



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: AGRARIE E DEL TERRITORIO

CURRICULUM: PRODUZIONE E PROTEZIONE DELLE COLTURE VEGETALI

TECNICHE DI AGRICOLTURA DI PRECISIONE PER OTTIMIZZARE
LA GESTIONE DELLA NUTRIZIONE IN CARCIOFO

*PRECISION AGRICULTURE TECHNIQUES FOR OPTIMIZING NUTRITION
MANAGEMENT IN IN GLOBE ARTICHOKE*

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
FEDERICO MAMMARELLA

Relatore:
PROF. LUIGI LEDDA

Correlatore:
PROF. SSA PAOLA A. DELIGIOS

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

SOMMARIO

SOMMARIO	
ELENCO DELLE TABELLE.....	1
ELENCO DELLE FIGURE	2
PREMESSA	3
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE	5
1.1 <i>Green Deal</i>	6
1.2 Strategia <i>Farm to Fork</i>	7
1.2.1 Agricoltura biologica	9
1.3 Strategia dell'UE per il suolo 2030.....	14
1.4 Agricoltura di precisione.....	18
1.4.1 Storia dell'agricoltura di precisione e la sua diffusione.....	19
1.4.2 Gestione della variabilità in agricoltura di precisione	20
1.4.3 Telerilevamento in agricoltura di precisione	21
1.5 Gestione della fertilità del suolo di precisione.....	22
CAPITOLO 2 MATERIALI E METODI	24
2.1 Descrizione del sito sperimentale	24
2.2 Determinazione delle caratteristiche del suolo	26
2.3 Creazione delle zone omogenee.....	28
2.4 Bilancio della sostanza organica	29
2.5 Campionamento delle piante.....	30
2.6 Analisi statistica	31
CAPITOLO 3 RISULTATI E DISCUSSIONI.....	32
CONCLUSIONI	40
BIBLIOGRAFIA	42

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 Analisi statistiche descrittive	32
Tabella 2 Valutazione e selezione del modello di variogramma in base all'errore quadratico medio.....	32
Tabella 3 Risultati dell'analisi della varianza applicata alle due zone omogenee per ogni proprietà analizzata	35
Tabella 4 Bilancio della sostanza organica redato per la zona omogenea Z1	36
Tabella 5 Bilancio della sostanza organica redato per la zona omogenea Z2.....	36
Tabella 6 Effetto del fattore "zona" sulle caratteristiche biometriche e produttive in carciofo	36
Tabella 7 Caratteristiche pollina matura	37
Tabella 8 Conto economico	37

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1. Stime incremento demografico mondiale.....	5
Figura 2. Obiettivi della Farm To Fork.....	9
Figura 3. Logo biologico comunitario	9
Figura 4 Carciofaia in fase di emissione del primo capolino.....	24
Figura 5 Serie storica (1984 – 2014) delle precipitazioni e dell’umidità relativa per il sito di Uri	25
Figura 6 Serie storica (1984 – 2014) degli andamenti termici e della radiazione solare per il sito di Uri	25
Figura 7 Raffigurazione grafica della griglia di campionamento (3 × 3 m, 99 punti) adottata per il prelievo dei campioni di suolo.....	27
Figura 8 Per ciascun pannello (a – d) sono riportate le i) mappe di predizione per le diverse proprietà del suolo oggetto di studio, ottenute attraverso l’ordinary kriging (in alto a sinistra); ii) mappe di varianza per le diverse proprietà del suolo oggetto di studio, ottenute attraverso l’ordinary kriging (in alto a destra), e i iii) variogrammi empirici e relativi modelli esponenziali (in basso).....	33
Figura 9 Mappe di predizione che restituiscono un’informazione relativa all’eterogeneità del suolo in termini di caratteristiche chimico-fisiche.	34
Figura 10 Zone omogenee per il contenuto in sostanza organica	35

PREMESSA

In Italia, il carciofo riveste un ruolo di primaria importanza nell'ambito dell'orticoltura di pieno campo. L'Italia è infatti il primo produttore mondiale di questo pregiato ortaggio (Statistics - Food and Agriculture Organization, 2023), noto per la sue qualità nutrizionali e nutraceutiche e la sua versatilità culinaria (Lattanzio, 2009). Tuttavia, nonostante la posizione di leadership nel settore, è fondamentale affrontare le sfide attuali legate alla coltivazione del carciofo, come la gestione della fertilità del suolo, al fine di garantire una produzione sostenibile e di alta qualità nel rispetto delle esigenze dei consumatori e dell'ambiente.

La coltivazione degli ortaggi in regime biologico (SINAB, 2023) in Italia rappresenta un settore in crescita, in risposta alla sempre maggiore domanda di prodotti sani e sostenibili. Tuttavia, nonostante i vantaggi dell'agricoltura biologica, sono presenti diverse criticità che richiedono attenzione e soluzioni innovative. Tra queste, una delle sfide principali è la gestione efficace della fertilità del suolo (Deligios, 2021).

Il suolo, fondamentale per il successo di qualsiasi coltura, richiede particolare cura e attenzione in un sistema di coltivazione biologica. Senza l'uso di fertilizzanti di sintesi, diventa cruciale adottare strategie e pratiche che favoriscano la fertilità naturale del suolo, garantendo al contempo una produzione sostenibile e di alta qualità (Diacono, 2016).

L'assenza di elementi nutritivi derivanti da fertilizzanti chimici può comportare una minore disponibilità di macronutrienti per le piante, come azoto, fosforo e potassio, e un equilibrio nutrizionale compromesso. Di conseguenza, è necessario sviluppare sistemi di gestione della fertilità del suolo che favoriscano una corretta alimentazione delle piante, promuovendo la salute delle piante stesse e la resa del raccolto e l'efficientamento dell'utilizzo delle risorse. In quest'ottica, particolare attenzione deve essere posta anche all'aspetto della gestione dei residui di coltura (Muhie, 2022).

Affrontare queste criticità richiede un approccio integrato che comprenda la scelta di colture complementari, la rotazione delle colture, l'uso di concimi organici, l'applicazione di tecniche di compostaggio e l'adozione di pratiche agronomiche mirate. Solo attraverso l'implementazione di queste soluzioni innovative sarà possibile garantire una coltivazione del

carciofo biologico di successo, sostenibile e in linea con le esigenze dei consumatori moderni (Gamage, 2023).

Pertanto, l'obiettivo generale della tesi è quello di contribuire allo sviluppo di un metodo di coltivazione più efficiente rispetto al tradizionale, al fine di ridurre i costi di produzione e migliorare la sostenibilità del comparto cinaricolo bio. Obiettivi specifici sono la i) realizzazione di mappe di zone omogenee utilizzando i principi della geostatistica e dell'agricoltura di precisione; ii) determinazione del quantitativo ottimale di sostanza organica da integrare in ciascuna zona attraverso la messa a punto del bilancio della sostanza organica.

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Ormai da millenni l'agricoltura rappresenta il fulcro della vita nel mondo. Questa ha permesso all'essere umano di progredire nel tempo fino a raggiungere i giorni d'oggi nel quale il livello della popolazione mondiale si attesta a otto miliardi di persone. Questo scenario però tenderà (secondo le previsioni ONU) a incrementare raggiungendo così la soglia di otto miliardi e mezzo nel 2030 e si stima che nel 2050 si potrà raggiungere valori attorno ai dieci miliardi (figura 1) (Statistics - Food and Agriculture Organization, 2023).

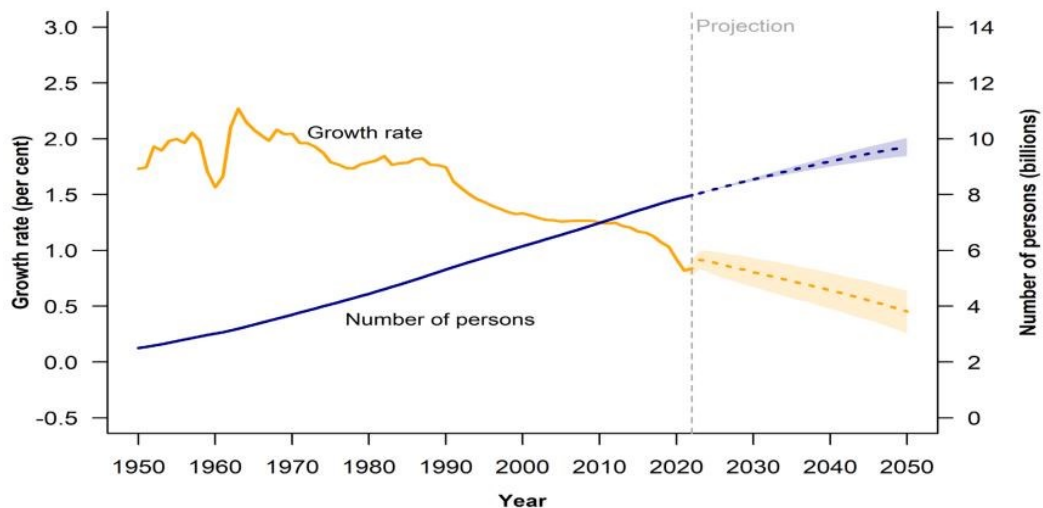


Figura 1. Stime incremento demografico mondiale

Questi importanti traguardi vengono ad essere raggiunti grazie al sostegno che il comparto agricolo è in grado di dare.

Bisogna dire però che tutti questi obiettivi non sono esenti da contraddizioni in quanto secondo gli ultimi dati della FAO, ben settecento sessanta milioni di persone hanno sofferto la fame nel 2021. I continenti più soggetti a questa problematica sono rappresentati da quelli africani, asiatici e latino-americani (Food and Agriculture Organization, 2022).

Così facendo, si rischierà di non raggiungere gli obiettivi prefissati dall'ONU di zero fame nel mondo.

Queste problematiche sono strettamente correlate alla difficoltà nel condurre un'agricoltura adeguatamente produttiva a causa delle difficoltà climatiche (eventi eccezionali come alluvioni, innalzamento delle temperature) e della progressiva desertificazione dei suoli.

In questo contesto così articolato, la produzione agricola europea è in grado sia di sostenersi, ma anche di produrre prodotti d'eccellenza apprezzati in tutto il mondo e quindi esportati. Secondo un ultimo report della commissione europea, le esportazioni sono aumentate del 14% in più rispetto all'anno 2022. I principali paesi esportatori sono rappresentati da Regno Unito, Cina e America (Commissione Europea, 2023).

Ci sono però delle nuove problematiche all'orizzonte che rischiano di mettere a dura prova la buona salute del comparto agricolo europeo, queste sono rappresentate dai cambiamenti climatici e dalla progressiva degradazione dei suoli che può portare nel lungo periodo a fenomeni di desertificazione (Corte dei Conti Europea, 2018).

L'Unione Europea, viste queste nuove minacce, ha deciso di adottare politiche specifiche mediante l'adozione di riforme come: *Green Deal*, *Farm- to-Fork* e la strategia dell'UE per il suolo 2030.

1.1 *Green Deal*

Nel novembre del 2019 il parlamento europeo ha dichiarato l'emergenza climatica e in concomitanza con questo episodio è stato fissato l'obiettivo di limitare il riscaldamento globale al di sotto di 1,5 °C e diminuire le emissioni di gas a effetto serra. Per raggiungere questo obiettivo, la commissione europea ha presentato il piano *green deal* europeo.

Il *green deal* rappresenta quindi un insieme di strategie che hanno come obiettivo quello di rendere l'Europa il primo continente a impatto ambientale zero a livello mondiale.

Questa strategia è costituita da una serie di tappe che mirano al raggiungimento della neutralità climatica (bilancio di emissioni nette di CO₂) entro il 2050.

Tutto questo viene ad essere reso possibile mediante l'attuazione di una moltitudine di investimenti finanziati a livello europeo per modificare l'attuale contesto economico per raggiungere un'economia più *green*.

Nel 2021 è stata approvata la legge europea sul clima che ha reso vincolante il raggiungimento degli obiettivi del *green deal* per tutti i paesi facente parte dell'UE. È stato quindi fissato anche un obiettivo intermedio: la riduzione del 55% delle emissioni entro il 2030. Tutto questo viene ad essere reso possibile mediante la costituzione di normative specifiche che dovranno essere rispettate da tutti i paesi comunitari, ma anche per l'emissione di fondi a sostegno degli obiettivi precedentemente citati.

Questa strategia mira al raggiungimento degli obiettivi mediante:

- Riduzione delle emissioni dei settori industriali e dei trasporti;
- Creare fondi per sostenere le famiglie nella transizione verde;
- Promuovere l'economia circolare;
- Creare un sistema alimentare sostenibile;
- Preservare la biodiversità;
- Finanziare la transizione verde;

Il fine ultimo della strategia *green deal* è il raggiungimento di un bilancio negativo in termini di emissioni (Parlamento Europeo, 2023).

