



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

CONCIMAZIONE DI PRECISIONE IN
FRUMENTO DURO: L'INTEGRAZIONE
FRA LE MAPPE DI PRESCRIZIONE E
BILANCIO DEI NUTRIENTI
(*Triticum turgidum subsp. durum Desf*)

Precision fertilization in durum wheat: the integration
between prescription maps and nutrient balance
(*Triticum turgidum subsp. durum Desf*)

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
ANNAMARIA CUSCIANNA

Relatore:
PROF. LUIGI LEDDA

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

A mio nonno Emanuele

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE	4
ELENCO DELLE FIGURE	5
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	6
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	7
CAPITOLO 1 PRECISION FARMING	9
1.1 Introduzione all'agricoltura di precisione.....	9
1.2 Origine e diffusione dell'agricoltura di precisione.....	10
1.2.1 L'agricoltura di precisione nel mondo.....	11
1.2.2 L'agricoltura di precisione in Italia	12
1.3 Determinazione della variabilità del suolo	14
1.3.1 Sensori prossimali	14
1.4 Mappe di prescrizione	16
1.5 Fertilizzazione di precisione	17
1.5.1 Concimazione azotata.....	19
1.5.2 Concimazione fosfatica	25
CAPITOLO 2 MATERIALI E METODI	29
2.1 Descrizione dei siti sperimentali	29
2.2 Analisi del suolo.....	32
2.3 Delineazione delle zone omogenee	35
2.4 Determinazione della dose di concime azotato.....	39
2.1 Determinazione della dose di concime fosforico	41
CAPITOLO 3 RISULTATI E DISCUSSIONE.....	43
3.1 Concimazione azotata a rateo variabile	43
3.2 Concimazione fosfatica a rateo variabile.....	44
CONCLUSIONI.....	45
BIBLIOGRAFIA	47

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1-1 Valori di densità apparente in funzione di diverse tipologie di terreno	23
Tabella 1-2 Fattore correttivo da utilizzare per valutare l'immobilizzazione e la dispersione dell'azoto nel terreno	24
Tabella 1-3 Quantità di azoto ($\text{kg ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$) perso annualmente per lisciviazione in funzione della facilità di drenaggio e della tessitura del terreno.....	25
Tabella 1-4 Valutazione agronomica della dotazione (mg/kg) in P_2O_5 (estratto con metodo Olsen) di un suolo	26
Tabella 1-5 Limiti inferiore e superiore della classe di dotazione "normale" in P_2O_5 (mg/kg) in funzione di tessitura e classe colturale.	27
Tabella 2-1 Determinazione degli apporti e perdite relative all'azoto, nelle tre zone omogenee	41
Tabella 2-2 Determinazione degli apporti e perdite relative al fosforo, nelle cinque zone omogenee	42
Tabella 3-1 Calcolo delle dosi di azoto da distribuire nelle tre zone omogenee, da frazionare in due concimazioni	43
Tabella 3-2 Calcolo della dose di fosforo da distribuire nelle cinque zone omogenee	44

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 Diagramma di flusso agricoltura di precisione (Castrignanò et al., 2020)	9
Figura 2 Primo esempio di mappa di prescrizione proposto nel 1929 da Linsley e Bauer per la correzione del pH (Linsley & Bauer, 1929)	10
Figura 3 Rappresentazione del funzionamento dei sensori ad induzione elettromagnetica	15
Figura 4 Curva di risposta riferita alla produzione di una coltura generica rispetto a dosi crescenti di concime (ipotesi azoto)(Grignani, 2016)	21
Figura 5 Localizzazione sito sperimentale	29
Figura 6 Cooperativa La Generale, Genzano di Lucania (PZ)	30
Figura 7 Disegno sperimentale della prova	31
Figura 9 Indagine elettromagnetica e creazione di mappe di resistività.....	32
Figura 10 Resistività elettrica del suolo 0-50 cm ricavata con CMD miniexplorer	34
Figura 11 Mappa dell'azoto dell'area interessata dalla coltivazione di frumento, ricavata in seguito all'analisi pedologica diretta.....	35
Figura 12 Mappa della suddivisione del campo in tre zone omogenee per la prescrizione azotata	36
Figura 13 Mappa del fosforo dell'area interessata dalla coltivazione di frumento, ricavata in seguito all'analisi pedologica diretta.....	37
Figura 14 Mappa della suddivisione del campo in cinque zone omogenee per la prescrizione fosfatica	38

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

ISPA	International Society of Precision Agriculture
GPS	Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System
DGPS	Differential GPS
RTK	Real-Time Kinematics
VRT	Variable Rate Technology
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
ISO	Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione
SAU	Superficie agricola utilizzata
DSS	Decision support system
AP	Agricoltura di Precisione
EMI	Electromagnetic Induction
GPR	Ground Penetrating Radar
ECa	Conducibilità Elettrica apparente
CEC	Capacità di scambio cationico
MZ	Managment Zone
NUE	Nitrogen Use Efficiency

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Il 15 novembre 2022 l'ONU ha dichiarato che la popolazione mondiale ha raggiunto 8 miliardi di persone grazie ai progressi della sanità pubblica, dell'alimentazione, dell'igiene e della medicina.

L'agricoltura ha trascinato l'esplosione demografica della nostra specie a partire dai primi decenni del novecento. Grazie all'applicazione di innovazioni, che derivano dalla ricerca scientifica, è stato possibile aumentare la produzione agricola e ridurre il numero di persone al di sotto della soglia di sufficienza alimentare. Nel 1970 circa il 35% della popolazione mondiale aveva scarse risorse alimentari, mentre oggi è poco più del 10%. Uno degli obiettivi dell'agenda 2030, per lo sviluppo sostenibile tratta di come porre fine alla fame nel mondo, raggiungere la sicurezza alimentare, migliorare l'alimentazione e promuovere l'agricoltura sostenibile.

Fino al XIX l'agricoltura era un sistema produttivo a elevato impegno di manodopera, ma con una bassa produttività. Alcuni storici identificano questa fase come agricoltura 1.0 cioè più "antica" e a basso livello tecnologico. Nel secolo successivo, con la rivoluzione verde, l'agricoltura subisce un notevole cambiamento, vengono introdotte innovazioni da quattro diversi ambiti: genetica, tecniche di coltivazione, patologia vegetale e meccanizzazione.

Ad oggi si parla di agricoltura di precisione che deriva dalla fusione di pratiche agronomiche con l'ingegneria informatica (Internet of Things). L'innovazione tecnologica compie un ruolo importante nel rendere l'agricoltura più efficiente e sostenibile, in modo da massimizzare le rese minimizzando l'impatto ambientale.

Le tecnologie riconducibili all'AdP si sono sviluppate per prima nei sistemi colturali erbacei, in particolare quelli basati su colture cerealicole. Difatti, spesso si tratta di sistemi colturali caratterizzati da appezzamenti di dimensioni medio-grandi, in cui è abbastanza evidente la scarsa efficienza della gestione agronomica uniforme nello spazio e nel tempo (MIPAAF, 2015).

Gli obiettivi della tesi sono:

- determinare la variabilità spaziale utilizzando la risposta del suolo alla radiazione elettromagnetica, e quantificare la dotazione dei nutrienti con l'analisi pedologica diretta;
- ottimizzazione e quantificazione della dose ottimale di concime azotato e fosforico da distribuire su frumento duro, basandosi sulla mappatura del suolo effettuata nella prima fase

Capitolo 1

PRECISION FARMING

1.1 Introduzione all'agricoltura di precisione

L' ISPA, “international society of precision agriculture”, definisce l'agricoltura di precisione come: “una strategia di gestione dell'attività agricola con la quale i dati vengono raccolti, elaborati, analizzati e combinati con altre informazioni per orientare le decisioni in funzione della variabilità spaziale e temporale al fine di migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse, la produttività, la qualità, la redditività e la sostenibilità della produzione agricola”



Figura 1 Diagramma di flusso agricoltura di precisione (Castrignanò et al., 2020)

Per monitorare la variabilità spaziale e temporale, l'agricoltura di precisione si avvale dell'utilizzo di tecnologie che permettono di attuare una gestione sito-specifica. Si può intervenire con:

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

Non è sufficiente che un'azienda agraria si equipaggi di tecnologie elettroniche o di sensoristica per parlare di agricoltura di precisione ma è necessario impiegare questi strumenti con un approccio sito-specifico.

1.2 Origine e diffusione dell'agricoltura di precisione

I concetti alla base dell'agricoltura di precisione furono introdotti già nel 1911 da Mercer e Hall che cercarono di eliminare la variabilità spaziale del suolo nella sperimentazione agronomica (Mercer & Hall, 1911), successivamente, negli anni '20 Harris riporta degli studi sulla variabilità spaziale del suolo. Nel 1929 in una pubblicazione, Linsley e Bauer fornirono le istruzioni per effettuare un campionamento del pH del suolo, secondo una griglia regolare (non essendoci ancora il GPS contavano i passi) ed ottennero la prima mappa di prescrizione (Figura 3) con zone di applicazione di dosi diverse di correttivo (calcare) che veniva distribuito manualmente (Linsley & Bauer, 1929).

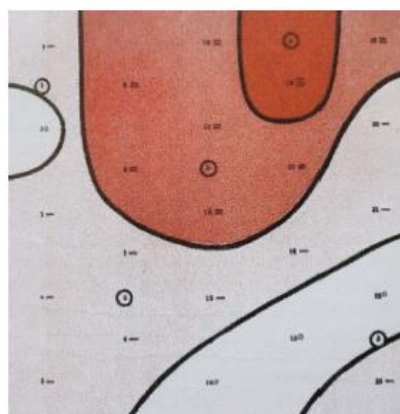


Figura 2 Primo esempio di mappa di prescrizione proposto nel 1929 da Linsley e Bauer per la correzione del pH (Linsley & Bauer, 1929)

Grazie al lavoro di Matheron, negli anni '60 si iniziò a sviluppare la geostatistica e furono messe a punto tecniche di quantificazione ed analisi della variabilità spaziale.

Sulla base di questi studi nel 1988 la AgChem Equipment Company del Minnesota (USA) introdusse sul mercato il primo spandiconcime a rateo variabile, ma la ricerca agronomica non aveva ancora sviluppato le metodologie adatte per utilizzarlo. Fu proprio a seguito di ciò, che nel 1992 all' International Conference of Precision Agriculture si mise in evidenza che le tecnologie avanzano ad una velocità maggiore rispetto alla capacità di sfruttarle per la gestione agronomica (Franzen & Mulla, 2015).

L'evoluzione dell'AP avvenne nel 1995 con l'autorizzazione dell'utilizzo del GPS (Global Position Service) per scopi civili. L'insieme dei sistemi di posizionamento del mondo si definiscono GNSS (Global Navigation Satellite System), comprendono il sistema GPS americano, GLONASS russo, Beidou cinese e Galileo europeo. Un ricevitore satellitare calcola la posizione di un ricevitore a terra e rilascia dei dati in termini di latitudine, longitudine e quote, espresse in un sistema geografico di riferimento. Per un rilievo GNSS è necessario che questo sia ripetibile nel tempo per cui è necessario:

- accuratezza: scarto tra la posizione media calcolata dal GNSS e la posizione vera del punto indagato;
- precisione: variabilità della distribuzione dei punti rilevati rispetto alla loro posizione media calcolata

La determinazione della posizione di un punto sulla terra, attraverso i sistemi di posizionamento determinano un errore di 5-10 metri. Per ridurre questi errori è necessario affidarsi a sistemi di correzione differenziale, DGPS che prevedono l'impiego di due ricevitori: rover e master quest'ultimo in postazione fissa a coordinate note. Entrambi, effettuano dei calcoli sulla base dei segnali ricevuti e determinano la propria posizione, insieme ad un errore E. Per cui si procede con una correzione differenziale che può avvenire in tempo differito (post-processing) se vengono apportate in tempi successivi al rilievo, o in tempo reale (real time) quando le correzioni sono indispensabili contestualmente al rilievo e il sistema viene definito Real Time Kinematic, RTK.

