DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DEL SUOLO IN AZIENDE DELL'EMILIA ROMAGNA SOGGETTE A MORIA DEL PERO (P*yrus communis* var. Abate Fètel)

EVALUTATION OF SOIL QUALITY IN FARMS OF EMILIA ROMAGNA AFFECTED BY PEAR DECLINE (P*yrus communis* var. Abate Fètel)

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
SIMONE BOCCHINI

Relatore:
DOTT.SSA ELGA MONACI

Correlatori:
PROF. COSTANTINO VISCHETTI

PROF. DAVIDE NERI

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE 5

ELENCO DELLE FIGURE 6

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI 8

PREMESSA 9

CAPITOLO 1 . INTRODUZIONE 10

1.1 Strategia UE per il suolo 10

1.2 La sostanza organica e il recupero della fertilità dei suoli agricoli 11

1.3 Fertilità dei suoli agricoli 14

1.4 Fertilità fisica 14

1.4.1 Tessitura 15

1.4.2 Struttura 18

1.4.3 Bilancio aria/acqua 21

1.4.4 Temperatura 23

1.5 Fertilità biologica 23

1.6 Indicatori biochimici di qualità del suolo 27

1.7 Fertilità chimica 31

1.8 Cambiamenti climatici 36

1.9 I suoli dell'Emilia-Romagna 37

CAPITOLO 2 . SCOPO DELLA TESI 45

CAPITOLO 3 . MATERIALI E METODI 46

3.1 Sito sperimentale 46

3.2 Analisi biochimiche dei suoli 48

3.2.1 Determinazione del carbonio organico (metodo Walkey-Black) 48

3.2.2 Determinazione della respirazione basale 49

CAPITOLO 4 . RISULTATI E DISCUSSIONI 54

4.1 Proprietà fisiche e chimiche dei suoli 54

4.2 Proprietà biochimiche - respirazione basale e contenuto di biomassa microbica dei suoli..... 64

CONCLUSIONI 74

BIBLIOGRAFIA 76

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1-1-Tipologie strutturali e caratteristiche del suolo 20
Tabella 4-1-Principali proprietà fisico-chimiche dei suoli analizzati 57
Tabella 4-2-Contenuto di macroelementi assimilabili negli 8 suoli delle aziende coinvolte nella sperimentazione..... 60
Tabella 4-3-Contenuto di microelementi assimilabili negli 8 suoli delle aziende coinvolte nella sperimentazione..... 63
Tabella 4-4- Punteggio assegnato ad ogni intervallo di valori individuato per gli indicatori di fertilità biochimica presi in esame 71
Tabella 4-5- Punteggio assegnato ad ogni indicatore misurato e derivato nei suoli di pereto 72
Tabella 4-6- Punteggio associato alla fertilità biochimica dei suoli 72

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1-Gradi della tessitura 16
Figura 1-2-Classificazione USDA per il continente europeo 16
Figura 1-3-Tasso medio annuo di erosione del suolo in Europa..... 19
Figura 1-4-Tempo richiesto dall'acqua per percolare in profondità nel suolo in funzione della diversa tessitura del suolo..... 22
Figura 1-5-Contenuto di carbonio organico in EU 24
Figura 1-6-Risposta della coltura alla biodisponibilità degli elementi della nutrizione.... 33
Figura 1-7-Regola delle 4R in un'ottica di gestione integrata della nutrizione e ottimizzazione della pratica di fertilizzazione..... 35
Figura 1-8-Terre dei dossi abbandonati del fiume Po..... 40
Figura 1-9-Terre calcaree dei dossi fluviali 40
Figura 1-10-Terre parzialmente decarbonate della pianura pedemontana 41
Figura 1-11-Limitazioni alla crescita delle varietà di pero Abate e Conference su portinnesti di cotogno BA29 e Sydò 42
Figura 1-12-Limitazioni alla crescita delle varietà Abate e Conference su portinnesti Franco e Farrold 40 42
Figura 3-1-Ubicazione geografica degli impianti oggetto di studio 46
Figura 3-2-Metodo di campionamento 47
Figura 3-3-Prova di incubazione allestita e titolazione di campioni..... 50
Figura 3-4-Campioni prima e dopo il passaggio in stufa a 120°C..... 52
Figura 3-5-Reazione a caldo in ambiente acido per permettere l'ossidazione del carbonio solubile..... 53
Figura 4-1-Regressione lineare tra contenuto di azoto totale (Ntot) e contenuto di sostanza organica (SO) 54
Figura 4-2- I anno di sperimentazione – contenuto di biomassa microbica (istogrammi arancioni) e quantità di CO_2 cumulata (istogrammi verdi) sviluppata durante un periodo di incubazione di 28 giorni (± errore standard della media) 64
Figura 4-3-Regressione lineare tra CO_2 sviluppata e contenuto di SO (I anno) 65

Figura 4-4- Regressione lineare tra contenuto di Cbiom e SO (I anno)..... 66
Figura 4-5- II anno di sperimentazione – contenuto di biomassa microbica (istogrammi arancioni) e quantità di CO_2 cumulata (istogrammi verdi) sviluppata durante un periodo di incubazione di 28 giorni (± errore standard della media) 67
Figura 4-6- Regressione lineare tra CO_2 sviluppata e contenuto di SO (II anno) 68
Figura 4-7- Regressione lineare tra contenuto di Cbiom e SO (II anno) 68
Figura 4-8- Dati medi dei due anni di sperimentazione – contenuto di biomassa microbica (istogrammi arancioni) e quantità di CO_2 cumulata (istogrammi verdi) sviluppata durante un periodo di incubazione di 28 giorni (± errore standard della media) 69
Figura 4-9- Regressione lineare tra contenuto di Cbiom e SO 70

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

Norg	Azoto organico
Ntot	Azoto totale
S.O	Sostanza organica
$CaCO_3$	Calcare
PAC	Politica Agricola Comune
CO_2	Anidride carbonica
ATP	Adenosina trifosfato
WSC	Carbonio solubile in acqua
MBC	Carbonio della biomassa microbica
POC	Particolato organico di carbonio
POXC	Carbonio ossidabile
SOC	Carbonio organico del suolo
MBC	Contenuto di biomassa microbica
SBR	Attività della respirazione basale
BFI	Indice di fertilità biologica
qCO_2	Quoziente metabolico
qM	Quoziente di mineralizzazione
CO_2bas	Respirazione basale giornaliera
Cbiom	Carbonio della biomassa microbica
CO_2cum	Respirazione basale del suolo

PREMESSA

Il suolo è una risorsa naturale fondamentale che fornisce beni e servizi essenziali all'uomo e al mondo intero. Rappresenta la base della vita sul nostro pianeta in grado di sostenere la produzione agricola primaria di alimenti, fibre, legna da ardere, combustibili e altre materie prime di varia natura. Basti pensare che il 95% del nostro cibo proviene dal suolo per rendere l'idea di quanto questa risorsa sia indispensabile nell'ottica di garantire l'approvvigionamento alimentare a tutta la popolazione mondiale.

Il suolo rappresenta un ecosistema complesso e diversificato del pianeta dove dimorano miliardi di organismi e microrganismi in grado di regolare e controllare, la qualità dell'aria e dell'acqua. Infatti, può trattenere, accumulare, filtrare e trasformare innumerevoli sostanze, come l'acqua, gli elementi utili alla nutrizione, il carbonio regolandone il ciclo. È un ecosistema in grado di controllare e mitigare gli effetti del cambiamento climatico.

Tuttavia, l'attuale contesto storico in cui viviamo, dal rapido incremento demografico accompagnato impone necessariamente una gestione sostenibile del suolo per ridurre i fenomeni degradativi e quindi l'insicurezza alimentare.

È importante porre in atto delle azioni che tengano conto che il suolo, è una risorsa non rinnovabile destinata a degradarsi lentamente nel tempo se gestita in maniera non ottimale. Secondo quanto riportato dalla FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), il 33% dei nostri suoli risulta degradato e pratiche di gestione non sostenibili, come la progressiva conversione di aree boschive in suoli arabili, l'intensificazione colturale, la fertilizzazione spinta e le lavorazioni profonde, dell'ultimo secolo hanno portato alla continua perdita di qualità delle terre coltivabili. Le recenti stime europee sullo stato di salute dei suoli in Europa e nel mondo non sono confortanti, anzi sembrerebbero mostrare un netto peggioramento della situazione, con il 55% dei suoli degradati.

Sono state individuate diverse minacce all'ecosistema riconducibili a erosione, perdita di carbonio organico, salinizzazione, impermeabilizzazione, compattazione, contaminazione e perdita di biodiversità. Nello specifico, per i suoli agricoli la perdita di sostanza organica è causa della perdita di fertilità dovuta al peggioramento delle proprietà fisico-chimiche e biologiche.

Capitolo 1. INTRODUZIONE

1.1 **Strategia UE per il suolo**

L'Europa ha recepito e fatto sue le istanze di protezione della risorsa suolo e ha tracciato dapprima la roadmap strategica per la conservazione e il recupero della qualità dei suoli e, negli anni più recenti, attraverso la definizione di politiche comunitarie, ha definito le linee guide che i vari stati dovranno perseguire per tutelare tale risorsa.

In ambito agricolo, la nuova PAC, appena entrata in vigore, prevede un maggiore sostegno in favore di un suolo sano, in linea con diversi obiettivi del Green Deal, principalmente quelli incentrati su paesaggio, biodiversità, risorse naturali e azioni per il clima. Ad esempio, la nuova politica agricola comunitaria prevede l'uso di uno strumento di sostenibilità per le aziende agricole relativo alle pratiche di fertilizzazione. Nello specifico, nuovi sistemi di produzione agricola dovranno essere applicati per limitare la diffusione ambientale e la contaminazione dei comparti suolo-acqua-aria ad opera di nutrienti e pesticidi. Dovranno essere poste in atto misure per indicare all'agricoltore come ottimizzazione l'uso degli input chimici soddisfacendo i reali fabbisogni colturali ed evitando surplus nutritivi o di eccedere nella quantità distribuita di fitofarmaci con un vantaggio sia economico per sé stesso che ambientale per l'ecosistema.

Inoltre, l'UE ha recentemente definito, con la Strategia per il suolo per il 2030, una serie di azioni e misure concrete per la protezione, il ripristino e l'uso sostenibile dei suoli. Questa nuova legge, che verrà emanata in maniera giuridica e ufficiale entro l'anno corrente (2023), punta a contribuire a raggiungere suoli sani entro il 2050, con azioni concrete da attuare già a partire dal 2030. In particolare, tali azioni comprendono:

- migliorare il quadro di riferimento per il monitoraggio del suolo in Europa
- sostenere la ricerca e l'innovazione sul suolo
- proteggere le zone umide e i suoli organici per una migliore mitigazione dei cambiamenti climatici
- promuovere l'economia circolare e incrementare l'uso conservativo dei suoli
- bonifica dei siti contaminati
- sviluppare una strategia comune per prevenire la desertificazione

- sensibilizzare l'opinione pubblica sull'importante ruolo dei suoli nella vita degli organismi terrestri

Questi quindi i principali provvedimenti che verranno certamente implementati e redatti in maniera formale e ufficiale.

Un ulteriore passo in avanti in questo senso della Commissione Europea si concretizza con l'iniziativa "A Soil Deal for Europe" nell'ambito del progetto Horizon Europe. Si tratta di un accordo tra la Commissione e la Rete delle Regioni Europee per la Ricerca e l'Innovazione (ERRIN) che mobilita regioni, comuni, organizzazioni, imprese, scuole e cittadini per un impegno locale nella creazione di 100 "living lab", luoghi dedicati alla sperimentazione in campo e all'individuazione di aziende basate sulla sostenibilità delle produzioni agricole per presentare e divulgare le buone pratiche agli agricoltori, al fine di guidare la transizione verso suoli sani nelle aree rurali e urbane entro il 2030. Gli obiettivi della strategia sono:

- ridurre la desertificazione e la salinizzazione
- incrementare gli stock di carbonio organico del suolo
- fermare l'impermeabilizzazione del suolo e ridurre il consumo del suolo nelle aree urbane
- ridurre l'inquinamento del suolo
- prevenire l'erosione
- migliorare la struttura e la biodiversità del suolo
- ridurre l'impronta globale
- migliorare l'alfabetizzazione sui servizi offerti dal suolo

In particolare, per i suoli agricoli, risulta importante incrementare la quantità di carbonio organico essendo la sostanza organica considerata come elemento chiave che controlla l'equilibrio tra le proprietà fisico-chimiche e biologiche, correlate strettamente al concetto di fertilità del suolo agricolo.

1.2 **La sostanza organica e il recupero della fertilità dei suoli agricoli**

La EU già nel 2006 aveva individuato il ripristino del contenuto di sostanza organica come necessario al recupero della qualità dei suoli agricoli e posto una soglia minima di riferimento uguale al 2%.

La qualità dei suoli agricoli è definita come la capacità del suolo di sostenere la produzione primaria, di promuovere e mantenere la qualità dell'acqua, superficiale e profonda, dell'aria e di sostenere la biodiversità e il ciclo biogeochimico degli elementi nutritivi.

I benefici di cui le culture agrarie possono disporre se messe a dimora su un suolo di qualità sono molteplici:

- resistenza a stress abiotici
- resistenza ai patogeni
- migliore sviluppo radicale e vegetativo
- buon contenuto e biodisponibilità di elementi nutritivi
- buona capacità di ritenzione idrica
- migliore efficienza metabolica nell'assorbimento e nella trasclocazione degli elementi della nutrizione
- qualità organolettica
- relazioni mutualistiche con microrganismi utili

Per il raggiungimento di tale obiettivo (soglia minima di SO al 2%) è necessario passare dalle produzioni agricole con tecniche convenzionali a nuove forme di agricoltura basate sull'applicazione di pratiche meno impattanti, come ad esempio l'agricoltura integrata di secondo livello e l'agricoltura biologica.

Entrambe mirano ad un uso controllato di tutti i mezzi di difesa disponibili, dando priorità a quelli a più basso impatto ambientale in un'ottica di agricoltura sostenibile, ma esistono sostanziali differenze tra le due tipologie.

Nell'ambito della produzione integrata si distingue tra produzione integrata di primo livello e produzione integrata di secondo livello. Quella di primo livello coincide in sostanza con quella che veniva precedentemente chiamata agricoltura convenzionale e l'unico vincolo a cui sono chiamati a rispondere gli agricoltori che aderiscono a questo sistema di coltivazione è solo quello di essere a conoscenza della presenza di modelli previsionali o di bollettini agri-meteo e di mezzi di controllo alternativi a quelli chimici.

Nell'agricoltura integrata di secondo livello l'agricoltore aderisce in maniera ferma e vincolata ai disciplinari di produzione integrata, ottimizzando l'uso dei mezzi a sostegno della produzione e della difesa delle colture integrando i mezzi chimici con quelli tecnici (fisici, meccanici, agronomici e biologici) a ridotto impatto ambientale.

Si cerca di limitare il più possibile l'utilizzo degli input chimici preferendo strategie flessibili (non interventi calendarizzati o subordinati al superamento di una soglia di rischio).

L'agricoltore che adotta questo sistema di coltivazione in maniera volontaria beneficia di un finanziamento comunitario, in quanto, per ogni coltura e avversità, i vincoli da rispettare secondo disciplinare sono più stringenti rispetto a quelli di etichetta dei prodotti fitosanitari.

L'agricoltura biologica esclude totalmente i mezzi chimici e, per questo motivo, per quanto riguarda la fertilità del suolo è previsto solo il ricorso a concimazioni e ammendamenti organici e sovesci. Per quanto riguarda le lavorazioni, il biologico non prevede comunque nessun tipo di vincolo.

Anche l'agricoltura conservativa e quella di precisione sono considerate nuove forme di agricoltura più sostenibili e meno impattanti: la prima si impegna a disturbare il meno possibile la risorsa suolo, lasciando che sia sempre presente una minima copertura su di esso; la seconda invece punta alla razionalizzazione delle risorse, riducendo gli input tramite l'ausilio di trattamenti mirati solo dove c'è la reale necessità.

In particolare, con l'agricoltura conservativa, che non prevede l'esclusione a priori degli input chimici, si cerca di passare dalla lavorazione alla non lavorazione oppure alla minima lavorazione, facendo pacciamature prima vive e poi morte. Si seminano diverse miscele di cover crops (colture di copertura), in funzione dell'ordinamento produttivo e del periodo di semina, che vengono fatte crescere per produrre più biomassa possibile e poi vengono abbattute e sui residui, lasciati in campo come strato pacciamante, si semina successivamente con una seminatrice di precisione la coltura da reddito, senza effettuare la lavorazione del suolo. Così facendo si evita anche lo sviluppo delle erbe infestanti grazie alla copertura pacciamante, che limita l'arrivo di luce e acqua al suolo.

Questo tipo di agricoltura viene ampiamente utilizzata negli ambienti pedoclimatici dove scarseggiano le precipitazioni. In questi areali si effettua l'abbattimento dopo una pioggia e il suolo si mantiene in questo modo umido più a lungo, grazie alla copertura pacciamante che limita l'evaporazione dell'acqua dal suolo.

Infine, i diversi mix di cover crops, tramite il loro diverso sviluppo dell'apparato radicale (graminacee con radici di tipo fascicolate, espanse e superficiali oppure leguminose e brassicacee con radici fittonanti, compatte e profonde), svolgono una lavorazione biologica del suolo.

Nei suoli italiani, per via del ridotto periodo di tempo che intercorre tra una coltura principale e la successiva nella grande maggioranza degli ordinamenti produttivi, questa pratica delle colture di copertura suscita poco interesse, quindi nei nostri ambienti, quando si parla di agricoltura conservativa, si intende principalmente la non lavorazione o semina su sodo, pratica molto più comune e ormai ampiamente utilizzata.

L'agricoltura di precisione rappresenta invece una moderna tecnica di coltivazione che, come già precedentemente accennato, prevede l'uso della tecnologia (droni, sensori remoti, sensori di prossimità, sistemi satellitari GPS ecc..) per razionalizzare l'uso degli input chimici solo dove strettamente necessario.

Così facendo si limitano sia i surplus nutritivi, dovuti alle eccessive concimazioni, che possono portare a lisciviazione, che l'uso massiccio dei fitofarmaci, evitando rischi di fitotossicità per le piante oltre che una migliore sostenibilità per l'uomo e per l'ecosistema.

Inoltre, con questa tipologia colturale c'è il duplice vantaggio per l'agricoltore sia in termini di risparmio economico, per la riduzione dei costi dovuti al minor utilizzo, che di salute e sicurezza per sé stesso, venendo meno a diretto contatto con le sostanze chimiche.

1.3 **Fertilità dei suoli agricoli**

Il suolo rappresenta un sistema dinamico in continua evoluzione e la fertilità del suolo stesso influenza in maniera diretta la resa agronomica in termini qualitativi e quantitativi. Chiaramente la produttività dipende direttamente anche dalle caratteristiche varietali delle diverse colture e dall'adattabilità di queste all'ambiente pedoclimatico della zona; ma se la fertilità del suolo è compromessa, lo sarà anche la crescita delle piante e persino i genotipi migliori e più performanti potrebbero incorrere in stress idrici e nutrizionali.

Il termine di fertilità è spesso associato alla pratica di fertilizzazione e alla disponibilità degli elementi della nutrizione, in realtà la fertilità è un concetto molto più complesso che riferisce ad uno stato in cui le proprietà fisiche, biologiche e chimiche del suolo sono contemporaneamente coinvolte in un equilibrio dinamico e mutevole. Queste tre proprietà sono tra loro strettamente correlate e si auto-condizionano per cui un disturbo su una delle tre componenti si trasmette sulle altre due e in definitiva sulla pianta condizionandone l'adattamento e lo sviluppo.

Per cui si può assumere che la fertilità sia uno stato complesso derivante da tre diverse fertilità: fisica, biologica e chimica.

1.4 **Fertilità fisica**

Le proprietà fisiche sono in grado di regolare lo sviluppo e la crescita radicale, il movimento dell'aria, dell'acqua e il trasporto e l'assorbimento degli elementi nutritivi negli strati di suolo.

L'analisi e la valutazione delle condizioni fisiche di un suolo agricolo è estremamente importante e utile ad individuare lo spessore dello strato fertile del suolo e a definire un'opportuna gestione agronomica in termini di lavorazioni, concimazioni e apporti irrigui.

I vari fattori della fertilità fisica sono in grado di regolare la capacità idrica di campo e la biodisponibilità di acqua e aria, la capacità di scambio cationico e lo stato di ossidazione degli elementi nutritivi, la tendenza al compattamento e all'erosione, gli habitat della pedo-fauna e della microflora, la germinazione e lo sviluppo dell'apparato radicale (Monaci et al. 2017).

Le quattro componenti fondamentali della fertilità fisica che permettono lo svolgimento dei fenomeni sopracitati sono:

- tessitura
- struttura
- bilancio aria/acqua
- temperatura

1.4.1 *Tessitura*

Con il termine tessitura si intende la distribuzione percentuale delle diverse frazioni granulometriche, ossia le categorie dimensionali delle particelle costitutive del suolo.

