccio adottato, basato sul bilancio della sostanza organica integrato con le analisi chimico-fisiche del terreno, ha consentito di definire una strategia di concimazione orientata non solo alla soddisfazione dei fabbisogni nutrizionali del mais, ma anche alla conservazione della fertilità del suolo nel lungo periodo, nel pieno rispetto dei vincoli imposti dalla normativa ambientale. Sebbene il modello adottato rappresenti una semplificazione dei processi che regolano la dinamica della sostanza organica nel suolo, esso costituisce un valido strumento di supporto alle decisioni agronomiche. La mineralizzazione della sostanza organica è infatti influenzata da numerosi fattori, tra cui le condizioni climatiche, l'umidità del terreno, le lavorazioni, la rotazione colturale e la gestione dei residui vegetali, elementi che possono determinare variazioni rispetto ai valori teoricamente stimati. L'applicazione del bilancio della sostanza organica ha consentito di definire una strategia di fertilizzazione organica specifica per la coltivazione del mais, capace di coniugare le esigenze nutrizionali della coltura con il mantenimento della fertilità del suolo e con il rispetto dei limiti imposti dalla normativa ambientale. In quest'ottica, il monitoraggio periodico delle caratteristiche del terreno rappresenta uno strumento indispensabile per adeguare nel tempo il piano di concimazione all'evoluzione delle condizioni pedologiche e alle esigenze produttive dell'azienda. L'analisi

comparativa evidenza come la concimazione organica di precisione rappresenti un'evoluzione cruciale rispetto all'approccio minerale tradizionale, superandone i limiti strutturali attraverso la sinergia tra ecologia e tecnologia. Mentre i fertilizzanti di sintesi garantiscono un rilascio immediato ma inefficiente dei nutrienti, esponendo l'agroecosistema a fenomeni di lisciviazione dell'azoto ed eutrofizzazione delle acque (Smith et al., 2021), l'applicazione a rateo variabile (VRA) di matrici organiche permette di modulare gli input in base alle reali esigenze della coltura rilevate tramite sensori prossimali o remoti (NDVI). Questo approccio non solo ottimizza l'efficienza d'uso dei nutrienti (NUE), ma innesca un processo di rigenerazione del suolo. L'apporto mirato di carbonio organico stimola infatti il microbiota edematoso e incrementa la stabilità degli aggregati del terreno, migliorandone la capacità di ritenzione idrica a lungo termine (Jones & Davis, 2023). Infine, l'adozione di questa pratica risponde pienamente agli obiettivi di sostenibilità e decarbonizzazione della strategia europea Farm to Fork, offrendo al contempo una resilienza economica alle aziende agricole attraverso la valorizzazione di sottoprodotti locali (es. digestato) in un'ottica di economia circolare, riducendo la dipendenza dalla volatilità dei mercati dei concimi chimici (Gliessman, 2022).

## **8.1 LIMITI DELLO STUDIO**

Il presente lavoro ha consentito di elaborare un piano di fertilizzazione organica basato sulle caratteristiche chimico-fisiche del suolo e sul bilancio della sostanza organica, fornendo uno strumento utile per la gestione della concimazione della coltura del mais. Tuttavia, il modello adottato presenta alcuni limiti che devono essere considerati nell'interpretazione dei risultati. Il calcolo del bilancio della sostanza organica si basa infatti su coefficienti medi di mineralizzazione e di umificazione del letame ricavati dalla letteratura scientifica. Tali coefficienti possono variare in funzione delle condizioni climatiche, della tipologia di terreno, della gestione agronomica, della qualità dell'ammendante organico e delle tecniche di lavorazione adottate. Di conseguenza, le dosi di letame calcolate devono essere considerate come valori teorici di riferimento e non come quantità assolute applicabili indistintamente in ogni situazione aziendale. Un ulteriore limite è rappresentato dalla mancata valutazione della sostanza organica apportata dai residui colturali del mais. Gli stocchi e le altre biomasse restituite al terreno costituiscono infatti una fonte significativa di carbonio organico e possono

contribuire, nel medio-lungo periodo, al mantenimento della fertilità del suolo, riducendo il fabbisogno di ammendanti esterni.