1.2 Strategia *Farm to Fork*

La strategia Farm to Fork (dal produttore al consumatore) rappresenta una serie di strategie atte a raggiungere gli obiettivi prefissati nell'ambito del *green deal* per quanto riguarda il comparto agroalimentare. Questa può essere definita come una strategia da adottare dal campo alla tavola per un sistema alimentare equo, sano e rispettoso dell'ambiente. Essa si basa sulla convinzione che il passaggio verso un sistema alimentare sostenibile può portare benefici ambientali, sanitari, sociali, offrire guadagni economici e garantire una produzione sostenibile in tutto il contesto comunitario.

La strategia pone l'attenzione in tutti gli ambiti della filiera agroalimentare che porta il prodotto dal campo alla tavola. Per quanto riguarda il campo, gli obiettivi da perseguire sono:

- Abbattimento delle emissioni di CO₂: il comparto agricolo è responsabile del 10% delle emissioni totali di CO₂ di tutto il contesto europeo, e di questo il 68% deriva dall'attività zootecnica. La commissione europea mira a favorire il decremento delle emissioni andando ad incentivare una diminuzione delle proteine di importazione, favorendo l'autoapprovvigionamento, incentivando l'utilizzo di proteine vegetali o alternative (insetti, mangimi marini, scarti di pesce) di produzione europea. Inoltre, si vuole favorire l'applicazione di pratiche agricole (inerbimento) che rimuovono CO₂ dall'atmosfera andandola a stoccare all'interno del comparto produttivo;
- Efficientamento energetico;
- Sviluppo di energie rinnovabili: mediante la costituzione di digestori anaerobici in grado di trasformare i rifiuti agricoli di natura zootecnica (es. letame) in risorsa grazie alla possibilità di produrre biogas;

- Riduzione dell'uso degli agrofarmaci del 50% entro il 2030: la commissione europea ha costituito un indice armonizzato di rischio nel quale i prodotti fitoiatrici vengono ad essere classificati in base ai rischi che essi stessi apportano a seguito della loro applicazione. Verrà ad essere promossa un'attività di gestione alternativa per incentivare la diminuzione dell'utilizzo degli agrofarmaci mediante il rafforzamento di tecniche come la rotazione e il diserbo meccanico ma anche tramite un maggior accesso ai servizi di consulenza;
- Rafforzamento dei controlli su parassiti e malattie emergenti di importazione extra europea: per evitare l'insorgenza di ulteriori emergenze fitosanitarie causate dall'importazione di materiale vegetale extra UE, verranno ad essere implementate le risorse e le competenze atte a garantire maggiori controlli dei confini comunitari;
- Riduzione dell'uso di fertilizzanti almeno del 20% entro il 2030: la misura riguarda in particolar modo l'utilizzo di nutrienti come azoto e fosforo i quali, nel momento in cui non vengano ad essere assorbiti dalla pianta, rappresentano una fonte di inquinamento di aria, acqua e suolo. L'Unione Europea ha come focus principale quello di andare a ridurre almeno del 50% le perdite, salvaguardando la fertilità dei suoli. Per adempiere a questi obiettivi, si vuole implementare l'applicazione di tecniche di fertilizzazione di precisione (garantendo servizi di consulenza e la ricerca in tecnologie spaziali) e di riciclaggio di rifiuti organici (soprattutto in zone fortemente vocate alla zootecnica intensiva);
- Incremento delle superfici condotte in regime di produzione biologica, raggiungendo la soglia del 25% della SAU: dato l'impatto positivo sia a livello dell'ecosistema ma anche dal punto di vista sociale, la commissione europea vuole promuovere il regime di produzione biologica mediante l'adozione di investimenti in servizi di consulenza, incentivi nelle misure PAC e campagne promozionali (Commissione Europea, 2020).

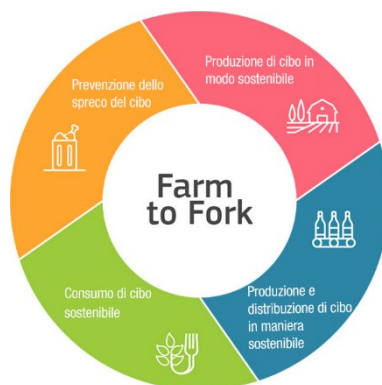


Figura 2. Obiettivi della Farm To Fork

1.2.1 Agricoltura biologica

L'agricoltura biologica è definita come «un sistema produttivo che sostiene la salute dei terreni, degli ecosistemi e delle persone. Essa si basa su processi ecologici, biodiversità e cicli adeguati alle condizioni locali, piuttosto che sull'utilizzo di fattori produttivi con effetti nocivi (IFOAM, 2009)»

Dal punto di vista normativo, essa è codificata dal regolamento 848/2018 a livello comunitario e dalla legge n. 23/2022 a livello nazionale. Tali normative hanno il compito di disciplinare la produzione, la distribuzione e la commercializzazione dei prodotti biologici in tutto il territorio comunitario.

Questi prodotti sono contrassegnati con un logo di riferimento (Figura 3). La possibilità da parte delle aziende di utilizzarlo è resa possibile solo a seguito del superamento di una serie di controlli effettuati da enti preposti autorizzati a livello nazionale (Commissione Europea, 2022).



Figura 3. Logo biologico comunitario

A seguito del raggiungimento della strategia *farm to fork* attinente al piano *green deal*, l'agricoltura biologica deve raggiungere una superficie pari al 25% di tutto il territorio europeo entro il 2030. Per fare questo l'UE ha creato un piano di azione che può essere così riassunto:

- 1) Stimolare la domanda: ad oggi il settore del biologico trova molto interesse da parte dei cittadini comunitari che associano il prodotto ad un maggior benessere ambientale del processo produttivo. La comunità europea vuole stimolare il consumatore all'acquisto di tali prodotti (mediante campagne promozionali) in modo tale da incentivare in maniera indiretta le aziende alla conversione. Questo però potrebbe far risultare meno redditizio il mercato da parte dei produttori, in tal senso, per creare una tutela da parte delle imprese, si vuole: prevenire le frodi alimentari e rafforzare la fiducia dei consumatori; migliorare la tracciabilità e facilitare il contributo del settore privato.
- 2) Incentivare la conversione da parte delle aziende in produzione integrata: questo viene reso possibile mediante la costituzione di una filiera corta che sia in grado di far acquisire alle aziende il valore aggiunto dei prodotti biologici. Non solo, si intende dare anche incentivi per la conversione in termini economici, ma anche fondi per il mantenimento di tale regime produttivo.
- 3) Implementare il contributo che l'agricoltura biologica è in grado di dare alla sostenibilità ambientale: questo può essere effettuato attraverso la creazione di una rete di scambio di informazioni nella quale sono riportate le migliori azioni da adottare. Si intende anche creare un sistema di produzione del materiale di propagazione biologico.

Il raggiungimento di questi punti avviene mediante delle politiche specifiche di finanziamento della PAC ma anche tramite l'accessibilità da parte dei produttori di servizi di consulenza (Commissione Europea, 2021a).

Ad oggi, l'agricoltura biologica risulta tra le principali forme di coltivazione più attinenti al tema della sostenibilità delle produzioni.

Quando si parla di sostenibilità in ambito agricolo, si prendono in considerazione tre aree tematiche complessive: ambiente, economia e sostenibilità sociale.

Per quanto concerne la sostenibilità ambientale, risulta che l'impiego di questa tipologia di produzione sia in grado di ridurre gli impatti grazie a:

- Riduzione dell'impiego di fertilizzanti: i fertilizzanti di sintesi rappresentano il 50% di energia impiegata sia in modo diretto che indiretto nel sistema agricolo;

- Minori emissioni di gas serra: l'agricoltura biologica è in grado di ridurre le emissioni di gas serra anche del 1030% in termini di kg di prodotto rispetto alle colture convenzionali;
- Maggior sequestro di carbonio da parte dei suoli: grazie all'incremento del contenuto di sostanza organica dovuta all'utilizzo di sovescio e letamazioni;
- Minore perdite di nutrienti per lisciviazione: l'incremento della sostanza organica dei suoli permette di incrementare l'efficienza dei nutrienti immessi nel sistema e anche di garantire una ritenzione generale più efficiente;
- Incremento dei servizi ecosistemici: l'aumento di biodiversità (grazie a una maggiore abbondanza di specie, il non utilizzo di prodotti chimici di sintesi etc.) permette di avere una maggiore variabilità di organismi andando indirettamente ad implementare l'abbondanza dei servizi ecosistemici offerti dal paesaggio agrario (Halberg, 2012).

Per quanto concerne la sostenibilità economica, è bene dire che la valutazione complessiva deve essere fatta sulla base di differenti parametri economici quali:

- Resa produttiva: molte analisi associate agli studi di resa delle aziende in regime di produzione biologico confrontata con quelli in produzione convenzionale hanno riportato delle riduzioni di produttività, ma non senza contraddizioni. È stato visto infatti, che nel contesto europeo sistemi produttivi cerealicoli o orticoli hanno portato sì delle diminuzioni di produzione ma non molto inferiori rispetto a un sistema di produzione convenzionale. Altri studi in America hanno riportato che in situazioni di siccità, i sistemi di produzione biologici hanno portato a produzioni più elevate rispetto quelle convenzionali. Questo è associato a una maggiore resilienza alla siccità del sistema produttivo. Questa piccola differenza in termini di resa viene associata ad una minore applicazione di input che è compensata dalla necessità di applicare particolari tecniche di gestione del suolo che siano in grado di rendere più resiliente il sistema (es. incremento della s.o. che permette di sopperire alla diminuzione di fertilizzanti immessi nel sistema produttivo).
- Costi di produzione: differenti analisi permettono di definire le produzioni agricole biologiche meno costose rispetto a quelle convenzionali. Tutto ciò è associato a un minor impiego di input quali fertilizzanti e antiparassitari. I maggiori risparmi sono applicati su quelli che sono quindi i costi variabili che subiscono una flessione a seconda della tipologia di produzione: 50-60% per produzioni cerealicole e 10-20% per produzioni orticole;

- Prezzi di vendita: i prodotti biologici riescono a spuntare prezzi più elevati nel mercato in quanto giustificati dalle minori rese produttive, ma soprattutto grazie all'associazione del prodotto, a uno stile di produzione sano che incentiva i consumatori a pagare un prezzo maggiore;
- Politiche di sostegno: molto spesso le produzioni biologiche sono sostenute anche da politiche economiche che permettono di aumentare i guadagni delle aziende stesse.

Analizzando nel complesso questi parametri quindi si può dire che le aziende che ottemperano a produzioni biologiche sono più redditizie in quanto hanno meno costi di produzione, maggiori remunerazioni sul mercato e maggiori sostegni da parte delle politiche economiche (Nemes, 2009).

Per quanto concerne la sostenibilità sociale, è stato evidenziato che l'adesione su vasta scala di sistemi di coltivazioni biologici, permettono di aumentare le esternalità positive comportando un aumento del reddito netto familiare, aumentando la richiesta di manodopera locale, ma anche l'attività turistica grazie all'immagine positiva che l'agricoltura biologica da rispetto all'agricoltura convenzionale (MacRae, 2007).

Altro impatto da prendere in considerazione è l'incremento dei servizi ecosistemici rappresentati da:

- Piante: le piante beneficiano dell'agricoltura biologica in quanto l'impossibilità di utilizzo dei diserbanti causa un incremento della presenza delle erbe infestanti che indipendentemente dalla rotazione colturale applicata, trovano modo di sopravvivere e accrescersi nel tempo;
- Impollinazione: è stato visto che il numero di impollinatori aumentano sia dal punto di vista del numero di specie, ma anche dal punto di vista della popolazione per ciascuna specie. Studi hanno riportato un aumento in abbondanza del numero di impollinatori anche di cento volte maggiore rispetto a campi coltivati con metodi convenzionali. Tutto ciò deriva dall'incremento dell'abbondanza di variabilità floreale che contraddistingue i sistemi biologici;
- Antagonisti naturali: l'incremento della variabilità di biodiversità e la presenza di colture perenni presenti ai margini dei campi comportano un incremento degli antagonisti naturali;
- Maggior abbondanza del microbioma terricolo: la diminuzione dell'impiego di input esterni, il più delle volte dannosi per il microbioma stesso (come l'impiego di sostanze xenobiotiche), porta a un incremento dello stesso andando a garantire un maggior sviluppo di organismi utili al suolo come i lombrichi;

- Miglioramento del paesaggio: la variabilità vegetale ed animale che si sviluppa grazie all'agricoltura biologica permette di garantire migliori paesaggi apprezzati dalla comunità (Winqvist, 2012).