Le frazioni granulometriche sono distinte in scheletro e terra fine a seconda che le particelle costitutive del suolo abbiano rispettivamente diametro superiore o inferiore a 2 mm. Lo scheletro è ritenuto la parte inerte, mentre la terra fine è la frazione attiva del suolo e luogo di tutte le reazioni chimiche e biochimiche del suolo.

Inoltre, da essa dipendono tutte le interazioni tra matrice solida, soluzione circolante e aria tellurica. Secondo la classificazione USDA la terra fine si suddivide ulteriormente in:

- sabbia (2-0.05 mm)
- limo (0.05-0.002 mm)
- argilla (< 0.002 mm)

I diversi gradi della tessitura sono riportati nella figura 1-1. La figura 1-2 evidenzia la classificazione dei suoli europei secondo il sistema USDA.

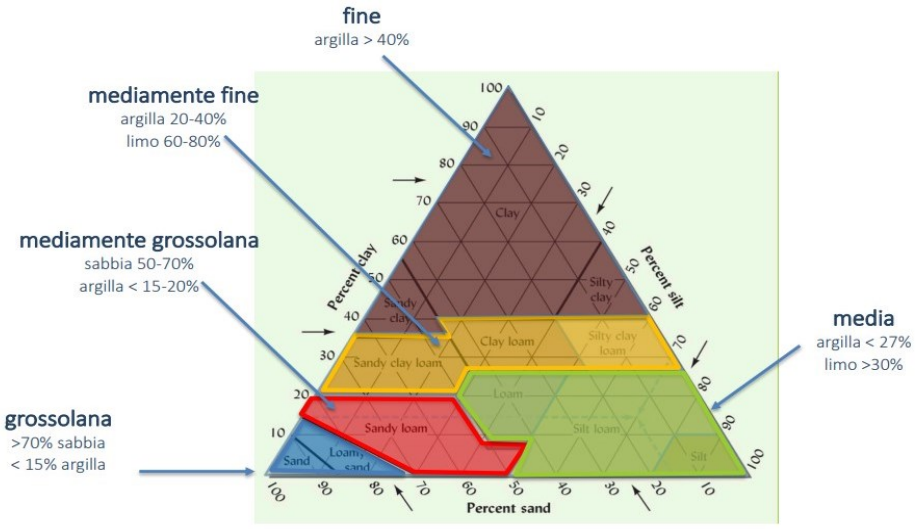

Figura 1-1-Gradi della tessitura

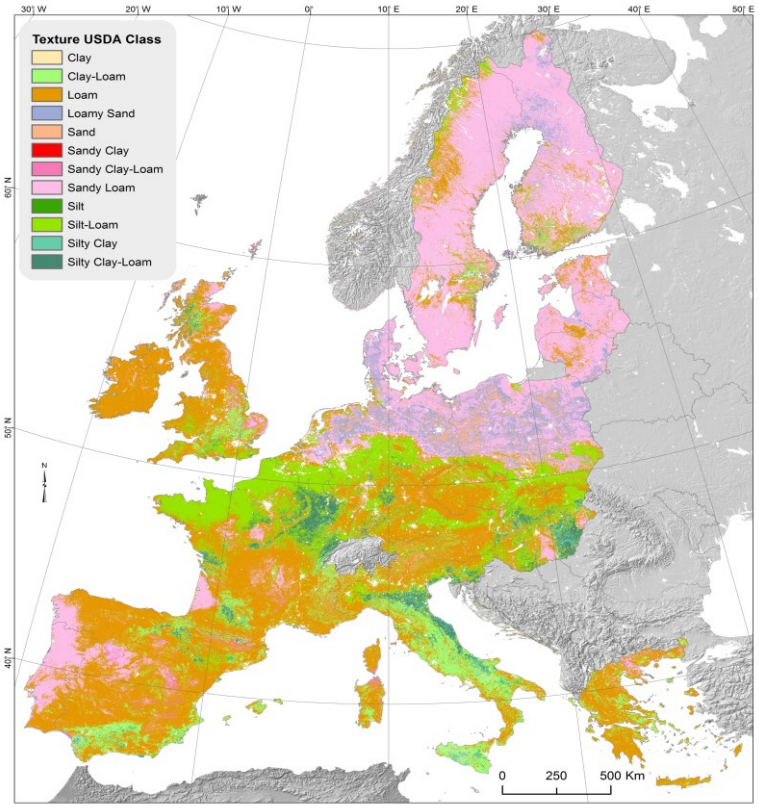

Figura 1-2-Classificazione USDA per il continente europeo

Nella frazione sabbiosa predominano i minerali primari (silicati e non silicati), che non hanno subito alterazioni.

In quella argillosa predominano i minerali secondari (argille e ossidi-idrossidi), che hanno subito alterazione chimica e fisica.

La frazione limosa possiede caratteristiche intermedie tra i due tipi.

La differenza che si fa rispetto ai diversi gradi di tessitura (i.e. grossolana, mediamente grossolana, mediamente fine, fine e media) trova ragione nell'assimilazione delle migliori pratiche agronomiche da adottare in riferimento alle lavorazioni o alla distribuzione di fertilizzanti organici e inorganici. Infatti, la gestione agronomica deve adeguarsi al diverso grado tessiturale in ragione della diversa risposta del suolo nel trattenere acqua e nutrienti, ad accumulare sostanza organica o a essere lavorato.

Gli elementi della nutrizione e l'acqua possono essere trattenuti, dalla componente minerale e organica del suolo, tramite interazioni di diversa intensità (es interazioni elettrostatiche, legami ionici e di coordinazione)

La capacità di trattenere gli elementi, cioè la forza di queste interazioni, varia in base alla tessitura del suolo. In particolare, un suolo con tessitura grossolana o mediamente grossolana (tendenzialmente sabbioso) avrà una ridotta densità di carica e quindi una scarsa capacità di trattenere nutrienti ed acqua, perché le particelle sabbiose, essendo di più grandi dimensioni, espongono meno superficie specifica e creano poche zone di contatto.

Al contrario, un suolo a tessitura fine o mediamente fine (tendenzialmente argilloso) avrà una elevata densità di carica e di conseguenza un'ottima capacità di trattenere acqua ed elementi della nutrizione, perché le particelle argillose, essendo di più piccole dimensioni, espongono più superficie specifica creando molte più zone di contatto.

La tessitura del suolo influenza la biodisponibilità degli elementi anche in ragione del fatto che nelle particelle più grossolane gli elementi sono inclusi nei reticoli cristallini di maggiori dimensioni e quindi meno solubili. Il ferro, ad esempio, in un suolo sabbioso è quasi completamente immobilizzato nella frazione minerale del suolo e quindi molto poco disponibile per le piante, che potrebbero manifestare sintomi di carenza, uno su tutti la clorosi ferrica.

La mineralizzazione della sostanza organica è invece più veloce in un suolo a tessitura grossolana (maggiore presenza di aria) che in un suolo a tessitura argillosa.

Occorre tenere presente che la tessitura di un suolo non cambia, vale a dire che non può essere modificata se non con particolari interventi, anche molto onerosi, che comunque modificano solo leggermente e in maniera reversibile la granulometria. È opportuno quindi adattare la tecnica agronomica al tipo di tessitura e prevedere pratiche di lavorazione e concimazione diverse.

Un suolo di medio impasto (tessitura franca) è considerato un suolo ideale dal punto di vista agronomico, visto che presenta il giusto equilibrio tra le frazioni granulometriche (sabbia 7-27%, limo 28-50%, sabbia<52%) in cui le proprietà negative di una frazione vengono compensate da quelle positive dell'altra.

1.4.2 *Struttura*

La struttura è una componente fondamentale per la qualità di un suolo. Essa consiste nella formazione di aggregati di diversa forma e stabilità che derivano dall'associazione di frazioni organiche e inorganiche in condizioni naturali. Tali aggregati conservano la propria forma grazie alle forze di coesione che si instaurano tra le componenti. Affinché si formi struttura stabile, è necessario che tali componenti, in particolare la formazione di complessi organo-minerali, cementifichino tra di loro in un aggregato stabile.

La stabilità è fondamentale perché permette, ad esempio, alle particelle terrose di resistere alle piogge battenti (nei climi umidi), all'abrasione e all'erosione del vento (nei climi aridi) e dipende dalla natura dei cementi che partecipano all'aggregazione. Cementi argillosi sono aggregati poco stabili, mentre cementi organici e ferrici sono aggregati molto più stabili.

Anche le dimensioni degli aggregati influiscono sulla stabilità:

- micro-aggregati: hanno diametro inferiore a 0.25 mm e sono caratterizzati da maggiore stabilità alla disgregazione, imputabile alle minori dimensioni che limitano l'accesso dei microrganismi e alla formazione di complessi organo-minerali con prevalenza di molecole organiche di tipo umico che possono presentare carbonio aromatico, tendenzialmente apolare e maggiormente recalcitrante alla degradazione
- macro-aggregati: hanno diametro superiore a 0.25 mm e sono caratterizzati da minore stabilità alla degradazione a causa delle maggiori dimensioni e della presenza di molecole organiche di più facile degradazione (peptidi e oligosaccaridi) e mucillagini microbiche o fungine.

Quindi, la stabilità degli aggregati è un ottimo indicatore del ripristino della qualità del suolo agricolo ed è importante avere una struttura stabile soprattutto nei suoli tendenzialmente argillosi o franchi, poiché incrementa l'infiltrazione riducendo l'erosione, migliora il bilancio aria-acqua, l'apporto di elementi nutritivi e si riduce il rischio di asfissia e rottura delle radici. La formazione di struttura, seppur di minore entità, è considerata importante anche nei suoli tendenzialmente sabbiosi, al fine di preservare il quantitativo di sostanza organica che, in

questo tipo di suoli, si perde molto più velocemente a causa del tasso di mineralizzazione molto più rapido.

La formazione di struttura è importante al fine di ridurre, come detto in precedenza, gli eventi erosivi che riducono lo spessore del suolo ed in particolare del suolo superficiale più fertile, limitando la capacità di accumulo di acqua che quindi si muove più velocemente verso gli invasi producendo, in caso di eventi piovosi di forte intensità, esondazioni.

Si stima che il 93,5% dei fenomeni di erosione riguardino le aree agricole, e che la causa principale sia riconducibile alla presenza di suolo nudo e alle lavorazioni e quindi alla scarsa infiltrazione dovuta alla formazione di crosta e alla formazione della suola di lavorazione. In Italia l'erosione è stimata in 10-20 t ha^{-1}/anno.

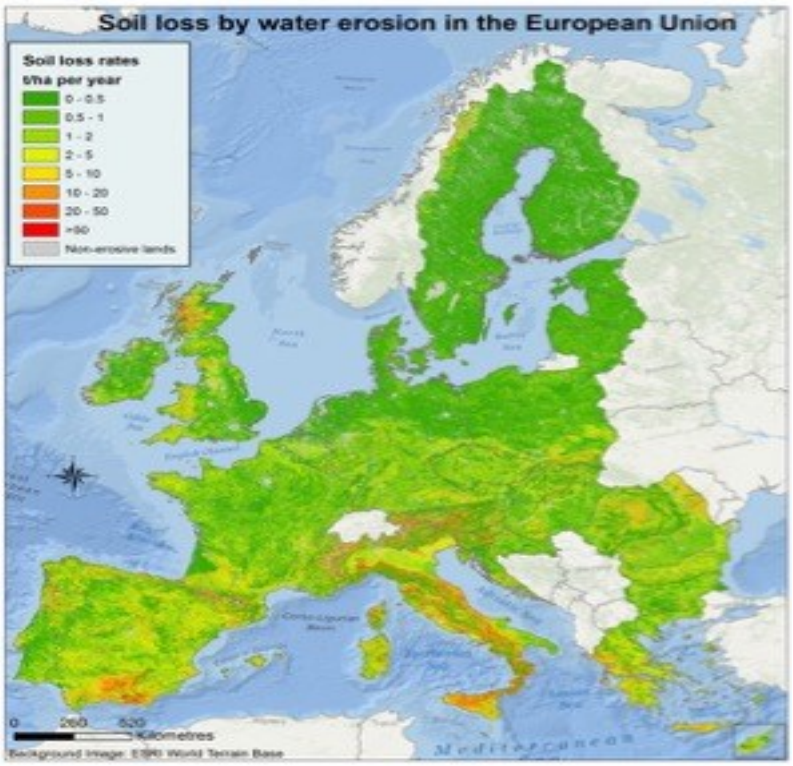

Figura 1-3-Tasso medio annuo di erosione del suolo in Europa

La struttura, a differenza della tessitura, è una proprietà che cambia e può essere modificata.

Le pratiche agronomiche che favoriscono la formazione e il mantenimento della struttura sono:

- alternanza di colture a diverso sviluppo radicale per favorire la lavorazione biologica del suolo e il rilascio di essudati radicali, nonché l'attività della biomassa microbica a diverse profondità del suolo

- protezione del suolo dagli agenti abiotici, quali pioggia battente e vento, tramite l'utilizzo di cover-crops o pacciamature
- interramento dei residui colturali
- lavorazioni di tipo conservativo, come la lavorazione minima, quella a strisce o la semina su sodo
- uso sostenibile dei fitofarmaci

In base alla forma che assumono gli aggregati, la struttura del suolo può essere classificata secondo quanto riportato in Tabella 1-1.

Tabella 1-1-Tipologie strutturali e caratteristiche del suolo

TIPOLOGIE DI STRUTTURA	CARATTERISTICHE
Granulare	Insieme incoerente di particelle indipendenti
Massiva	Masse compatte più o meno resistenti alla rottura
Grumosa	Molto porosa e ricca in complessi argillo-umici. Si origina negli orizzonti superficiali di suolo coltivato in presenza di molta sostanza organica stabilizzata e intensa attività biologica
Poliedrica angolare	Aggregati angolari e sub-angolari, tipici degli orizzonti superficiali con scarso humus e scarsa attività biologica di suoli a tessitura franca e limosa
Prismatica	Parte superiore dell'aggregato piatta o arrotondata in suoli ricchi di Na^{+} e Mg^{2+}. Si forma in presenza di elevato contenuto di argilla
Lamellare	Orizzonti di superficie nei suoli forestali o non coltivati

La struttura ottimale, in un suolo agricolo di qualità, è da considerarsi quella grumosa.

1.4.3 *Bilancio aria/acqua*

La soluzione circolante è il centro delle reazioni chimiche e biochimiche del suolo e rappresenta il collegamento tra parte solida e parte liquida del suolo. il movimento e la biodisponibilità dell'acqua variano in funzione dello stato in cui può venire a trovarsi l'acqua stessa, che può essere:

- acqua legata alle particelle colloidali
- acqua nello spazio suolo-radice
- acqua di percolazione nei macropori
- acqua trattenuta nei micropori

La porosità, che rappresenta il rapporto percentuale del volume degli spazi vuoti rispetto al volume totale del suolo, regola la presenza dell'aria e dell'acqua nel suolo, definendone il rapporto e lo stato idrico nel suolo.

In base a come l'acqua riempie i pori del suolo, si possono distinguere tre stati idrici: saturazione (H_2O riempie tutti i pori e quella contenuta nei macropori viene persa per gravità), capacità idrica di campo (H_2O disponibile per le piante perché trattenuta nei micropori) e punto di appassimento (l'H_2O è così fortemente trattenuta dalla frazione solida che la pianta non riesce ad assorbirla).

Questo diverso comportamento dipende dalle forze di adesione e di coesione che esistono ed insistono nel sistema suolo-acqua.

Quando prevalgono le forze di coesione, che sono quelle che si instaurano tra i dipoli dell'acqua, si ha poca aderenza tra le particelle minerali del suolo e l'acqua, che quindi percola in profondità sotto l'azione della forza gravitazionale. Quanto appena detto è quello che avviene nei macropori per l'acqua gravitazionale, proprio perché quando il diametro del poro è più grande, minori sono le molecole che tendono a aderire alle pareti e quindi alla matrice solida del suolo. La macroporosità difatti viene definita come porosità utile ad accogliere aria.

Nei micropori invece succede l'esatto opposto, cioè, sono le forze di adesione tra dipoli dell'acqua e particelle del suolo a prevalere, per cui l'acqua viene trattenuta in sottili lembi proprio perché il diametro dei pori è più piccolo e di conseguenza sono maggiori le molecole d'acqua che aderiscono alle pareti delle particelle di suolo. La microporosità è difatti la porosità utile a trattenere acqua.

Il movimento dell'acqua viene influenzato anche dalla struttura e dalla tessitura (figura 1-4).

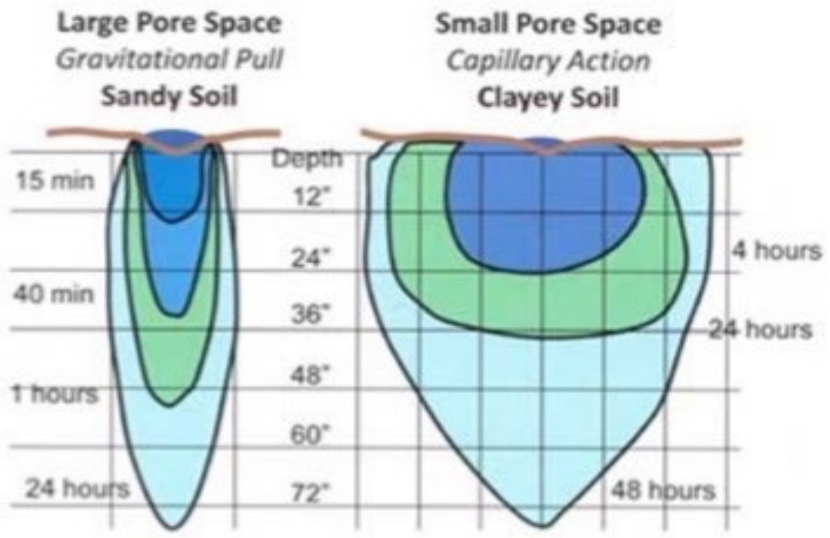

Figura 1-4-Tempo richiesto dall'acqua per percolare in profondità nel suolo in funzione della diversa tessitura del suolo

L'aria nel suolo (aria tellurica), che è composta principalmente da azoto (78%), ossigeno (21%) e anidride carbonica (0.035%), è del tutto simile a quella atmosferica e viene ricambiata attraverso fenomeni di diffusione e flusso di massa. In particolare, l'ossigeno è essenziale per l'attività respiratoria delle radici e per quella della biomassa microbica. In considerazione dei processi biologici che avvengono nel suolo, la composizione dell'aria tellurica può subire piccole variazioni riconducibili a consumo di ossigeno e formazione di anidride carbonica, ma anche trasformazione di azoto molecolare in azoto organico (ad opera di batteri azoto-fissatori liberi e simbionti) o riduzione dell'azoto minerale (nitrico e ammoniacale) in ossidi di azoto e ammoniaca.

La radice vive circondata sempre da un velo di acqua utile a favorire i processi osmotici e l'assorbimento dei nutritivi, ma è importante evitare che lo strato di acqua intorno alla radice non diventi troppo spesso per non ridurre la quantità di ossigeno a livelli incompatibili con la vita della radice stessa.

La disponibilità di ossigeno nel suolo è tanto importante quanto la presenza di un adeguata disponibilità di acqua, perché questo gas è indispensabile per l'ossidazione dei fotosintetati a livello radicale e garantisce l'energia necessaria all'assorbimento dei nutritivi (es. ATP-asi di membrana)

1.4.4 *Temperatura*

La temperatura è il fattore della fertilità fisica in grado di regolare i processi chimico-biologici, l'intensità dell'evapotraspirazione e lo sviluppo radicale delle colture.

La temperatura di crescita radicale varia in funzione della specie e della varietà, ma l'optimum per la maggior parte delle specie sembra essere quello di 24°C

La temperatura del suolo superficiale varia in funzione dell'esposizione, della pendenza, della latitudine e della morfologia del territorio.

Sebbene il suolo sia un cattivo conduttore di calore, la dotazione di sostanza organica, le lavorazioni e la presenza dei residui colturali possono incidere in maniera significativa sulla temperatura del suolo.

La sostanza organica umificata incide per via del suo colore più scuro e quindi suoli con una buona dotazione di sostanza organica si riscaldano meglio di suoli più poveri.

Un suolo lavorato si riscalda meglio di un suolo a sodo o lavorato con lavorazione minima perché, determinando discontinuità sulla superficie, l'aria atmosferica può penetrare ed avere maggior contatto con matrice solida. In tempi recenti, caratterizzati da eventi estremi come il verificarsi di prolungati periodi di siccità, la temperatura del suolo superficiale può incrementare a valori che ostacolano la crescita e il funzionamento della radice così come l'attività della biomassa microbica. Il danno che la pianta può subire è molto elevato in considerazione del fatto che la radice è adattata a vivere e si mantiene funzionale a temperature decisamente più basse di quelle a cui è esposta la parte area.