## Capitolo 9

# CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo la definizione di un piano di fertilizzazione per la coltura del mais basato sulle caratteristiche chimico-fisiche del terreno e sul bilancio della sostanza organica, integrando i principi dell'agricoltura di precisione con le esigenze produttive e i vincoli normativi.

Le analisi del suolo hanno evidenziato terreni a tessitura franco-argillosa, caratterizzati da un contenuto di sostanza organica compreso tra l'1,77% e il 2,66%. Sebbene tali valori possano essere considerati soddisfacenti, l'elevato rapporto carbonio/azoto osservato nella maggior parte dei campioni indica una sostanza organica relativamente stabile e una ridotta velocità di mineralizzazione, con conseguente limitazione della quota di azoto prontamente disponibile per la coltura. A ciò si aggiungono valori di capacità di scambio cationico medio-bassi, che riducono la capacità del terreno di trattenere gli elementi nutritivi, influenzando l'efficienza della fertilizzazione.

L'applicazione del bilancio della sostanza organica ha consentito di stimare le perdite annuali dovute ai processi di mineralizzazione e di determinare la quantità teorica di letame necessaria per mantenere un bilancio positivo della sostanza organica. In alcuni appezzamenti la dose calcolata risulta superiore ai limiti imposti dalla normativa vigente nelle Zone Vulnerabili ai Nitrati; pertanto, la gestione aziendale prevederà la distribuzione della massima quantità di letame consentita dalla legislazione, rinviando la verifica dell'efficacia della strategia adottata a una nuova campagna di campionamento e analisi del terreno prevista dopo alcuni anni di coltivazione.

Uno degli aspetti più rilevanti emersi da questo studio riguarda l'applicazione dei principi della concimazione di precisione. La disponibilità di informazioni dettagliate sullo stato di fertilità del terreno consente infatti di adattare gli apporti fertilizzanti alle reali esigenze dei diversi appezzamenti, evitando distribuzioni uniformi che possono determinare sia sprechi di risorse sia carenze nutrizionali. Tale approccio permette di migliorare l'efficienza d'uso dei

fertilizzanti, ridurre i costi aziendali e minimizzare gli impatti ambientali derivanti da un impiego non razionale degli input produttivi.

L'adozione di una strategia di fertilizzazione basata sul monitoraggio periodico del suolo rappresenta inoltre un elemento fondamentale per la conservazione della fertilità nel lungo periodo. La sostanza organica costituisce infatti una risorsa dinamica, il cui mantenimento richiede una gestione continua e adattativa, capace di tenere conto delle condizioni pedoclimatiche, delle pratiche agronomiche e dell'evoluzione delle caratteristiche del terreno.

In conclusione, il presente studio dimostra come l'integrazione tra analisi del suolo, bilancio della sostanza organica e tecniche di agricoltura di precisione costituisca uno strumento efficace per supportare le decisioni agronomiche. L'approccio proposto consente non solo di soddisfare le esigenze nutrizionali della coltura del mais, ma anche di ottimizzare l'impiego dei fertilizzanti, migliorare la sostenibilità economica dell'azienda e contribuire alla tutela delle risorse ambientali, in linea con i principi della moderna agricoltura sostenibile