Quando si parla di agricoltura biologica, è bene andare sempre a prendere in considerazione quelli che sono i vantaggi dal punto di vista agronomico che possono essere riassunti in tre punti: gestione delle acque, gestione dei nutrienti e gestione della fertilità dei suoli.

1.2.1.1 Ottimizzazione nella gestione delle acqua

Una delle problematiche più attuali del contesto agricolo attuale, riguarda proprio l'efficientamento delle risorse idriche in un'ottica di cambiamento climatico e quindi di una sempre minore disponibilità della risorsa. Una delle possibili soluzioni potrebbe essere proprio l'adozione del sistema di produzione biologico in quanto essa implica l'adozione di specifiche tecniche di gestione del suolo come la pacciamatura che oltre al controllo delle infestanti permette di diminuire le perdite per evaporazione.

Numerosi studi hanno evidenziato che in condizioni di siccità, le colture gestite in biologico sono in grado di avere rese produttive nettamente superiori rispetto a quelle convenzionali, questo è associato alla maggiore capacità di ritenzione idrica dei suoli che può raggiungere valori superiori del 20-40% rispetto ai sistemi di agricoltura convenzionale. L'incremento del potere di ritenzione idrico è anche la conseguenza di una maggiore capacità di intercettazione dell'acqua da parte del suolo, grazie a un aumento delle proprietà fisiche a seguito di un incremento della presenza di aggregati. Migliori proprietà fisiche determinano anche un maggiore sviluppo dell'apparato radicale e quindi una maggiore superficie di suolo messa a disposizione per la suzione della risorsa idrica (Gomiero, 2011).

1.2.1.2 Ottimizzazione nella gestione dei nutrienti

Ad oggi le nuove normative comunitarie e gli obiettivi della *farm to fork* vanno sempre di più verso una riduzione dell'impiego di input esterni come i fertilizzanti. Questa diminuzione però non deve avere delle ripercussioni dal punto di vista produttivo. Ecco perché si deve lavorare sempre di più in un'ottica di efficientamento delle risorse immesse nel sistema produttivo. L'agricoltura biologica cerca di lavorare in tal senso, ma non senza contraddizioni. È stato visto infatti che adottare un sistema di coltivazione biologico mediante l'immissione di sostanza organica tramite il sovescio di leguminose o l'utilizzo di letamazioni, permette di incrementare il contenuto di carbonio e di azoto presente nella sostanza organica andando così ad aumentare la disponibilità di nutrienti nel sistema, permette di diminuire le perdite di lisciviazione anche del 50%, ma al contempo abbiamo un incremento di biomassa microbica

denitrificante che aumenta le perdite per volatilizzazione. Quindi, abbiamo sì un incremento della presenza nei nutrienti nel lungo periodo (al contrario dei sistemi convenzionali dove abbiamo una diminuzione dei nutrienti presenti sotto forma organica perché gli elementi vengono forniti grazie alla concimazione minerale), ma abbiamo anche un incremento delle perdite per denitrificazione (Drinkwater, 1998).

1.2.1.3 Ottimizzazione nella gestione della fertilità dei suoli

Uno dei principali problemi a cui le aziende convenzionali sono costrette a confrontarsi riguarda la progressiva perdita di sostanza organica nei suoli, la quale è associata alla diminuzione della biomassa microbica (causati anche dall'impiego di agrofarmaci), all'eccessivo ricorso alle lavorazioni e alla scarsa presenza di biodiversità.

Rotazioni colturali brevi, insieme agli scarsi residui organici tipici di un sistema convenzionale, determinano progressiva perdita di sostanza organica dei suoli.

Questo fenomeno può essere contrastato nel momento in cui si effettua una coltivazione in biologico in quanto si ha l'obbligo di effettuare rotazioni molto ampie e con colture molto diversificate. È bene dire però che tutto questo può essere raggiunto solo se nello schema di rotazione viene inserita una coltura foraggiera poliennale. L'incremento della sostanza organica non è solo associato ad una buona gestione del suolo, ma anche all'immissione di ammendanti organici.

La diversificazione colturale permette inoltre, di incrementare il contenuto di carbonio organico mineralizzabile nel suolo e quindi incrementare la disponibilità di nutrienti e la stabilità degli aggregati (Lynch, 2022).

1.3 Strategia dell'UE per il suolo 2030

Rappresenta la principale strategia che ad oggi può essere applicata per tutelare i suoli della comunità europea. La situazione non è idilliaca in quanto risulta che circa il 60-70% dei suoli della comunità europea non si trovino in un buono stato di salute. Essi sono fortemente assoggettati a fenomeni di degradazione causati dalla erosione, compattazione, perdita di sostanza organica, inquinamento ambientale, perdita di biodiversità, salinizzazione e impermeabilizzazione.

Si stima che in Europa ogni anno vengono ad essere persi circa un miliardo di tonnellate di suolo all'anno. Visto che per produrre 1 mm di suolo è richiesto un periodo di tempo pari a mille di anni, possiamo definire il contesto attuale molto preoccupante.

Buone pratiche di gestione dei suoli permettono di migliorarne la salute, grazie all'incremento della biodiversità e creando delle situazioni per le quali la coltivazione diventa più resiliente agli stress biotici e abiotici permettendo così di ridurre gli input esterni come, ad esempio, l'applicazione dei fitofarmaci.

A livello europeo, il suolo viene tenuto in considerazione sotto differenti punti di vista:

- Suolo per la mitigazione dei cambiamenti climatici e l'adattamento agli stessi: qui si prende in considerazione la capacità del suolo di fungere da *sink* di carbonio. È stato visto che negli ultimi anni, l'attività di assorbimento di carbonio da parte dei suoli europei è diminuita del 20%. Questo rappresenta un problema per il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050 (*green deal*). A tal proposito, si vuole intervenire andando a ripristinare la capacità dei suoli di assorbire carbonio andando a:
 - Ripristinare torbiere o areali umidi che permettano di stoccare il più possibile carbonio organico nel lungo periodo;
 - Incentivare gli agricoltori all'adozione di pratiche atte a incrementare il contenuto di biodiversità in modo tale che essa possa contribuire al mantenimento e all'incremento di carbonio organico nei suoli agricoli.
- Suolo ed economia circolare: qui si prende in considerazione la capacità del suolo di effettuare il riciclo di tutte le componenti che servono per la vita dell'essere umano in quanto permette di: filtrare acqua, riciclare nutrienti, filtrare agenti inquinanti ma soprattutto rappresenta una fonte di riserva di differenti componenti utilizzate in edilizia (sabbia, ghiaia ect.). In questa tipologia di aspetto, vengono ad essere fatte delle considerazioni sia per quanto riguarda il mondo edilizio ma anche quello agronomico. Per quanto concerne le considerazioni di tipo agronomico, si pone la questione di «*chiudere il cerchio dei nutrienti del carbonio*». In particolar modo, si pone l'attenzione sulla possibilità di implementare l'utilizzo dei residui organici di derivazione sia agricola (digestato, stallico, residui vegetali) e urbana (fanghi di depurazione). Con questa direttiva, si mira a rivedere i parametri europei per l'autorizzazione all'impiego di queste sostanze nel contesto agricolo, incentivare l'utilizzo di questi prodotti mediante dei finanziamenti e ampliare la ricerca in merito. Tutto questo in un'ottica di miglioramento del contenuto di sostanza organica nei suoli, con tutte le conseguenze del caso.
- Suolo come fonte di biodiversità per il benessere comune: il suolo è il luogo di accoglienza di tanti microrganismi che permettono l'esplicazione di tutti i cicli biogeochimici che permettono la vita dell'uomo (rilascio dei nutrienti per la

produzione primaria, biorisanamento delle sostanze inquinanti). L'obiettivo è quindi tutelare ed implementare la biodiversità terricola. A tal proposito, questa direttiva mira a finanziare la ricerca in tema per approfondire le conoscenze affinché si possano individuare le migliori tecniche gestione.

- Suolo e la risorsa idrica: il suolo è strettamente associato all'attività dei corpi idrici. La messa in contatto avviene tramite le precipitazioni atmosferiche e, in funzione delle caratteristiche dei suoli, possiamo avere: percolazione (andando a finire in falda), ritenzione (andando a rappresentare la riserva idrica per la produzione agricola) o scorrimento (andando a creare fenomeni di erosione). La direttiva effettua un focus su quelle che sono le problematiche legate all'erosione, nel quale si evidenzia il fatto che terreni non in salute sono maggiormente suscettibili a fenomeni di perdita dello strato fertile del suolo andando a causare anche un inquinamento delle acque marine. In questa direttiva, la comunità europea si impegna a creare delle normative che vadano a regolamentare il recupero e la gestione dei sedimenti. Si pone l'attenzione anche alla costituzione di nuove normative che vadano a coordinare la gestione dei suoli e delle acque in modo tale da ridurre al minimo le probabilità di esondazioni o la costituzione di suoli impermeabili.

Per quanto riguarda le azioni da intraprendere, a livello europeo si lavora sia sulla prevenzione ma anche sul ripristino dei suoli ormai degradati.

Per quanto concerne le attività di prevenzione, ci si basa su:

- La prevenzione della desertificazione: ad oggi, ben tredici paesi della comunità europea hanno dichiarato di avere problemi di desertificazione. Per questo motivo, è necessario un piano di gestione di questo fenomeno. La desertificazione è un fenomeno strettamente associato alla diminuzione delle precipitazioni e all'impoverimento dei suoli dal punto di vista della sostanza organica con conseguente diminuzione della biodiversità terricola e quindi con l'aumento di esposizione delle aree interessate a eventuali calamità naturali. Si suggeriscono quindi l'applicazione di misure per contrastare questo fenomeno, queste sono rappresentate da: applicazione di pratiche di gestione del suolo sostenibili specifiche per trattenere l'umidità; impianto di arbusti e alberi che facciano ombra; e coltivazione di piante e specie e varietà adatte alle condizioni asciutte. La direttiva in questione introduce differenti azioni volte alla mitigazione di questo fenomeno come: individuazione di metodologie e indicatori comuni da poter applicare su tutto il territorio comunitario; obbligo da parte degli stati membri di pubblicare ogni cinque anni i dati sullo stato di desertificazione dei suoli

nazionali; adottare piani di gestione delle risorse idriche, studiando metodi di efficientamento delle risorse a disposizione.

- La prevenzione dell'inquinamento: per quanto riguarda questo punto, la direttiva risulta molto aleatoria in quanto è indicato che il miglior modo per limitare gli impatti da inquinamento chimico è effettuare una ottimale valutazione del rischio per quanto concerne l'utilizzo di sostanze chimiche sia in ambito agricolo che industriale. Per perseguire questo obiettivo la direttiva indica le seguenti azioni da seguire: migliorare e armonizzare i criteri della valutazione del rischio; diminuire l'impiego di agrofarmaci e di antibiotici nel mondo agricolo e zootecnico.

Per quanto concerne il ripristino, la direttiva prevede due casi distinti:

- Suoli con possibilità di risanamento: questi sono i suoli che riguardano principalmente gli areali desertificati. Qui possono essere applicate delle operazioni di gestione differenti a seconda della gravità della desertificazione. Nelle situazioni più irrisorie come il compattamento o la perdita di biodiversità, la problematica può essere risolta mediante l'adozione di buone pratiche di gestione del suolo. Nel caso di situazioni più complesse come salinizzazione o impermeabilizzazione, il ripristino può essere garantito solo mediante interventi attivi che non sempre possono risolvere la problematica.
- Suoli non risanabili: riguardano principalmente i suoli che sono contaminati da agenti inquinanti. La direttiva indica chiaramente che si può intervenire solo mediante interventi diretti di bonifica. Queste sono metodologie molto costose che però devono essere ottemperate per il bene della comunità. Nel caso in cui la bonifica non sia possibile, si devono obbligatoriamente adottare misure di contenimento atte a non ampliare il problema. L'obiettivo di tale direttiva è di creare un ambiente privo di sostanze inquinanti entro il 2050. Inoltre, è chiaramente indicato che i soggetti che hanno cagionato il danno sono obbligati ad assumersi per intero i costi delle attività di bonifica.

Le azioni individuate alla direttiva in merito sono: individuazione di tutte gli areali contaminati nel territorio comunitario; costituzione di una normativa specifica atta a gestire le emergenze di contaminazione.

In definitiva, la direttiva riguardante la strategia per il suolo dell'UE, per quanto aleatoria e non ancora ben definita, rappresenta un primo passo per la gestione dei suoli del contesto europeo e di conseguenza, permette di capire quelle che saranno le misure che saranno adottate

per affrontare le sfide a cui il continente europeo sarà sottoposto in futuro (Commissione Europea, 2021b).