1.5 **Fertilità biologica**

La sostanza organica alimenta tutti i processi fisici e biochimici che avvengono all'interno del suolo ed è il substrato energetico utilizzato dai microrganismi edafici per il loro metabolismo, attraverso cui rilasciano elementi utili alla nutrizione vegetale.

È considerata il principale parametro di qualità e salubrità di un suolo per le importanti funzioni benefiche che svolge nel suolo agrario:

- rilascia elementi nutritivi e forma le sostanze umiche (macromolecole di neo-genesi resistenti alla degradazione, di natura chimica eterogenea, non bene definita e in continua evoluzione)
- favorisce l'adsorbimento di micro e macroelementi, aumenta la CSC (capacità di scambio cationico) fino al 70% e riduce le perdite per lisciviazione
- aumenta la capacità di ritenzione idrica dei suoli grazie alle molecole umiche, in grado di trattenere acqua fino a 20 volte il loro peso

- forma aggregati strutturali stabili nel suolo grazie alla sua frazione colloidale
- induce la crescita laterale delle radici delle piante
- favorisce il riscaldamento e quindi tutti i processi metabolici nel suolo grazie alla sua colorazione scura
- esercita un forte potere tampone a rapide variazioni di pH
- migliora l'aerazione del suolo
- incrementa la biomassa microbica

Nell'ultimo secolo si è assistito ad un netto calo del contenuto di sostanza organica dei suoli europei, soprattutto in quelli più a sud caratterizzati da clima mediterraneo. In queste aree, la combinazione delle alte temperature del periodo primaverile-estivo e delle pratiche agricole meno virtuose, come ad esempio le arature profonde e il suolo privo di copertura vegetale per buona parte dell'anno, favorisce la rapida mineralizzazione e la veloce degradazione della sostanza organica. Nelle regioni del centro-nord Europa il fenomeno è meno marcato e la degradazione avviene molto più lentamente a causa delle temperature più basse che caratterizzano il clima continentale della zona.

Difatti il contenuto in S.O nei territori dei paesi del nord Europa è maggiore di quello nei suoli del sud Europa, dove il livello è ben al di sotto del 2% (figura 1-5)

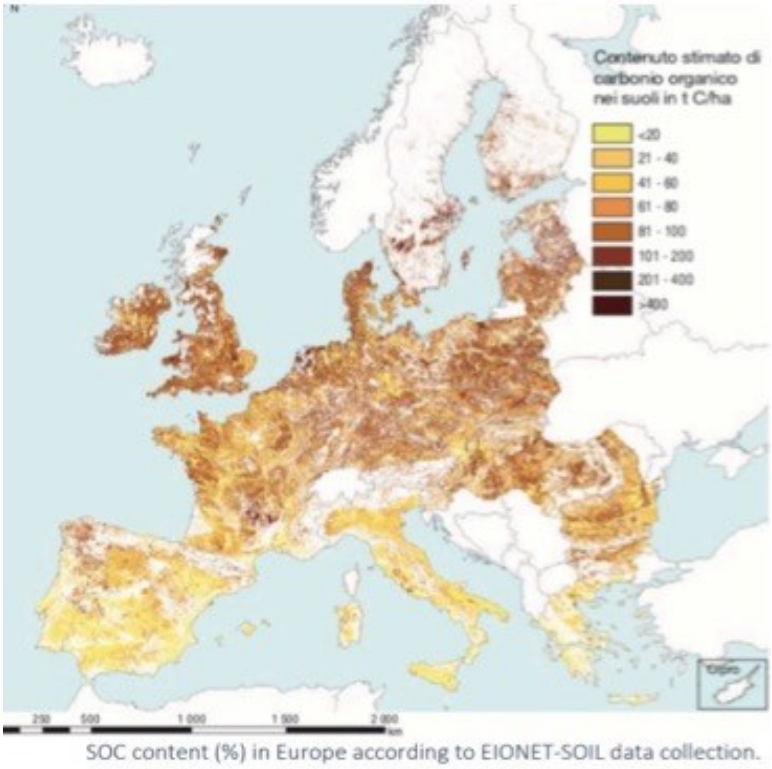

Figura 1-5-Contenuto di carbonio organico in EU

Uno degli obiettivi europei in questo senso è quello di riportare il quantitativo di sostanza organica di tutti i suoli almeno al 2%, che è considerato il limite minimo a garantire un livello di fertilità biologica accettabile.

Visti i benefici che apporta, risulta evidente che incrementare o quantomeno preservare il contenuto di S.O dei nostri suoli, tramite l'adozione di pratiche agricole sostenibili, è importante per frenare il peggioramento qualitativo della maggioranza dei suoli agricoli.

L'ammendamento e la concimazione organica, l'uso di colture di copertura e la lavorazione minima o la non lavorazione sono le operazioni colturali da prediligere per recuperare la fertilità organica.

La composizione della frazione organica nel suolo è diversa a seconda della fonte di origine, che è prevalentemente di natura vegetale (fonte primaria) e/o animale (fonte secondaria), ma può essere costituita anche dalle spoglie di micro-, meso- e macrorganismi edafici e in ultimo da sostanze umiche.

Ne consegue che la caratterizzazione della S.O è piuttosto difficoltosa, poiché la frazione non umificata è combinata alla frazione umica, e la struttura chimica di questa ultima, è sconosciuta in quanto materiale di neo-genesi che si forma in condizioni molto diverse di roccia madre, copertura vegetale, organismi e microrganismi edafici e clima. Ad ogni modo, le maggiori componenti della S.O. risultano essere i carboidrati e la lignina, mentre composti azotati, composti solforati, composti fosforati, lipidi risultano componenti minoritarie.

I carboidrati sono la forma organica di carbonio più presente e abbondante, difatti si stima che il 58% della sostanza organica sia costituito da carbonio.

A seconda della natura chimica e dell'attività di biodegradazione operata dai microorganismi che ne determina i tempi di permanenza nel suolo, si distinguono tre forme di sostanza organica:

- *LABILE:* molecole polari di piccole dimensioni che possono essere facilmente degradate e rapidamente mineralizzate dai microorganismi (si parla di giorni/mesi) ottenendo elementi minerali utili alla nutrizione vegetale. Si tratta solitamente di C organico solubile, quindi presente in soluzione circolante, in forma di glucosio, amminoacidi e peptidi
- *ATTIVA:* sono molecole più grandi, prevalentemente costituite di cellulosa, emicellulosa e chitina, che vengono degradate dai microorganismi in tempi maggiori, si parla di mesi/anni, poiché il quantitativo di carbonio organico è più elevato, la struttura più complessa.

- *RECALCITRANTE:* si tratta di lignina, tannini e sostanze umiche che insieme vanno a formare la riserva di carbonio organico. Questa frazione di sostanza organica può rimanere nel suolo anche per centinaia di anni.

Quando un residuo organico arriva al suolo va incontro alla sua decomposizione, che avviene in quattro tappe lungo la catena del detrito. La prima tappa è la senescenza naturale della materia organica con iniziali reazioni di ossidazione ed idrolisi e quindi parziale degradazione dei polimeri. Successivamente, l'artro-pedofauna (organismi detritivori) opera la frantumazione meccanica, che consiste nella riduzione delle dimensioni dei residui vegetali. Così facendo aumenta la superficie specifica delle particelle, facilitando il successivo attacco microbico. Come effetti benefici indiretti relativi all'azione svolta dall'artro-pedofauna nei confronti della fertilità del suolo abbiamo il rimescolamento del suolo e il miglioramento dell'areazione e della permeabilità. Tuttavia, l'efficienza della mineralizzazione a questo livello è ancora piuttosto bassa.

I veri mineralizzatori entrano in gioco nello step successivo e sono funghi, batteri e attinomiceti, cioè la biomassa microbica che, idrolizza ulteriormente i polimeri organici fin qui formatisi, di più facile degradazione, in oligomeri e monomeri. Il primo attacco è operato dai batteri, gli organismi predominanti che regolano, con la loro attività metabolica, circa il 90% dell'attività biochimica del suolo. In seguito, intervengono i funghi, più specializzati nella degradazione della lignina, e per ultimo gli attinomiceti (batteri filamentosi).

La quarta ed ultima tappa del processo è la formazione delle riserve di carbonio organico, le sostanze umiche. Durante il processo di umificazione le molecole organiche cambiano la loro composizione: diminuisce il contenuto di carbonio e idrogeno, mentre aumenta il contenuto di azoto e ossigeno. Inoltre, l'umificazione, a differenza della mineralizzazione, non comporta la completa trasformazione del C organico in C minerale (CO_2).

La biomassa microbica rappresenta la principale responsabile della trasformazione del carbonio e degli elementi nutritivi nel suolo, è contemporaneamente "sink and source" (pozzo e sorgente) di tali elementi, e ne controlla il ciclo biogeochimico attraverso il processo di mineralizzazione e umificazione della sostanza organica.

1.6 **Indicatori biochimici di qualità del suolo**

Il contenuto dei microrganismi nel suolo è uno degli indicatori biochimici che meglio fornisce informazione, assieme all'attività metabolica e alla diversità dei microrganismi stessi, circa la qualità e la fertilità dei suoli agricoli.

L'attività enzimatica è la principale responsabile per i processi biochimici che regolano il rilascio di micro e macronutrienti presenti in forma organica nel suolo.

Gli agenti maggiormente coinvolti nella decomposizione della materia organica sono gli enzimi extra-cellulari prodotti dalle cellule microbiche (Burns et al, 2013).

La produzione di questi enzimi è una priorità fondamentale nell'acquisizione di energia e nutrienti per la cellula microbica.

Tuttavia, la sintesi enzimatica extra-cellulare richiede un costo energetico ai microrganismi in termini di ATP: si stima che 1-5% del C e dell'N assimilati venga impiegato in questo senso. Questa quota rappresenta comunque un investimento energetico inferiore a quello necessario per la sintesi degli enzimi endocellulari, perché la cellula microbica preferisce destinare le sue risorse energetiche verso forme di N e C che non saranno poi disperse nell'ambiente circostante.

Quando nel suolo sono presenti condizioni di stress o di assenza del substrato, il costo energetico da sostenere per la sintesi degli enzimi extracellulari potrebbe risultare fatale alla sopravvivenza della cellula microbica stessa e quindi l'attività metabolica viene reindirizzata al mantenimento dell'integrità e della vitalità cellulare piuttosto che alla crescita.

La cellula microbica dispone di un meccanismo chiamato "quorum sensing" con cui riesce in qualche modo a percepire le condizioni presenti nell'ambiente suolo circostante, come ad esempio la posizione, la qualità e la quantità del substrato. Solamente quando la quantità dei fattori induttori supera una certa soglia limite, la cellula comprende che le condizioni sono sicure e il suo gene regolatore codifica per un determinato sistema enzimatico che in seguito viene espresso.

Esistono 3 tipologie di enzimi extracellulari sintetizzati dalle cellule microbiche:

- Ectoenzimi: che rimangono legati alla cellula microbica. Possono essere protetti da biofilm polisaccaridici o essere protesi alla cellula a mezzo del cellulosoma, un piede proteico che facilita la stabilità e l'efficienza di idrolisi enzimatica durante l'attacco. Grazie a questi enzimi, i microrganismi riescono a ridurre le perdite per diffusione ed a competere meglio per l'acquisizione del substrato, ma si riduce la capacità di utilizzo di substrati distanti dalla cellula.

- Enzimi che diffondono dalla cellula microbica: sono più resistenti alla degradazione perché presentano strutture termostabili in grado di resistere a variazioni di pH e all'attacco delle proteasi.
- Enzimi immobilizzati: associati con minerali argillosi, acidi umici e molecole organiche particolarmente resistenti che ne permettono l'attività per lunghi periodi. Rappresentano la riserva di attività biochimica del suolo e contribuiscono al turn-over della sostanza organica in condizioni di stress microbico.

I sistemi enzimatici di interesse per la fertilità biochimica dei suoli agricoli sono le ossidoreduttasi, che catalizzano le reazioni di ossidoriduzione, e le idrolasi, che catalizzano la rottura di numerosi e diversi legami in presenza di acqua.

Fanno parte delle idrolasi le glucosidasi (agiscono sui legami glicosidici dell'amido, della cellulosa, della pectina e della chitina), le esterasi (agiscono sui legami esteri), che si dividono in inorganiche (fosfatasi e solfatasi) e organiche (lipasi), le fosfatasi di tipo non esterasico (tra cui l'ATP, che agisce su legami di anidrificazione dell'acido fosforico), le ammidasi (dette anche ureasi, che idrolizzano il legame C-N in ammoniaca e anidride carbonica), le peptidasi (endopeptidasi ed esopeptidasi, che idrolizzano rispettivamente i legami interni ed esterni alla catena polipeptidica), le ossalacetasi (idrolizzano il legame C-C).

Fanno parte invece delle ossidoriduttasi le deidrogenasi (piridina dipendenti e flavina dipendenti) e le ossidasi (ferroporfiriniche e metallo-proteiche).

In particolare, dalla determinazione delle deidrogenasi, che sono sistemi enzimatici endocellulari in grado di funzionare solo se la cellula è viva, si riesce a quantificare la biomassa microbica viva presente nel suolo.

Le ossidasi ferroporfiriniche o catalasi forniscono invece una misura dello stress microbico presente nel suolo.

Le ossidasi metallo-proteiche o fenolossidasi sono invece un gruppo enzimatico che catalizza per la rottura della lignina e che solitamente è dotato di un elemento metallico come cofattore.

Si distinguono all'interno delle fenolossidasi le laccasi e le perossidasi, che hanno entrambe il Cu come cofattore metallico, mentre le perossidasi presentano Fe o Mn come cofattori.

Tutte le proprietà fisiche, chimiche e biologiche sopracitate interagiscono tra di loro in maniera complessa per determinare quanto efficacemente funzionerà il suolo (Bünemann et al., 2018).

È noto che la gestione del suolo e le pratiche colturali alterano i fattori che influenzano quasi tutti i processi biologici nel suolo, nonché l'intero scenario della qualità del suolo per il sistema agricolo (Bhaduri e Purakayastha, 2014).

Ne è un esempio una sperimentazione di 15 anni (Ktrauss et al, 2020) condotta in un contesto di agricoltura biologica su di un suolo a tessitura franco-argillosa che ha messo a confronto l'aratura con la lavorazione minima e una serie di concimazioni fatte con letame maturo solido rispetto ad altre fatte con liquame liquido. I risultati hanno evidenziato che la conversione da aratura a minima lavorazione ha portato a un incremento del carbonio organico del 25 %, della biomassa microbica del 32% e dell'attività enzimatica del 34% nello strato più superficiale del suolo (primi 10 cm).

L'applicazione addizionale di letame maturo ha incrementato del 6% il contenuto di carbonio organico rispetto all'uso del liquame. Inoltre, un'analisi sugli acidi grassi fosfolipidici, condotta parallelamente sugli stessi campioni di suolo ha dimostrato che lombrichi, funghi e protozoi sono più che raddoppiati e che il numero dei batteri è aumentato del 60% con la lavorazione ridotta rispetto all'aratura profonda (Kuntz et al, 2011).

Come già precedentemente accennato, la gestione del suolo (concimazione e lavorazione ad esempio) influisce sulla fertilità e sulla qualità del suolo stesso. Allo stesso tempo, è stato riscontrato che anche i cambiamenti nella copertura vegetale, quindi nella copertura del suolo, incidono significativamente come indicatori funzionali di qualità, poiché modificano le caratteristiche chimico-fisiche dei suoli, alterando ulteriormente le riserve organiche del suolo (Desjardins et al., 2004).

Da questo punto di vista una sperimentazione (Kooch et al., 2023), che comparava la fertilità di un suolo gestito a frutteto con quella di un habitat pascolivo, ha messo in evidenza che le coperture arboree non sono state in grado di migliorare la fertilità del suolo tanto quanto il pascolo, durante i primi dieci anni di vita del frutteto. Tuttavia, dopo 25 anni, i frutteti sono riusciti a migliorare la qualità e la fertilità del suolo rispetto alla coltura del pascolo indipendentemente dal tipo di frutteto. Questo perché, con la crescita degli alberi per 25 anni nei frutteti, il volume delle chiome è aumentato, più residui vegetali sono entrati nel suolo a lungo termine e di conseguenza, sono stati potenziati contenuto di sostanza organica, il biota del suolo, le attività enzimatiche e microbiche rispetto alla copertura dei pascoli. La maggiore produttività delle piante ha accumulato più materia organica nel suolo, influendo sulla popolazione microbica.

Un altro studio ha messo a confronto tre tipi di gestione di frutteto (pescheto di 15 anni, pereto di 20 anni e un frutteto di kiwi di 30 anni) con un campo di cereali preso come riferimento, nella parte sud-orientale dell'Emilia-Romagna.

I risultati hanno mostrato che la conversione della produzione da cereali a frutta ha aumentato in media lo stock di carbonio organico dell'82%, suggerendo ancora una volta che i sistemi di coltivazione a frutteto riescono ad aumentare la capacità di arricchire la sostanza organica del suolo (De Feudis e Missere et al, 2022). Inoltre, i risultati indicherebbero anche che gli agroecosistemi di pesche e pere riescono a promuovere il sequestro del carbonio in maniera molto più significativa delle coltivazioni di kiwi, evidenziando il fatto che anche la tipologia di frutteto incide.

Viste le numerose prove a supporto fornite dalla letteratura scientifica, risulta oggettivo che la coltivazione di colture di copertura è una pratica estremamente efficace per aumentare il contenuto di carbonio organico del suolo (Poeplau e Don, 2015) e che le operazioni colturali che prevedono l'incorporazione dei residui vegetali potrebbero impedire la riduzione del carbonio organico del suolo (Keel et al., 2019).

Il carbonio organico del suolo è uno degli indicatori più importanti della qualità del suolo, ma non riflette necessariamente gli effetti dei diversi usi del suolo in modo particolarmente sensibile, poiché il contenuto totale di carbonio organico cambia in maniera relativamente lenta (Bhattacharjya et al, 2017). Pertanto, è necessario identificare le frazioni di carbonio organico più sensibili alle variazioni e che servono a distinguere le variazioni associate ai cambiamenti nella gestione dei suoli (von Lützow et al., 2007).

Il pool attivo della frazione labile comprende diversi indicatori, tra cui il carbonio solubile in acqua (WSC, water soluble carbon) e il carbonio della biomassa microbica (MBC), mentre il pool più resistente, ma sempre facente parte della frazione labile della sostanza organica, comprende il particolato organico di carbonio (POC) e il carbonio ossidabile (POXC). Queste sono fonti di carbonio estremamente importanti a discriminare la qualità dei suoli agrari, anche perché è noto dalla letteratura scientifica che questi pool si trasformano più rapidamente del carbonio organico totale, in risposta a variazioni nella gestione agricola del suolo, comportandosi come indicatori più sensibili (Benbi et al., 2015). Il WSC, assieme a N, P, e S mineralizzabili, è la fonte principale di energia per i microorganismi del suolo.

La frazione particolata della sostanza organica è anch'essa un ottimo indicatore che per primo risponde ai cambiamenti indotti sull'uso del suolo (Cambardella ed Elliot, 1992).

La biomassa microbica è responsabile della decomposizione della sostanza organica e del ciclo dei nutrienti (Franzluebbers et al., 1999). Difatti, si è visto che un aumento del contenuto

di sostanza organica nel suolo stimola l'attività microbica misurabile attraverso un aumento di respirazione basale del suolo (Cheng et al, 2015).

La respirazione basale, che dipende dalle sostanze umiche, dalla qualità del substrato e da varie proprietà del suolo (Singh et al, 2012), è un importante indicatore utile a comprendere i tempi di permanenza del carbonio negli ecosistemi terrestri (Raich e Tufekciogul, 2000).

Esiste una correlazione positiva tra contenuto di sostanza organica e contenuto dei microrganismi che la usano come fonte di energia e come risorsa carboniosa per costruire biomassa. La S.O è infatti in parte convertita in biomassa microbica, in parte mineralizzata (allontanamento del C organico come CO_2) e in parte umificata stabilizzata nel suolo come frazione di riserva).

L'efficienza d'uso che i microorganismi fanno del carbonio presente sul substrato per costruire biomassa, cioè per accrescersi e riprodursi come cellule microbiche, dipende dal tipo di pool organico, per cui si stima che

- Il 60% del C viene convertito quando si tratta di C composto prevalentemente di zuccheri semplici (monosaccaridi e oligosaccaridi)
- Il 40 % del C si trasforma se è C formato per lo più da cellulosa e/o emicellulosa
- Il 10% del C viene convertito se è C composto di lignina

Sulla base dell'importante ruolo svolto dai microrganismi nella trasformazione della sostanza organica e nel ciclo biogeochimico degli elementi, si può affermare che la componente microbica di un suolo e la sua attività rappresentino i principali indicatori di fertilità e pertanto la misura del contenuto di sostanza organica, della biomassa microbica e della respirazione diventa lo strumento fondamentale per definire lo stato di fertilità dei suoli agricoli e monitorare tale stato nel tempo.