## BIBLIOGRAFIA

- AEF (Agricultural Industry Electronics Foundation). (2026). *ISOBUS standard: Technical guidelines for interoperability in smart farming*.
- Blackmore, S., et al. (2003). The interpretation of yield maps. *Precision Agriculture Journal*.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Cluster Alta Tecnologia Agrifood Lombardia. (2025). *Agricoltura 4.0 in Italia: Cresce l'adozione delle soluzioni smart*.
- Coherent Market Insights. (2026). *Precision farming market size & opportunities, 2026–2033*.
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*.
- ESA (European Space Agency). (n.d.). *Sentinel-2: Copernicus optical imaging mission*.
- European Commission. (2020). *A farm to fork strategy for a fair, healthy and environmentally friendly food system* (COM(2020) 381 final).
- European Commission. (2021). *Technical report: The role of precision agriculture in the Farm to Fork strategy*. DG Agriculture and Rural Development.
- European Commission. (2023). *The common agricultural policy: 2023–27*. Official Journal of the European Union.
- European Commission. (2025). *Precision farming and the digital transformation of agriculture*. DG Agriculture and Rural Development.

- European Parliament. (2016). *L'agricoltura di precisione e il futuro dell'agricoltura in Europa*.
- FAO. (2017). *Voluntary guidelines for sustainable soil management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2020). *State of knowledge of soil biodiversity: Status, challenges and potentialities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2022). *The state of food and agriculture 2022*.
- Fiorentini, M., et al. (2022). A machine learning modelling framework for *Triticum turgidum* subsp. *durum* yield forecasting in Italy. *Agronomy Journal*.
- Fondazione Qualivita. (2026). *L'agricoltura 4.0 in Italia cresce del +9% nel 2025*.
- Fortune Business Insights. (2026). *Precision agriculture market size, share | Industry report 2034*.
- Fountas, S., et al. (2006). Information management in precision agriculture. In *Precision agriculture: Methods and applications*.
- Gitelson, A. A., et al. (2003). Vegetation and soil lines in reflectance space: A revisit. *Remote Sensing of Environment*.
- Gliessman (2022): Testi di Agroecologia e sostenibilità dei sistemi colturali.
- Haboudane, D., et al. (2004). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content. *Remote Sensing of Environment*.
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review. *Soil and Tillage Research*.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Academic Press.
- Imageline (AgroNotizie). (2026). *Agricoltura, 11 tendenze per il 2026*.
- Jones & Davis (2023): Ricerche sulla Smart Agriculture applicata alla distribuzione di ammendanti organici e salute del suolo.

- Kuzyakov, Y., Friedel, J. K., & Stahr, K. (2000). Review of priming effects: process links in carbon and nitrogen turnover. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(11-12), 1485-1498.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1-22.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627
- Lipiec, J., et al. (2003). Soil physical properties and growth of wheat as affected by tillage and compaction. *Soil and Tillage Research*.
- Market Growth Reports. (2026). *Dimensioni del mercato dell'agricoltura di precisione: Previsioni globali fino al 2035*.
- Matese, A., & Di Gennaro, S. F. (2020). Technology in precision viticulture: A state-of-the-art review. *International Journal of Molecular Sciences*.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*.
- Osservatorio Smart AgriFood. (2026). *Il ruolo del digitale nella transizione ecologica dell'agricoltura italiana*. Politecnico di Milano.
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*.
- Profitosan. (2026). *2026: dall'agritech sperimentale all'agritech strutturale*.
- Robert, P. C. (2002). Precision agriculture: A challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil*.
- Robertson, G. P., et al. (2012). Farming for ecosystem services: An agroecological approach. *BioScience*.
- Sellers, P. J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*.
- Shanahan, J. F., et al. (2008). Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture*.
- Smith et al. (2021): Studi sull'efficienza dei fertilizzanti e l'impatto ambientale dei nitrati.
- Stafford, J. V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research*.

- Sparks, D. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*.
- USDA. (2026). *Precision agriculture technologies for crop management*.
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision farming: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*.
- Zude-Sasse, M., et al. (2016). *Sensors in precision agriculture: A review*. Springer.
- Zuffellato Technologies. (2026). *Agricoltura 4.0 in Italia: I dati dell'Osservatorio Smart AgriFood*.