1.4 Agricoltura di precisione

Quando si parla di agricoltura di precisione (Adp), anche se vi sono molte definizioni, possiamo dire che la più esaustiva è quella di (Gebbers, 2010) dove si parla di un approccio gestionale del processo produttivo agricolo che ci permette di «fare la cosa giusta nel momento giusto, al punto giusto». Da questa definizione si possono comprendere i principi cardine di questa tipologia di gestione aziendale: studiare la variabilità temporale e spaziale dei fattori che influiscono sul processo produttivo aziendale al fine di migliorare l'impiego degli input durante l'evoluzione dinamica del processo produttivo stesso. Se si riesce a fare ciò, si rientra appieno negli obiettivi della strategia *farm to fork* in quanto si ha la possibilità di ridurre gli input immessi nel sistema produttivo grazie all'efficientamento degli stessi. Tutto questo, quindi, permette di creare un'agricoltura più produttiva e sostenibile.

L'Adp potrebbe essere considerata come un surrogato delle buone pratiche agronomiche di gestione, questa affermazione non è del tutto corretta in quanto questo sistema di gestione permette di attuare sì le buone pratiche agronomiche di conduzione, ma agisce andando a prendere in considerazione la variabilità che il singolo appezzamento dispone per proprie caratteristiche intrinseche. Quindi possiamo dire che l'agricoltura di precisione esercita un'attività sinergica con le buone pratiche agronomiche.

L'agricoltura di precisione, quindi, lavora andando a individuare la variabilità presente all'interno dell'azienda andando a modulare la modalità di esecuzione degli interventi per ottimizzare i risultati ottenibili. Tutto questo viene reso possibile grazie all'incontro tra la tecnologia (sensori e software) e conoscenze agronomiche dei tecnici preposti all'analisi.

L'agricoltura di precisione rientra nel contesto di gestione di precisione del territorio in quanto, l'utilizzo di questa tecnica può essere applicata sia alla selvicoltura che all'acquacoltura.

L'agricoltura di precisione a sua volta, può essere applicata sia in campo delle produzioni animali (*precision livestock farming*) o nelle produzioni vegetali (*precision crop farming*) (Casa, 2017).

1.4.1 Storia dell'agricoltura di precisione e la sua diffusione

I primi passi dell'agricoltura di precisione vennero fatti nei primi anni del Novecento in cui furono costituite le prime mappe di prescrizione per cercare di eliminare la variabilità spaziale del suolo che creava distorsioni durante le sperimentazioni agronomiche (Mercer, 1911).

Un ulteriore passo in avanti fu effettuato con lo sviluppo della geostatistica che permise di mettere a punto tecniche di quantificazione della variabilità spaziale che sono essenziali per l'agricoltura di precisione (Oliver, 2010). Di fondamentale importanza fu l'applicazione dei sistemi di posizionamento satellitari che negli anni Novanta permisero di effettuare l'individuazione di zone uniformi dal punto di vista delle caratteristiche del suolo all'interno delle aziende.

Negli anni Novanta, vennero fatti i primi studi sulla variabilità temporale e quindi cominciarono ad essere realizzati i primi sensori per la creazione di indici di vegetazione (*Normalized Difference Vegetation Index*) con l'obiettivo di differenziare le dosi di concime azotato da distribuire negli appezzamenti in modo tale da indurre uno sviluppo omogeneo. Questi primi studi vennero effettuati sia in America che in Germania avvalendosi dell'utilizzo di sensori posizionati a terra. Nei primi anni duemila, in Francia si lavorò sull'analisi temporale mediante l'ausilio di satelliti e di conseguenza vennero ideate le prime mappe di prescrizione per la concimazione azotata ottenute tramite l'analisi satellitare.

Tutta questa evoluzione permise quindi di creare delle prime applicazioni pratiche di agricoltura di precisione mettendo in comunicazione l'analisi satellitare, le trattatrici e le macchine operatrici.

Ad oggi ci troviamo in una situazione di ulteriore evoluzione in quanto l'avvento di droni con sensori multispettrali e di software di analisi dei dati, permettono di rendere l'agricoltura di precisione facilmente accessibile e atta a diminuire l'impiego di input per ottenere benefici sia in termini economici che ambientali.

Per quanto concerne la diffusione, è bene dire che il settore è in rapida crescita. Bisogna sottolineare però che le tecniche maggiormente diffuse riguardano le analisi satellitari rispetto a quelle sito-specifiche (in quanto le prime sono meno costose e di conseguenza più accessibili rispetto alle seconde). Il maggiore utilizzo è concentrato in America (che rappresenta anche il luogo di produzione delle maggiori tecnologie ad oggi disponibili) infatti, circa l'80% di agricoltori utilizzano sistemi di guida GPS, che sono spesso associati al controllo delle irroratrici, seminatrici o per la distribuzione dei fertilizzanti (Erikson, 2015).

A livello europeo, le nazioni in cui questa tecnica è maggiormente diffusa sono quelle centro-nordeuropee quali: Germania, Francia, Gran Bretagna e paesi scandinavi ovvero quelle

nazioni nelle quali ci sono aziende di grandi dimensioni ad indirizzo cerealicolo (realtà aziendali dove maggiormente può essere applicata l'agricoltura di precisione).

Benché l'impiego di questa tecnica ad oggi risulta particolarmente applicata alle coltivazioni erbacee, è bene sottolineare che c'è un crescente interesse anche per quando concerne il mondo della viticoltura.

Per quanto riguarda la situazione italiana, deve essere evidenziato il fatto che i maggiori sistemi di agricoltura di precisione sono attualmente concentrati sui trattori a guida GPS o per le mietitrebbie per andare a creare delle mappe di resa delle produzioni. L'acquisto di questi sistemi avviene da aziende di grandi dimensioni o da contoterzisti (situazione per la quale l'investimento iniziale ripaga i benefici ottenuti). Un ambito che sta via via crescendo è rappresentato da quello degli atomizzatori a getto mirato per i vigneti.

1.4.2 *Gestione della variabilità in agricoltura di precisione*

La possibilità di applicare le tecniche di agricoltura di precisione richiede scelte gestionali basate sulla conoscenza della variabilità delle proprietà del suolo e delle colture che sono oggetto di gestione (Oliver, 2013), di conseguenza è di fondamentale importanza utilizzare i giusti strumenti per l'analisi di dati spazio-temporali (Kitchen, 2002). Per l'acquisizione dei dati, è molto importante andare ad attribuire per un determinato punto dell'appezzamento, i giusti valori in termini di caratteristiche del suolo e della coltura.

La costruzione di mappe che siano in grado di illustrare in modo veritiero la situazione aziendale può essere effettuata solo a seguito di una pianificazione e campionamento ottimale che permetta quindi di raccogliere in maniera adeguata i dati. Una volta fatto questo, ci si avvale della geostatistica ovvero la materia che consente di effettuare la quantificazione e modellizzazione della variabilità spaziale delle proprietà ambientali permettendo quindi di effettuare l'analisi dell'areale di studio.

La geostatistica è stata applicata alla scienza del suolo agli inizi degli anni Ottanta (utilizzato in ambito minerario), mentre i primi riferimenti all'agricoltura di precisione sono stati riportati in (Mulla, 1988) e (Mulla, 1991) (Mulla, 1993). Da questo periodo in poi vi è stato un interesse crescente della geostatistica nell'agricoltura di precisione.

La distribuzione nello spazio delle proprietà fisiche del suolo e della coltura può essere di tipo deterministico (o sistemico) o casuale. La componente deterministica rappresenta un cambiamento graduale ben definito che agisce ad una scala spaziale maggiore di quella di osservazione (come la variazione delle caratteristiche tessiturali). La componente casuale invece è frutto di variazioni che non possono essere attribuite a cause note.

La geostatistica ci permette di effettuare lo studio dei fenomeni regionalizzati. Per fenomeno regionalizzato si intende la quantificazione di un certo parametro (es. contenuto di azoto) in un determinato punto in cui si effettua l'analisi. Da questo possiamo capire che è di fondamentale importanza la posizione geografica nel quale si va ad effettuare l'analisi. La geostatistica permette di descrivere i fenomeni regionalizzati mediante una descrizione matematica che prende il nome di variabile regionalizzata. Tutto questo porta alla costituzione di zone differenziate di gestione o anche chiamate *management zone*.

1.4.3 Telerilevamento in agricoltura di precisione

Quando si parla di telerilevamento, si intende la possibilità di andare a individuare le caratteristiche del campo coltivato oggetto di studio da remoto (infatti si parla di *remote sensing*). Questo viene reso possibile mediante l'applicazione di sensori che possono essere di due tipologie:

- Sensori prossimali: presenti sulle macchine agricole oppure posizionati sul campo oggetto di studio;
- Sensori aerotrasportati: posizionati su aerei o droni;
- Sensori satellitari: posizionati su satelliti di agenzie pubbliche o private.

In questo elaborato di tesi sarà trattata solo la parte inerente all'utilizzo di sensori satellitari.

Il mondo dei sensori satellitari è in continuo fermento in quanto ad oggi, sia agenzie pubbliche che private stanno investendo molto in tal senso dato che la loro applicazione è molto diversificata. Tra i differenti interessi, trova spazio anche l'agricoltura di precisione. In questo campo però c'è la necessità di avere una risoluzione spaziale molto accurata ma anche di avere una frequenza di rilevazione molto elevata. (perché si deve avere la possibilità di andare a fare analisi durante le differenti fasi fenologiche e quindi capire quando sia il momento migliore per intervenire con le differenti pratiche agronomiche).

I dati di interesse sono raccolti tramite i sensori satellitari che li creano sotto forma di dati grezzi, questi sono successivamente inviati verso stazioni terrestri che si occuperanno dell'elaborazione (applicando di fattori di correzione sui dati grezzi) e quindi della messa a disposizione dei differenti prodotti che possono essere utilizzati dagli utenti interessati.

Ad oggi le agenzie si stanno specializzando sempre di più per la messa a disposizione di elaborati di elevato livello come, ad esempio, la costituzione di indici di vegetazione.

Il telerilevamento può essere applicato sia per il monitoraggio delle colture agrarie che per il monitoraggio delle caratteristiche del suolo.

Per quanto concerne l'utilizzo del *remote sensing* per il monitoraggio del suolo, è bene dire che questo permette di individuare i diversi gradienti di fertilità (o di tessitura) che sono

presenti in un campo coltivato. Per individuare questo, si devono conoscere tessitura e contenuto di sostanza organica. Conoscendo queste variabili, si possono determinare le differenti potenzialità produttive e quindi applicare gestioni rateo variabili in modo tale da effettuare un efficientamento degli input e mantenere costante il contenuto di sostanza organica.

Una fattore imprescindibile per ottenere mappe di variabilità del suolo veritiere, consiste nell'andare ad effettuare un elevato numero di campioni che devono essere analizzate in laboratorio, questo perché ci deve essere l'associazione tra le misure spettroradiometriche e i valori analitici del suolo.

Dato che andare ad effettuare analisi di laboratorio ha un costo, a livello europeo è stato costituito una banca dati comunitaria (LUCAS) nella quale vengono riportate tutte le associazioni di misure spettroradiometriche con i valori analitici individuati in laboratorio.

L'analisi mediante telerilevamento satellitare permette di andare ad effettuare lo studio di grandi areali con la possibilità di analizzare il profilo del suolo interessato dalla coltivazione (strato fertile, 30 cm). Un problema che si riscontra però nell'utilizzo di questa tipologia di analisi è che non sempre i satelliti sono in grado di dare una risoluzione spaziale in grado di descrivere in maniera accurata la variabilità presente all'interno del campo in esame. Questo potrebbe rappresentare un problema a seconda della tipologia di dato o di coltura che si vuole osservare (in genere l'analisi mediante satellite viene effettuata su colture erbacee). Se si prende in considerazione la tessitura, le caratteristiche all'interno di un campo variano in maniera repentina da un punto all'altro; se si parla di contenuto di sostanza organica invece, la variazione è meno estrema e di conseguenza si può utilizzare una risoluzione spaziale meno accurata. In genere un buon grado di risoluzione si ha con valori intorno a 30 m (Casa, 2017).

1.5 Gestione della fertilità del suolo di precisione

La gestione della fertilità del suolo rappresenta uno dei principali punti critici del contesto agricolo attuale a seguito dei progressivi fenomeni di impoverimento che stanno interessando tutto il territorio della Comunità Europea (Commissione Europea, 2021).