1.7 **Fertilità chimica**

La fertilità chimica riguarda tutte le interazioni che si instaurano nel sistema suolo-pianta circa gli elementi della nutrizione. In altre parole, rappresenta la capacità del suolo di fornire alle colture vegetali il nutrimento di cui necessitano per sostenere la loro crescita e il loro ottimale sviluppo.

Per prima cosa, occorre distinguere tra elementi della nutrizione essenziali e utili.

Quelli essenziali sono insostituibili da altri elementi e direttamente coinvolti nel metabolismo primario della pianta, senza i quali la pianta non riuscirebbe ad accrescersi e

ultimare il suo ciclo biologico (Arnon e Stout 1939). Mentre quelli utili non sono strettamente necessari alla sopravvivenza della pianta, ma ne favoriscono il buon funzionamento fisiologico, rendendola maggiormente resistente a condizioni di stress.

Un possibile deficit di un elemento essenziale compromette la crescita colturale perché ha come effetto diretto o indiretto uno squilibrio fisiologico (es. riduzione della sintesi di clorofilla nelle foglie) che può portare a clorosi o ancor peggio a necrosi dei tessuti fogliari.

Rispetto alla loro concentrazione nei tessuti vegetali invece, i nutrienti si distinguono in macroelementi e microelementi.

I macroelementi sono N, P, K, S, Mg, Ca e sono quelli più abbondanti nei tessuti vegetali con concentrazioni maggiori di 1 g/kg (nel loro insieme i macronutrienti raggiungono il 99% del contenuto totale di nutritivi).

I microelementi sono Fe, Mn, Cu, B, Zn, Mo e sono quelli presenti in quantità minori con concentrazioni inferiori a 0,1 g/kg (1% nel loro insieme rispetto al totale degli elementi).

Gli altri 3 macroelementi della nutrizione C, H, e O non rappresentano un fattore limitante perché presenti abbondantemente in natura e vengono catturati dalle colture agrarie vegetali dall'acqua e dall'aria.

Solitamente, la quantità assorbita dei nutrienti è massima durante la crescita vegetativa perché la gran parte degli elementi è coinvolta nell'attività fotosintetica, che risulta essere massima durante la fase di accrescimento della biomassa vegetale.

Nel suolo gli elementi minerali subiscono diversi processi che ne condizionano la biodisponibilità, cioè la disponibilità per le piante. Tali processi possono essere riassunti in:

- adsorbimento e desorbimento, a carico di tutti gli elementi
- mineralizzazione, organicazione e umificazione, a carico di azoto, fosforo e zolfo
- solubilizzazione e precipitazione, a carico di potassio, calcio, magnesio, fosfato, ferro, manganese e rame, cioè tutti quegli elementi che derivano dall'alterazione minerale

In base al contenuto totale dei nutritivi, le colture possono avere diverse risposte che vanno dalla deficienza acuta (sintomi visibili di crescita ridotta e produzione compromessa dovute a carenze) alla tossicità acuta (evidenti sintomi di crescita rallentata, scarsa resistenza alle malattie e deperimento precoce), passando per tutti i vari step intermedi di deficienza marginale, dotazione ottimale, dotazione di lusso e tossicità marginale.

Tra queste condizioni la presenza di una dotazione di lusso degli elementi nel suolo rappresenta una condizione di costo economico superfluo per l'agricoltore e un rischio per la contaminazione del suolo e degli altri comparti acqua-aria (figura 1-6)

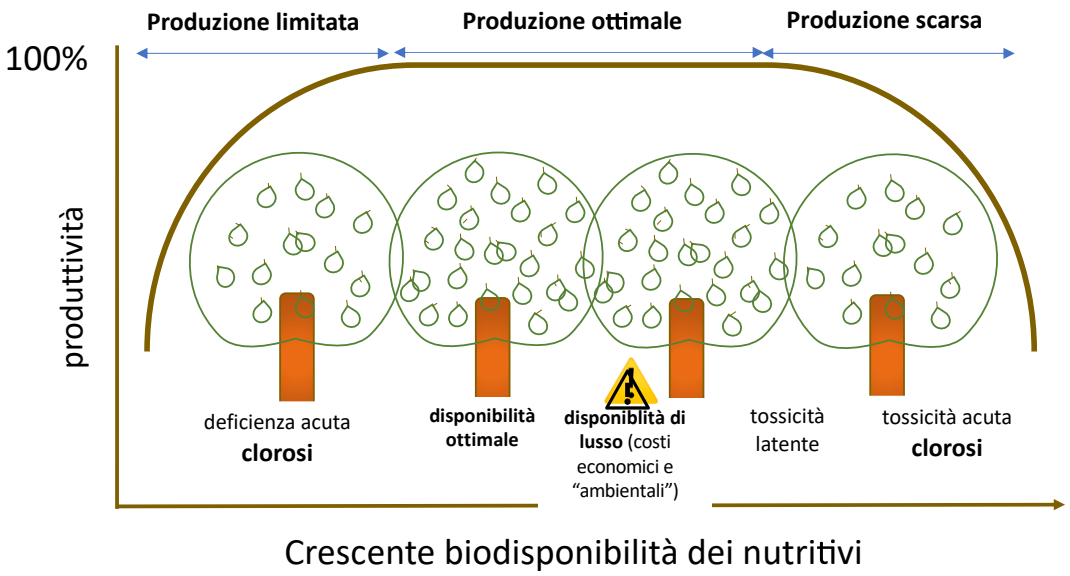

Figura 1-6-Risposta della coltura alla biodisponibilità degli elementi della nutrizione

Ogni elemento della nutrizione vegetale ha comunque una sua via preferenziale di apporto e di allontanamento dal suolo agrario. Le vie di accumulo principali sono la fertilizzazione, le precipitazioni atmosferiche, l'alterazione dei minerali, la mineralizzazione della S.O e dei residui colturali, l'azoto-fissazione e l'assimilazione microbica. Le principali vie di perdita sono invece le asportazioni colturali, la lisciviazione, l'erosione e la volatilizzazione. Le vie di accumulo e di perdita sono condizionate dalla diversa reattività degli elementi chimici e dalle diverse forme chimiche che può assumere uno stesso elemento (es. i diversi stati di ossidazione di N determinano un diverso destino per questo elemento) nonchè dalla tecnica agronomica. Anche la biodisponibilità è influenzata da entrambi questi fattori.

Per biodisponibilità di un nutriente si intende la quantità di elemento che può essere assorbito e utilizzato dalle colture vegetali. Ne consegue che non tutto il contenuto totale di un elemento nel suolo è usufruibile dalla pianta, bensì solamente la parte biodisponibile.

La biodisponibilità degli elementi della nutrizione varia a seconda della porzione di suolo in cui si trova l'elemento stesso. In particolare, nella soluzione circolante (la frazione solubile) si trovano gli elementi prontamente disponibili; nel complesso di scambio (frazione scambiabile) sono presenti gli elementi facilmente disponibili; nella frazione minerale e organica ci sono elementi moderatamente disponibili; e infine nella frazione di riserva, rappresentata da composti minerali e molecole organiche di difficile degradazione, i nutrienti

sono fortemente trattenuti e quindi molto lentamente disponibili o addirittura indisponibili per le piante.

Occorre tenere presente che le sostanze nutritive presenti in soluzione circolante sono in equilibrio con quelle presenti sul complesso di scambio e che tale equilibrio può spostarsi a favore dell'assorbimento radicale o a favore dell'immobilizzazione dell'elemento.

Di solito, la naturale dotazione di nutrienti dei suoli agricoli, tranne qualche eccezione (ad esempio suoli argillosi dove il quantitativo di potassio è più che sufficiente), non è in grado di soddisfare i fabbisogni colturali e di conseguenza la pratica della fertilizzazione, utile ad aumentare la quota di elemento prontamente disponibile alle colture, si rende necessaria per garantire produzioni qualitativamente e quantitativamente accettabili.

Spesso però molti agricoltori incorrono nell'errore comune di sovrastimare il reale fabbisogno delle colture agrarie, perché magari non considerano il quantitativo di nutrienti derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica o dei residui colturali, provocando surplus nutritivi che non sono convertiti dalle colture in un incremento significativo di produzione e che possono diventare pericolosi per l'ambiente. Difatti sarebbe opportuno avere sempre livelli sub-ottimali di un elemento minerale piuttosto che una dotazione in eccesso, proprio perché la sovra-fertilizzazione produce numerosi svantaggi, come ad esempio tossicità da microelementi, lisciviazione e conseguente inquinamento di falda, e sofferenza radicale dovuta a eccessiva salinità.

Per non incorrere in questi errori di sovrastimare o sottostimare il reale fabbisogno della coltura in elementi nutritivi sarebbe opportuno valutare la fertilizzazione in un'ottica di gestione integrata della nutrizione, tenendo conto del sistema colturale generale più che della singola coltura.

In questo senso, risulta evidente che aumentare l'efficienza d'uso dei nutrienti, in termini di resa per unità di fertilizzante impiegato, deve essere la strategia da perseguire.

Per ottimizzare al meglio la pratica della gestione integrata della nutrizione, anche in funzione della sostenibilità ambientale, esiste una metodologia adottabile chiamata regola delle 4R (figura 1-7)

- *Right product:* garantire la massima efficienza di apporto di nutrienti utilizzando il prodotto più adatto in funzione delle condizioni pedoclimatiche e della stagionalità della coltura
- *Right dose:* applicare la dose corretta di fertilizzante, da valutare anche sulla base della naturale dotazione dell'elemento nel suolo, della tipologia colturale e delle pratiche agricole applicate negli anni precedenti

- *Right time:* consiste nello scegliere il giusto periodo di distribuzione in funzione delle effettive dinamiche di assorbimento dell'elemento nutritivo da parte della coltura nel suo periodo di massima richiesta, che corrisponde al picco massimo di assorbimento. Bisogna tenere in considerazione anche le caratteristiche chimico-fisiche del suolo, il clima e il sistema irriguo adottato, se presente, che possono influenzare il rischio di perdite per lisciviazione, volatilizzazione o deriva.
- *Right place:* si intende la corretta modalità di distribuzione, che deve tenere conto del comportamento e della mobilità dell'elemento nel suolo. la mobilità e la capacità di adsorbimento a livello radicale o fogliare dipendono appunto dalle varie forme chimiche in cui sono presenti gli elementi della nutrizione nel sistema suolo-pianta. Per limitare la variabilità spaziale di concentrazione bisogna considerare anche le proprietà del suolo

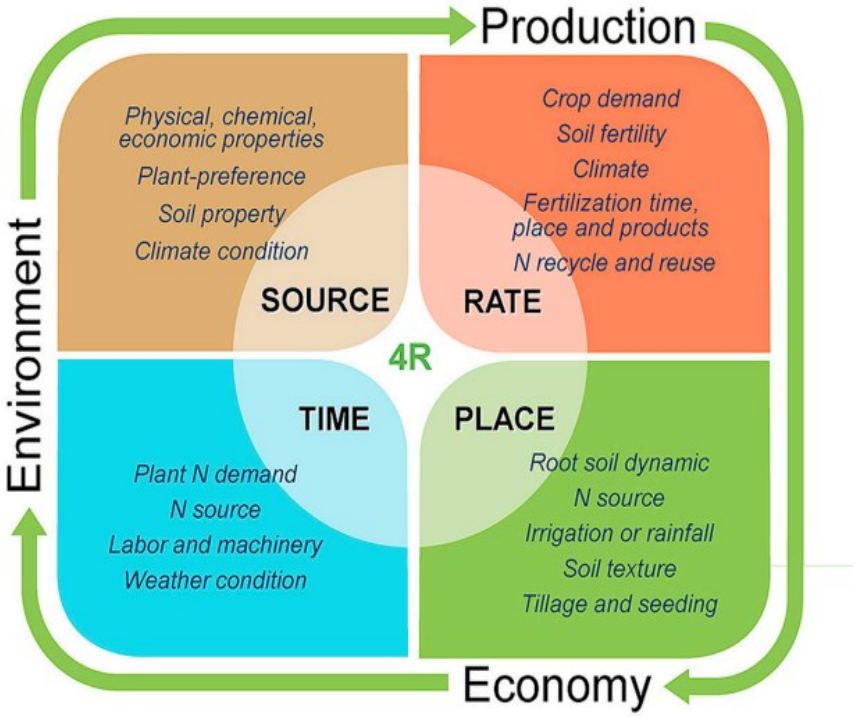

Figura 1-7-Regola delle 4R in un'ottica di gestione integrata della nutrizione e ottimizzazione della pratica di fertilizzazione

1.8 **Cambiamenti climatici**

Il clima rappresenta il fattore primario che influenza le produzioni agricole, proprio per questo, da diversi anni, molte organizzazioni hanno espresso la loro preoccupazione in merito al cambiamento climatico in atto (Cumhur et al 2008).

Negli ultimi anni, sia a livello nazionale che locale, i fenomeni climatici anomali sono stati numerosi ed hanno provocato numerose vittime oltre che ingenti danni economici in diversi settori, comparto agricolo in primis.

Gli effetti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura sono diversi nelle varie parti del mondo e condizionano come potranno essere gestite le produzioni agricole in futuro.

La produttività agricola deve quindi far fronte a questo cambiamento, e tutto ciò si riflette in una diversa gestione agronomica delle colture (irrigazione, gestione del suolo, controllo delle avversità etc.).

Il cambiamento climatico in atto può influenzare negativamente l'attività agricola provocando una diminuzione delle rese, con conseguente spostamento degli areali tipici di produzione delle colture, riduzione della disponibilità di acqua per l'irrigazione, salinizzazione dei suoli.

Una minore quantità di precipitazioni e le alte temperature sono responsabili della riduzione dell'umidità dei suoli in molte aree, limitando l'acqua disponibile per l'irrigazione e compromettendo la crescita delle colture nelle aree non irrigue di molte regioni. (Cumhur et al 2008).

Il mutato quadro climatico è responsabile, inoltre, di cambiamenti nelle proprietà del suolo come la perdita di sostanza organica, la lisciviazione dei nutrienti, la salinizzazione e l'erosione.

Gli effetti del riscaldamento globale sul fabbisogno in freddo, epoca di fioritura, rischio delle gelate, allungamento della stagione vegetativa, epoca di raccolta/maturazione, e qualità della frutta preoccupano sempre più gli agricoltori (Stöckle, C et al 2011).

Negli ultimi anni, la produzione di pere nell'area mediterranea è stata influenzata da queste condizioni climatiche difficili, come gelate tardive e temperature estive elevate e prolungate. Il verificarsi di periodi di siccità prolungati potrebbe ulteriormente compromettere la resa delle pere, aumentando la salinità dei suoli e dell'acqua di irrigazione (Nektarios et al., 2021).

A livello regionale, nei territori dell'Emilia-Romagna oggetto di indagine, sono frequenti i casi di salinizzazione dei suoli per effetto dell'ingresso del cuneo salino, proveniente dal mare, nei fiumi e nelle zone costiere durante i periodi più caldi.

Inoltre, il continuo susseguirsi di annate con inverni miti, gelate tardive ed estati siccitose ha danneggiato in larga parte le produzioni frutticole della regione.

La Abate Fètel, la cultivar più coltivata a livello regionale e la prima a risentire del fenomeno dei cambiamenti climatici, ha subito un brusco declino ma non sarà l'unica varietà ad essere colpita se continueranno a perdurare o addirittura a peggiorare le attuali condizioni.

Particolarmente impattante sul mercato frutticolo è stata l'annata del 2020, con cali drastici della produzione oltre il 50% rispetto all'anno precedente per pesche, susine e albicocche.

Ad oggi, a causa della recente alluvione che ha colpito numerose province dell'Emilia-Romagna nella primavera del 2023, la situazione è peggiorata ulteriormente, con danni al comparto agricolo dell'ortofrutta per miliardi di euro e numerose aziende che sono state costrette all'espianto.

Fenomeni naturali catastrofici di questo tipo, dove i millimetri di pioggia che dovrebbero cadere nel corso di un anno arrivano invece al suolo in poche ore, sono in continuo aumento.

Pertanto, è indispensabile tentare di invertire la rotta utilizzando tutti gli accorgimenti possibili al fine di preservare al meglio ambiente e territorio.

1.9 **I suoli dell'Emilia-Romagna**

I suoli maggiormente idonei per la crescita del pero sono quelli a medio impasto; i portinnesti franchi autoradicati di pero riescono a raggiungere produzioni discrete anche in suoli con argilla superiore al 40 %, purché la gestione agronomica sia attenta a favorire la corretta percolazione delle acque. Al contrario, i portainnesti di cotogno trovano difficoltà a svilupparsi nei medesimi suoli argillosi.

I principali portinnesti di Cydonia oblunga (cotogno) del pero crescono bene nei suoli ben drenati. Nei suoli con problemi evidenti di ristagno entro 50-70 cm è sconsigliabile la coltivazione del pero.

Un elevato contenuto di calcare può condizionare la crescita delle piante, causando difficoltà nutrizionali e il conseguente ingiallimento delle foglie. In particolare, i portinnesti franchi autoradicati crescono bene fino a contenuti del 10% di calcare attivo, mentre i cotogni sono sensibili a contenuti maggiori del 4-5%.

Inoltre, bisogna tenere presente che suolo molto alcalini, con pH elevato (superiore ad 8) inibiscono l'assorbimento del ferro da parte della pianta del pero con il conseguente ingiallimento delle foglie.

Premesso ciò, nel corso degli anni, grazie alla collaborazione di ricercatori nell'ambito del progetto "filiera pero", è stata fatta la caratterizzazione del suolo degli appezzamenti distribuiti nei siti sperimentali delle province di Modena, Bologna, Ravenna e Ferrara.

Tale caratterizzazione ha permesso di formulare la carta dei suoli della pianura emiliano romagnola, con cui si identificano tre tipologie di Terre rappresentative del territorio:

Terre dei dossi abbandonati del fiume Po (Figura 1-8)**:** sono ascrivibili in questa classificazione i suoli di due delle otto aziende considerate nel presente studio. Si tratta delle aziende PEL e TOM situate nel ferrarese. Questo ambiente comprende aree di argine naturale relative al complesso di rami distributori meridionali del delta padano gradualmente abbandonati dal fiume Po nel corso dei secoli. La pendenza varia tipicamente tra 0,05 e 0,2% e le quote sono tipicamente comprese fra 1 e 5 m. Sono suoli pianeggianti e si sono formati in sedimenti alluvionali calcarei, a tessitura media o moderatamente fine e talvolta moderatamente grossolana. Sono molto profondi, molto calcarei e moderatamente alcalini. Presentano una moderata disponibilità di ossigeno, quindi possono presentare condizioni di saturazione idrica (ristagni idrici nel suolo) per alcuni periodi dell'anno. Le difficoltà di drenaggio rendono necessaria l'adozione di un'efficiente rete scolante o drenaggi interrati per l'allontanamento delle acque in eccesso. Nelle stagioni piovose questi suoli possono avere problemi di percorribilità con mezzi meccanici a causa della permeabilità media dei suoli. Sono comunque dotati di buona fertilità naturale ed elevata capacità in acqua disponibile per le piante; non presentano restrizioni significative all'approfondimento e all'esplorazione radicale. La crescita delle colture arboree più sensibili può essere limitata a causa della scarsa disponibilità di ossigeno, dell'alto contenuto in calcare attivo e della fessurabilità. È necessario, pertanto, orientare la scelta dei portinnesti verso quelli con maggiore resistenza al calcare attivo o agli eccessi di umidità nel suolo. Gli apparati radicali più superficiali possono essere danneggiati dal ristagno idrico superficiale e dalla fessurabilità dei suoli.

Terre calcaree dei dossi fluviali (Figura 1-9)**:** la cartografia evidenzia che 4 aziende (ABB, BER, GAR E GOL) prese in esame in questa tesi, tutte situate nella provincia di Modena, rientrano in questa categoria. Si tratta dei dossi fluviali della pianura alluvionale con pendenza che varia da 0,1 a 0,5%. Le quote sono generalmente comprese tra 35 e 70 metri s.l.m. Sono suoli pianeggianti e si sono formati in sedimenti fluviali, solitamente organizzati in strati o laminazioni, la cui deposizione è imputabile agli eventi alluvionali dell'ultimo millennio. Sono molto profondi, a tessitura media o moderatamente fine, calcarei, moderatamente alcalini, e presentano una buona disponibilità di ossigeno, cioè non presentano condizioni di saturazione idrica dannose per le colture agricole. Si possono distinguere, in funzione del contenuto di calcare attivo, in suoli con moderato contenuto di calcare attivo (variabile tra 6 e 9 %) e suoli con scarso contenuto di calcare attivo (variabile tra 4 e 6 %). Questi suoli non presentano particolari problematiche di gestione agronomica. La posizione

rilevata rispetto alle aree circostanti della pianura e la tessitura media favoriscono il deflusso naturale delle acque meteoriche. L'esecuzione delle lavorazioni è agevole, la fertilità naturale è buona, la capacità in acqua disponibile è elevata e le radici, solitamente, riescono ad approfondirsi bene e ad esplorare in maniera efficace il volume del suolo. I suoli hanno un contenuto variabile di calcare attivo che, in caso di valori elevati, può influenzare la crescita e lo sviluppo vegetativo del pero. I suoli consentono al pero una buona potenzialità produttiva, con soddisfacenti livelli qualitativi. Le piante possono manifestare un elevato vigore per cui possono rendersi necessari interventi di contenimento mirati, come le potature. In questo tipo di suoli l'uso di portinnesti nanizzanti come il cotogno MC è fortemente sconsigliato.