Il GNSS in agricoltura può essere utilizzato per: la gestione sito-specifica e la navigazione. Nel primo caso sono comprese attività di gestione aziendale con l'acquisizione di dati geografici, produzioni e distribuzione dei fattori; nel secondo caso sono comprese tutte quelle attività legate al controllo operativo delle attività meccanizzate in campo (VRT dei fattori della produzione).

Negli anni '90, presso l'università dell'Oklahoma, si studiò l'applicazione di sensori ottici da applicare sulle macchine agricole, in grado di fornire un indice di vegetazione (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) in maniera rapida ed economica; negli anni a seguire la Francia sviluppò delle tecniche basate sui dati satellitari che permettesse, come nel primo caso, di gestire la concimazione azotata a rateo variabile, e applicare dosi differenti in base alla zona omogenea.

Per differenziare l'applicazione degli input all'interno dell'appezzamento è necessario che la trattrice trasmetta i dati alla macchina operatrice, questo fu possibile con l'introduzione di un protocollo standardizzato (ISO 11783) di comunicazione, denominato ISO-BUS.

1.2.1 *L'agricoltura di precisione nel mondo*

L'agricoltura di precisione è maggiormente diffusa negli Stati Uniti, dove la maggior parte delle tecnologie si sono sviluppate. L'università di Purdue in collaborazione con Croplife magazine esegue periodicamente dei questionari, ai rivenditori di mezzi tecnici e di servizi per l'agricoltura, per comprendere la diffusione negli USA delle tecnologie di agricoltura di precisione. Dai dati raccolti nel 2022, si stima che il 69% degli agricoltori statunitensi

utilizzano sistemi di guida automatica delle trattrici con GPS. Gli agricoltori che utilizzano sistemi GPS per il controllo delle sezioni delle irroratrici sono circa il 63% e per la semina il 51%. La fertilizzazione a rateo variabile è adottata da circa il 49% degli agricoltori, mentre il 9% per i trattamenti fitosanitari. Il 68% delle mietitrebbiatrici sono equipaggiate con sistema di mappatura delle produzioni. (Erickson et al., 2022)

Il sondaggio, proposto negli USA, è stato proposto anche in Canada, ed è stato rilevato che una percentuale maggiore di agricoltori utilizzano una guida automatica, pari al 75%. Gli agricoltori che utilizzano sistemi GPS per il controllo delle sezioni delle irroratrici è uguale agli Stati Uniti, circa il 63%, a differenza della semina dove la percentuale è in misura minore, pari al 36%. La fertilizzazione a rateo variabile è adottata da circa il 24% degli agricoltori, mentre l'11% per i trattamenti fitosanitari. (Mitchell et al., 2020)

Anche in Australia le tecniche di agricoltura di precisione sono ampiamente utilizzate. Da un'indagine nel 2014, si è dedotto che circa l'80% dei cerealicoltori adotta strumenti di guida automatica (Leonard Emma, 2014)

L'adozione di queste nuove tecnologie è molto simile tra Stati Uniti, Australia e Canada, in quanto le dimensioni delle aziende agricole sono maggiori in questi paesi e di conseguenza gli imprenditori agricoli sono maggiormente disposti e in grado di adottare nuove tecnologie. (Say et al., 2018). Al contrario, in Europa, la scarsa adozione delle tecnologie di precision farming può essere spiegata dalle dimensioni ridotte delle aziende, mancanza di conoscenza da parte degli agricoltori e aiuti economici non sufficienti per l'investimento iniziale. (ECPA et al., 2019)

1.2.2 *L'agricoltura di precisione in Italia*

Da una ricerca realizzata dall'Osservatorio Smart Agrifood e del Laboratorio RISE, "Research & Innovation for Smart Enterprises", è emerso che nel 2022 la superficie agricola italiana interessata da innovazioni tecnologiche e digitali ha raggiunto l'8% della SAU, con un enorme potenziale di crescita, soprattutto con l'introduzione dei big data analytics e il cosiddetto "Internet of Things".

Dal grafico 1 si può vedere che la crescita del mercato dell'agricoltura 4.0 è in continua crescita, si stima che nel 2022 il mercato ha raggiunto 2,1 miliardi di euro, +31% rispetto al 2021.

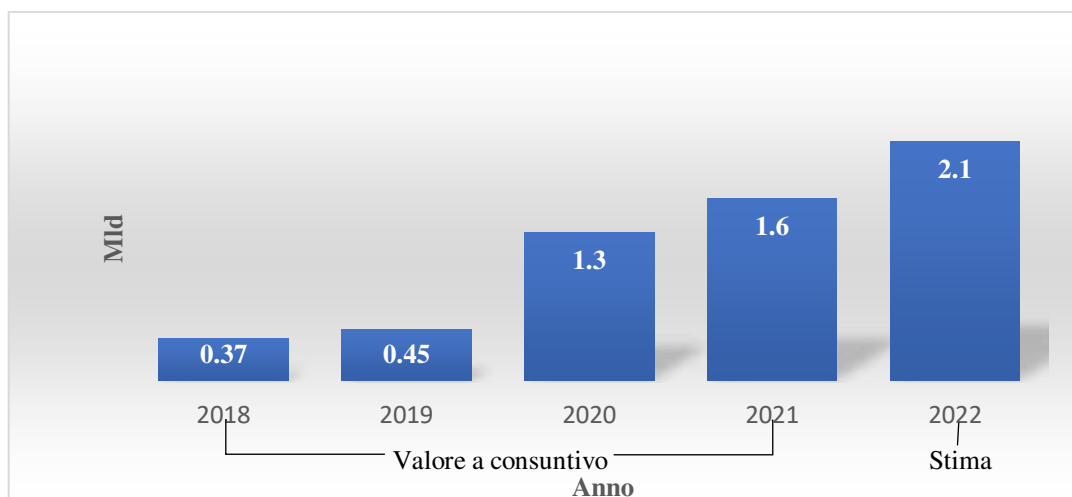


Grafico 1 Andamento del mercato dell'agricoltura 4.0 in Italia dal 2018 al 2022. Fonte Osservatorio Smart AgriFood, 2022-2023

Il 35% del valore del mercato è composto da sistemi di monitoraggio e controllo di mezzi e attrezzature. Il 30% macchinari connessi e dal 20% dai sistemi di monitoraggio da remoto di coltivazioni, terreni e infrastrutture. Il 6% è rappresentato da software gestionali aziendali, al 4% sistemi di mappatura di coltivazioni e terreni e al 3% Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS).

Dall'indagine, si è osservato che l'obiettivo trainante delle aziende agricole che utilizzano tecnologie di precision farming è l'ottimizzazione dei fattori produttivi (fertilizzanti, antiparassitari, acqua).

Dall'intervista effettuata ai rivenditori di mezzi agronomici, è stato dedotto che le barriere sono principalmente la mancanza di adeguate competenze nel mercato per il 51%, e la poca maturità dei clienti o potenziali per il 49%; mentre, per gli agricoltori, i ritorni sugli investimenti non sono sufficienti o quantificabili, inoltre, mancano anche le competenze e permangono problemi di connettività.

A favorire invece la diffusione di strumenti 4.0 c'è sicuramente l'intervento pubblico, visto che l'88% delle imprese afferma di aver usufruito di almeno un incentivo, tuttavia l'utilizzo di nuove tecnologie è ancora limitato. Difatti se si osservano i dati nel dettaglio si evidenzia che nel 2022 la maggior parte degli investimenti, riguardo l'AP, sono effettuati da aziende agricole che hanno già conoscenze in questo ambito, e che stanno implementando le tecnologie presenti, agendo di fatto sulla stessa superficie coltivata (Smart Agri Food, 2023).

1.3 Determinazione della variabilità del suolo

L'applicazione dell'agricoltura di precisione richiede la conoscenza della variabilità del suolo e delle colture, informazioni utili per definire le scelte gestionali (Oliver, 2013); di conseguenza è importante disporre di strumenti idonei per l'analisi dei dati spazio-temporali (Kitchen et al., 2002). L'acquisizione della variabilità spaziale può avvenire mediante sensori prossimali quando sono trasportati a bordo delle macchine agricole; sensori aerotrasportati a bordo di droni; sensori satellitari in orbita su piattaforme satellitari.

1.3.1 Sensori prossimali

I sensori prossimali durante la misurazione possono essere a diretto contatto con il terreno o con la coltura o in alternativa ad una distanza inferiore di 2 m dal suolo (Viscarra Rossel et al., 2011), e i dati raccolti possono essere georiferiti con GNSS. I sensori ad induzione elettromagnetica (EMI, Electromagnetic Induction) e il Ground Penetrating Radar (GPR) fanno parte dei sensori prossimali non invasivi (Vereecken et al., 2008), mentre tra i sensori che richiedono il contatto diretto con il suolo rientrano i georesistivimetri. Questi strumenti permettono di ricavare la conducibilità elettrica apparente del suolo (ECa), misura correlata alle proprietà del suolo come la tessitura, capacità di scambio cationico (CEC), porosità, salinità e temperatura (Grisso et al., 2009; Priori, 2010)

I sensori EMI sono composti da una bobina trasmittente ed una ricevente. La bobina trasmittente viene attraversata da corrente alternata a bassa frequenza e si genererà così un campo magnetico primario, che si propaga nell'aria e nel suolo. Le variazioni del campo magnetico inducono delle piccole correnti che attraversano il suolo e generano un campo magnetico secondario, che produce una corrente nella bobina ricevente (figura 5). La variabilità misurata rappresenta la conducibilità elettrica apparente (ECa), la distanza tra due bobine e il loro orientamento definisce la profondità di misurazione effettiva (Grisso et al., 2009).

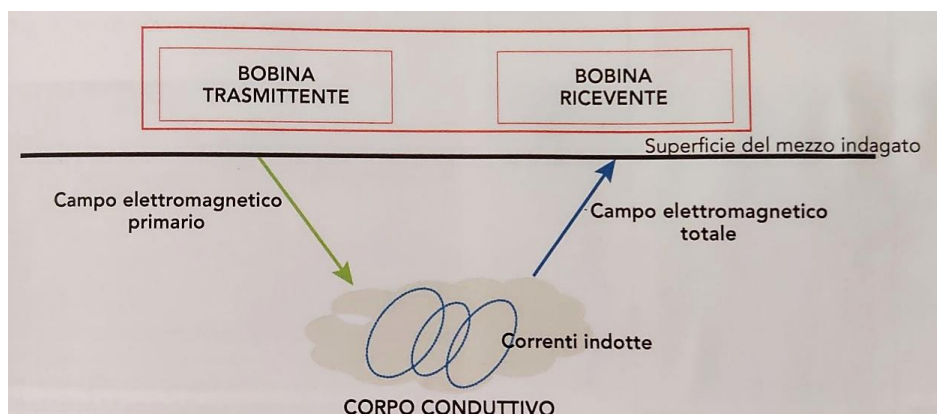


Figura 3 *Rappresentazione del funzionamento dei sensori ad induzione elettromagnetica*

Elevati valori di ECa sono determinati da: un maggior contenuto di argilla, maggior umidità del suolo, compattamento o elevata salinità. Valori bassi di ECa sono determinati da: tessitura più sabbiosa, maggiore pietroosità, profondità di suolo limitata (Priori, 2010).

Il GPR, anche detto georadar, è usato principalmente per individuare oggetti sepolti o ricostruire la stratificazione e la profondità del terreno investigato. I sistemi sono costituiti da:

- sistema di trasmissione che genera gli impulsi, collegato a un'antenna (TX)
- sistema ricevente connesso ad un'antenna (RX)

Il sistema consiste nell'invio nel terreno di impulsi elettromagnetici ad alta frequenza (100 MHz- 2 GHz) che percorre l'antenna trasmittente e torna a quella ricevente. Il dato in uscita è in funzione del tempo, dopo essere stato riflesso e/o diffranto da eventuali discontinuità presenti nel materiale investigato (Simone et al., 2016)

Il tempo di andata e ritorno del segnale, espresso in nanosecondi (ns), permette di misurare la distanza tra le antenne ed il bersaglio. Tale distanza può essere trasformata in profondità (metri) nel sottosuolo qualora si possa misurare la velocità di propagazione degli impulsi nel mezzo investigato (Baone & Ferrara, 2016).