Uno dei metodi che possono essere applicati per contrastare questa tendenza, consiste nell'apportare sostanza organica nei suoli mediante ammendamenti. L'agricoltura di precisione ci permette di effettuare un ammendamento rateo variabile in funzione dei livelli di fertilità del suolo nel quale si va ad operare. Affinché questo sia possibile, si devono conoscere prima le caratteristiche del suolo (individuate mediante analisi di laboratorio) a cui dovranno

essere associate i valori spettroradiometrici al fine di creare le management zone. In funzione del contenuto di sostanza organica si andrà ad immettere un quantitativo di input differente.

È obiettivo di questo lavoro di tesi andare a descrivere un caso studio nella quale sarà descritta la modalità di gestione della fertilità con lo scopo di preservare e incrementare il contenuto di sostanza organica su una carciofaia sita in Sardegna nel comune di Uri (SS).

Capitolo 2

MATERIALI E METODI

2.1 Descrizione del sito sperimentale

I dati sono stati raccolti tra il 2018 e il 2022 presso l'azienda privata Sarciofo, situata nella zona rurale del comune di Uri (SS), a 2,5 km dal centro abitato, lungo la strada "Pezzu Maria" (40° 37' 25" N, 8° 28' 15" E, 150 m s.l.m.). L'azienda è stata configurata come dimostratore di due progetti: MASLOWATEN (*Market uptake of an innovative irrigation Solution based on LOW WATER-ENERgy consumption*; 2015 – 2108) e SOLAQUA (*Accessible, reliable and affordable solar irrigation for Europe and beyond*; 2020 – in corso) finanziati dall'Unione Europea nell'ambito del programma Horizon 2020 (*SOCIETAL CHALLENGES - Climate action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials e Secure, clean and efficient energy*) che hanno avuto come obiettivo principale quello di promuovere il pompaggio fotovoltaico in un'ottica di sostenibilità energetica, economica e anche agronomica (attraverso l'efficientamento dell'utilizzo della risorsa idrica). Inoltre, di recente, l'azienda Sarciofo, ha avviato il percorso di transizione verso la coltivazione in regime biologico. Quindi, ha evidenziato la necessità di mettere a punto un piano di gestione della fertilità del suolo che combini i principi dell'agricoltura di precisione con i principi dell'agricoltura biologica.



Figura 4 Carciofaia in fase di emissione del primo capolino

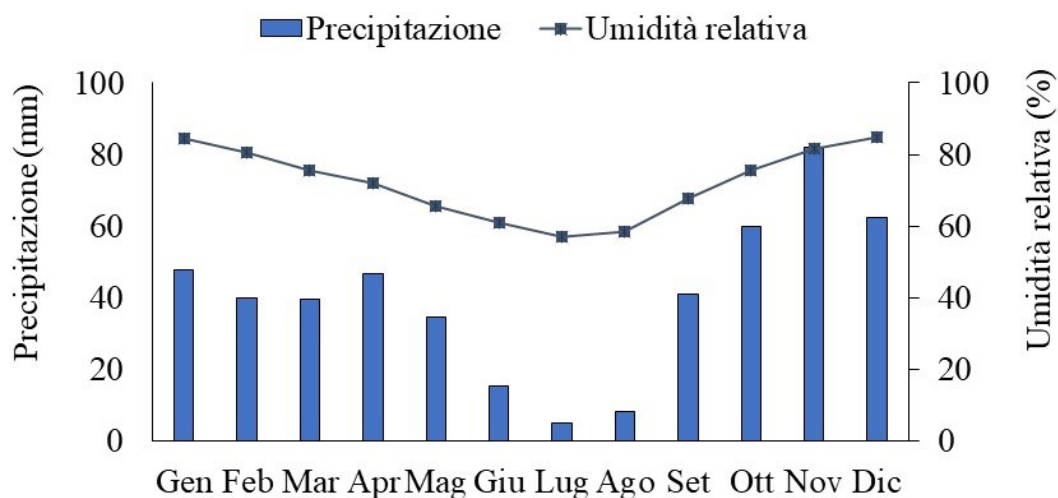


Figura 5 Serie storica (1984 – 2014) delle precipitazioni e dell’umidità relativa per il sito di Uri

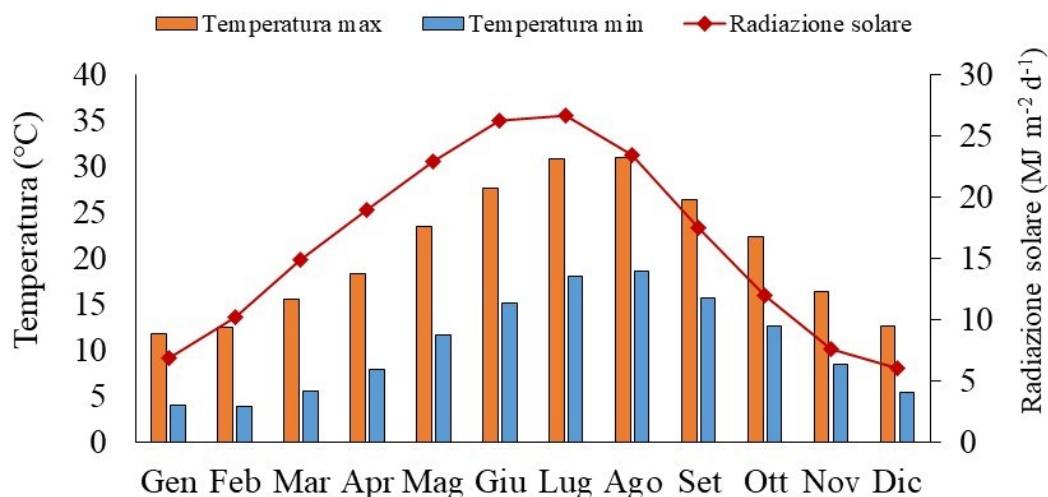


Figura 6 Serie storica (1984 – 2014) degli andamenti termici e della radiazione solare per il sito di Uri

L’area di studio si trova vicino al lago di Cuga, tra i comuni di Uri, Ittiri e Usini, ed è una delle principali aree di produzione di carciofi in Sardegna.

L’azienda rappresenta un esempio tipico delle dimensioni medie delle aziende carcioficole sarde, con una superficie di circa 11 ettari dedicata principalmente alla coltivazione del carciofo Spinoso sardo. Una parte dell’azienda è dedicata anche alla coltivazione della fragola. Le condizioni climatiche nella zona sono di tipo mediterraneo, con una precipitazione media annuale di 480 mm (serie storica 1984-2014), concentrata principalmente durante i mesi

autunnali e invernali (Figura 4). La temperatura media annuale è di circa 17,2 °C, con temperature massime medie di 26,4 °C e temperature minime medie di 9,9 °C. Il mese più caldo è agosto, mentre il più freddo è febbraio (Figura 5).

Il suolo è di origine alluvionale (Eutric Cambisols and Calcaric Cambisols) (WRB, 2014), pianeggiante o moderatamente collinare, prevalentemente con una tessitura argillo-limosa e con una capacità di ritenzione idrica che varia tra il 25% e il 28% (su base secca).

La preparazione del letto di trapianto ha previsto un'aratura a 40 cm seguita da una fresatura. L'impianto è stato eseguito a fine giugno con una densità di impianto di circa 1 pianta m⁻² (piante distanti 1,2 m tra le file e 0,7 m nell'interfila) utilizzando ovoli del tipo varietale Spinoso sardo. La carciofaia è stata risvegliata tramite l'applicazione di un'abbondante adacquata con l'adozione di un impianto per aspersione a microsprinkler. In seguito, i turni irrigui sono stati prestabiliti in funzione dell'andamento termico dell'aria e del contenuto idrico del suolo, costantemente monitorati attraverso una rete di sensori wireless collegati e comunicanti via moduli radio con una unità di controllo. Il carciofo in Sardegna, è una coltura tradizionalmente annuale e coltivata in monosuccessione. Prima che l'azienda avviasse la transizione verso il regime biologico, la gestione della nutrizione consisteva nella distribuzione di 190 kg ha⁻¹ di N (in forma ureica); 170 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 250 kg ha⁻¹ K₂O. Il fosforo e il potassio venivano distribuiti in preimpianto, in quanto elementi poco mobili; mentre l'azoto veniva distribuito in parte quando la pianta aveva raggiunto lo stadio fenologico 31 della scala BBCH (92 kg ha⁻¹) (Meier, 2009), in parte dopo la raccolta del primo capolino. Il controllo delle malerbe è stato effettuato meccanicamente.

2.2 Determinazione delle caratteristiche del suolo

Per lo studio riportato nella presente tesi, sono stati utilizzati dati di suolo raccolti in precedenza.



Figura 7 Rappresentazione grafica della griglia di campionamento (3×3 m, 99 punti) adottata per il prelievo dei campioni di suolo

La scelta dello schema di campionamento è stata fondamentale per ottenere risultati significativi, per calcolare gli indici statistici di una popolazione, identificare eventuali aree anomale e determinarne l'origine, nonché supportare decisioni operative relative a una variabile specifica. In questo caso, è stato utilizzato uno schema di campionamento definito come sistematico, con la selezione dei punti nello spazio seguendo uno schema predefinito. Questo tipo di campionamento ha consentito una copertura uniforme dello spazio e una stima ottimale della correlazione spaziale dei campioni.

La griglia di campionamento, precedentemente stabilita, ha compreso 99 punti sul terreno, disposti a una distanza di 3×3 metri l'uno dall'altro. La metodologia di campionamento, supportata da un GPS di precisione submetrica, ha permesso di riprodurre con la massima precisione possibile la griglia regolare predefinita, utilizzando il sistema di coordinate WGS_1984. I campioni di suolo sono stati prelevati utilizzando un carotatore manuale fino a

una profondità di 40 cm e successivamente trasportati in laboratorio. I campioni di suolo sono stati privati dei residui radicali e dei residui animali, quindi essiccati in una stufa a ventilazione forzata a una temperatura di 40 °C per 48 ore. Successivamente, sono stati setacciati attraverso una maglia con una dimensione di 2 mm. Una parte del campione è stata macinata utilizzando un mulino da laboratorio. Le analisi effettuate sono state diverse (ad esempio: pH, conduttività elettrica, contenuto di azoto totale e sostanza organica) e in accordo con le metodiche della Società Italiana di Scienza del Suolo (2000).

2.3 Creazione delle zone omogenee

La determinazione delle zone omogenee richiede l'uso della *cluster analysis* per creare un numero specifico di cluster. Questi cluster raggruppano i dati georeferenziati delle diverse proprietà del suolo con caratteristiche comuni, come pH, sostanza organica, rapporto C-N, carbonati totali, ecc. L'obiettivo è individuare gruppi definiti, chiamati zone omogenee, in cui i dati possono essere separati analizzando i valori dei loro attributi (Fridgen et al., 2004).

Il processo per creare la mappa delle zone omogenee utilizza il software statistico "R" e comprende la creazione del variogramma, l'interpolazione tramite *ordinary kriging* per generare la mappa di stima e di varianza, la generazione dello *stack layer*, l'analisi dei *cluster* e la creazione della mappa delle zone omogenee (Pebesma, 2005) (Bivand, 2013).

Dopo aver ottenuto i valori delle diverse proprietà del suolo per i 99 punti campionati, è stato calcolato il variogramma per ciascuna di queste proprietà. Il variogramma è stato utilizzato come strumento chiave per l'interpolazione, consentendo di stimare i valori della variabile in punti in cui non sono state effettuate misurazioni. L'interpolazione dei dati è stata effettuata utilizzando l'*ordinary kriging*, che fornisce valori predetti e varianze per i punti interpolati, generando mappe di predizione e mappe degli errori.

Successivamente, è stata valutata l'accuratezza delle stime utilizzando l'errore quadratico medio (RMSE) e si è scelto il modello esponenziale come modello appropriato per l'interpolazione dei dati.

Le mappe di predizione mostrano i valori stimati per i punti interpolati, consentendo di visualizzare le variazioni spaziali delle proprietà del suolo. Le mappe degli errori indicano la precisione delle stime, con aree a basso errore che indicano maggiore affidabilità e aree ad alto errore che indicano maggiore incertezza.

Successivamente, i dati sono stati preparati per l'applicazione della *cluster analysis*, assicurandosi che gli strati *raster* avessero la stessa risoluzione spaziale. È stato creato uno *stack layer* contenente gli strati *raster* delle mappe di predizione, e l'algoritmo *k-means* è stato

utilizzato per eseguire la *cluster analysis*, determinando il numero ottimale di *cluster* utilizzando il *gap statistic index*. Nel caso specifico, il numero ottimale di cluster è risultato essere 2.