Terre parzialmente decarbonate della pianura pedemontana (Figura 1-10)**:** i suoli analizzati di 2 aziende (ALD E FRE) ricadono geograficamente in questa tipologia. Questa zona comprende antiche aree di pianura pedemontana, con pendenza che varia tipicamente da 0,2 a 1%; debolmente incise da corsi d'acqua appenninici di minore entità. Le quote sono tipicamente comprese fra 27 e 90 m s.l.m. Sono suoli pianeggianti formati in sedimenti fluviali, la cui deposizione si ritiene risalga ad alcune migliaia di anni fa. Sono molto profondi, a tessitura media, da scarsamente a moderatamente calcarei nell'orizzonte lavorato e molto o fortemente calcarei negli orizzonti profondi, da neutri o debolmente alcalini a moderatamente alcalini. Presentano una buona disponibilità di ossigeno, cioè non presentano condizioni di ristagno idrico dannose per le colture. Generalmente non necessitano di opere di regimazione idraulica, né di lavorazioni atte a favorire il deflusso delle acque, come ad esempio baulature, drenaggi sotterranei o superficiali. Sono caratterizzati da elevato spessore, buona fertilità naturale ed elevata capacità in acqua disponibile per le piante. Anche l'approfondimento e l'esplorazione radicale non sembrano essere ostacolate. I suoli consentono al pero una buona potenzialità produttiva, con soddisfacenti livelli qualitativi. Le piante possono manifestare un elevato vigore per cui possono rendersi necessari interventi di potatura mirati. È possibile ricorrere alle diverse combinazioni di innesto compreso l'uso dei cotogni.

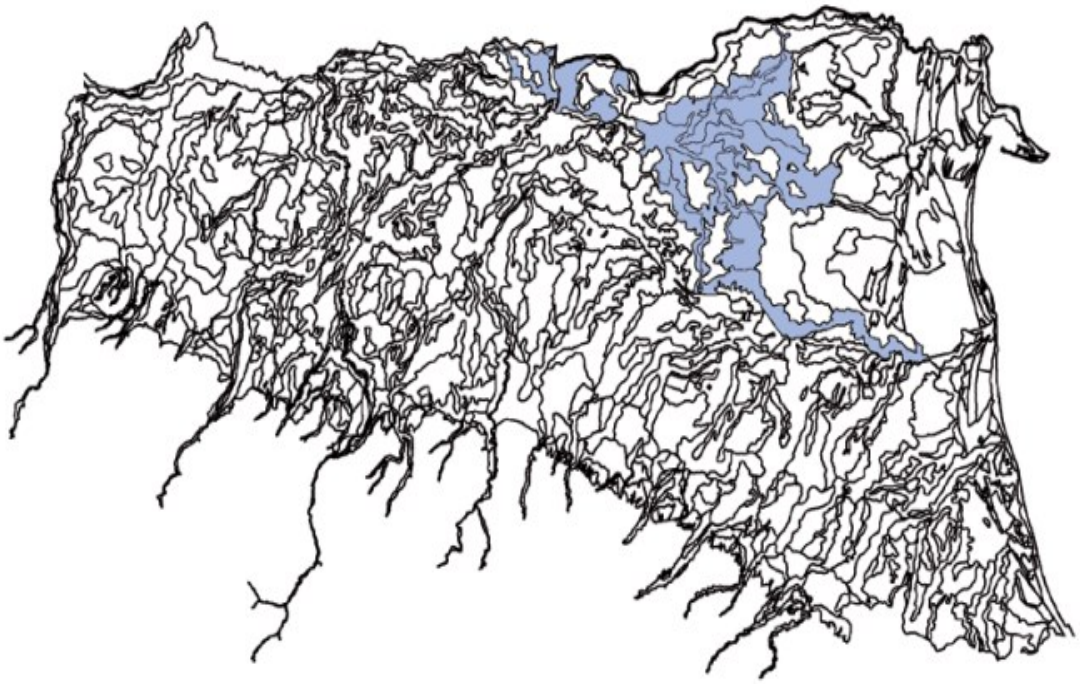

Figura 1-8-Terre dei dossi abbandonati del fiume Po

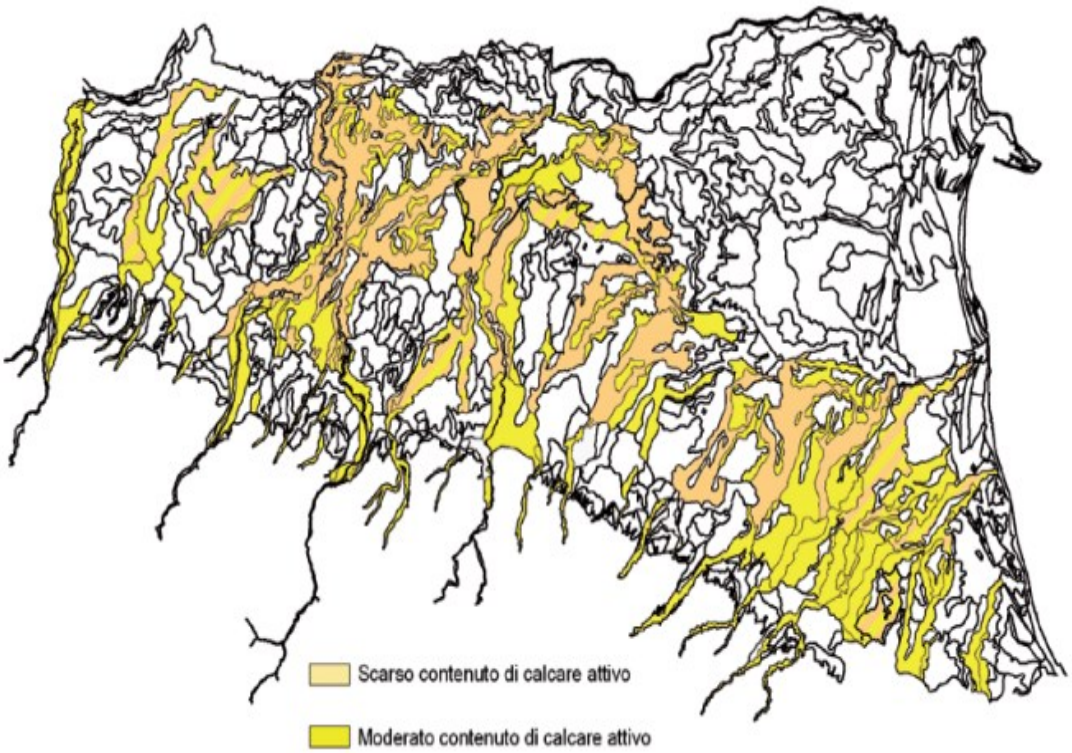

Figura 1-9-Terre calcaree dei dossi fluviali

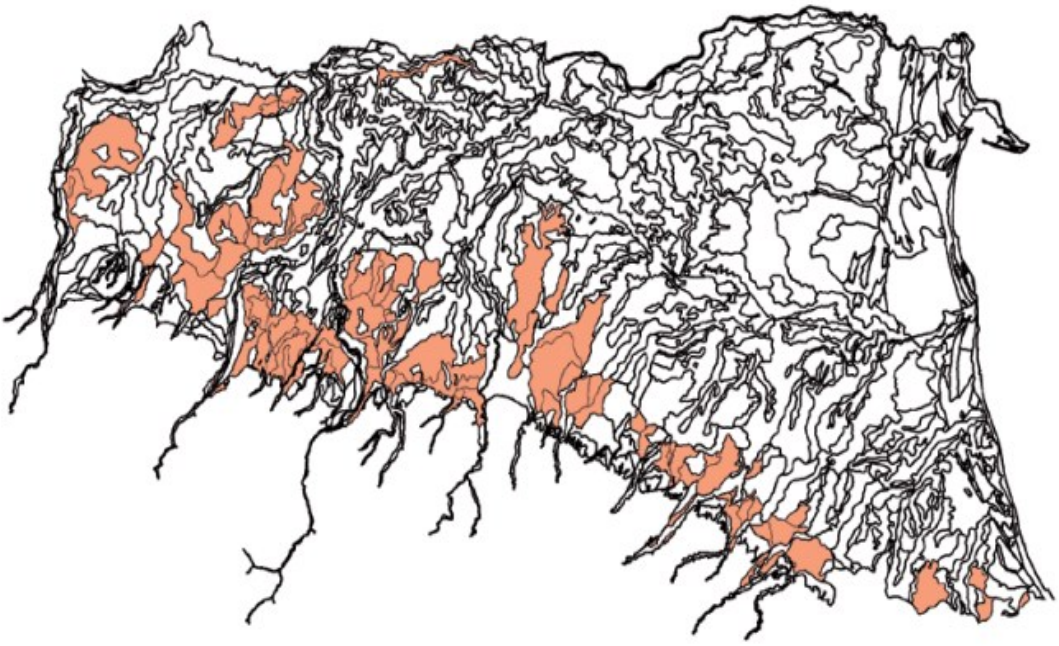

Figura 1-10-Terre parzialmente decarbonate della pianura pedemontana

Questa analisi dei suoli ha consentito di formulare anche le "Carte delle limitazioni alla crescita dei principali portinnesti di pero" e le conoscenze ottenute sono estendibili a tutte le aree cartografate con suoli simili a quelli in cui è avvenuta la sperimentazione. La Figura 1-11 riporta la cartografia delle limitazioni alla crescita delle varietà Abate e Conference sui portinnesti di cotogno BA29 e Sydò; mentre la Figura 1-12 mostra le limitazioni alla crescita delle medesime cultivar autoradicate o innestate su Farrold 40.

Entrambe le carte riportano in legenda le tre colorazioni diverse utilizzate per indicare se le limitazioni sono assenti o molto lievi, moderate o severe.

Confrontando la zona di ubicazione delle 8 aziende campionate con la mappatura, risulta che nessuna azienda sembra avere delle limitazioni severe alla crescita della varietà Abate Fètel sui principali portinnesti sopracitati.

Quindi, i suoli di tutte le aziende considerate presentano limitazioni molto lievi e moderate a seconda del portinnesto utilizzato (limitazioni praticamente assenti alla crescita su piante autoradicate).

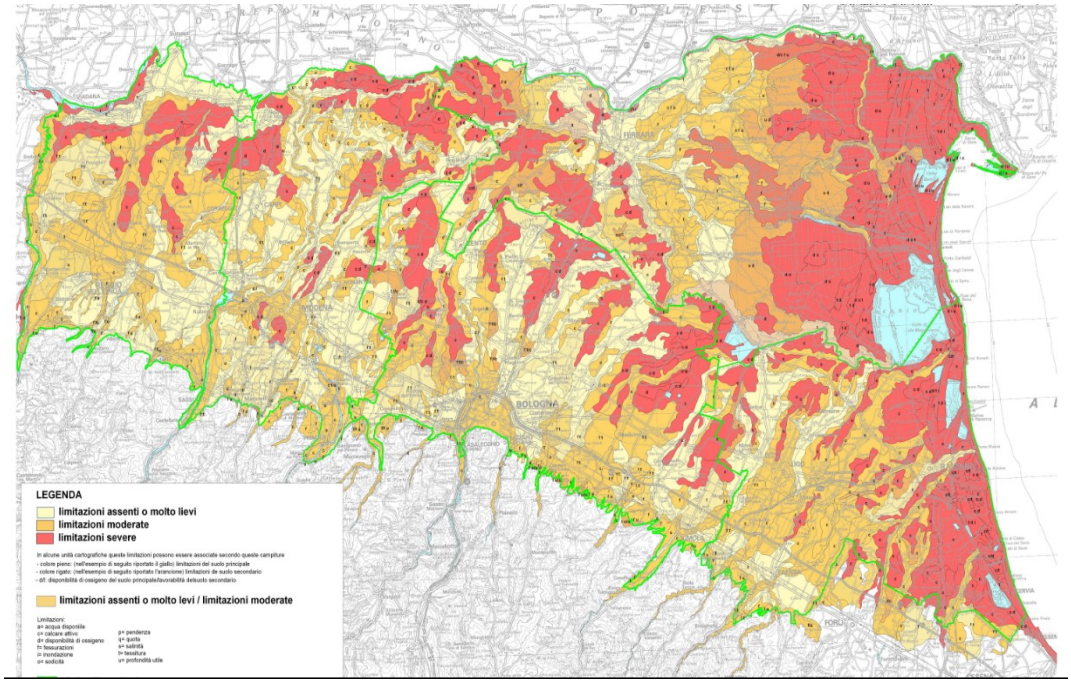

Figura 1-11-Limitazioni alla crescita delle varietà di pero Abate e Conference su portinnesti di cotogno BA29 e Sydò

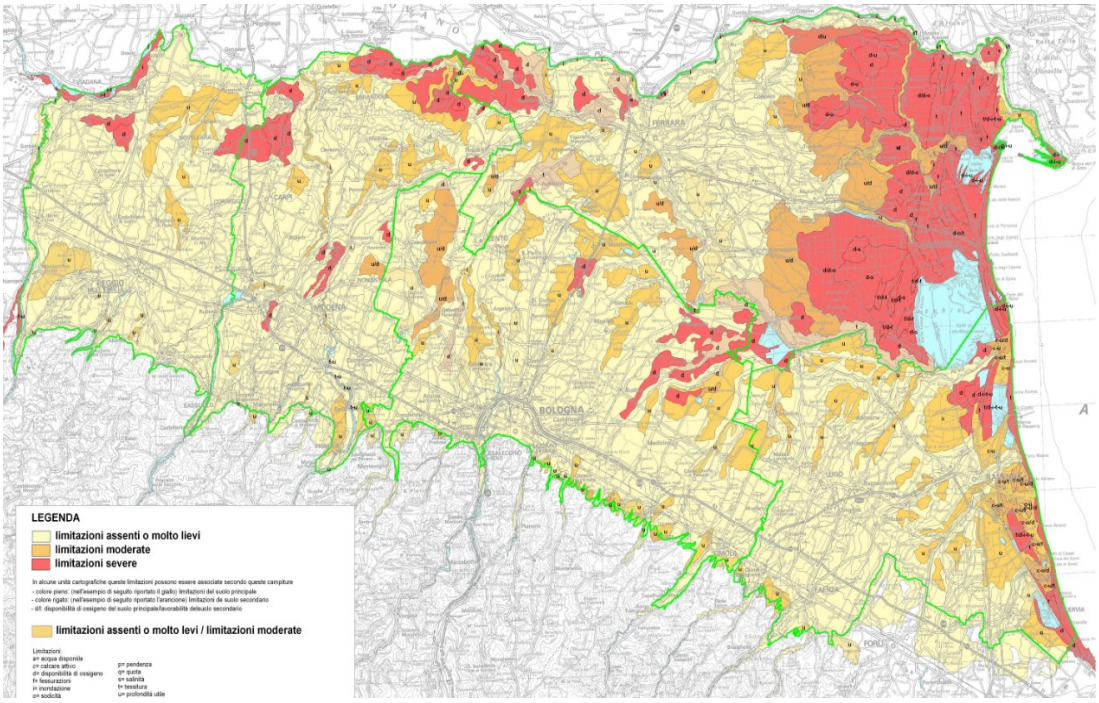

Figura 1-12-Limitazioni alla crescita delle varietà Abate e Conference su portinnesti Franco e Farrold 40

1.2. MORIA DEL PERO E PROGETTO IRRIGATE

Partendo da tale premessa, il contesto della sperimentazione è una problematica che affligge la coltivazione del pero in Emilia-Romagna, la regione più vocata per la pericoltura, che da sola contribuisce per il 70% alla produzione di pere made in Italy. Negli ultimi anni, in diverse aziende agricole specializzate degli areali della regione più vocati alla pericoltura come le province di Modena, Ferrara, Reggio-Emilia, Bologna e Ravenna, si assiste alla moria delle piante, che in prima battuta non sembra essere attribuibile a specifiche fitopatie.

A risentirne sono soprattutto le produzioni di Abate Fetel, la varietà più coltivata nella regione e che soffre particolarmente le gelate tardive primaverili.

Per salvaguardare questa eccellenza varietale, è partito il progetto IRRIGATE, una sperimentazione di 20 mesi (1° aprile 2021 – 31 dicembre 2022) per indagare sui sistemi irrigui a livello territoriale in risposta alla degenerazione degli impianti di pero. Il progetto è coordinato dal Crpv (Centro Ricerche Produzioni vegetali) in veste di capofila e si avvale della collaborazione di Apo Conerpo, Astra Innovazione e Sviluppo, Consorzio CER (Canale Emiliano Romagnolo), Irecoop Emilia-Romagna, Univpm e di alcune aziende agricole come partner effettivi e associati della ricerca, oltre ad altre aziende agricole del territorio.

L'obiettivo del piano Irrigate è proprio quello di individuare i fattori responsabili del deperimento di numerosi impianti di pero del territorio regionale al fine di fornire a tecnici e agricoltori delle linee guida idonee per prevenire questa grave problematica sugli impianti futuri e contrastarla nei sistemi di coltivazione già in uso.

Dai primi parametri rilevati nel 2018 dall'ufficio tecnico di Apo Conerpo e dal consorzio fitosanitario di Modena emerge che l'ipotesi più accreditata come possibile causa della degenerazione degli impianti è il surplus irriguo messo in atto istintivamente e con assoluto buon senso dagli agricoltori in risposta al cambiamento climatico. La siccità del periodo estivo, con temperature sempre più estreme e precipitazioni ridotte in termini di millimetri di pioggia caduti, impone notevoli apporti irrigui, che però se sovrastimati possono portare a ipossia radicale e quindi al collasso delle piante.

Quindi, nonostante il progetto verte principalmente sulla gestione ottimale degli apporti irrigui a scala territoriale al fine di preservare la coltura e risparmiare acqua garantendo l'uso sostenibile della risorsa idrica, le analisi comprendono un approccio multidisciplinare che tiene

conto di tutte le variabili che potrebbero essere una concausa del problema. Tra queste occorre analizzare e prendere in considerazione il cambiamento climatico, i sistemi di coltivazione (forma d'allevamento, densità e scelta dei portinnesti) e il sistema suolo.

Con questa tesi si cerca di delineare e contestualizzare al meglio il fattore suolo, che viene qui di seguito approfondito, per capire se deve essere considerato come uno degli elementi responsabili della sintomatologia.

Capitolo 2. SCOPO DELLA TESI

Il presente studio si colloca in un progetto di più ampio respiro orientato ad indagare sulle cause inerenti alla moria del pero (Pyrus communis) var Abate che recentemente ha interessato numerosi impianti nelle province di Modena, Ferrara, Reggio-Emilia, Bologna e Ravenna in Emilia-Romagna.

In ragione della stretta relazione tra le rese produttive e la qualità dei suoli agricoli, è stato condotto uno studio per la caratterizzazione fisico-chimica e biochimica di suoli provenienti da otto diverse aziende agricole operanti nel territorio, specializzate nella coltivazione della cultivar Abate Fètel, e soggette a gravi perdite di produzione che hanno portato, in alcuni casi, all'espianto del pereto. Tutte le otto aziende prese in esame presentano impianti a produzione intensiva in regime convenzionale.

La sperimentazione di pieno campo della durata di due anni, ha previsto il campionamento dei suoli del sottofila, la determinazione delle principali proprietà fisico-chimiche e la misura di alcuni indicatori dello stato di fertilità dei suoli, quali il contenuto di carbonio organico del suolo (SOC), il contenuto di biomassa microbica (MBC), l'attività della respirazione basale (SBR) e alcuni quozienti derivati, indicatori dell'efficienza metabolica dell'uso del carbonio organico da parte microrganismi del suolo.

Il fine è stato quello di valutare le condizioni di fertilità e la presenza di possibili fattori di stress per la componente biotica del suolo o per il metabolismo della pianta, da porre in relazione alla sofferenza produttiva dei pereti presi in esame.

Capitolo 3. MATERIALI E METODI

3.1 **Sito sperimentale**

La sperimentazione ha coinvolto 8 aziende agricole dell'Emilia-Romagna, la maggior parte situate tra le provincie di Modena e Ferrara, specializzate nella coltivazione del pero, dove sono stati evidenziati frequenti casi di moria delle piante.