La profondità di investigazione dipende dalla conducibilità elettrica del suolo e dalla frequenza: più alta è la frequenza più corto è l'impulso, quindi si ha minore penetrazione del segnale.

Il GPR può avere due configurazioni: configurazione bi-statica nella quale l'antenna trasmittente è fisicamente separata da quella ricevente; configurazione monostatica nella quale l'antenna trasmittente e ricevente coincidono.

In generale, in terreni a bassa conducibilità, come sabbie secche e ghiaie, e con sistemi a bassa frequenza si possono raggiungere penetrazioni anche di decine di metri, mentre, in

terreni molto conduttivi come argille umide e con alte frequenze, la profondità di penetrazione raggiunge circa 1m (Simone et al., 2016).

Come anticipato precedentemente, tra i sistemi invasivi si collocano i georesistivimetri dinamici che si stanno diffondendo in agricoltura e per scopi pedologici, l'indagine del suolo può arrivare ad una profondità massimo di 3m. Lo strumento è composto da elettrodi costituiti da ruote metalliche che penetrano nel terreno; una coppia di ruote immette corrente nel terreno, mentre l'altra, misura la caduta di potenziale della corrente che ha percorso il suolo. Il problema che si può riscontrare con l'utilizzo di questi strumenti è il contatto tra elettrodi e suolo non ottimale a causa di suoli pietrosi o molto secchi. Con questa tecnica si determinano i valori di resistività elettrica apparente del suolo, ovvero l'inverso della ECa; di conseguenza valori elevati possono corrispondere a zone con basso contenuto idrico e/o con tessitura sabbiosa e/o con elevata pietrosità.

In seguito all'acquisizione dei dati con i sensori geofisici e la georeferenziazione degli stessi, si procede ad elaborare la mappa di resistività e la costituzione di aree omogenee per determinare e quantificare la variabilità spaziale. Sulla base della mappa, si effettuano dei campionamenti del suolo nelle diverse aree per ottenere un'indagine pedologica mirata.

La maggior parte dei sistemi ad oggi in uso in agricoltura sono i sensori ad induzione elettromagnetica (EMI) e i georesistivimetri mentre i georadar sono maggiormente utilizzati in archeologia, ingegneria e in alcune applicazioni geologiche (Priori, 2010).

1.4 Mappe di prescrizione

Per avere una gestione sito-specifica della coltura è necessario identificare delle zone omogenee all'interno del campo, definite in inglese management zone.

Le management zone possono essere definite come parti del campo con proprietà omogenee che possono essere condotte in modo uniforme (Nawar et al., 2017).

Secondo Miao et al.(2018) esistono tre diverse metodologie per poter definire le MZ.

1) basato sulle caratteristiche del suolo, come conducibilità elettrica, sostanza organica e carbonio organico che possono essere stimati da immagini telerilevate;

2) basato sulle mappe di produzione;

3) basato sull'integrazione delle mappe di resa e dati suolo;

4) basato sull'uso di modelli di simulazione che riescono a stimare la risposta della produzione in base alle caratteristiche del suolo e del clima.

L'utilizzo di alcune pratiche di agricoltura di precisione, tra cui la fertilizzazione, può contribuire a migliorare l'efficienza produttiva e a diminuire l'impatto ambientale; la maggior parte dei fattori che determinano la resa e la qualità delle colture sono variabili nello spazio e nel tempo, per cui è necessario prendere delle gestioni sulla base di queste (Ortega & Santibáñez, 2007).

Inoltre, le zone omogenee individuate con i metodi descritti precedentemente, possono rappresentare i punti dove effettuare il campionamento del suolo e delle colture in modo da ridurre il numero di campioni da prelevare ed analizzare (Cid-Garcia et al., 2014).

Per la delimitazione delle zone omogenee le metodologie utilizzate sono:

- analisi empirica;
- analisi dei cluster.

L'analisi empirica è basata sulle conoscenze e sulla distribuzione della resa all'interno del campo, in modo da poterlo dividerlo in zone. Questo metodo ha il vantaggio di essere semplice ma, non è molto affidabile in quanto è influenzato da decisioni soggettive.

L'analisi dei cluster divide i dati di un campo in classi, mediante una funzione della valutazione della somiglianza. Le classi rinvenute permettono di definire le zone omogenee che, successivamente possono essere delimitate nel campo (Boydell & McBratney, 2002). Questo metodo è più complesso, rispetto al precedente, ma permette una maggiore differenziazione tra le classi in quanto meno soggettivo e tiene in considerazione diverse variabili nella definizione delle zone (Gavioli et al., 2019).

In letteratura sono descritti diversi algoritmi di clustering, tra quelli più analizzati per la definizione delle zone omogenee sono (Gavioli et al., 2019):

- K-means
- Fuzzy C-means (FCM)(Bezdek, 1981)

1.5 Fertilizzazione di precisione

La concimazione ha l'obiettivo di fornire alle colture gli elementi nutritivi che ne necessitano in quantità e tempi tali per raggiungere la massima potenzialità produttiva. I sistemi culturali sono contraddistinti da asportazioni di elementi minerali contenuti nei prodotti raccolti, questo, a lungo termine può determinare l'impoverimento del suolo e mancanza di sostenibilità di un elevato livello produttivo. Per tener conto dei componenti aggiuntivi riguardanti le entrate e le uscite, bisogna far affidamento al metodo del bilancio (Grignani et al., 2013). In passato, le stime delle asportazioni e restituzioni o il bilancio non

tenevano conto della variabilità spaziale e temporale dell'appezzamento, per cui le dosi di fertilizzante erano invariate negli anni, con un'inefficienza del sistema.

Il calcolo delle dosi di concime da distribuire è strettamente legato ad alcuni fattori tra cui:

- obiettivo aziendale, sia in termini di quantità di granella da produrre che di qualità;
- caratteristiche del terreno, processi fisici (tessitura del terreno e flussi idrici), chimici (reazioni delle molecole che contengono i nutrienti) e biologici (nitrificazione, assorbimento radicale da parte delle piante), inoltre, il calcolo delle dosi è influenzato dallo stock di elementi nutritivi presenti nel suolo e la disponibilità di nutrienti
- precessione colturale, la coltivazione di leguminose apportano una considerevole quantità di azoto al terreno al contrario della monosuccessione;
- varietà, è bene considerare il potenziale produttivo e le esigenze di ognuna e considerare che, nel caso di varietà soggette ad allettamento è necessario ridurre l'apporto di azoto;
- andamento stagionale influenza soprattutto la tipologia di concime da usare e il momento di somministrazione.

Inoltre, è necessario considerare il momento in cui viene effettuata la concimazione. Può essere:

1. di fondo: a base di fosforo, il quale deve essere interrato in quanto non idrosolubile e scarsamente mobile nel terreno a questa può essere abbinata la concimazione azotata, utilizzando un concime binario;
2. di copertura in fase di accostamento: momento chiave in cui si ha il picco di assorbimento dell'azoto;
3. inizio levata, in quanto è il momento in cui la pianta "programma" il numero di grani nella spiga;
4. di copertura prima della spigatura: fondamentale per accrescere il contenuto di proteine nella granella.

L'agricoltura di precisione sta lavorando affinché la gestione della fertilizzazione possa migliorare, per fare ciò si possono adottare procedimenti differenti, ad esempio (Heege, 2013):

- mappatura delle produzioni delle colture dell'anno precedente, per quantificare le asportazioni degli elementi nutritivi, nel caso dell'azoto non considera le perdite per lisciviazione o volatilizzazione mentre il fosforo e potassio essendo due elementi poco mobili nel suolo il metodo è più affidabile;
- mappatura del suolo di proprietà correlate ad elementi di fertilità;

- utilizzo di sensori prossimali o remoti per monitorare lo stato nutrizionale della coltura durante la stagione.

La distribuzione del concime in agricoltura può avvenire applicando il rateo variabile VRA, variable rate application. Le metodologie ad oggi presenti sono: (Castrignanò et al., 2020)

1. applicazione a rateo variabile tradizionale, tecnica che non prevede l'uso di sensori e attrezzature costose, la quantità di concime sono basate su osservazioni visive in campo o dati raccolti nel tempo;
2. utilizzo di sensori ottici, montati sulla trattrice e/o sullo spandiconcime a rateo variabile, in grado di rilevare le proprietà delle colture. I dati registrati dai sensori vengono trasformati in indici di vegetazione, vengono elaborati da algoritmi appositamente sviluppati e si determina la dose di concime da distribuire. Con l'utilizzo di questa tecnica non è necessario utilizzare sistemi di guida GPS e mappe di prescrizione, per cui non si avrà la possibilità di memorizzare i dati e di creare mappe di prescrizione per applicazioni future;
3. applicazione a rateo variabile basato su mappe di prescrizione, la dose di concime da distribuire viene definita prima di eseguire l'operazione in campo. In questo caso, il tasso di input viene modificato man mano che la trattrice si sposta in campo, sincronizzando la posizione delle mappe di prescrizione con la posizione effettiva della trattrice in campo tramite GPS.

Le mappe di prescrizione sono file di dati digitali che specificano la quantità di input da apportare su ogni punto del campo, i dati vengono caricati sulla centralina dello spandiconcime a rateo variabile tramite USB. L'uso delle mappe di prescrizione basate su dati storici, di almeno 5 anni, possono essere impiegate nel primo intervento di concimazione azotata della coltura, in quanto la biomassa vegetale è ridotta e si avrebbe un'influenza del suolo nelle immagini telerilevate. Mentre, per le concimazioni successive si può far affidamento a dati relativi allo stato attuale della coltura.

1.5.1 *Concimazione azotata*

Per impostare correttamente la concimazione azotata su frumento duro, bisogna tenere in considerazione il potenziale produttivo dei terreni: nel nord Italia la produzione per ettaro si aggira intorno a 70 q/ha, mentre in alcune aree del centro e nel sud Italia se le condizioni climatiche sono favorevoli, tra aprile e maggio, si ha una produzione di 35-40 q /ha. Nelle zone più produttive bisogna evitare che la carenza di azoto diventi il fattore determinante della

riduzione della resa, mentre nelle aree meno produttive la distribuzione di concimazioni azotate devono essere eseguite nei momenti maggiormente favorevoli per l'assorbimento, evitando distribuzioni eccessive. Nella determinazione della dose di azoto da distribuire è bene considerare che il frumento duro asporta circa 3 chilogrammi di azoto per quintale di granella.

La fase critica, dove viene assorbito maggiore quantità di azoto nei cereali autunno-vernini, corrisponde alla fase di inizio levata-spiga al secondo nodo, in cui è bene distribuire la massima parte dell'azoto previsto (circa il 65-70% del totale) in una forma di assimilazione relativamente pronta (nitrato ammonico o urea). Per ottenere maggiore accumulo proteico nella spiga è necessario considerare un'ulteriore concimazione nella fase di botticella, con 25-30 unità di azoto.

Inoltre, per ottenere una buona copertura del fabbisogno azotato nel tempo riducendo il numero dei passaggi in campo si possono utilizzare fertilizzanti a lenta cessione, molto meno esposti al rischio di dilavamento e rendono disponibile l'azoto in modo progressivo, assecondando i flussi di assorbimento della coltura.

L'azoto è il principale macroelemento utile alla produttività dei campi di frumento duro, è l'elemento costitutivo dei tessuti vegetali e gioca un ruolo in tutte le fasi di crescita della pianta. È alla base dell'espansione fogliare e ritarda la senescenza, induce un maggiore accostamento, migliora la fertilità della spiga, nonché la grandezza delle cariossidi e il contenuto in amidi e proteine. Nello stesso tempo, un eccesso di azoto può aumentare il rischio di allettamento, in quanto i tessuti vegetali diventano meno turgidi e si piegano con più facilità al vento, inoltre, a causa della promozione della crescita vegetale si può creare condizioni di ristagno di umidità tra le foglie, favorendo così un clima favorevole agli attacchi fungini.

Al contrario, carenze di azoto causano una crescita stentata della pianta, le foglie ingialliscono e le cariossidi appaiono striminzite, con una percentuale di bianconatura elevata.