L'algoritmo *k-means* suddivide i dati in gruppi (cluster) in base alla loro similarità, utilizzando i centroidi come punti di riferimento per definire i *cluster*. Si basa sulla rappresentazione dei dati come punti in uno spazio euclideo e passa attraverso fasi di inizializzazione, assegnazione del cluster e aggiornamento della posizione del centroide fino a raggiungere un punto di convergenza. L'algoritmo mira a minimizzare la somma dei quadrati delle distanze tra i punti dei dati e i centroidi dei *cluster*.

Dopo aver completato l'algoritmo di clusterizzazione, viene generata la mappa delle zone omogenee che rappresenta visivamente i diversi *cluster* ottenuti. Ogni area colorata corrisponde a una zona omogenea con caratteristiche simili delle proprietà del suolo analizzate. Questa mappa permette di identificare e distinguere facilmente le diverse zone del territorio in base alle proprietà del suolo, fornendo informazioni sulla distribuzione spaziale.

In conclusione, attraverso l'utilizzo della *cluster analysis* con l'algoritmo *k-means* e l'interpolazione dei dati mediante *ordinary kriging*, è stata creata una mappa delle zone omogenee che rappresenta le diverse aree del territorio in base alle proprietà del suolo analizzate.

2.4 Bilancio della sostanza organica

La superficie aziendale oggetto dello studio, è soggetta a coltivazione di carciofo in regime di omosuccessione. Per poter procedere, in base alle mappe di zone omogenee, al calcolo della quantità di sostanza organica da restituire per mantenere inalterata, o favorire un leggero incremento della fertilità del suolo, occorre conoscere il coefficiente isoumico (k_1), cioè il rapporto tra la quantità di humus formato e la quantità di sostanza organica apportata. Tale coefficiente varia in relazione al tipo di sostanza organica apportata, al rapporto C/N della stessa e alle condizioni pedoclimatiche in cui avviene l'umificazione. Esistono valori sperimentali per diversi tipi di residui che possono aiutare a redigere un bilancio della sostanza organica nel suolo nel corso di un'annata agraria. Il coefficiente isoumico va moltiplicato per il contenuto di sostanza organica e non per il peso tal quale (che comprende anche l'umidità della matrice organica considerata). La quantità di sostanza organica interrata è rappresentata da residui colturali del carciofo (biomassa aerea e apparato radicale) e da residui di malerbe.

La sostanza organica che viene annualmente degradata, espresso come percentuale sulla quantità totale di sostanza organica contenuta nel terreno, viene definita tasso di mineralizzazione (k_2). Tale coefficiente varia in relazione al tipo di terreno ed è più elevato nei terreni sabbiosi e sciolti e più basso nei terreni argillosi e pesanti.

$$\text{Stima degli apporti di sostanza organica al suolo } (\pm \text{variazioni della coltura}) = A - P$$

Dove A sono gli apporti (derivanti dall'interramento dei residui colturali e dagli ammendamenti); P sono le perdite (derivanti da mineralizzazione, e asportazione della produzione della coltura). Per poter redare il bilancio è stato considerato il coefficiente isoumico dell'ammendante (pollina) e dei residui colturali del carciofo. I coefficienti isoumici utilizzati sono stati pari a 30% (Ceccon, 2017) e 15% (Musu, 2013), rispettivamente. Un tasso di mineralizzazione della sostanza organica (k_2) pari al 16% (Ceccon, 2017) è stato invece utilizzato tenendo conto delle caratteristiche tessiture del suolo dell'area oggetto di studio (argillo-limoso). Si è quindi proceduto alla determinazione del contenuto di sostanza organica per il profilo di suolo preso in considerazione (40 cm), per poi determinare il quantitativo di sostanza organica mineralizzata annualmente. Questa è stata posta a confronto con il quantitativo di sostanza organica restituita al sistema mediante l'interramento dei residui colturali. Trattandosi di un bilancio, il risultato può essere positivo o negativo. In caso di bilancio negativo, si dovrà stimare il quantitativo di ammendante da apportare (pollina) basandosi sui coefficienti isoumici dello stesso. Una volta stabilita la quantità di pollina da distribuire al sistema per preservare nel tempo la dotazione in sostanza organica, sono stati calcolati anche i macronutrienti apportati al suolo con l'ammendamento.

2.5 Campionamento delle piante

All'inizio della produzione, cioè in corrispondenza dell'emissione del primo capolino, fase fenologica 53 della scala BBCH (Piras, 2012), all'interno di ogni zona omogenea, sono state individuate 20 piante sulle quali sono state registrate: altezza e diametro della rosetta, numero di foglie per pianta, peso medio del primo capolino, e percentuale di incidenza dell'atrofia. A fine ciclo le 20 piante, già oggetto di monitoraggio in corrispondenza di ciascuna zona di gestione omogenea, sono state raccolte per la determinazione del peso della biomassa aerea e dell'apparato radicale e del numero totale di capolini prodotti. Questi dati sono stati utilizzati per la stima della sostanza organica in ingresso (residui colturali) e in uscita (capolini totali prodotti). In corrispondenza delle aree di saggio si è inoltre proceduto al prelievo della

biomassa residuale della flora infestante. È stata quindi calcolata la resa per ettaro riferita all'intera produzione dell'annata agraria.

2.6 Analisi statistica

I dati raccolti sono stati sottoposti ad analisi statistica utilizzando il software R. È stata eseguita un'analisi della varianza a una via per valutare l'effetto delle zone omogenee (a diverso contenuto in sostanza organica) sulle diverse variabili misurate. In caso di significatività ($P < 0,05$), le medie sono state separate mediante il test di Tukey. Le mappe tematiche e i dati statistici sono stati utilizzati per valutare l'andamento delle caratteristiche del suolo e delle piante all'interno dell'azienda e per fornire informazioni utili ai produttori per una gestione mirata e sostenibile della coltivazione del carciofo Spinoso sardo.

Capitolo 3

RISULTATI E DISCUSSIONI

Dall'analisi statistica descrittiva (Tab. 1), è emerso che il suolo preso in considerazione nello studio aveva un pH leggermente alcalino, con una media di 8,15, e una conduttività elettrica media di 133 S/m. Il contenuto di carbonio organico e di sostanza organica sono risultati adeguati, con una media dello 0,97% e di 16,9 g/kg, rispettivamente. Il contenuto medio di carbonio totale era di 22,9 g/kg di suolo.

Tabella 1 *Analisi statistiche descrittive*

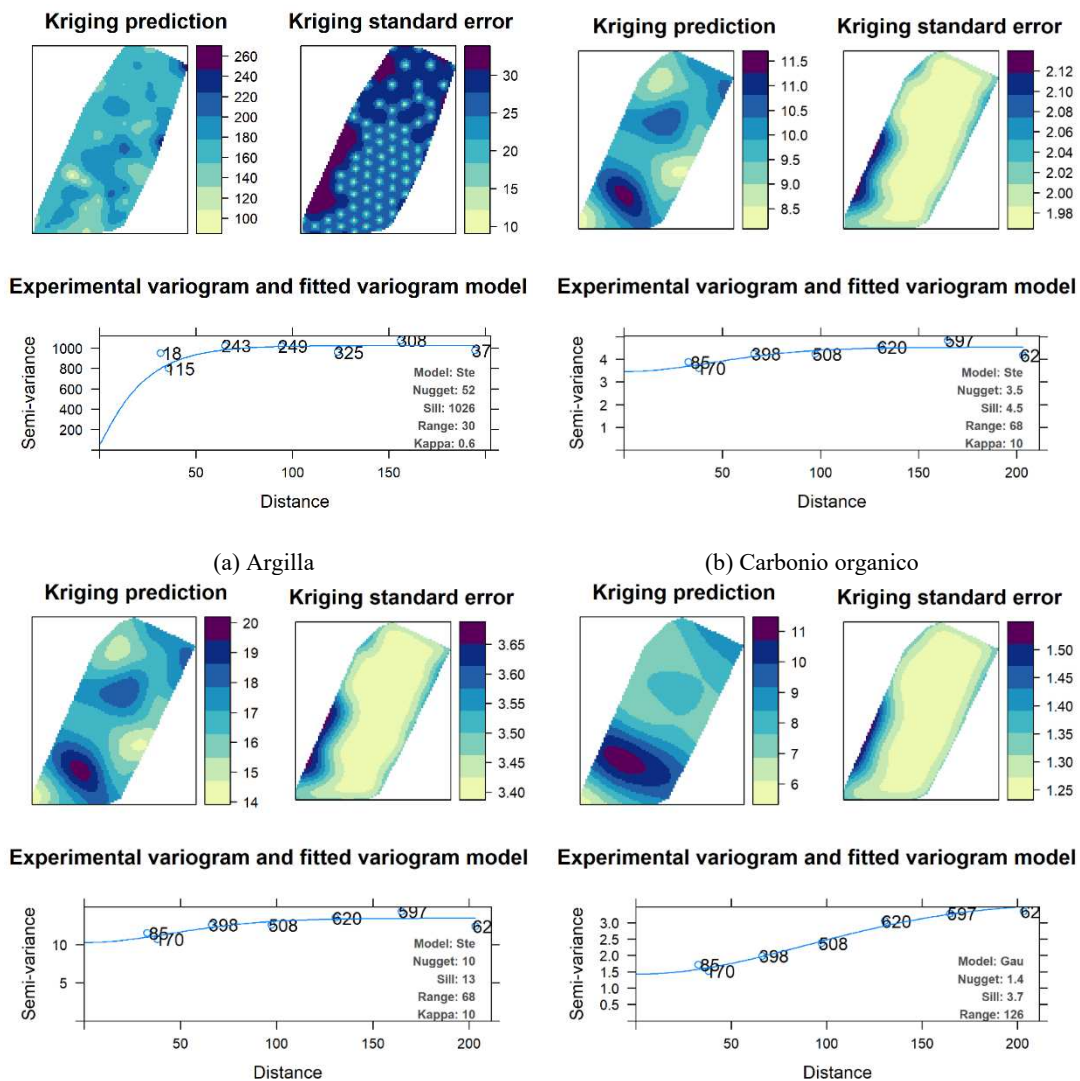
Variabile	Media	Dev. st.	P0	P25	P50	P75	P100	Skewness	Kurtosis
pH	8,15	0,193	7,41	8,09	8,18	8,28	8,58	0,93	1,41
Conducibilità elettrica (S/m)	133	30,6	85,4	113	126	145	225	0,91	0,28
Carbonio organico (g/kg)	9,8	2,1	4,82	8,53	9,53	11,0	16,1	0,49	0,36
Sostanza organica (g/kg)	16,9	3,63	8,32	14,7	16,4	19,0	27,0	0,49	0,36
Carbonio totale (g/kg)	22,9	13	7,34	11,3	17,4	35,5	52,9	0,62	1,07
N totale (g/kg)	1,2	0,18	0,68	1,09	1,18	1,34	1,72	0,04	0,27
C/N	8,25	1,76	4,31	7,11	8,05	9,13	14,50	0,79	1,14

Tabella 2 *Valutazione e selezione del modello di variogramma in base all'errore quadratico medio.*

Variabile	Sferico	Esponenziale	Gaussiano	Matern
pH	0.168	0.159	0.186	0.165
Conducibilità elettrica (S/m)	26.86	24.46	30.74	28.50
Carbonio organico (g/kg)	2.135	2.086	2.148	2.093
Sostanza organica (g/kg)	3.575	3.552	3.75	3.575
Carbonio totale (g/kg)	9.23	8.73	9.75	9.23
N totale (g/kg)	0.164	0.143	0.165	0.157
C/N	1.517	1.471	1.537	1.489

Come si evince dalla tabella 2, per l'interpolazione dei dati, i valori dell'errore quadratico medio (RMSE) più bassi sono risultati quelli del modello esponenziale. I variogrammi ottenuti

mediante l'applicazione del modello esponenziale hanno generato una serie di punti sul grafico, in cui una specifica distanza (*lag*) corrisponde a una determinata semivarianza. Di seguito sono riportati tutti i variogrammi empirici e teorici, che sono stati creati per ogni proprietà del terreno oggetto di studio nell'ambito di questa tesi (Figg. 8 a - d). Nella parte iniziale del variogramma per ciascuna proprietà del terreno, si osserva un incremento progressivo fino a raggiungere un valore specifico di semi-varianza (*sill*) e distanza (*range*). Dopo aver raggiunto tali valori, il grafico prosegue con un andamento costante, ossia, all'aumentare del *range*, il *sill* rimane costante.