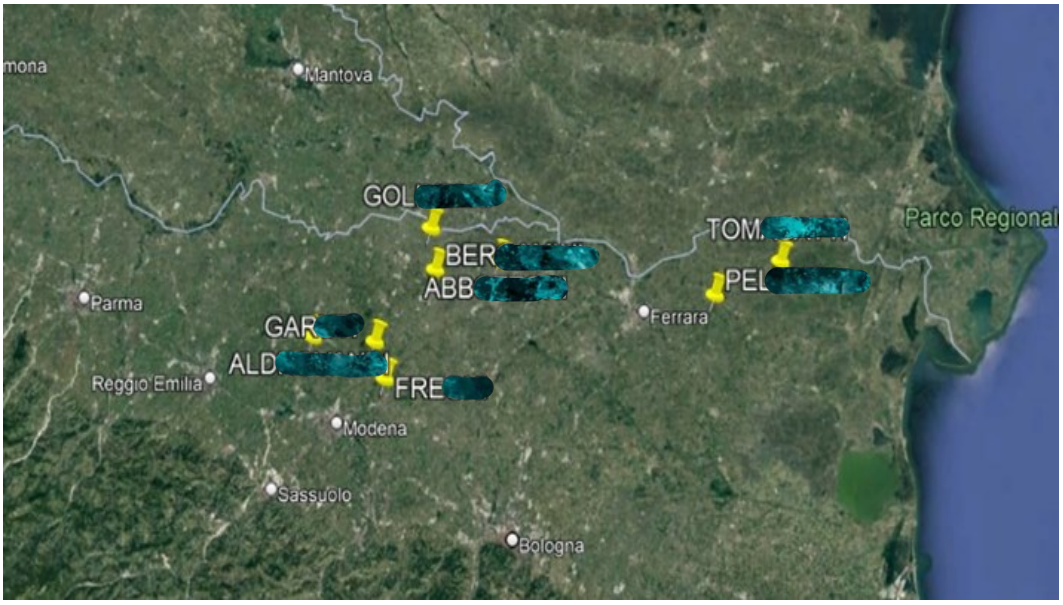

Figura 3-1-Ubicazione geografica degli impianti oggetto di studio

Ogni azienda coinvolta è operante nella cooperativa APOCONERPO e ha permesso il campionamento dei loro appezzamenti ai fini del presente studio.

Tutte le aziende coltivano la varietà Abate Fètel, ma il sistema di gestione, i portinnesti adottati e l'età dell'impianto variano tra un'azienda e l'altra:

- Azienda ABB, ubicata a Finale Emilia (MO): impianto del 2004 di cv Abate innestata su Farold 40 e Sydò;
- Azienda ALD, ubicata a Carpi (MO): cv Abate innestata su cotogno MA, MC, MH nel 2010/2011;

- Azienda BER, San Felice sul Panaro (MO): varietà Abate impiantata nel 2011 su portinnesti Farold e Sydò;
- Azienda FRE, situata a Nonantola (MO): cv Abate innestata su portinnesto BA29, impianto del 2017;
- Azienda GAR, Bomporto (MO): impianto recente del 2020 di cv Abate innestata su BA29;
- Azienda GOL, Mirandola (MO): impianto del 2017 di Abate su BA29;
- Azienda PEL, Copparo (FE): cv Abate su portinnesto Adams, impianto del 2017;
- Azienda TOM, ubicata a Copparo (FE): impianto del 2007 di Abate su Sydò;

I campionamenti sono stati eseguiti in due annate, ad agosto 2021 e settembre 2023 dal personale di Astra Innovazione e Sviluppo (Agenzia per la Sperimentazione Tecnologica e la Ricerca Agroambientale) partner nel progetto PSR-IRRIGATE.

In particolare, nelle 8 aziende selezionate, per il primo anno, sono stati prelevati 6 campioni di suolo per ogni azienda e singolo portinnesto in modo piante sintomatiche e non sintomatiche seguendo uno schema random lungo i filari.

Il secondo anno sono stati prelevati 4 campioni di suolo seguendo le stesse modalità.

Il campionamento è stato eseguito tramite uso di trivella lungo il filare in modo da prelevare il suolo a circa 30 cm dal gocciolatore e dal tronco e a 30 cm di profondità. Ogni campione deriva dalla miscelazione di 3 sotto-campioni per dare origine a un campione composito rappresentativo del peso di circa un chilo da sottoporre ad analisi.

In totale sono stati analizzati 76 campioni il primo anno e 58 campioni il secondo anno.

Figura 3-2-Metodo di campionamento

3.2 **Analisi biochimiche dei suoli**

Prima di effettuare le analisi, tutti i campioni di suolo sono stati fatti asciugare all'aria e setacciati con vaglio a 2 mm. Tutte le analisi si sono svolte in maniera conforme alle normative ufficiali previste in materia dal MIPAF (Ministero delle Politiche Agrarie e Forestali).

Nei vari sotto-capitoli vengono spiegati nel dettaglio i parametri valutati e il metodo utilizzato.

3.2.1 *Determinazione del carbonio organico (metodo Walkey-Black)*

Il metodo si basa sul fatto che il carbonio organico viene ossidato, con potassio bicromato e in presenza di acido solforico, ad anidride carbonica.

La reazione di ossidazione è favorita dall'ambiente acido e dallo sviluppo di calore originato dalla reazione dell'acido solforico in ambiente acquoso. Il tempo di reazione previsto dal metodo è di 30 minuti, trascorsi i quali la reazione viene interrotta dall'aggiunta di acqua deionizzata.

La quantità di potassio bicromato che non ha reagito nella reazione si determina retro-titolando con una soluzione di ferro solfato esaidrato (Sale di Mohr).

Prima di procedere con l'analisi sono state preparate le soluzioni necessarie di potassio bicromato e ferro ammonio solfato. La soluzione di bicromato di potassio 0,1667 M è stata preparata sciogliendo 49,032 g di $K_2Cr_2O_7$ in un matraccio tarato da 1000 ml e portando a volume con acqua deionizzata. La soluzione 0,5 M di $Fe(NH_4)(SO_4)_2*6H_2O$ è stata preparata secondo il seguente procedimento: sono stati sciolti 196,06 g di ferro (II) ammonio solfato in un matraccio tarato da 1000 ml. Sono stati aggiunti 20 ml di H_2SO_4 (acido solforico) facendoli scivolare accuratamente lungo le pareti del matraccio, e dopo aver raffreddato, la soluzione è stata portata a volume con acqua deionizzata.

Per la titolazione finale è stato usato come indicatore sodio 4-difenilamminosolfonato, preparato sciogliendone 0,2 grammi in acido solforico al 96%.

3.2.1.1 Metodica del procedimento:

1 grammo di suolo viene posto in una beuta dopo essere stato preventivamente asciugato all'aria e stacciato a 0,5 mm. Si aggiungono 10 ml di bicromato di potassio e 20 ml di acido solforico.

La titolazione procede aggiungendo 0,5 g di indicatore, ponendo la beuta su agitatore magnetico e titolando con il Sale di Mohr fino al viraggio dal blu al verde scuro.

Contemporaneamente si esegue la prova in bianco nelle stesse condizioni sopracitate ma senza aggiungere il campione di suolo.

L'equazione usata per il calcolo della percentuale di C organico ossidato è la seguente:

% Corg Oss = (ml prova bianco/ml titolaz)*f*0,5*3*100/1000*P

Dove:

ml prova bianco sono i ml di Sale di Mohr utilizzati nella prova in bianco, che dovrebbero essere ipoteticamente uguali a 20;

ml titolaz sono i ml di Sale di Mohr utilizzati e misurati nella titolazione con il campione;

f è il fattore di conversione che tiene conto della frazione realmente ossidata (ml teorici prova in bianco/ml effettivamente misurati prova in bianco);

0,5 è la normalità del Sale di Mohr;

3 è il peso equivalente del C;

P è il peso del campione di suolo analizzato;

il peso equivalente del carbonio viene calcolato dalla formula PA/n, dove PA è il peso atomico del C (12) e n è il numero di elettroni persi nella reazione ossidativa (4).

I milli-equivalenti (meq) di bicromato determinati per differenza tra i meq titolati nel campione e i meq titolati nella prova in bianco corrispondono ai meq di C organico ossidato.

I mg di C organico presenti in 1 g di suolo si ottengono moltiplicando appunto i meq per il peso equivalente del C (formula chimica: meq = mg/PE, quindi mg = meq*PE). Tale valore va convertito in grammi (g) di carbonio organico e moltiplicato per cento per ottenere la percentuale di carbonio organico ossidabile (% Corg Oss).

Il valore di C org viene successivamente convertito in percentuale di sostanza organica.

Dal momento che il contenuto percentuale di C org è variabile in funzione del suolo e del tipo di sostanza organica, si è stabilito per convenzione che il contenuto di C presente nella sostanza organica sia pari al 58%. Il passaggio da carbonio organico (CO) a sostanza organica (SO) si ottiene dalla seguente proporzione:

100 : 58 = % S.O. : % C.O.

Quindi, moltiplicando il valore della percentuale di carbonio organico per 1,724 (fattore di Van Bemmelen) si ottiene il valore percentuale della sostanza organica.

3.2.2 *Determinazione della respirazione basale*

La respirazione basale del suolo viene determinata tramite incubazione del campione in contenitori ermetici, dove l'anidride carbonica sviluppata dalla biomassa microbica presente

nel suolo viene intrappolata da una soluzione di NaOH (idrossido di sodio), in seguito retro-titolata con HCl (acido cloridrico).

L'apparecchiatura necessaria per la titolazione consiste in una buretta in vetro automatica, beakers da 50 ml e piastra con magnete.

I reagenti chimici utilizzati nella reazione sono:

- H_2O deionizzata
- NaOH 0,2 N
- HCl 0,1 N
- $BaCl_2$ (cloruro di bario)
- Fenoftaleina (soluz all'1% in etanolo 95% v/v) indicatore

Figura 3-3-Prova di incubazione allestita e titolazione di campioni

3.2.2.1 Metodica del procedimento

30 g di suolo asciugato all'aria vengono pesati e poi condizionati con H_2O deionizzata per portare il suolo intorno al 60% della capacità di campo.

I campioni così preparati sono lasciati in incubazione al buio a 25°C.

Contemporaneamente sono allestite 2 prove in bianco poste alle stesse condizioni di incubazione dei campioni, ma omettendo il campione di suolo.

La prova di incubazione ha durata di circa 28-30 giorni e la titolazione della soluzione di soda viene effettuata a 1, 3, 7, 15, 21 e 28 giorni (Figura3-3).

La titolazione della soluzione di NaOH ai tempi prestabiliti viene eseguita aggiungendo 2 ml di $BaCl_2$ per l'abbattimento dei carbonati che potrebbero interferire e 2 gocce di fenoftaleina, che è l'indicatore usato per le titolazioni acido-base (con l'aggiunta dell'indicatore il contenuto assume colorazione rosa-fucsia).

Dopodiché si effettua la titolazione con HCl fino al viraggio di colore dal rosa al bianco neutro.

La quantità di CO_2 prodotta dai microrganismi che hanno respirato la soda NaOH viene determinata ricavando i meq di HCl serviti per retro-titolare la NaOH non consumata dalla CO_2 e convertendo tale valore in peso (mg) secondo la formula meq = mg/PE, quindi mg = meq*PE.

La misura seguita fino al ventottesimo giorno serve per ricavare la respirazione basale cumulativa. I dati raccolti sono generalmente in accordo e possono essere usati per ricavare la curva di degradazione del C organico espressa come Ct = C0($1 - e^{-kt}$), dove Ct è il carbonio organico al tempo t, k la costante di degradazione e C0 il contenuto di carbonio organico all'inizio della prova di incubazione. I dati di CO_2 respirata e C mineralizzato possono essere comunque facilmente convertiti l'uno nell'altro moltiplicando i valori di CO_2 respirata per il fattore 0,27 derivato dal rapporto stechiometrico tra il peso atomico del C sul peso molecolare della CO_2.

3.2.3 *Determinazione del contenuto di carbonio della biomassa microbica*

Il metodo utilizzato è quello della fumigazione-estrazione ovvero il carbonio microbico viene determinato per differenza tra il contenuto di carbonio solubile rilasciato dalla lisi cellulare delle cellule microbiche e quello del carbonio solubile presente nel suolo. Il metodo si basa sulla fumigazione del suolo con cloroformio, che provocando la lisi delle membrane delle cellule microbiche, determina il conseguente rilascio del materiale citoplasmatico cellulare e i composti carboniosi in esso contenuti. Il carbonio solubile viene in seguito estratto da una soluzione salina.

Per differenza tra il carbonio organico solubile estratto dal suolo fumigato con quello estratto dal suolo non fumigato si determina il contenuto di carbonio della biomassa microbica tramite l'equazione lineare B_C = 2,64 * E_C .

Dove B_C è appunto il contenuto in C della biomassa microbica ed E_C è la differenza in C organico tra il suolo fumigato e quello non fumigato.

Di conseguenza, da ogni campione sono stati pesati 10 g di terra fine in una capsula in porcellana e altri 10 g di suolo in un tubo da centrifuga entrambi condizionati al 60% della capacità idrica di campo e lasciati riposare per un giorno. I primi sono stati fumigati con cloroformio, mentre il suolo in provetta non è stato fumigato ed è servito da controllo.

La fumigazione con cloroformio consiste nel mantenere il campione di suolo in atmosfera di cloroformio per 20-24 ore, al buio. Le capsule di ceramica contenenti i campioni di suolo vengono poste in un ampio essiccatore nel quale viene fatto il vuoto.

Si posizionano le capsule con i suoli sulla piastra di porcellana forata dell'essiccatore sul cui fondo sia stato già messo un contenitore con circa 50 mL di $CHCl_3$. Si azione la pompa da vuoto per creare un'atmosfera di $CHCl_3$ all'interno dell'essiccatore. All'ebollizione del cloroformio si lascia funzionare la pompa ancora per un minuto, si chiude l'essiccatore e si lascia i campioni in atmosfera di cloroformio per una notte. Dopo tale lasso di tempo il $CHCl_3$ deve essere completamente rimosso dal suolo. Per questo occorre aprire l'essiccatore, rimuovere il contenitore con il $CHCl_3$ e mantenere all'aria i campioni per circa 30 minuti, allontanando tutto il $CHCl_3$ presente nei pori dei campioni di suolo.

I campioni di suolo, fumigati e non fumigati, vengono estratti con una soluzione K_2SO_4 0,5 M nel rapporto suolo 10 g: estraente 25 ml per 30 minuti a temperatura ambiente, agitando a velocità media per 30 minuti e quindi filtrando l'estratto con carta Whatman 42.

Gli estratti così ottenuti possono essere analizzati mediante titolazione per il contenuto di C organico solubile. Tale determinazione si effettua per ossidazione in ambiente acido a caldo.

Figura 3-4-Campioni prima e dopo il passaggio in stufa a 120°C

Si introducono 8 ml di estratto, 2 ml di $K_2Cr_2O_7$ 0,4 N, 10 ml di H_2SO_4 al 96% e 5 ml di H_3PO_4 all'85%. Si prepara anche un bianco che invece dell'estratto di suolo contiene solamente la soluzione estraente (8 ml K_2SO_4 0,5 M).

Quindi si chiudono i campioni con carta stagnola per limitare l'evaporazione e favorire la reazione e si mantengono le beute in stufa a 120°C per 30 minuti (Figura 3-4).

Figura 3-5-Reazione a caldo in ambiente acido per permettere l'ossidazione del carbonio solubile

La reazione viene interrotta dall'aggiunta di acqua deionizzata e si titola il dicromato che non ha reagito con un sale di ferro-ferroso quale il $Fe(NH_4)_2SO_4x6H_2O$ (sale di Mohr) 33,3 mN in ambiente acido, usando come indicatore redox il complesso 2-3 gocce di indicatore di 1,10-fenantrolina-$FeSO_4$ 25 mM (soluzione al 3%). Quindi, sotto agitazione si aggiunge goccia a goccia il titolante. Il punto di fine titolazione è dato dal viraggio della soluzione da arancione a rosa-rosso.

La Figura 3-5 mostra il viraggio di colore dal verde all'azzurro che avvengono nella reazione, fino ad arrivare al punto di viraggio finale.

Siccome il C organico viene ossidato dal dicromato di potassio, il contenuto in C organico di ogni estratto si ricava tramite la relazione:

mg di C kg suolo^{-1} = (ml fumigati - ml non-fumigati) *f*0,0333*3*25/8 * 1000/10

Dove:

- 0,0333 la normalità del Sale di Mohr;
- 3 il peso equivalente del C;
- 8 ml su 25 ml titolati
- 1000g su 10g estratti

Capitolo 4. RISULTATI E DISCUSSIONI

4.1 **Proprietà fisiche e chimiche dei suoli**

La tessitura è di tipo franco-limoso-argilloso in tutti i suoli ad eccezione di ALD e PEL, che presentano tessitura di tipo franco, e di TOM, che presenta tessitura di tipo argilloso; mentre il pH è alcalino in tutti i suoli e compreso tra valori di 7,91 e 8,23 (Tabella 4-1).

L'analisi della fertilità chimica dei suoli ha messo in evidenza che la maggior parte di essi presenta una buona dotazione di elementi essendo il contenuto spesso superiore al valore medio di dotazione.

Nello specifico, il contenuto di N varia in un intervallo di valori compreso tra 1,38-2,87 g kg^{-1}. La dotazione media è riconducibile a valori compresi nell'intervallo 0.8-1.2 g kg^{-1} e quindi per tutti i suoli analizzati si può considerare una dotazione da alta a molto alta.

L'andamento del Norg può essere posto in relazione al contenuto in sostanza organica (S.O.). Infatti, esiste una buona correlazione positiva tra il contenuto di sostanza organica e Ntot essendo l'azoto totale per circa l'80% organico, poiché l'azoto viene rapidamente convertito in azoto organico dalle piante e dai microrganismi del suolo (Figura 4-1)

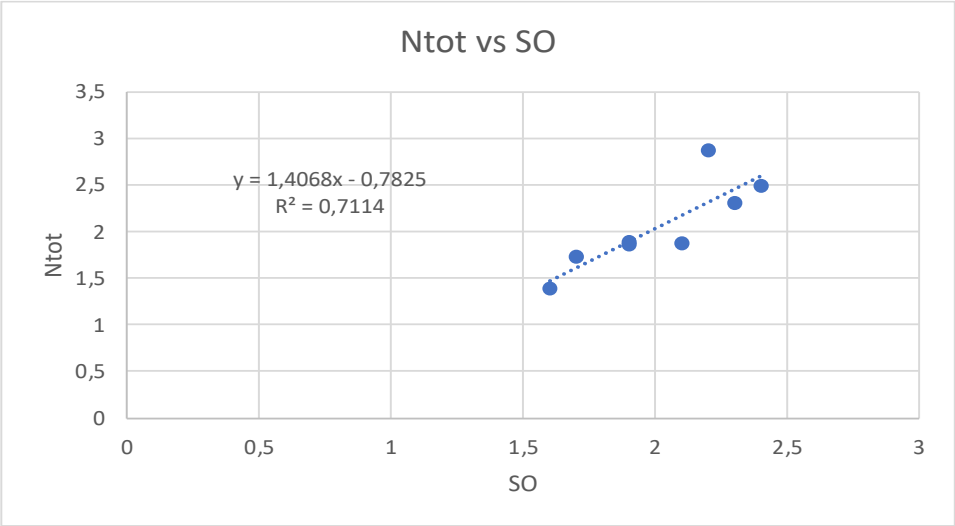

Figura 4-1-Regressione lineare tra contenuto di azoto totale (Ntot) e contenuto di sostanza organica (SO)

La maggior parte dei suoli in analisi presentano un contenuto di S.O intorno al 2% che rappresenta la dotazione minima indicata per i suoli agricoli dalla EU nel documento di Thematic Strategy for Soil Protection, COM (2006) 231 final.

Nello specifico i suoli ABB, ALD e TOM presentano un contenuto di SO superiore al 2% (valore medio 2,3%), i suoli BER e PEL inferiore (valore medio 1,7%) e i suoli FRE, GAR e GOL presentano un contenuto del 2%.

Il contenuto di $CaCO_3$ totale è per la maggior parte dei suoli elevato variando dal 12% al 16% in sei aziende su otto.

Allo stesso modo, nella metà dei suoli analizzati il contenuto di $CaCO_3$ attivo varia da 6,1 a 7,4% e pertanto la dotazione può considerarsi elevata o comunque considerata potenzialmente rischiosa per l'immobilizzazione di alcuni elementi necessari al metabolismo della pianta (es. P) o per il funzionamento dell'apparato radicale essendo il portainnesto del cotogno, indipendentemente dalla tipologia, molto sensibile al calcare.