La gestione della concimazione azotata è più complessa, rispetto agli altri elementi, a causa dei processi dinamici che caratterizzano il ciclo dell'azoto. L'efficienza d'uso dell'azoto, NUE (Nitrogen Use Efficiency) è calcolata dal rapporto tra azoto asportato dalla coltura (al netto delle perdite per lisciviazione e apporti per mineralizzazione) ed azoto distribuito come fertilizzante (Equazione 1).

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

Dove:

N_{asp} : azoto asportato dalla coltura (contenuto nel prodotto)

N_{suolo} : azoto fornito dal suolo alla coltura (es. mineralizzazione sostanza organica, apporti da residui delle colture precedenti, apporti da fertilizzazione organiche precedenti)

N_{dep} : azoto proveniente da deposizioni atmosferiche

N_{fert} : azoto fornito con la concimazione

Equazione 1 NUE (Nitrogen Use Efficiency)

Raun & Johnson, (1999) stimano che la NUE a livello mondiale sia pari al 33%. Questo è dato dal fatto che l'azoto minerale che non giunge nei prodotti agricoli, si disperde nell'ambiente e può avere effetti negativi sugli ecosistemi. Esso sotto forma di ammoniaca (NH_3) altera gli ecosistemi sensibili come le paludi e le foreste, sotto forma di nitrati (NO_3) inquina le acque sotterranee e gli ecosistemi marini e sotto forma di protossido di azoto (N_2O) concorre al riscaldamento climatico.

Per interpretare l'effetto della fertilizzazione si può fare riferimento al grafico dose-risposta, come si può osservare dalla figura 5, apportando al suolo dosi crescenti di un elemento nutritivo, ci si aspetta un aumento di resa iniziale ma, tale aumento decresce progressivamente con possibili effetti negativi sulla coltura, che nel caso dell'azoto possono essere: allettamento, aumento della superficie traspirante e maturazione tardiva. Sulla base di ciò si può definire:

- la dose tecnica ottimale (DTO), cioè la dose di fertilizzante che corrisponde alla massima produzione;
- la dose economica ottimale (DEO) del concime oltre la quale non si ha un aumento della produzione che giustificerebbe il costo del fertilizzante (Grignani, 2016).

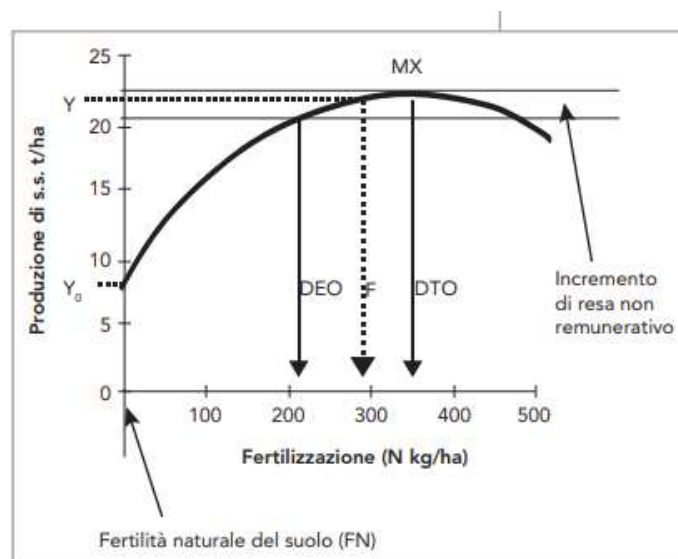


Figura 4 Curva di risposta riferita alla produzione di una coltura generica rispetto a dosi crescenti di concime (ipotesi azoto)(Grignani, 2016)

Delgado et al. (2005) e Delin et al. (2005) hanno individuato che la curva di risposta varia nel tempo e nello spazio, anche all'interno del singolo appezzamento a causa di diversi fattori

come la disponibilità di acqua e la tessitura del suolo. Per cui, una distribuzione uniforme della concimazione si traduce in elevati livelli di inefficienza e non è possibile costruire curve di risposta specifiche per ogni singola area del campo in caso di concimazione a rateo variabile. Risulta più opportuno stabilire la dose ottimale di azoto da distribuire attraverso il metodo del bilancio (Equazione 2), applicando la formula per ciascuna zona omogenea individuata all'interno del campo e successivamente creare la mappa di prescrizione per la concimazione.

1.5.1.1 Bilancio dell'azoto

Il calcolo delle unità di azoto complessive da distribuire alla coltura viene determinato sulla base di un bilancio che prevede:

Apporti:

- provenienti dalla mineralizzazione della sostanza organica (B);
- provenienti dalla fertilità del suolo (C);
- residui della coltura dell'anno precedente (D);
- azoto da fertilizzazioni organiche effettuate negli anni precedenti (E);
- da deposizioni atmosferiche (precipitazioni) (F).

Perdite:

- fabbisogni della coltura (A);
- immobilizzazioni e dispersioni (G);
- lisciviazione (H).

$$\text{Concimazione azotata} = A - B - C - D - E - F + G + H$$

Equazione 2 Bilancio dell'azoto

- Determinazione del fabbisogno della coltura (A)

$$A = \frac{\text{Assorbimenti}}{\text{Asportazioni colturali} \times \text{Produzione attesa}}$$

Per le colture erbacee si considera il coefficiente di assorbimento colturale unitario, cioè la quantità di azoto, per unità di prodotto, assorbita dalla pianta e localizzata nei frutti e negli altri organi (culmo, fusto, foglie e radici).

- Determinazione della sostanza organica mineralizzata (B)

Rappresenta la quantità di azoto mineralizzato ogni anno (kg ha⁻¹ anno⁻¹), a partire dalla s.o. presente nel terreno, che viene reso disponibile per la coltura. La quantità annualmente distrutta viene definita dal coefficiente di mineralizzazione, che si esprime con K₂, che

varia da 0,7% a 2,0% in relazione al tipo di terreno ed è più elevato nei terreni sabbiosi e sciolti e più basso nei terreni argillosi e pesanti.

Il coefficiente K₂ si può calcolare con la seguente formula:

$$K_2 = \frac{1200}{[(argilla \% + 20) \times (calcare \% + 20)]}$$

Per la determinazione dell'azoto apportato dalla mineralizzazione della sostanza organica la formula è:

$$B = Pr[m] \times d. a. \times S. O. [\%] \times K_2 \times 50$$

Pr: profondità del terreno maggiormente interessata dallo sviluppo radicale;

d.a.: densità apparente che può essere misurata o si fa riferimento ai valori in tabella 1-1;

S.O.: sostanza organica.

Tabella 1-1 Valori di densità apparente in funzione di diverse tipologie di terreno

Tipo di terreno	Densità apparente (t m-3)
Terreni argillosi	1,2
Terreni medi	1,3
Terreni sabbiosi	1,4

Dato che gli apporti di azoto derivanti dalla mineralizzazione della sostanza organica (B) sono disponibili per la coltura esclusivamente nel periodo in cui essa si sviluppa, il valore di B si moltiplica per il coefficiente n/12 dove n è il numero di mesi in cui la coltura è effettivamente presente in campo durante i 12 mesi dell'anno.

▪ **Determinazione della fertilità del suolo (C)**

Si indica la quantità di azoto presente nel terreno in una forma prontamente disponibile per le colture (kg ha⁻¹), si calcola in funzione del contenuto in azoto totale del terreno e della sua tessitura. Per un suolo:

- tendenzialmente sabbioso: $C = 28,4 \times N_{totale} [\%]$;
- franco: $C = 26,0 \times N_{totale} [\%]$;
- tendenzialmente argilloso: $C = 24,3 \times N_{totale} [\%]$.

Il dato ottenuto va moltiplicato per il coefficiente tempo (n/12)

▪ **Determinazione dell'azoto da residui della coltura in precessione (D)**

I residui delle colture precedenti una volta interrati subiscono un processo di demolizione che porta in tempi brevi alla liberazione di azoto. Se però questi materiali risultano caratterizzati da un rapporto C/N elevato, si verifica l'effetto

contrario con una momentanea riduzione della disponibilità di azoto. Tale fenomeno è causato da microrganismi che operano la demolizione dei residui e che per svilupparsi utilizzano l'azoto minerale presente nella soluzione circolante del terreno.

- **Determinazione dell'azoto da fertilizzazioni organiche effettuate negli anni precedenti (E)**
L'azoto derivante dalla mineralizzazione dei residui di fertilizzanti organici che sono stati distribuiti negli anni precedenti varia in funzione delle quantità e del tipo di fertilizzante impiegato e nel caso di distribuzioni regolari nel tempo anche della frequenza (uno, due o tre anni). Il coefficiente di recupero si applica alla quantità totale di azoto contenuto nel prodotto ammendante abitualmente apportato nel caso di apporti regolari o alla quantità effettivamente distribuita l'anno precedente per apporti saltuari.
- **Determinazione dell'azoto da apporti naturali (F)**
La quantità di azoto che arriva al terreno con le precipitazioni (G) è normalmente stimata in 10-20 kg/ha, e varia in funzione soprattutto della località e della vicinanza a centri urbani ed industriali.
- **Determinazione delle perdite per immobilizzazione e dispersione (H)**
Rappresenta la quantità di azoto che viene immobilizzato dalla biomassa e/o dal terreno per processi di adsorbimento chimico-fisico, nonché l'azoto perso per processi di volatilizzazione e denitrificazione e dell'effetto negativo che la mancanza di ossigeno causa sui processi di mineralizzazione della sostanza organica. Si calcola come quota di tutti gli apporti azotati utilizzando la formula seguente:

$$G = (B + C + D + E + F) \times \text{fattore correttivo}$$

Il fattore correttivo è funzione della tessitura del terreno e del drenaggio (Tabella 1-2).

Tabella 1-2 Fattore correttivo da utilizzare per valutare l'immobilizzazione e la dispersione dell'azoto nel terreno

Drenaggio	Tessitura		
	Tendenzialmente sabbioso	Franco	Tendenzialmente argilloso
Lento o impedito	50	40	50
Normale	40	30	20
Rapido	50	40	30

- Determinazione delle perdite per lisciviazione (H)

Con H si indica la quantità di azoto ($\text{kg ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$) perso per lisciviazione in funzione della facilità di drenaggio e della tessitura del terreno. Nella tabella 1-3 sono riportati i valori stimati di H.

Tabella 1-3 *Quantità di azoto ($\text{kg ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$) perso annualmente per lisciviazione in funzione della facilità di drenaggio e della tessitura del terreno.*

Drenaggio	Tessitura		
	Tendenzialmente sabbioso	Franco	Tendenzialmente argilloso
Lento o impedito	0,35	0,40	0,45
Normale	0,20	0,25	0,30
Rapido	0,15	0,20	0,25

1.5.2 Concimazione fosfatica

Il fosforo, a differenza dell'azoto, è caratterizzato da una minor dinamicità e mobilità, per cui è necessario tenere in considerazione la variabilità spaziale del fosforo assimilabile, dato che la variabilità temporale non varia in maniera considerevole nell'arco della stagione colturale.

Il fosforo svolge un ruolo fondamentale nello sviluppo della rizosfera e nell'incremento del numero di spighe per unità di superficie ed è importante per rendere le piante più resistenti alle malattie. In situazioni in cui c'è carenza di fosforo si ha un ritardo e un minore accrescimento, nonché una stentata formazione di semi. Sulle foglie la carenza di questo minerale provoca una colorazione antocianica (rossastra) sulle foglie superiori, a cominciare dai bordi.

Il fosforo può essere fornito con la sola concimazione di fondo, ma è soprattutto durante l'accestimento e la levata che avviene il maggiore assorbimento. Durante la sola levata viene usato il 70-75% del fosforo necessario alla crescita. Il frumento duro utilizza una quantità di fosforo pari a 1,4-1,6 kg/ettaro di anidride fosforica.

La disponibilità di fosforo per le piante è fortemente condizionata oltre che dal pH del terreno anche dalla presenza di calcare; quindi, la quantità di P assimilabile dalle piante dipende solo parzialmente dal contenuto totale dell'elemento nel terreno. Per la determinazione analitica del fosforo si usa generalmente il metodo Olsen per terreni con $\text{pH} > 7$ ed il metodo Bray-Kurtz per terreni con $\text{pH} < 7$.