(c) Sostanza organica del suolo (d) Rapporto C/N
Figura 8 Per ciascun pannello (a – d) sono riportate le i) mappe di predizione per le diverse proprietà del suolo oggetto di studio, ottenute attraverso l'ordinary kriging (in alto a sinistra); ii) mappe di varianza per le diverse proprietà del suolo oggetto di studio, ottenute attraverso l'ordinary kriging (in alto a destra), e i iii) variogrammi empirici e relativi modelli esponenziali (in basso)

A seguito dell'interpolazione dei dati presi da satellite e dai campionamenti, è stato possibile creare un variogramma che, grazie all'analisi dell'algoritmo *kriging*, ha permesso di realizzare delle mappe di predizione che hanno restituito l'analisi dell'eterogeneità dell'area oggetto di studio in termini di caratteristiche chimico-fisiche del suolo (Figura 9).

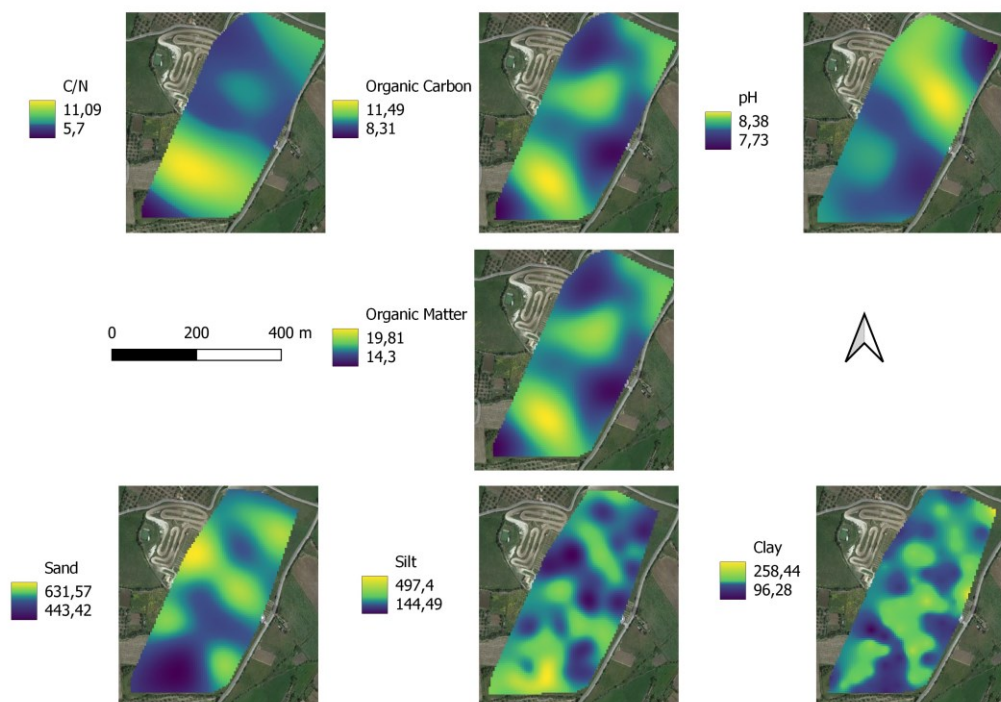


Figura 9 Mappe di predizione che restituiscono un'informazione relativa all'eterogeneità del suolo in termini di caratteristiche chimico-fisiche.

Questo ha permesso quindi di evidenziare differenti aree di gestione omogenea del suolo o *zone management* distinte, in funzione dell'obiettivo del lavoro di tesi, per il contenuto in sostanza organica (Figura 10). La zona omogenea rappresentata in viola nella figura indica la zona omogenea 1 del sito mentre la zona rappresentata in verde acqua indica la zona omogenea 2 del sito. In particolare, dall'elaborazione emerge che nelle aree raggruppate sotto la Zona 1 il contenuto di sostanza organica è risultato pari a 18,0 g/kg di suolo; mentre nelle aree ricadenti sotto la Zona 2 il contenuto in sostanza organica è stato pari a 16,4 g/kg di suolo.

La conoscenza di questa variabilità e suddivisione in due zone omogenee, consentirebbe di effettuare un ammendamento a rateo variabile a seconda delle due *zone management* individuate e con il fine di preservare dal depauperamento il contenuto in sostanza organica che caratterizza l'area oggetto di studio (Fig. 10) consentendo al contempo un certo risparmio delle risorse e una maggior sostenibilità economica e ambientale.



Figura 10 Zone omogenee per il contenuto in sostanza organica

L'elaborazione statistica ha restituito differenze significative tra la Zona 1 e la Zona 2 per sostanza organica, limo e sabbia. Prendendo in considerazione le caratteristiche del suolo riportate in Tab. 3, e conoscendo i differenti coefficienti isoumici e di mineralizzazione, è stato redatto il bilancio della sostanza organica (Tabb. 4 e 5).

Tabella 3 Risultati dell'analisi della varianza applicata alle due zone omogenee per ogni proprietà analizzata

Parametri	Zona 1	Zona 2	<i>p-value</i>
Sostanza organica (g/kg)	1,8	1,6	0,012
Limo (g/kg)	283	267	<0.001
Argilla (g/kg)	171	167	n.s.
Sabbia (g/kg)	562	544	<0.001
Densità (g/cm ³)	1,3	1,3	n.s.

Dalla redazione del bilancio, è emerso che nella Zona 1 (Tab. 4), vengono persi 6 q/ha di sostanza organica all'anno. Ciò significa che, in assenza di interventi per ripristinare la dotazione di sostanza organica, questa si esaurirebbe nel corso di 156 anni ($936 \text{ q} \div 6 \text{ q} = 156$). Pertanto, per equilibrare il bilancio, sarebbe necessario apportare 20 q/anno di pollina.

Nella Zona 2, invece, dove il contenuto di sostanza organica è significativamente più basso rispetto alla Zona 1 (Tab. 3), sarebbe necessario distribuire 14,7 q/ha di pollina all'anno per compensare la perdita annuale di sostanza organica (Tab. 5).

Tabella 4 Bilancio della sostanza organica redato per la zona omogenea Z1

Perdite	
Volume di suolo nello “strato attivo” (m ³)	4000
Massa di terreno (t) (densità apparente 1,3 t/m ³)	5200
Contenuto di s.o. nello “strato attivo” (t/ha)	93,6
Contenuto di s.o. annualmente mineralizzato (t/ha/anno)	1,5 (15,0 q/ha/anno)
Apporti	
Sostanza secca derivante da residui colturali interrati (q/ha)	60,0
Apporto s.o. per interrimento residui colturali (q/ha/anno)	9,0
<i>Bilancio totale</i>	
Perdite (q/ha)	15
Apporti (q/ha)	9
Totale	-6

Tabella 5 Bilancio della sostanza organica redato per la zona omogenea Z2

Perdite	
Volume di suolo nello “strato attivo” (m ³)	4000
Massa di terreno (t) (densità apparente 1,3 t/m ³)	5200
Contenuto di s.o. nello “strato attivo” (t/ha)	83,2
Contenuto di s.o. annualmente mineralizzato (t/ha/anno)	1,33 (13,3 q/ha/anno)
Apporti	
Sostanza secca derivante da residui colturali interrati (q/ha)	59,3
Apporto s.o. per interrimento residui colturali (q/ha/anno)	9,0
<i>Bilancio totale</i>	
Perdite (q/ha)	13,3
Apporti (q/ha)	9
Totale	-4,3

Le differenze significative tra le zone di gestione omogenea sono state riscontrate anche per i dati biometrici e produttivi della coltura, come riportato nella Tabella 6. In particolare, la Zona 1 ha mostrato valori più elevati per l'altezza e il diametro della pianta, il peso fresco del capolino, il numero totale di capolini commerciali raccolti e la resa (Tabella 6).

Tabella 6 Effetto del fattore “zona” sulle caratteristiche biometriche e produttive in carciofo

Zone management	Pianta			Produzione			
	Altezza (cm)	Diametro (cm)	Foglie (no.)	Peso fresco I capolino (g)	Capolini (no. ha ⁻¹)	Atrofia (%)	Resa areica (kg ha ⁻¹)
Zona 1	76,1 a	58,6 a	29,4	179,0 a	61219 a	8,0	7223 a
Zona 2	65,7 b	52,2 b	29,9	150,0 b	59888 b	10,0	5922 b
<i>Effetto</i>							
Zona (Z)	<0.001	<0.001	0,2145	<0.001	<0.001	0,602	0,011

Inoltre, nella Zona 1 si sono osservate percentuali più basse di atrofia dei capolini, anche se non statisticamente significative. Non sono state individuate differenze significative per quanto riguarda il numero di foglie per pianta.

L'applicazione di un ammendamento a rateo variabile di pollina matura consentirebbe non solo di stabilizzare il contenuto di sostanza organica nel suolo, ma anche di integrare una certa quantità di elementi nutritivi, garantendo una maggiore sostenibilità economica per l'agricoltore. In particolare, considerando le caratteristiche compositive della pollina matura (Tab. 7) e le quantità da distribuire nelle due zone omogenee, con l'ammendamento si arriverebbero ad integrare nella Zona 1 anche 60 kg/ha di N e P₂O₅ e 49 kg/ha di K₂O, mentre nella Zona 2 si avrebbero 43 kg/ha di N e P₂O₅ e 36 kg/ha di K₂O. Questi apporti risponderebbero a un fabbisogno colturale che si aggira intorno a 180, 120 e 150 kg/ha rispettivamente per N, P₂O₅ e K₂O.

Tabella 7 Caratteristiche pollina matura

Tipo di ammendante	s.s. (% t.q.)	N (kg/t)	P (kg/t)	K (kg/t)
Pollina ovaiole secca	85	30	30	25

Va sottolineata anche l'importanza della sostenibilità economica dell'ammendamento. Considerando il costo attuale della pollina (380 €/t) e le quantità necessarie per le due zone di gestione (Tab. 8), il costo totale dell'ammendamento sarebbe di 5404 € nella Zona 1, che si estende su 7,11 ha, e di 2633 € nella Zona 2, che si estende su 4,62 ha.

Tabella 8 Conto economico

Descrizione	Z1	Z2
Costo pollina (€/t)	380	380
Fabbisogno aziendale (t/ha)	2,0	1,5
Costo ammendamento (€/ha)	760	570
Superficie aziendale (ha)	7,11	4,62
Totale ammendante da distribuire (t)	14,2	6,9
Costo totale ammendamento aziendale (€)	5.404	2.633
Risparmio	-2.770 (euro) 51%	

L'adozione delle zone omogenee nella gestione della fertilità in agricoltura biologica e di precisione rappresenta un approccio strategico e sostenibile per ottimizzare l'uso delle risorse, migliorare la produttività delle colture e ridurre l'impatto ambientale. L'identificazione e la suddivisione dell'area di coltivazione in zone omogenee, basate su caratteristiche chimico-fisiche del suolo, permettono un approccio più mirato e sostenibile nella gestione delle risorse

agricole. Autori come Landrum et al. (Landrum, 2015) hanno dimostrato che la differenziazione delle pratiche di gestione del suolo in base alle zone omogenee può portare a notevoli benefici. Questi includono un miglioramento dell'efficienza nell'utilizzo dei nutrienti, una riduzione dell'impatto ambientale derivante dall'uso eccessivo di fertilizzanti e una maggiore produttività delle colture. L'agricoltura biologica, in particolare, trae vantaggio dalle zone omogenee nel contesto di una gestione integrata delle risorse. Studi come quello condotto da Ortega et al. (Ortega, 2007) hanno evidenziato che l'adozione di una strategia di gestione delle zone omogenee nell'agricoltura biologica può favorire una migliore distribuzione delle risorse organiche e nutrienti nel suolo, migliorando la fertilità e la resa delle colture. Inoltre, l'agricoltura di precisione sfrutta le informazioni fornite dalle zone omogenee per adattare le pratiche agronomiche in modo specifico a ciascuna area. L'utilizzo di tecnologie avanzate, come i sistemi di posizionamento globale (GPS) e i sensori, consente un'applicazione mirata di input come fertilizzanti, acqua e fitofarmaci nelle diverse zone omogenee. Questo approccio, come evidenziato da alcuni autori (Hedley, 2015), migliora l'efficienza nell'uso delle risorse, riduce i costi di produzione e minimizza l'impatto ambientale.

I risultati del lavoro di tesi hanno confermato che la sola gestione virtuosa dei residui colturali che prevede il loro interrimento a fine ciclo, non è sufficiente a preservare nel tempo il contenuto di sostanza organica del suolo, e anzi che se la gestione della fertilità non prevedesse un'ulteriore integrazione di sostanza organica sotto altra forma (es. letame, compost, pollina, sovescio), in un arco temporale relativamente breve (meno di 200 anni) la dotazione in sostanza organica del suolo tenderebbe all'esaurimento. Premettendo, che i risultati sono preliminari e si riferiscono ad unica annata agraria, e che tale annata era il primo anno di transizione verso il regime biologico, e che quindi non prevedeva la distribuzione di concimi minerali, che probabilmente nel suolo era presente fertilità residua in termini di elementi nutritivi derivanti da annate passate in cui si eseguiva la concimazione minerale, è innegabile comunque il ruolo chiave che riveste la dotazione in sostanza organica del suolo. Infatti, la produzione o comunque i parametri biometrici monitorati sono risultati significativamente diversi per effetto del fattore zona.