In tre suoli la salinità è risultata elevata con valori variabili in un range di 0,402-0,493 mS cm^{-1}. Sebbene i suoli delle altre aziende abbiano valori di conducibilità riconducibili a valori normali (0,233-0,318 mS cm^{-1}), alcuni suoli hanno valori prossimi ai 0,300 mS cm^{-1}, e quindi è possibile che tali valori possano raggiungere la soglia di rischio in concomitanza con le pratiche di concimazione o per l'uso di acque di irrigazione con elevate concentrazioni di sali per la carenza di piogge durante il periodo primaverile-estivo. Si tenga conto che la zona di indagine è una zona in cui è elevato il rischio di salinizzazione dei suoli anche per la risalita del cuneo salino in ragione della riduzione dei volumi di portata del fiume di Po, fenomeno che si manifesta sempre più frequentemente in ragione dei cambiamenti ambientali che stiamo vivendo.

Ad ogni modo ogni coltura ha una sua particolare tolleranza nei confronti della concentrazione dei sali nel suolo essendo diversa la risposta fisiologica che le colture possono mettere in atto rispetto agli stress osmotici. Ad esempio, nel disciplinare di produzione integrata disponibile sul sito della Regione Marche, per il pero è consigliata una salinità del suolo di 2 mS cm^{-1} e comunque non superiore a 3 mS cm^{-1} (produzione integrata D.G.R 936 del 25 luglio 2022). In un lavoro di Musacchi et al., (2006) è dimostrato che, soprattutto nelle giovani piante innestate su cotogno (Cydonia oblunga), la selettività all'assorbimento degli ioni Na^+ e Cl^- è ridotta per l'astone su portainnesto rispetto all'astone di pero autoradicato, meglio abile ad escludere l'assorbimento degli ioni sodio e cloro; Sebbene l'astone su portainnesto sia più abile a non traslocare gli ioni Na^+ verso le foglie, capacità che comunque

viene meno con l'età della pianta accumulando nel tempo sodio nelle foglie e manifestando fenomeni di tossicità (Myers et al., 1995).

In cinque suoli su otto analizzati il contenuto di sodio e cloro solubile varia da 20 a 42,2 mg kg^{-1}, per cui la concentrazione di sodio e cloro assorbibile è elevata, sebbene l'indice SAR (qui non riportato in tabella e calcolato come rapporto tra Na e Ca+Mg) sia nei limiti della normalità e alto solo nel caso del suolo TOM.

In particolare, 4 suoli (ABB, BER, FRE, e GAR) presentano alti valori di calcare attivo che, se elevato, risulta pericoloso in quanto può compromettere l'assorbimento di altri elementi, come il fosforo e il ferro (per insolubilizzazione), e provocare la comparsa di clorosi.

Tre suoli (ALD, FRE, TOM) su otto presentano un livello di salinità medio alto, mentre 5 suoli (ALD, FRE, GAR, PEL, TOM) su 8 evidenziano un elevato contenuto di Na idrosolubile.

Quindi, tre suoli (ALD, FRE E TOM) presentano contemporaneamente salinità e alto contenuto di sodio solubile.

Questi picchi di salinità, in concomitanza delle concimazioni (al suolo e fogliari) e all'utilizzo di acque irrigue che potrebbero essere piuttosto concentrate in sali (per effetto dell'evaporazione dell'acqua dolce e/o del cuneo salino naturalmente presente nella zona di interesse), potrebbero essere un'ulteriore potenziale causa di aggravamento dello stress della componente biotica nel sistema suolo-radice-pianta.

In un contesto dove le alte temperature del periodo primaverile-estivo, che sono già di per sé un fattore limitante, impongono il ricorso ad abbondanti irrigazioni c'è il rischio di creare un ambiente fortemente asfittico, dove l'acqua occupa tutto l'intorno della radice e viene a mancare l'ossigeno.

Anche la natura fisica dei suoli presi in esame può contribuire a creare una condizione di asfissia radicale, visto che quasi tutti i suoli analizzati presentano una tessitura di tipo franco-limoso-argilloso, fanno eccezione solamente i suoli franchi delle aziende ALD e PEL. Nel suolo dell'azienda TOM il contenuto di argilla raggiunge addirittura il 60% del totale.

Tabella 4-1-Principali proprietà fisico-chimiche dei suoli analizzati

AZIENDA	tessitura	pH	Salinità (mS/cm)	Na solubile (mg kg-^{1})	$CaCO_3$ totale (%)	$CaCO_3$ attivo (%)	SO (%)	N (g kg^{-1})
ABB	Franco-limoso-argilloso	8,17	0,263	9,2	16	7,4	2,4	2,49
ALD	Franco	8,02	0,464	42,2	12	4,3	2,2	2,87
BER	Franco-limoso-argilloso	8,15	0,318	13,6	16	6,1	1,7	1,73
FRE	Franco-limoso-argilloso	8,08	0,402	26,5	15	6,3	2,1	1,87
GAR	Franco-limoso-argilloso	8,23	0,284	20,3	16	7,4	1,9	1,88
GOL	Franco-limoso-argilloso	8,12	0,259	14,4	10	3,8	1,9	1,86
PEL	Franco	8,22	0,233	23,5	16	4,1	1,6	1,38
TOM	Argilloso	7,91	0,493	20	2	1,7	2,3	2,31

Per quanto riguarda la dotazione di elementi della nutrizione, in tabella 4-2 sono riportati i valori dei tre principali macroelementi e, a lato di ogni singolo valore dei parametri, i giudizi espressi in merito alla dotazione e il rapporto Mg/K come indicatore di possibili squilibri metabolici dovuti a uno squilibrio di assorbimento per fenomeni di antagonismo.

Il contenuto di P assimilabile (metodo Olsen) varia da 21 a 148 mg kg^{-1} e, in considerazione di una dotazione media di P assimilabile riconducibile a 15-20 mg kg^{-1}, la dotazione di fosforo assimilabile può considerarsi in tutti suoli da alta a molto alta.
Il fosforo è un macroelemento generalmente poco mobile nel suolo poiché è soggetto a precipitazione sia nei suoli acidi ad opera del Al e Fe, sia nei suoli alcalini ad opera del Ca e generalmente la sua biodisponibilità è massima in un range ristretto di pH compreso tra 6 e 7. Il fosforo partecipa alla costituzione dei fosfolipidi di membrana, della fitina, degli zuccheri durante i processi metabolici ed è un componente degli acidi nucleici e dell'ATP per cui è un elemento fondamentale per tutti i processi metabolici della pianta. La sua presenza aiuta l'emergenza della plantula e della radice e facilita la traslocazione delle risorse carboniose nei frutti e nei semi. Conferisce vigoria alla pianta. In ragione della sua scarsa presenza nella soluzione circolante proprio perché molto reattivo, gli agricoltori tendono a distribuire quantità molto elevate di fosforo, ma questo non porta un incremento significativo di produzione perché il fosforo è tra quegli elementi caratterizzati da un elevato effetto residuale derivante dalla concimazione e uno scarso effetto di incrementare la frazione prontamente disponibile per la pianta. Per questo motivo è bene tentare di determinare le condizioni per una maggiore mobilità del P già presente nel suolo piuttosto che incrementare il suo contenuto anno dopo anno soprattutto nei suoli dove il contenuto di P assimilabile è già molto elevato.

Allo stesso modo il contenuto di K ed Mg varia da 177 a 862 mg kg^{-1} e da 158 a 354 mg kg^{-1} rispettivamente. Nel caso del K si considera una dotazione media pari a valori compresi tra 80 e 120 mg kg^{-1} mentre per il Mg la dotazione media è considerata variabile tra 100-150 mg kg^{-1}. Quindi nel caso del potassio tutti i suoli presentano una dotazione alta o molto alta, mentre il magnesio una dotazione medio alta o normale.
Entrambi questi due elementi sono importanti per il corretto svolgimento delle funzioni metaboliche della pianta. Il potassio ha la funzione fondamentale di regolatore della corretta conformazione del sito attivo di almeno una settantina di sistemi enzimatici coinvolti nei principali processi del metabolismo primario, per cui la sua mancanza causa inibizione del processo metabolico degli zuccheri e delle proteine.

Inoltre, il potassio svolge l'importante funzione di regolatore osmotico delle cellule stomatiche e delle cellule radicali e fogliari (mesofillo) proteggendo la pianta dal verificarsi di stress abiotici, quali stress idrici in estate, freddo o gelate primaverili. L'accumulo di potassio in caso di stress idrico diminuisce il potenziale osmotico delle cellule radicali favorendo l'assorbimento di acqua dal suolo, mentre in quelle del mesofillo diminuisce la tensione di vapore limitando l'evapotraspirazione. Allo stesso modo, l'accumulo del potassio nei tessuti fogliare ha l'effetto di abbassare il punto di congelamento prevenendo la cristallizzazione dell'acqua presente e la lisi cellulare.

Il Mg svolge invece la funzione essenziale di componente della clorofilla (entra nel complesso di coordinazione dei quattro atomi di N presenti nel complesso porfirinico), per cui la carenza di Mg o il suo mancato assorbimento riduce la sintesi di clorofilla limitando la fotosintesi clorofilliana.

È chiaro, quindi, il ruolo che questi due elementi svolgono per il corretto funzionamento fisiologico della pianta e l'importanza del giusto equilibrio con il quale la pianta deve assorbirli.

Il rapporto Mg/K è infatti considerato un indicatore di un possibile dismetabolismo della pianta conseguente ad uno scorretto assorbimento di uno dei due elementi. È noto che l'assorbimento radicale del magnesio avviene in maniera antagonistica rispetto a quello del potassio e i valori tabellari (tabella 4-2) evidenziano che in 6 aziende su 8 tale rapporto assume valori maggiori o minori rispetto ai valori ritenuti ottimali del rapporto Mg/k che sono quelli compresi tra tra 2,5 e 5.

Nella maggior parte dei casi tali valori risultano più bassi mentre in un'azienda più elevati del range ottimale:

- Nelle aziende ABB, ALD, BER e GAR l'apporto Mg/K basso indica un possibile rischio per lo scarso assorbimento del magnesio con conseguente minore sintesi di clorofilla nei tessuti della pianta. Un deficit di questo elemento può ridurre notevolmente l'attività fotosintetica, causando clorosi
- Nell'azienda TOM il rapporto Mg/K alto indica un potenziale scarso assorbimento da parte della pianta del potassio con associata ridotta resistenza all'attacco dei patogeni ed agli stress abiotici

Tabella 4-2-Contenuto di macroelementi assimilabili negli 8 suoli delle aziende coinvolte nella sperimentazione

AZIENDA	P (mg kg^{-1})	Giudizio Dotazione (P)	K (mg kg^{-1})	Giudizio Dotazione (K)	Mg (mg kg^{-1})	Giudizio Dotazione (Mg)	Mg/K (meq)	Giudizio Dotazione Mg/K
ABB	54	molto alto	463	molto alto	237	medio alto	1,65	medio basso
ALD	148	molto alto	862	molto alto	354	medio alto	1,32	basso
BER	21	medio alto	302	alto	187	normale	1,99	medio basso
FRE	90	molto alto	394	molto alto	254	medio alto	2,07	normale
GAR	40	alto	506	molto alto	246	medio alto	1,56	medio basso
GOL	21	medio alto	315	alto	224	normale	2,29	normale
PEL	25	medio alto	177	medio alto	158	normale	2,87	normale
TOM	26	alto	296	normale	581	medio alto	6,32	medio alto

Le condizioni di ricchezza nella dotazione dei macroelementi si evidenziano anche nel caso del contenuto assimilabile dei microelementi (tabella 4-3).

Il corretto assorbimento dei microelementi è fondamentale per la pianta perché la maggior parte di essi svolge il ruolo di cofattore metallico dei sistemi enzimatici coinvolti in tutti i processi metabolici della pianta.

In particolare, il Fe è il cofattore più importante in ragione dell'attitudine di questo elemento a formare chelati e alla velocità di cambiare numero di ossidazione, che ne fanno l'elemento fisiologicamente attivo come gruppo prostetico di più di 70 Fe-proteine e come catalizzatore per la sintesi delle clorofille e per il trasporto di elettroni nel processo di fotosintesi (ferredossina) prevalentemente nei cloroplasti.

Il contenuto di Fe assimilabile determinato negli 8 suoli varia nell'intervallo di valori tra 11,47 a 22,69 mg kg^{-1}. Tali valori indicano una dotazione medio alta per la maggior parte di essi (6 su 8) e una dotazione normale per i due restanti suoli.

Allo stesso modo vengono rilevate dotazioni di Zn e Cu assimilabili per lo più variabili da alte a medio alte, nell'intervallo di valori da 2,34 a 9,45 mg kg^{-1} per lo Zn e da 7,16 a 22,81 mg kg^{-1} nel caso del Cu.

Il contenuto assimilabile di Mn e B varia negli intervalli 3,79-5,04 mg kg^{-1} e 0,34-1,25 mg kg^{-1} rispettivamente, indicando per la quasi totalità dei suoli analizzati un contenuto normale con l'eccezione dell'azienda FRE nel caso del Mn e dell'azienda ALD nel caso del B.

Tutti i microelementi analizzati svolgono il ruolo di cofattori metallici in enzimi coinvolti in processi metabolici fondamentali per la pianta: Il manganese è presente in enzimi che catalizzano per la fotosintesi, respirazione , metabolismo dell'azoto, lo zinco è un cofattore di sistemi enzimatici coinvolti nell'allungamento degli internodi, il rame è il co-fattore degli enzimi coinvolti nella sintesi dell'acido indolacetico, nella respirazione e nella fotosintesi, mentre il boro è necessario per la formazione delle pareti cellulari, integrità biologica della membrana, assorbimento del calcio, regolazione della fioritura, germinazione del polline e fruttificazione. Tutti questi elementi sono però richiesti in traccia ovvero in piccole quantità, e se la pianta dovesse trovarsi in condizioni di biodisponibilità eccessiva di questi elementi la dose minima richiesta potrebbe essere superata e la pianta potrebbe soffrire di fenomeni di fitotossicità.

Le elevate dotazioni di macro e microelementi della nutrizione indicano pratiche di concimazione non calibrate sulla base delle reali condizioni chimiche del suolo, ma effettuate a cadenza annuale nel tentativo di soddisfare il fabbisogno della pianta del pero e probabilmente incrementate dagli agricoltori alla comparsa di sintomi di clorosi difficilmente

riconducibili a condizioni di carenza, ma al contrario, possibilmente correlati a fenomeni di fitotossicità dovuti ad una quantità elevata di elementi assimilabili.

Sono soprattutto i valori particolarmente elevati di ferro, rame e zinco registrati in quasi tutte le aziende a destare qualche preoccupazione perché la fitotossicità dovuta a elevata disponibilità è un effetto che viene associato proprio ai microelementi, che seppur importante per il metabolismo della pianta, come già detto, devono essere assorbiti in piccole quantità.

La distribuzione dei microelementi, in particolare, non è da eseguire ogni anno, ma quando si verifica una loro eventuale carenza nel suolo, questo perché della quantità totale di microelementi distribuita solo il 10% può essere assorbita dalle radici, il resto rimane nel suolo e si accumula, soprattutto in suoli con pH alcalino come quelli analizzati.

Tabella 4-3-Contenuto di microelementi assimilabili negli 8 suoli delle aziende coinvolte nella sperimentazione

AZIENDA	Fe (mg kg^{-1})	Giudizio Dotazione (Fe)	Mn (mg kg^{-1})	Giudizio Dotazione (Mn)	Zn (mg kg^{-1})	Giudizio Dotazione (Zn)	Cu (mg kg^{-1})	Giudizio Dotazione (Cu)	B (mg kg^{-1})	Giudizio Dotazione (B)
ABB	18,33	medio alto	4,44	normale	7,87	alto	8,15	medio alto	0,36	normale
ALD	14,49	normale	4,80	normale	9,45	alto	22,81	molto alto	1,25	alto
BER	11,47	normale	3,79	normale	3,73	medio alto	9,14	medio alto	0,34	normale
FRE	22,69	medio alto	5,04	medio alto	5,13	alto	21,46	molto alto	0,65	normale
GAR	19,64	medio alto	4,35	normale	2,68	normale	20,20	molto alto	0,47	normale
GOL	15,20	medio alto	4,57	normale	2,34	normale	7,83	medio alto	0,43	normale
PEL	18,90	medio alto	3,95	normale	4,74	medio alto	13,57	alto	0,35	normale
TOM	19,25	medio alto	3,85	normale	2,52	normale	7,16	medio alto	0,53	normale

4.2 **Proprietà biochimiche - respirazione basale e contenuto di biomassa microbica dei suoli**

Per quanto riguarda gli indicatori di fertilità biochimica che rappresentano il focus prioritario e principale del presente studio, sono stati ricavati dati di respirazione basale del suolo, di contenuto di biomassa microbica e posti tra loro in relazione così da effettuare un'analisi dello stato biochimico del suolo e capire la risposta dei microorganismi alle condizioni di fertilità.

In figura 4-2 sono riportati i dati di respirazione basale del suolo misurata per un periodo di 28 giorni e i dati di biomassa microbica misurata nei suoli oggetto di indagine.

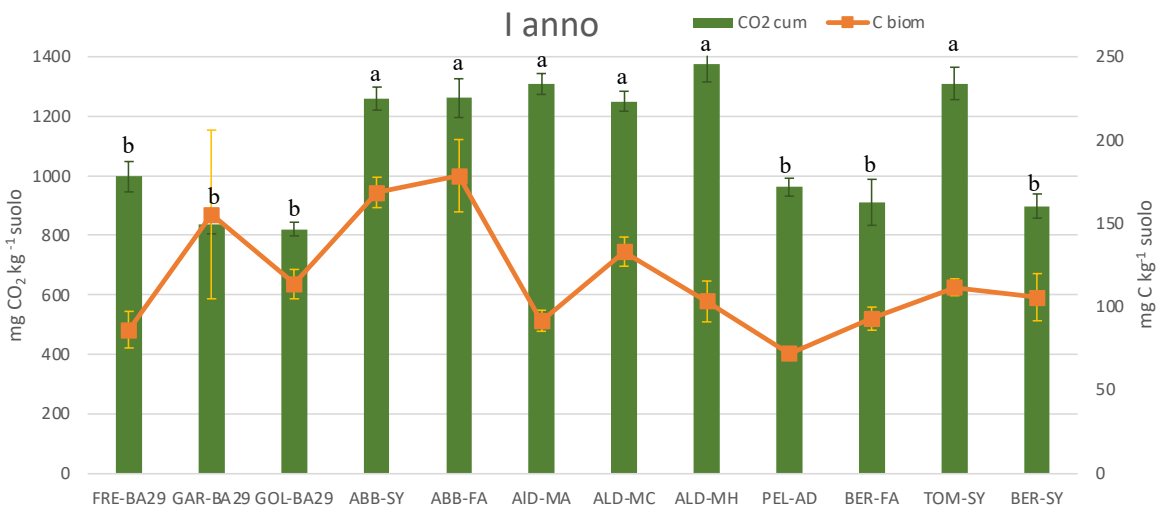

Figura 4-2- I anno di sperimentazione – contenuto di biomassa microbica (istogrammi arancioni) e quantità di CO_2 cumulata (istogrammi verdi) sviluppata durante un periodo di incubazione di 28 giorni (± errore standard della media)

In particolare, gli istogrammi in verde riferiscono ai valori di anidride carbonica sviluppata cumulativamente durante il periodo di incubazione (mg CO_2 cum kg^{-1} suolo) mentre gli istogrammi in arancione riportano i dati di contenuto del carbonio della biomassa microbica (mg C biomassa kg^{-1} suolo) misurati nel suolo delle 8 aziende in presenza dei diversi portinnesti.

I valori più elevati di CO_2 cum (da 1250 a 1376 mg CO_2 Kg^{-1}) sono stati determinati nei suoli con il più alto contenuto di SO (tra 2,2 e 2,7 %), mentre i valori più bassi (da 820 a 997 mg CO_2 Kg^{-1}) sono stati misurati nei suoli dove il contenuto di SO era minore (tra 1,7 e 1,9 %), tranne in FR-BA29, che ha riportato un contenuto intermedio di sostanza organica considerando l'intervallo di dati misurati. La regressione tra il contenuto di SO e l'attività respiratoria indica proporzionalità tra il contenuto di sostanza organica e attività dei microrganismi che la usano come substrato di crescita (figura 4-3).