Tabella 1-4 Valutazione agronomica della dotazione (mg/kg) in P₂O₅ (estratto con metodo Olsen) di un suolo

P ₂ O ₅ (mg/kg)	Valutazione
<6	Molto basso
6-13	Basso
13-25	Medio
25-40	Alto
>40	Molto alto

1.5.2.1 Bilancio del fosforo

Il calcolo delle unità di fosforo complessive da distribuire alla coltura, espresso come P₂O₅, viene determinato sulla base di un bilancio che tiene in considerazione:

Apporti

- provenienti dalla fertilità del suolo (B);
- da fertilizzazioni organiche effettuate negli anni precedenti (E).

Perdite

- fabbisogni della coltura (A);
- immobilizzazione dovuti al calcare (C);
- quota di arricchimento o riduzione (D).

$$\text{Concimazione fosfatica} = A - B + B \times (C - 1) - E$$

in caso di arricchimento + ($D_1 \times C$)

in caso di riduzione - D_2

- Determinazione dei fabbisogni colturali (A)

$$A = \text{assorbimenti colturali unitari} \times \text{produzione attese}$$

- Determinazione della fertilità del suolo (B)

indica la quantità di fosforo mineralizzato ogni anno (kg ha⁻¹ anno⁻¹), a partire dalla sostanza organica presente nel terreno, e che viene reso disponibile per la coltura. La quantità annualmente distrutta viene definita coefficiente di mineralizzazione, che si esprime con il simbolo K₂.

Per la determinazione del fosforo apportato dalla mineralizzazione della sostanza organica la formula è la seguente:

$$B = Pr[m] \times d. a. \times S. O. [\%] \times K_2 \times 10$$

Pr: profondità di terreno maggiormente interessata dallo sviluppo radicale;

d.a.: densità apparente che può essere misurato o si fa riferimento ai valori in tabella 1-1;
S.O.: sostanza organica.

Gli apporti di fosforo derivanti dalla mineralizzazione della sostanza organica sono disponibili per la coltura esclusivamente nel periodo in cui essa si sviluppa, per cui B si moltiplica per il coefficiente $n/12$ dove n è il numero di mesi in cui la coltura è effettivamente presente in campo durante i 12 mesi dell'anno.

- Determinazione delle perdite per immobilizzazione (C)
quantità di fosforo derivante dagli apporti, sia di quelli provenienti dalla dotazione in sostanza organica sia di concimi, che per specifici processi fisico-chimici in funzione della dotazione di calcare totale, non è disponibile per la coltura. Può essere calcolata come:

$$C = a + (0,02 \times \text{calcare totale} [\%])$$

Dove:

a = 1,2 in terreni tendenzialmente sabbiosi

a = 1,3 in terreni franchi

a = 1,4 in terreni tendenzialmente argillosi

- Determinazione della quota di arricchimento o riduzione (D)
per calcolare la quota di arricchimento/riduzione le colture vengono suddivise in cinque classi in funzione della loro esigenza in termini di fosforo. Il frumento rientra nella prima classe, e sulla base di questo e della tessitura del suolo si individua il livello di dotazione di fosforo (Tabella 1-5).

Tabella 1-5 Limiti inferiore e superiore della classe di dotazione "normale" in P_2O_5 (mg/kg) in funzione di tessitura e classe colturale.

Classe della coltura	Terreno		
	Tendenzialmente sabbioso	Franco	Tendenzialmente argilloso
1	18-25	23-28	30-39
2	11-21	18-25	23-30
3	23-30	30-39	34-44
4	25-30	30-35	35-40
5	34-41	41-50	46-55

Se la dotazione è:

- più bassa del limite inferiore di dotazione si calcola la quota di arricchimento (D1);
- più alta del limite superiore di dotazione si calcola la quota di riduzione (D2).

Quota di arricchimento (D1)

Corrisponde alla quantità di elemento che è necessario apportare al terreno per portarlo al limite inferiore della normalità. La formula è:

$$D_1 = (P_r \times d. a. \times Q)$$

Q è la differenza tra il valore del limite inferiore di normalità del terreno (Tabella 1-5) e la dotazione risultante dalle analisi

Quota di riduzione (D2)

Costituisce la riduzione da calcolare, nel caso in cui la dotazione del terreno sia abbondante, al fine di diminuire la quota di asportazione della quantità eccedente la normalità. Si calcola come:

$$D_2 = -(P_r \times d. a. \times Q)$$

- Determinazione del fosforo da fertilizzazioni organiche effettuate negli anni precedenti (E)

il fosforo derivante dalla mineralizzazione dei residui di fertilizzanti organici che sono stati distribuiti negli anni precedenti varia in funzione delle quantità e del tipo di fertilizzante impiegato e nel caso di distribuzioni regolari nel tempo anche della frequenza (uno, due o tre anni).

Capitolo 2

MATERIALI E METODI

2.1 Descrizione dei siti sperimentali

La prova **è in corso** a Genzano di Lucania (PZ) latitudine: 40.82° N, longitudine: 16.08° N. L'area di studio è situata sulle colline argillose della Fossa Bradanica e del bacino di Sant'Arcangelo (Figura 5).

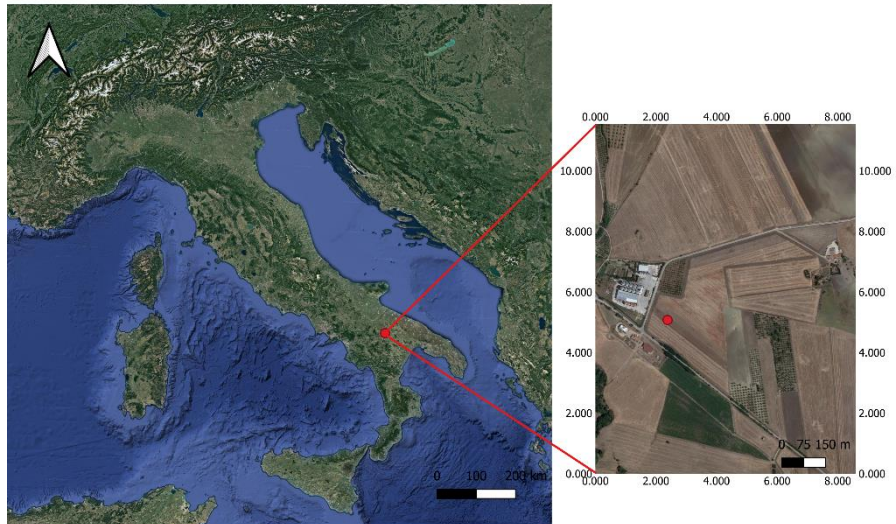


Figura 5 Localizzazione sito sperimentale

Il sito sperimentale si trova presso la cooperativa agricola La Generale a Genzano di Lucania, in un territorio collinare attraversato dal fiume Bradano, essa nasce nel 1983 da un gruppo di 21 associati e ad oggi ne conta più di mille (Figura 6). La società si occupa della vendita di prodotti per l'agricoltura e dello stoccaggio e lavorazione successiva di cereali e leguminose nei sei impianti dislocati a Genzano di Lucania, Oppido Lucano, Tolve, Irsina, Tricarico e Cancellara. Inoltre, nel 2020, per valorizzare il frumento duro lucano l'azienda ha sviluppato una linea per la produzione di pasta con marchio "La Lucana" che al momento conta circa cinquanta formati e viene commercializzata da negozi specializzati in prodotti tipici.

La cooperativa collabora attivamente con gli enti di ricerca, tra cui il dipartimento DICEM dell'Università della Basilicata e l'Agenzia Lucana di Sviluppo e di Innovazione in Agricoltura. Insieme hanno avviato due progetti finanziati dal PSR 2014-20 della Regione Basilicata che mettono a confronto le tecniche tradizionali e di agricoltura biologica con quelle di agricoltura di precisione e conservative per trasferire innovazioni, sia tecniche che gestionali, nel comparto cerealicolo.



Figura 6 Cooperativa La Generale, Genzano di Lucania (PZ)

La prova ha interessato un'area di studio di 12 ha, suddiviso rispettivamente in (Figura 7):

- monosuccessione 1 ha;
- specie alternative 2,8 ha;
- leguminose 2,9 ha;
- frumento 3,10 ha;
- consociazione 2,10 ha.

Le analisi del suolo e pedologiche sono state svolte in tutta l'area di studio, 12 ha, mentre il bilancio dei nutrienti e quindi la concimazione ha interessato unicamente la parcella del frumento di circa 3 ettari.



Figura 7 Disegno sperimentale della prova

2.2 Analisi del suolo

La caratterizzazione del suolo è stata rilevata mediante tecnica elettromagnetica a bassa induzione con CMD miniexplorer (GF Instruments, sro, Brno, Repubblica Ceca) con 6 m tra i transetti e una distanza di misurazione media di 0,8 m lungo i transetti (Figura 9).

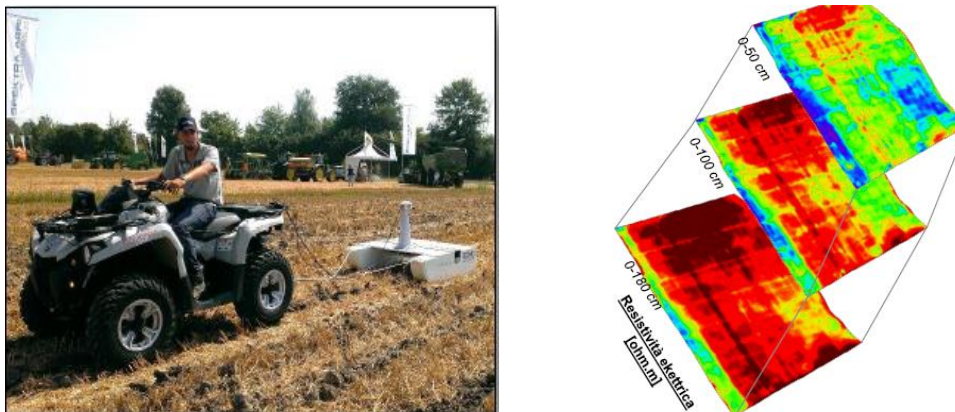


Figura 8 Indagine elettromagnetica e creazione di mappe di resistività

I dati in uscita dallo strumento devono essere interpolati con il metodo della distanza inversa al quadrato utilizzando il software Qgis.

Dopo aver ricavato la mappa della resistività elettrica, per individuare le zone è stata effettuata l'analisi dei cluster, e per ciascuna zona sono stati raccolti campioni di suolo alla profondità di 0-40 cm e caratterizzati con metodi analitici convenzionali secondo Page et al. (Figura 10). Quindi, il numero di campionamenti da eseguire sulla superficie oggetto di indagine, è stato definito in base alla variabilità spaziale della resistività elettrica del suolo e dalle aree omogenee elaborate. Ogni punto di campionamento è stato georeferenziato, quindi rintracciabile in campo con uso di GPS.

Nei punti di analisi pedologica vengono eseguiti rilievi tramite profili e/o trivellate, per ogni orizzonte di suolo, questo per rilevare le caratteristiche fisiche quali colore, figure di idromorfia, pietrosità superficiale, scheletro totale, densità apparente (stima), indice di drenaggio interno, indice di permeabilità, contenuto in acqua disponibile (AWC stimato), umidità top soil e sub soil, profondità utile allo sviluppo delle radici.

Tutti i campioni sono stati essiccati all'aria e setacciati di 2 mm prima delle analisi di laboratorio, e si è ottenuto: contenuto di carbonio organico (OC) misurato con il metodo Walkley-Black, azoto totale è stato determinato con il metodo Kjeldahl. Il fosforo disponibile (P_{ava}) è stato determinato mediante spettrofotometria ultravioletta e visibile (UV-vis) secondo

il metodo Olsen. Il contenuto totale di CaCO_3 è stato determinato con metodi gas-volumetrici (metodo del calcimetro di Freuling), la calce attiva è stata estratta con ossalato di ammonio 0,1 M e determinata per titolazione con KMnO_4 0,1 M. Inoltre, le analisi fisico-chimiche di laboratorio hanno compreso: reazione in acqua (pH), sabbia, limo, argilla, sostanza organica, rapporto Carbonio/Azoto, carbonati totali, carbonati attivi, capacità di scambio cationico (CSC), calcio scambiabile, potassio scambiabile, magnesio scambiabile, sodio scambiabile, conducibilità estratto, percentuale di sodio scambiabile (ESP), saturazione in basi, acidità totale e rapporto Magnesio/Potassio.