I risultati della tesi confermano che la gestione adeguata dei residui colturali, che prevede l'interrimento alla fine del ciclo, da sola non è sufficiente a mantenere nel tempo il livello di sostanza organica nel suolo, come confermato anche da altri studi (Deligios, 2017) condotti sul carciofo. Al contrario, senza un'integrazione aggiuntiva di sostanza organica sotto forma di letame, compost, pollina o sovescio, nel giro di un periodo relativamente breve (meno di 200 anni), il contenuto di sostanza organica nel suolo tenderebbe ad esaurirsi (Deligios, 2021).

È importante sottolineare che questi risultati sono preliminari e si riferiscono a un'unica stagione agraria, che coincideva con il primo anno di transizione verso l'agricoltura biologica. Inoltre, va considerato che in questa stagione non sono stati utilizzati concimi minerali, ma è probabile che nel suolo fosse presente una certa fertilità residua derivante dalle stagioni precedenti in cui erano stati utilizzati concimi minerali. Nonostante queste considerazioni, è innegabile il ruolo fondamentale svolto dalla sostanza organica del suolo. Infatti, la produzione della carciofaia e i parametri biometrici monitorati hanno mostrato differenze significative in relazione alla zona considerata.

Inoltre, sono necessarie alcune considerazioni sugli aspetti economici della gestione della fertilità del suolo, soprattutto riguardo ai costi associati al ripristino del tenore di sostanza organica attraverso l'utilizzo di fonti come la pollina. Considerando anche le fluttuazioni di resa che spesso caratterizzano le colture in regime biologico, potrebbe essere opportuno adottare diverse strategie che, nel complesso, contribuiscono a mantenere stabile il contenuto di sostanza organica nel suolo. Alcuni autori (Deligios, 2017) hanno ipotizzato, ad esempio, l'introduzione di colture leguminose intercalari tra due cicli di carciofo o la rotazione del carciofo stesso con altre specie orticole. Un'altra tecnica che può contribuire a preservare la sostanza organica nel suolo è l'utilizzo del sovescio, specialmente se basato su specie leguminose. In questo caso, oltre all'effetto diretto sulla sostanza organica, anche se a breve termine, vi è un significativo arricchimento di elementi nutritivi come l'azoto (fino a 150 kg ha⁻¹ per stagione, a seconda della specie utilizzata) (Doltra, 2013); (Valkama, 2015). Queste strategie consentono di mantenere un equilibrio tra la gestione della fertilità del suolo e gli aspetti economici, fornendo un approccio sostenibile per la coltivazione del carciofo in regime biologico.

CONCLUSIONI

Lo scopo della seguente tesi è stato quello di affrontare le nuove sfide del contesto agricolo europeo, analizzando quelle che sono le problematiche inerenti alla degradazione dei suoli, della strategia *Farm-to-Fork* per il raggiungimento degli obiettivi del green deal europeo, e individuando le possibili soluzioni. Una di queste, consiste nella gestione aziendale mediante regime di produzione biologico avvalendosi dell'applicazione delle tecniche di agricoltura di precisione, in modo tale da lavorare in un'ottica di efficientamento degli input immessi nel sistema ed evitare impieghi eccessivi al fine di operare in un'ottica di sostenibilità sia economica che aziendale.

È stato affrontato un caso studio specifico, andando ad analizzare una prova sperimentale condotta nell'azienda carcioficola (varietà spinoso Sardo) Sarciofo, sita nel comune di Uri (SS) e orientata a transire verso il regime di produzione biologico.

Mediante l'adozione delle tecniche di agricoltura di precisione è stato possibile studiare la variabilità spaziale delle caratteristiche del suolo quali rapporto C/N, pH, il contenuto di carbonio organico, contenuto di argilla, limo e sabbia e determinazione del contenuto di sostanza organica.

L'individuazione delle zone omogenee ha evidenziato differenze produttive pari al 18 % tra la Zona 1 (dove è presente un maggior contenuto di sostanza organica) e la Zona 2 (dotata di una minore disponibilità).

È stato evidenziato che l'apporto di sostanza secca a seguito dell'interramento dei residui colturali a fine ciclo sono in grado di andare a sopperire per la gran parte dei nutrienti richiesti dalla coltura, ma non sono sufficienti in un'ottica di bilancio equilibrato. A seguito dell'immissione della pollina è stato evidenziato l'evidente capacità della stessa di andare a raggiungere un bilancio vicino alla neutralità, ma con la manifestazione di carenze che dovranno essere obbligatoriamente colmate mediante delle concimazioni apposite durante il ciclo colturale.

L'applicazione di tecniche gestionali tramite l'ausilio dell'agricoltura di precisione potrebbe garantire un grande risparmio sia in termini economici (i quali si aggirano intorno al 27%) che ambientali, in quanto garantisce un ottimo efficientamento delle risorse impiegate

ed evitare che si abbia una perdita eccessiva di nutrienti andando a subire fenomeni di lisciviazione.

In definitiva possiamo dire che le sfide dell'agricoltura del futuro sono ardue e non facili da superare. L'aumento dei prezzi degli input e la riduzione sempre maggiore dei margini di guadagno necessitano nell'adozione di un approccio gestionale, basato sull'utilizzo consapevole delle risorse al fine di incrementare l'efficiamento degli stessi e diminuire gli sprechi.

BIBLIOGRAFIA

- Bivand, R., Pebesma, E., Gomez-Rubio, V., 2013. Applied spatial data analysis with R. Second edition. Springer, NY. <https://asdar-book.org/>.
- Bivand, R. P. E. G.-R. V., 2013. Hello World: Introducing Spatial Data. In: *Applied Spatial Data Analysis with R*. New York: Springer.
- Casa, R., 2017. *Agricoltura di precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali*. s.l.:Edagricole .
- Ceccon, P. F. M. G. C. M. M. O. S. e. a., 2017. *Agronomia*. I a cura di Napoli: Edises srl.
- Commissione Europea, 2020. *A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system*. [Online].
- Commissione Europea, 2021a. *EU Organic Action Plan*. [Online] Available at: https://agriculture.ec.europa.eu/farming/organic-farming/organic-action-plan_en
- Commissione Europea, 2021b. *Strategia dell'UE per il suolo per il 2030: Suoli sani a vantaggio delle persone, degli alimenti, della natura e del clima*. [Online].
- Commissione Europea, 2022. *Organic farming*. [Online] Available at: https://agriculture.ec.europa.eu/farming/organic-farming/organics-glance_it
- Commissione Europea, 2023. *MONITORING EU AGRI-FOOD TRADE*. [Online].
- Corte dei Conti Europea, 2018. *Combattere la desertificazione nell'UE*, s.l.: s.n.
- Deligios, e. a., 2017. Stable Nutrient Flows In Sustainable and Alternative Cropping Systems of Globe Artichoke.. *Agronomy for sustainable development*, 37(6), p. 54.
- Deligios, e. a., 2021. C-sequestration and resilience to climate change of globe artichoke cropping systems depend on crop residues management.. *Agron. Sustain. Dev.* , Volume 41, p. 20.

- Deligios, P. F. R. T. M. F. R. & L. L., 2021. C-sequestration and resilience to climate change of globe artichoke cropping systems depend on crop residues management. *Agron. Sustain. Dev.*, Volume 41.
- Diacono, M. F. A. F. R. C. S. D. B. C. T. E. M. F., 2016. Combined agro-ecological strategies for adaptation of organic horticultural systems to climate change in Mediterranean environment. *Italian Journal of Agronomy*.
- Doltra, J. O. J., 2013. The role of catch crops in the ecological intensification of spring cereals in organic farming under Nordic climate. *Eur. J. Agron.*, Volume 44, pp. 98-108.
- Drinkwater, L. W. P. & S. M., 1998. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature*, p. 262–265.
- Erikson, B. W. D., 2015. Precision agricultural services dealership survey results. *Department of Agricultural Economics*, p. 37.
- Food and Agriculture Organization, 2022. *THE STATE OF FOOD SECURITY*. [Online].
- Gamage, A. G. R. G. J. J. N. K. N. S. P. M. O., 2023. Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming System*, Volume 1, p. 100005.
- Gebbers, R. & A. V., 2010 . Precision agriculture and food security. *Science*, 5967(327), pp. 828-831.
- Gomiero, T. P. M., 2011. Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture. *Plant Sciences*, p. 103.
- Halberg, N., 2012. Assessment of the environmental sustainability of organic farming: Definitions, indicators and the major challenges. *Canadian Journal of Plant Science*, 92((6)), pp. 981-996..
- Hedley, C., 2015. The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms.. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(1), pp. 12-19.
- IFOAM, 2009. *Principles of organic agriculture*. [Online].
- Kitchen, N. S. C. F. D. W. W., 2002. Precision Agriculture. *Springer*, p. 341–351.
- Landrum, C. C. A. M. T. Z. D. Z. J. & D. B. D., 2015. An approach for delineating homogeneous within-field zones using proximal sensing and multivariate geostatistics.. *Agricultural water management*, Volume 147, pp. 144-153.

- Lattanzio, V. K. P. L. V. C. A., 2009. Globe artichoke: A functional food and source of nutraceutical ingredients. *Journal of Functional Foods*, 1(2), pp. 131-144.
- Lynch, D., 2022. Soil Health and Biodiversity Is Driven by Intensity of Organic Farming in Canada. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, pp. 2-3.
- MacRae, R. F. B. & M. R., 2007. Economic and social impacts of organic production systems. *CANADIAN JOURNAL OF PLANT SCIENCE*, pp. 5-6.
- Meier, U. B. H. B. L. F. C. H. H. H. M. L. P. D. S. U. S. R. V. d. B. T. W. E. Z. P., 2009. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants-history and publications. *JOURNAL FÜR KULTURPFLANZEN*, Volume 61, p. 41–52.
- Mercer, W. H. A., 1911. The Experimental Error of Field Trials. *Journal of Agricultural Science*, pp. 107-132.
- Muhie, S., 2022. Novel approaches and practices to sustainable agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, Volume 10, p. 100446.
- Mulla, D., 1991. Using geostatistics and GIS to manage spatial patterns in soil. In: G. Kranzler, a cura di *Automated Agriculture for the 21st Century*. St. Joseph: Am. Soc. Agric. Eng, pp. 336-345.
- Mulla, D., 1993. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield. In: P. R. R. a. L. W. Robert, a cura di *Site Specific Crop Management*. Madison: American Society of Agronomy, pp. 15-26.
- Mulla, D. H. M., 1988. *Mapping soil test results from large irrigation circles*. Washington, Agricultural Experimental Station Technical Paper No. 8597.
- Musu, V., 2013. *Stima dell'apporto di sostanza organica al suolo in sistemi per la coltivazione del carciofo in regime biologico*. Sassari: Tesi di Laurea Magistrale, Università di Sassari.
- Nemes, N., 2009. *Comparative analysis of organic and non-organic farming systems: a critical assessment of farm profitability*, s.l.: s.n.
- Oliver, M. A., 2010. An Overview of Geostatistics and Precision Agriculture. *Springer*, pp. 1-34.
- Oliver, M. B. T. M. B., 2013. *An overview of precision agriculture*. s.l.:Routledge.
- Ortega, R. A. & S. O. A., 2007. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility.. *Computers and Electronics in agriculture*, 58(1), pp. 49-59..

- Parlamento Europeo, 2023. [Online]
 Available at:
https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20200618STO81513/green-deal-europeo-la-chiave-per-un-ue-sostenibile-e-climaticamente-neutrale?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=DSA&at_goal=TRG&at_audience
- Pebesma, E. B. R., 2005. Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5((2)), p. 9–13.
- Piras, F., 2012. *Codifica fenologica edinamica dell'assorbimento minerale in Cynara cardunculus var. scolymus*. Sassari: Tesi di Dottorato, Università di Sassari.
- SINAB, 2023. [Online]
 Available at: <https://www.sinab.it/content/bio-statistiche>
- Statistics - Food and Agriculture Organization, 2023. [Online]
 Available at: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Valkama, E. L. R. K. H. T. E., 2015. Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields. *Agric. Ecosyst. Environ.*, Volume 203, pp. 93-101.
- Winqvist, C. A. J. a. B. J., 2012. Effects of organic farming on biodiversity and ecosystem. *ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES*, pp. 192-198.
- WRB, 2014. *International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps..* Rome: FAO.