RESISTIVITÀ ELETTRICA DEL SUOLO 0-50 cm

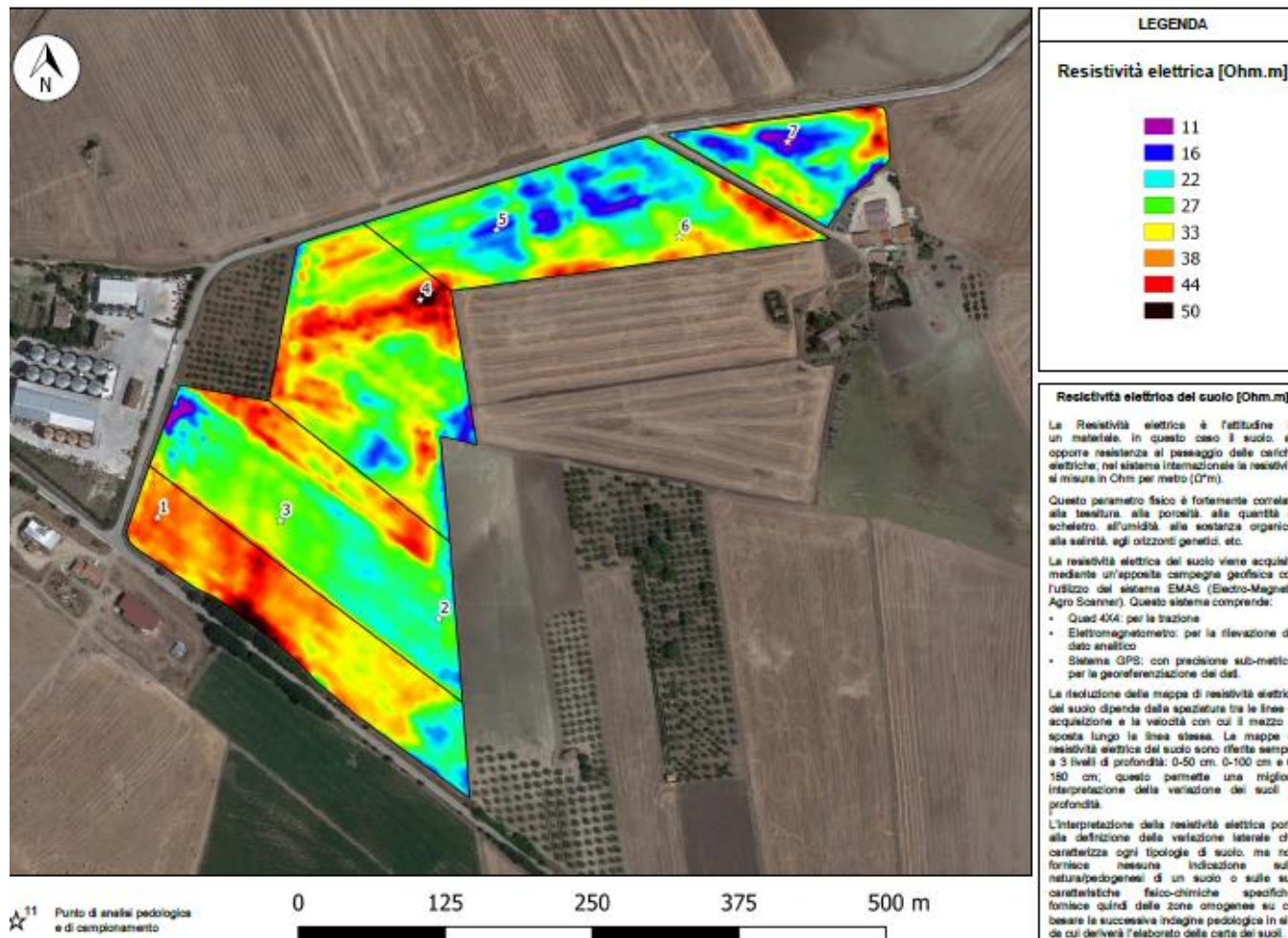


Figura 9 Resistività elettrica del suolo 0-50 cm ricavata con CMD miniexplorer

2.3 Delineazione delle zone omogenee

Ogni parametro fisico-chimico derivante dalle analisi di laboratorio o dall'indagine pedologica diretta è stato catalogato in un database e restituito come carta di analisi spaziale in formato raster grid. Questo tipo di dato permette di osservare le variazioni del singolo parametro, associato alla propria interpretazione agronomica, sull'intera superficie aziendale.

Nella Figura 11 viene riportata la mappa della quantità di azoto presente in campo, ricavata in seguito all'analisi pedologica diretta, nella legenda a destra si può osservare che la variabilità di N varia da 1,1 a 2. Visto che, la variabilità è minima, si è deciso di suddividere il campo in tre aree omogenee (Figura 12).

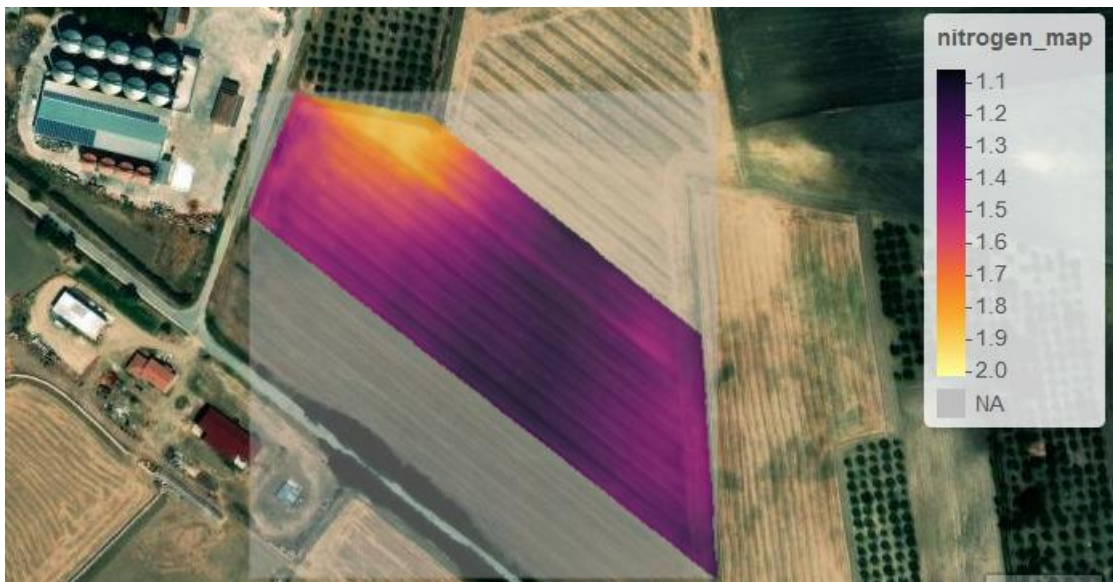


Figura 10 Mappa dell'azoto dell'area interessata dalla coltivazione di frumento, ricavata in seguito all'analisi pedologica diretta

Nella figura 13 si riporta la mappa della distribuzione del fosforo in campo, ricavata in seguito all'analisi pedologica diretta. A differenza dell'N, la variabilità del fosforo in campo è maggiore, varia da 6 a 18, di conseguenza, si è deciso di suddividere il campo in 5 zone omogenee (Figura 14).

Per la concimazione di N e P viene definita una dose di concime differente, per ogni zona, determinata mediante il bilancio dei nutrienti presente nel disciplinare di produzione integrata.



Figura 11 Mappa della suddivisione del campo in tre zone omogenee per la prescrizione azotata

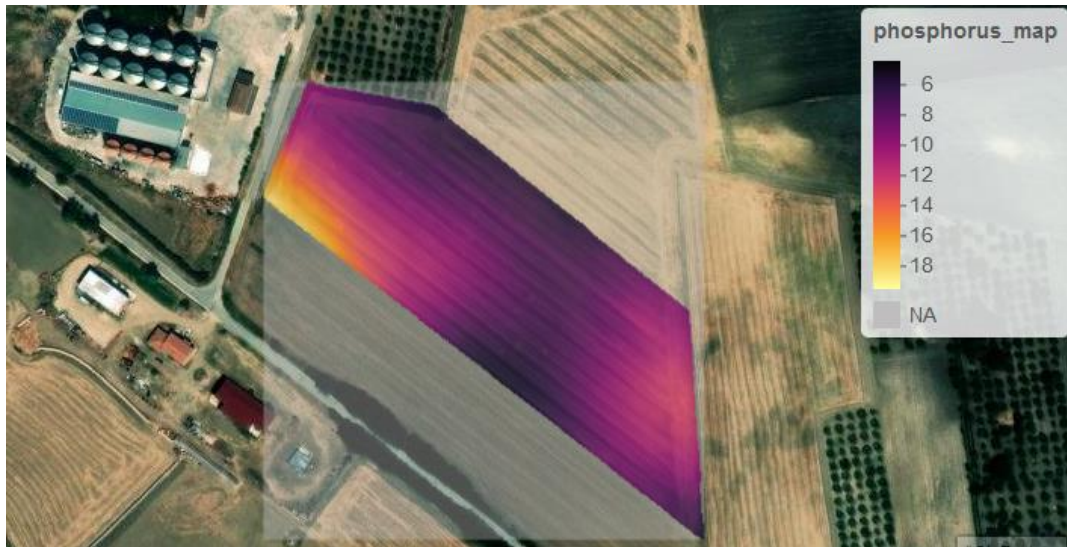


Figura 12 Mappa del fosforo dell'area interessata dalla coltivazione di frumento, ricavata in seguito all'analisi pedologica diretta

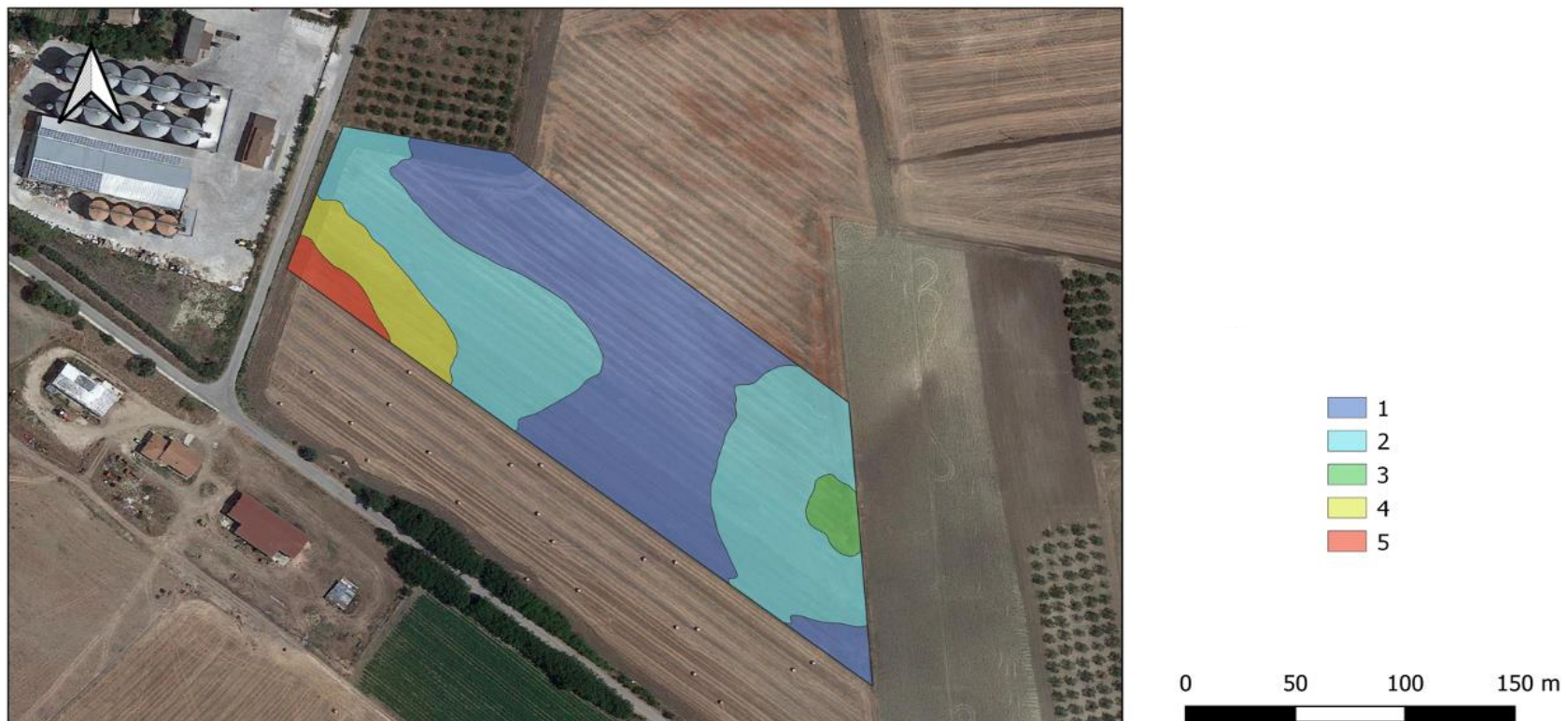


Figura 13 Mappa della suddivisione del campo in cinque zone omogenee per la prescrizione fosfatica

2.4 Determinazione della dose di concime azotato

Per determinare la dose di concime azotato da distribuire si applica la formula del bilancio, che prevede:

- Determinazione del contributo da mineralizzazione

Il contributo in azoto fornito alla coltura da parte della mineralizzazione della sostanza organica (Mn in Kg/ha) dipende dal contenuto in sostanza organica (S.O. in %) presente nello spessore di terreno esplorato dalle radici (Pr in m) e dal suo contenuto in azoto organico (Norg in %), dal tasso di mineralizzazione (Mr in %, che considera quanto di questo azoto organico può mineralizzarsi nelle forme assimilabili dalla coltura) e dall'efficienza di mineralizzazione della S.O. (E come coefficiente compreso tra 0,3 e 1) che a sua volta dipende dal rapporto carbonio/azoto del suolo (C/N) secondo le seguenti formule:

$$\begin{aligned} N_{org} &= (Pr \times d.a) \times (S.O/100) \times (N/1000) = \\ &= (0,6 \times 10000) \times 1,2 \times \left(\frac{2,9}{100}\right) \times \left(\frac{N_{tot}}{1000}\right) \times 1000 = 354,96 \text{ kg/ha}^1 \\ Mr &= \frac{1200}{[(39 + 20) \times (174 + 20)]} = 0,10 \end{aligned}$$

Calcolo del rapporto C/N e determinazione del fattore di correzione dell'efficienza di mineralizzazione dell'azoto organico:

$$\begin{aligned} C_{organico} &= S.O. \times 0,581 = 2,9 \times 0,581 = 1,68 \\ \frac{C}{N} &= \frac{C_{organico} \%}{\frac{N_{org}}{10}} = \frac{1,68}{\frac{354,96}{10}} = 0,047 \end{aligned}$$

Il fattore di correzione dell'efficienza di mineralizzazione dell'azoto organico (E) è attribuito in funzione del valore di C/N.

Visto che il rapporto C/N è inferiore a 9, la mineralizzazione risulterà veloce e il valore di E è pari a 1. Se il rapporto carbonio/azoto in un terreno è alto significa che i residui colturali sono prevalentemente a base di carboidrati complessi come la cellulosa. In

¹ I dati si riferiscono alla zona omogenea numero 1

questo caso i batteri hanno bisogno proprio di azoto per accrescere la propria massa ed attaccare la sostanza organica, di conseguenza sarà meno disponibile per la coltura e bisognerà necessario aumentare la dose di concime azotato per compensare le asportazioni da parte dei batteri. Al contrario in caso di un rapporto basso, non sarà necessario considerare questo aspetto.

L'azoto mineralizzabile (Mn) della sostanza organica sarà quindi:

$$Mn = Mr \times N_{org} \times E = 0,10 \times 354,96 \times 1 = 37,21 \text{ kg/ha}$$

- Determinazione del contenuto in azoto minerale

Il contributo di azoto da parte dell'azoto minerale presente nelle forme direttamente assimilabili da parte della coltura (N_{min} in kg/ ha) viene determinato sulla base del contenuto in nitrati (N- NO_3^- in ppm) e ioni ammonio (N- NH_4^+ in ppm) presenti nel terreno al momento della concimazione:

$$N_{min} = (N - NO_3^- + N - NH_4^+) \times Pr \times d. a.$$

Considerando la variabilità spaziale del terreno, il calcolo delle asportazioni di azoto (A_N) tiene conto degli elementi che escono dal campo con la raccolta, va eseguito sulla base delle produzioni delle annate precedenti, all'interno delle aree omogenee derivate dalle mappe di produzione. Le mappe di produzione vengono redatte in base alle misure georeferenziate istantanee di produzione effettuate direttamente dalla mietitrebbia opportunamente allestita con degli specifici sensori. Inoltre, per poter essere generalizzabili, tali mappe di produzione dovrebbero prendere in considerazione i dati di almeno tre differenti annate agrarie. Statisticamente infatti tre annate agrarie sono il periodo di tempo minimo per poter avere una prima indicazione della variabilità delle produzioni in funzione della variabilità climatica.

Nella prova in esame la mappa di produzione è stata elaborata sulla base dell'esperienza pluriennale dell'agricoltore, che ci ha fornito una sua stima delle produzioni medie di frumento duro nelle tre aree omogenee individuate dalla mappatura del campo sperimentale.

Per calcolare le asportazioni di azoto presenti nella granella e nella paglia le formule sono:

$$\begin{aligned} An_{granella} &= (Produzione_{granella} \times Coeff. di asportazione^2) \times 100 \\ &= ((40 \times 0,87) \times 0,023) \times 100 = 80,04 \text{ kg/ha} \end{aligned}$$

² I coefficienti di asportazioni di N della coltura del frumento duro sono stati ottenuti a seguito di prove precedenti

$$\begin{aligned} \text{An paglia} &= (\text{Produzione paglia} \times \text{Coeff. di asportazione}) \times 100 \\ &= ((32 \times 0,87) \times 0,009) \times 100 = 25,06 \text{ kg/ha} \end{aligned}$$

$$\text{An totale} = \text{An granella} + \text{An paglia} = 105,10 \text{ kg/ha}$$

Tabella 2-1 Determinazione degli apporti e perdite relative all'azoto, nelle tre zone omogenee

	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
A % mm	39	40,3	42,63
Calcare totale g/kg	174	200	250
Sostanza organica g/kg	2,9	2,2	1,9
Azoto totale g/kg	1,7	1,39	1,15
E	1	1	1
Produzione granella [q/ha]	40,00	40,00	40,00
Produzione paglia [q/ha]	32,00	32,00	32,00
An granella [kg/ha]	80,04	80,04	80,04
An paglia [kg/ha]	25,06	25,06	25,06
An totale	105,10	105,10	105,10
Norg [kg/ha]	354,96	220,18	157,32
Mr	0,10	0,09	0,07
Apporti per Mineralizzazione	37,21	19,92	11,16

2.1 Determinazione della dose di concime fosforico

Per determinare la dose di fosforo da distribuire alla concimazione si applica la formula del bilancio che prevede:

- Determinazione del fattore di correzione dell'efficienza del fosforo minerale (EP)
È necessario determinare il rapporto di solubilizzazione, phosphorus adsorption ratio (Psp) con la seguente formula:

$$Psp = 0,46 - (0,0916 \times \log CaCO_3 \%) = 0,46 - (0,0916 \times \log 5,83) = 0,12^3$$

$$Ep = \max[1; 1,5 \times (1 - Psp) + 0,02 \times CaCO_3 =$$

$$\max[1; 1,5 \times (1 - 0,12) + 0,02 \times 5,83] = 1,37$$

³ I calcoli si riferiscono alla zona omogenea 1 del fosforo

- Asportazioni

$$PY = \text{Produzione granella [q/ha]} \times 0,09 \times 10 = 40 \times 0,09 \times 10 = 36 \text{ kg/h}$$

Tabella 2-2 Determinazione degli apporti e perdite relative al fosforo, nelle cinque zone omogenee

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
A % mm	41,41	41,20	41,02	37,72	35,07
Calcare totale	5,83	6,16	9,07	3,66	2,18
Fosforo assimilabile	6,53	9,78	12,28	13,65	17,35
Produzione granella (q/ha)	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Psp	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13
EP	1,37	1,38	1,43	1,33	1,30
Asportazioni (PY)	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00

Capitolo 3

RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Concimazione azotata a rateo variabile

Per determinare la dose totale di azoto da distribuire è necessario sottrarre dalle asportazioni di azoto gli apporti che derivano dalla mineralizzazione quindi:

$$\text{Unità di N totali} = A_n - M_n = 105,10 - 37,21 = 67,88 \text{ kg/ha}$$

In seguito alla determinazione del fabbisogno di azoto della coltura, è necessario frazionare la dose totale di azoto, in modo da effettuare più concimazioni per minimizzare le perdite per lisciviazione e massimizzare l'efficienza della concimazione (Tabella 3-1).

La prima concimazione di fondo è stata effettuata andando a distribuire due parti dell'unità di N totali, per cui nella zona 1 la quantità di N è 45 kg/ha. Il prodotto distribuito è "Rhizovit 26 N-Process" della Timac, prodotto a rilascio graduale con un contenuto di azoto totale pari al 26%. Pertanto, le unità di N totali vanno divise per 0,26 per individuare la quantità di concime commerciale da distribuire, nel caso della zona 1 è pari a 174 kg/ha.

Nella seconda concimazione di copertura sono state distribuite le unità di N rimanenti, utilizzando nitrato ammonico con il 26% di N, che equivale a 87 kg/ha nella zona 1.

Tabella 3-1 *Calcolo delle dosi di azoto da distribuire nelle tre zone omogenee, da frazionare in due concimazioni*

	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
Unità di N totali [kg/ha]	67,88	85,18	93,93
I concimazione [kg/ha]	45,25	56,79	62,62
Rhizovit 26%	174,06	218,41	240,85
II concimazione [kg/ha]	22,63	28,39	31,31
Nitrato ammonico 26%	87,03	109,20	120,43

In una prova eseguita da Denora et al. (2022) si è messo a confronto l'utilizzo dell'applicazione uniforme di azoto e la distribuzione a rateo variabile. Si è visto che: la resa e la qualità della granella nell'applicazione uniforme dell'azoto è uguale rispetto alla VRT; nel primo caso è stato impiegato una quantità maggiore di concime e di conseguenza, si ha

meno efficienza nell'uso delle risorse. Inoltre, nel VRT tutto l'azoto distribuito è stato assorbito dalla coltura, mentre nel caso di concimazione tradizionale il 22% dell'azoto applicato non è stato utilizzato, questo implica un maggior rischio ambientale del suolo e inquinamento dell'acqua di falda

3.2 Concimazione fosfatica a rateo variabile

In relazione alla scarsa mobilità del P e tenendo presente l'esigenza di adottare modalità di distribuzione dei fertilizzanti che ne massimizzino l'efficienza, nelle colture erbacee a ciclo annuale non sarchiate, come i cereali autunno vernini, sono consentite solo le distribuzioni durante la lavorazione del terreno.

Per determinare la dose di fosforo la formula è la seguente:

$$\begin{aligned} \text{Unità di P tot.} &= \max[P_{\text{starter}}; PY + (\text{Prof. aratura} \times d.a \times (P_{\text{ott}} - P_{\text{ass}})) \times EP] \\ &= \max(20; 36 + (3 \times 1,25 \times (13 - 6,53)) \times 1,37 = 69,22 \text{ kg/ha} \end{aligned}$$

È stata effettuata una concimazione di fondo con perfosfato semplice al 19%, per cui l'unità di P totale è stata divisa per 0,19 per ottenere la quantità di concime commerciale da distribuire nelle diverse zone.

Tabella 3-2 Calcolo della dose di fosforo da distribuire nelle cinque zone omogenee

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Unità di P totali [kg/ha]	69,22	52,61	39,87	32,77	20,00
Perfosfato semplice 19%	364,30	276,90	209,85	172,47	105,26

Stefanova e Muhova (2020), hanno studiato in Bulgaria l'influenza di diversi livelli di fertilizzazione minerale di NP da 0 a 160 kg/ha e hanno stabilito che l'optimum si ha con i seguenti tassi di fertilizzazione: numero di cariossidi per spiga a N160 P160; peso del grano a N80 P160; lunghezza della spiga a N160 P120; altezza della pianta a N120; e massima resa in granella a N160 P80. La stessa tendenza è stata osservata anche nello studio di Panayotova et al. (2018), che è stato però contraddetto dai risultati di altri autori (Almaliev et al., 2014) che riferiscono che la combinazione N120 e P80 è più efficace. Boukhalfa-Deraoui et al. (2015) hanno scoperto che il tasso di fosforo ottimale nel grano duro è di 60 kg/ha in terreno alcalino sabbioso e calcareo.

CONCLUSIONI

I risultati riportati nella presente tesi di laurea rientrano in una prova sperimentale svolta dal Dipartimento delle Culture Europee e del Mediterraneo (DiCEM) dell'Università della Basilicata in collaborazione con il dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali dell'Università Politecnica delle Marche. La prova è iniziata nell'anno in corso, 2022-2023, con una durata complessiva di tre anni. L'obiettivo della prova è; osservare nel corso degli anni gli effetti della rotazione in campo delle colture; l'utilizzo di sensori a induzione magnetica per determinare la variabilità del suolo e la creazione di mappe della resistività dei suoli; l'applicazione in pieno campo delle tecnologie di precision farming e della distribuzione del concime a rateo variabile sulla base del bilancio dei nutrienti.

Nella ricerca svolta, è stato possibile combinare la mappatura geofisica con il bilancio dell'azoto e fosforo per applicare l'agricoltura di precisione e la VRT per la fertilizzazione azotata e fosfatica del grano duro.

Con l'utilizzo del sensore prossimale ad induzione elettromagnetica è stato possibile determinare la resistività elettrica, e successivamente individuare i punti dove effettuare l'analisi pedologica diretta. A seguito della determinazione della mappa dell'azoto si è osservato che la variabilità all'interno del campo è ridotta per cui il campo è stato suddiviso in 3 zone per la concimazione azotata. Mentre, il fosforo all'interno dell'area di studio mostra una variabilità maggiore per cui le zone omogenee individuate sono pari a 5.

In seguito sono state applicate le formule del bilancio dei nutrienti per determinare le dosi di azoto e fosforo da distribuire nelle zone omogenee, in modo da applicare una dose razionale di concime e aumentare la sostenibilità economica e ambientale della coltivazione di frumento duro.

Ad oggi, la gestione della concimazione è fondamentale per cercare di ridurre l'utilizzo che impatta in maniera rilevante nei costi che l'azienda deve sostenere, motivo per cui i produttori di grano duro rischiano di avere bilanci negativi con costi di produzione che superano i ricavi. Inoltre, l'UE nella strategia Farm to Fork richiede di diminuire del 20% l'utilizzo di concimi di sintesi entro il 2030, visto che costituisce un'altra importante causa di

inquinamento dell'aria, del suolo e dell'acqua e ha provocato la diminuzione della biodiversità nei fiumi, nei laghi, nelle zone umide e nei mari.

Per finalizzare la prova nell'anno in corso sarà necessario:

- acquisire i dati sulla resa alla maturità del raccolto;
- valutare se si è riusciti o meno ad omogeneizzare la resa, partendo da un terreno con forti differenze spaziali;
- valutare se l'efficienza dell'input è presente.

BIBLIOGRAFIA

- Almaliev, M., Kostadinova, S., & Panayotova, G. (2014). Effect of fertilizing systems on the phosphorus efficiency indicators at durum wheat. *Poljoprivreda i Sumarstvo*, 60(4), 127.
- Baone, P. M., & Ferrara, C. (2016). *Georadar tra archeologia ed InveStIGazlonI forenSI*.
- Bezdek, J. C. (1981). *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. Plenum Press.
- Blume, H.-P. (1985). Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Keeney (Ed., 1982): Methods of soil analysis; 2. Chemical and microbiological properties, 2. Aufl. 1184 S., American Soc. of Agronomy (Publ.), Madison, Wisconsin, USA, gebunden 36 Dollar. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*, 148(3), 363–364. <https://doi.org/10.1002/JPLN.19851480319>
- Boukhalfa-Deraoui, N., Hanifi-Mekliche, L., Mekliche, A., Mihoub, A., & Daddibouhoun, M. (2015). Effect of phosphorus application on durum wheat in alkaline sandy soil in arid condition of southern algeria. *Asian Journal of Crop Science*, 7(1), 61–71. <https://doi.org/10.3923/AJCS.2015.61.71>
- Boydell, B., & McBratney, A. B. (2002). Identifying potential within-field management zones from cotton-yield estimates. *Precision Agriculture*, 3(1), 9–23. <https://doi.org/10.1023/A:1013318002609/METRICS>
- Castrignanò, A., Buttafuoco, G., Khosla, R., Mouazen, A. M., Moshou, D., & Naud, O. (2020). *Agricultural internet of things and decision support for precision smart farming*. 459.
- Cid-Garcia, N. M., Bravo-Lozano, A. G., & Rios-Solis, Y. A. (2014). A crop planning and real-time irrigation method based on site-specific management zones and linear programming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 107, 20–28. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2014.06.002>
- Delgado, J. A., Khosla, R., Bausch, W. C., Westfall, D. G., & Inman, D. J. (2005). Nitrogen fertilizer management based on site-specific management zones reduces potential for nitrate leaching. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60(6), 402–410. <https://www.jswnonline.org/content/60/6/402>

- Delin, S., Lindén, B., & Berglund, K. (2005). Yield and protein response to fertilizer nitrogen in different parts of a cereal field: potential of site-specific fertilization. *European Journal of Agronomy*, 22(3), 325–336. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2004.05.001>
- Denora, M., Amato, M., Brunetti, G., De Mastro, F., & Perniola, M. (2022). Geophysical field zoning for nitrogen fertilization in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *PLOS ONE*, 17(4), e0267219. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0267219>
- ECPA, Daheim, C., Poppe, K., & Schrijver, R. (2019). *L'agricoltura di precisione e il futuro dell'agricoltura in Europa: studio prospettico scientifico*. Parlamento europeo. <https://doi.org/doi/10.2861/24896>
- Erickson, B., Lowenberg-Deboer, J., & Magazine, C. (2022). 2022 *PRECISION AGRICULTURE DEALERSHIP SURVEY*.
- Franzen, D., & Mulla, D. (2015). A History of Precision Agriculture. *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*, 1–20. <https://doi.org/10.1201/B19336-1/HISTORY-PRECISION-AGRICULTURE-DAVID-FRANZEN-DAVID-MULLA>
- Gavioli, A., de Souza, E. G., Bazzi, C. L., Schenatto, K., & Betzek, N. M. (2019). Identification of management zones in precision agriculture: An evaluation of alternative cluster analysis methods. *Biosystems Engineering*, 181, 86–102. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2019.02.019>
- Grignani, C. (2016). *Fertilizzazione sostenibile*.
- Grignani, C., Bertora, C., & Zavattaro, L. (2013). Gestione della nutrizione vegetale. In *Agricoltura sostenibile* (pp. 153–179). Edagricole.
- Grisso, R., Alley, M., Wysor, W. G., Holshouser, D., & Thomason, W. (2009). Precision Farming Tools: Soil Electrical Conductivity. Virginia Cooperative Extension. *Precision Farming Tools: Soil Electrical Conductivity, Virginia Cooperative Extension Publication*.
- Heege, H. J. (2013). Site-specific fertilizing. *Precision in Crop Farming: Site Specific Concepts and Sensing Methods: Applications and Results*, 193–272. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6760-7_9/COVER
- Kitchen, N. R., Snyder, C. J., Franzen, D. W., & Wiebold, W. J. (2002). Educational needs of precision agriculture. *Precision Agriculture*, 3(4), 341–351. <https://doi.org/10.1023/A:1021588721188/METRICS>
- Leonard Emma. (2014, November 3). *Precision Ag Down Under - Iniziativa tecnologica globale per l'agricoltura*. <https://www.globalagtechinitiative.com/in-field-technologies/guidance/precision-ag-down-under/>

- Linsley, C. M., & Bauer, F. C. (1929). *Test Your Soil for Acidity*. https://books.google.it/books/about/Test_Your_Soil_for_Acidity.html?id=V4NRAQAAMAAJ&redir_esc=y
- Mercer, W. B., & Hall, A. D. (1911). The Experimental Error of Field Trials. *The Journal of Agricultural Science*, 4(2), 107–132. <https://doi.org/DOI: 10.1017/S002185960000160X>
- Miao, Y., Mulla, D. J., & Robert, P. C. (2018). An integrated approach to site-specific management zone delineation. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 5(4), 432–441. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2018230>
- MIPAAF. (2015). *LINEE GUIDA PER LO SVILUPPO DELL'AGRICOLTURA DI PRECISIONE IN ITALIA*.
- Mitchell, S., Bannon, N., & Weersink, A. (2020). *Give to AgEcon Search*. <http://ageconsearch.umn.edu>
- Nawar, S., Corstanje, R., Halcro, G., Mulla, D., & Mouazen, A. M. (2017). Delineation of Soil Management Zones for Variable-Rate Fertilization: A Review. In *Advances in Agronomy* (Vol. 143, pp. 175–245). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.003>
- Oliver, M. A. (2013). An overview of precision agriculture. *Precision Agriculture for Sustainability and Environmental Protection*, 3–19. <https://doi.org/10.4324/9780203128329-2>
- Ortega, R. A., & Santibáñez, O. A. (2007). Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58(1), 49–59. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2006.12.011>
- Panayotova, G., Kostadinova, S., Aleksieva, S., Slavova, N., & Aladzhova, C. (2018). Nitrogen and phosphorus balances as dependent on durum wheat fertilization. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24.
- Priori, S. (2010). *Rilevamento pedologico tramite l'utilizzo di sensori basati sull'induzione elettromagnetica. Un approccio per la cartografia dettagliata dei suoli e per il riconoscimento di anomalie superficiali e sottosuperficiali*.
- Raun, W. R., & Johnson, G. V. (1999). Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. *Agronomy Journal*, 91(3), 357–363. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ1999.00021962009100030001X>
- Say, S. M., Keskin, M., Sehri, M., & Sekerli, Y. E. (2018). *ADOPTION OF PRECISION AGRICULTURE TECHNOLOGIES IN DEVELOPED AND DEVELOPING COUNTRIES*. www.tojsat.net

- Simone, P., De Benedetto, D., Stellacci, A. M., Pasquale, L., & Manfrini, L. (2016). 6. Sensori e metodi per rilievi prossimali delle proprietà del suolo e della coltura. In *AGRICOLTURA DI PRECISIONE-Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali* (pp. 129–153). Il Sole 24 Ore Edagricole srl.
- STEFANOVA-DOBREVA, S. , & M. A. (2020). INFLUENCE OF NPK FERTILIZATION ON GRAIN YIELD AND SOME COMPONENTS OF DURUM WHEAT (*Triticum durum* Desf.). *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 63(2). *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 63(2).
- Vereecken, H., Huisman, J. A., Bogena, H., Vanderborght, J., Vrugt, J. A., Hopmans, J. W., & Vereecken, C. : (2008). *On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review*. <https://doi.org/10.1029/2008WR006829>
- Viscarra Rossel, R. A., Adamchuk, V. I., Sudduth, K. A., McKenzie, N. J., & Lobsey, C. (2011). Chapter Five - Proximal Soil Sensing: An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 113, pp. 243–291). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386473-4.00005-1>