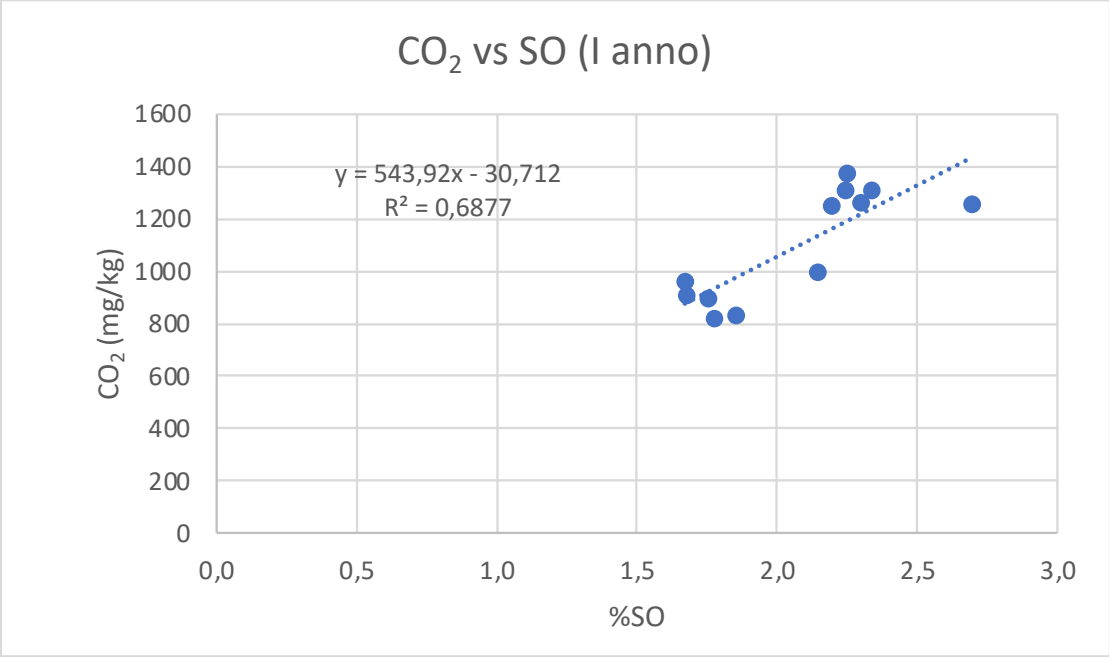

Figura 4-3-Regressione lineare tra CO_2 sviluppata e contenuto di SO (I anno)

I valori di respirazione basale variano nell'intervallo tra 820 mg kg^{-1} (GOL-BA29) e 1376 mg kg^{-1} (ALD-MH), mentre quelli misurati per MBC variano tra un valore minimo di 72 mg kg^{-1} (PEL-AD) ed un valore massimo di 178 mg kg^{-1} (ABB-FA).

Osservando i dati, emerge un generale basso contenuto di biomassa microbica presente nei suoli e una certa discontinuità tra l'andamento della respirazione dei suoli e il carbonio biomassa determinato: in 7 suoli su 13 analizzati il C-biom risulta più basso rispetto al livello di respirazione misurata. Questo significa che i microrganismi respirano molto, ma in compenso crescono poco e non sembrano aumentare in termini di numero, probabilmente a causa di qualche possibile condizione stressante presente nel suolo.

Sebbene il contenuto di biomassa microbica sia proporzionale al contenuto di sostanza organica in quanto quest'ultima rappresenta il loro substrato di crescita da dove ricavare carbonio ed energia, la regressione lineare trovata per il primo anno tra questi due indicatori è

positiva ma piuttosto debole (r^2=0,257), quindi, all'aumentare del contenuto di sostanza organica aumenta anche il contenuto di biomassa microbica, ma in maniera meno che proporzionale (figura 4-4).

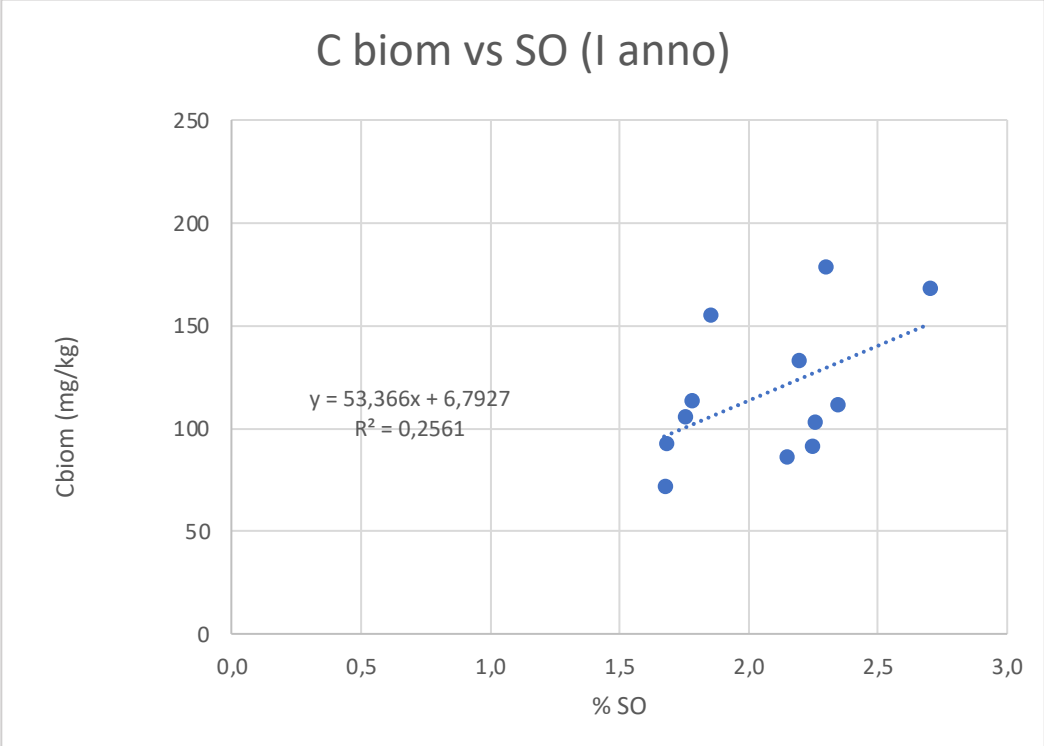

Figura 4-4- Regressione lineare tra contenuto di Cbiom e SO (I anno)

È possibile che la scarsa correlazione possa essere determinata dalla presenza di fattori di stress che impediscono ai microrganismi di consumare sostanza organica per accrescersi, e di usare carbonio organico solo per il mantenimento del metabolismo cellulare.

Infatti, va detto che, nei frutteti convenzionali sottoposti a produzione intensiva, le cause che possono determinare condizioni di stress per i microrganismi nel suolo sono molteplici e spesso riconducibili a pratiche agricole come la lavorazione del suolo o l'applicazione estensiva di sostanze chimiche per il controllo di agenti patogeni e infestanti. È riconosciuto che queste pratiche comuni causano effetti dannosi e tossicità nei confronti di microrganismi non bersaglio (Zhang et al., 2016, Egbe et al.,2021).

Una carenza di contenuto e attività della biomassa microbica del suolo è sempre una condizione indesiderabile che porta a limitazioni del ciclo del carbonio e dei nutrienti e al deterioramento della soppressione del suolo contro i patogeni, rendendo le piante più vulnerabili a fattori di stress abiotici e biotici (Chavarriaa et al., 2018; Jayaraman et al., 2021, Katri et al., 2023).

Inoltre, il verificarsi di gravi periodi di siccità prolungati, può contribuire alla riduzione dell'attività microbica dovuta a condizioni, anche temporanee, di salinità del suolo o delle acque di irrigazione, specialmente in aree vulnerabili alla salinizzazione, come quelle dei frutteti oggetto di indagine (Yan et al., 2021).

Il secondo anno (figura 4-5) si evidenzia un andamento diverso. In termini numerici, la respirazione basale è compresa tra un valore minimo di 667 mg kg^{-1} (BER-SY) e un valore massimo di 1201 (mg kg^{-1}) (ALD-MC), mentre il carbonio biomassa microbica varia tra 182 (BER-SY) e 328 (ALD-MC), evidenziando che il valore più elevato e quello più basso di uno degli indicatori coincidono rispettivamente con il valore massimo e minimo dell'altro parametro nello stesso suolo (i.e. ALD-MC con CO_2cum e Cbiom più alti, mentre BER-SY con i valori più bassi).

In generale, il secondo anno è stato caratterizzato da valori di respirazione più bassi e dalla presenza di un contenuto di biomassa microbica più elevato.

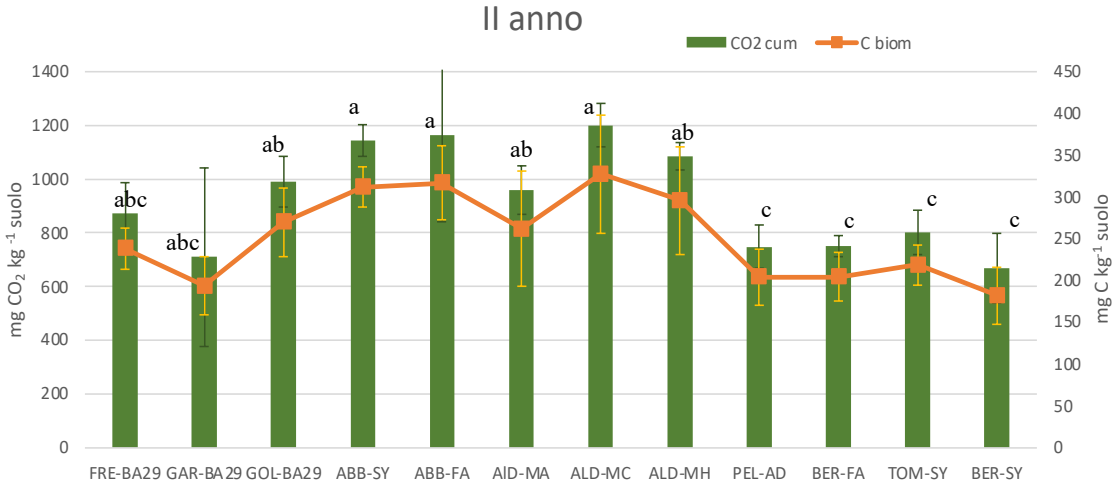

Figura 4-5- II anno di sperimentazione – contenuto di biomassa microbica (istogrammi arancioni) e quantità di CO_2 cumulata (istogrammi verdi) sviluppata durante un periodo di incubazione di 28 giorni (± errore standard della media)

Il valore della sostanza organica nei diversi suoli, al secondo anno, varia da un minimo di 1,5 % (PEL-AD) a un massimo di 2,7% (ALD-MC).

Anche il secondo anno di sperimentazione è stata trovata una generale corrispondenza positiva tra contenuto di sostanza organica e attività di respirazione con una correlazione assimilabile a quella rilevata nel primo anno (figura 4-6), indicando che i suoli con maggior attività respiratoria sono quelli che generalmente contengono più sostanza organica

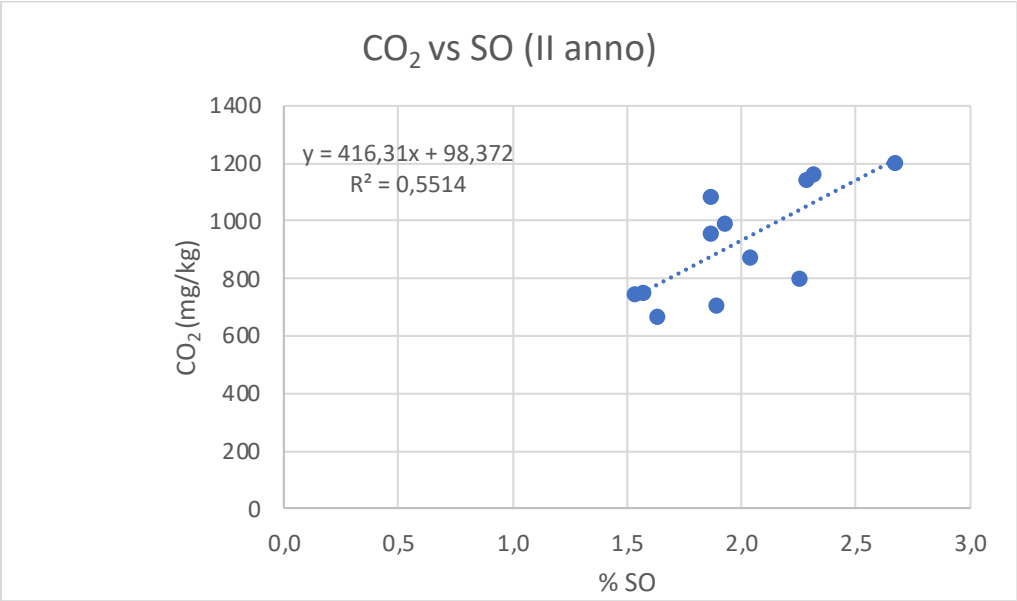

Figura 4-6- Regressione lineare tra CO_2 sviluppata e contenuto di SO (II anno)

Il secondo anno però (figura 4-7) mostra anche un rafforzamento della correlazione positiva tra contenuto di biomassa microbica e contenuto di sostanza organica (r^2=0,551). Il maggior contenuto di biomassa microbica e il rafforzamento della correlazione con il contenuto di sostanza organica, lasciano ipotizzare una maggiore efficienza nell'uso del substrato organico per la crescita microbica.

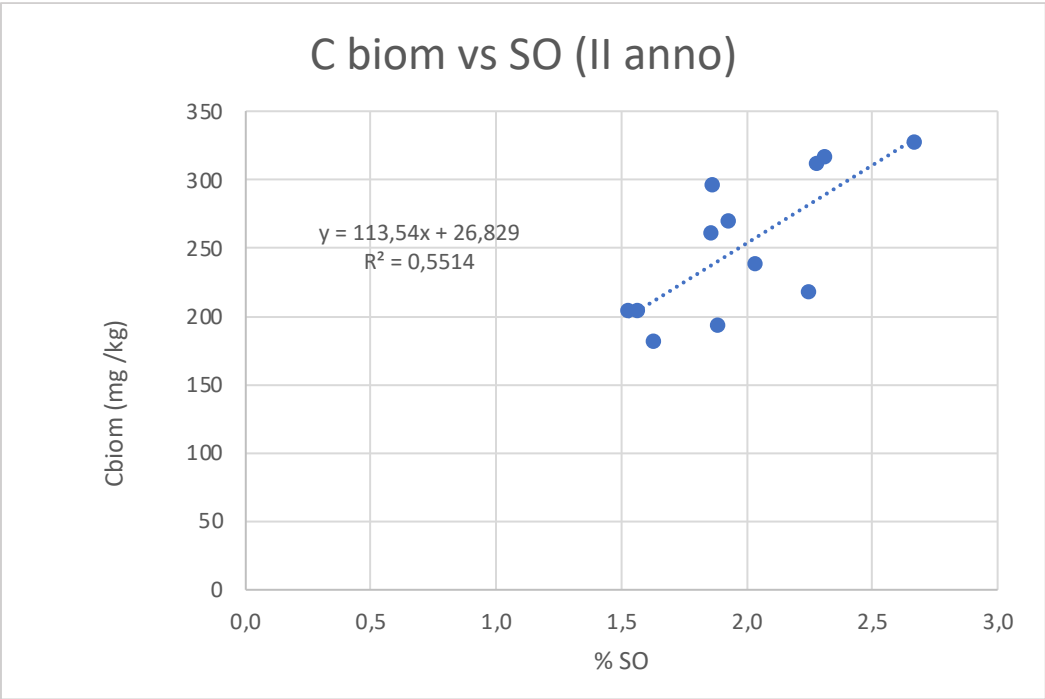

Figura 4-7- Regressione lineare tra contenuto di Cbiom e SO (II anno)

Dall'analisi dei dati emerge un contenuto variabile di sostanza organica per lo stesso suolo nei due anni di sperimentazione. Tale variabilità rientra nella normale oscillazione che il dato può subire in ragione della diversa epoca di campionamento, biomassa vegetale sviluppata, condizioni climatiche (temperatura-umidità), pratiche gestionali del suolo (distribuzione di ammendanti organici). I dati determinati non sono quindi da considerarsi dati puntuali, ma come media dei valori misurati nel tempo. Le stesse considerazioni devono valere rispetto ai dati determinati nel contenuto di biomassa microbica o dell'attività di respirazione, anch'essi variabili per ragioni legate agli aspetti di gestione del suolo o alle condizioni di temperatura ed umidità prevalenti nell'anno di campionamento.

Per avere un dato medio rappresentativo dei suoli analizzati, i dati misurati durante il primo e durante il secondo di sperimentazione sono stati mediati (figura 4-8)

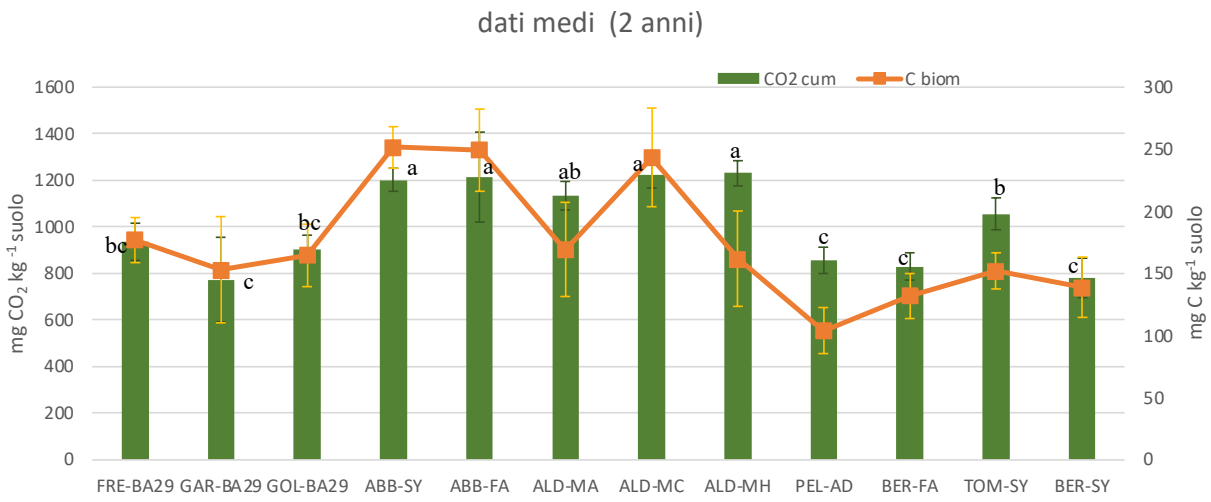

Figura 4-8- Dati medi dei due anni di sperimentazione – contenuto di biomassa microbica (istogrammi arancioni) e quantità di CO_2 cumulata (istogrammi verdi) sviluppata durante un periodo di incubazione di 28 giorni (± errore standard della media)

La mediazione dei dati consente anche di ridurre la variabilità relativa alle diverse condizioni di campionamento o eventualmente legata a disturbi della attività metabolica verificatisi in uno specifico anno. Questo è visibile in un incremento della significatività di correlazione tra il contenuto di Cbiom e il contenuto di sostanza organica (figura 4-9).

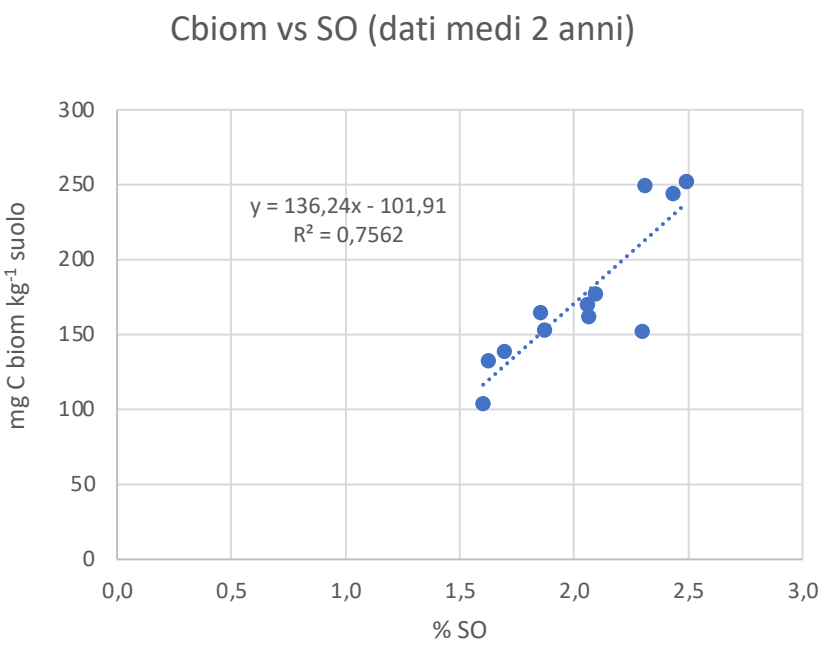

Figura 4-9- Regressione lineare tra contenuto di Cbiom e SO (dato medio 2 anni di sperimentazione)

Inoltre, i dati misurati della biomassa microbica (Cbiom), della respirazione basale del suolo (CO2cum) e della sostanza organica (SO) sono stati usati per il calcolo del quoziente metabolico (qCO_2), del coefficiente di mineralizzazione (qM) e della respirazione basale giornaliera (CO2bas), considerati tutti e tre come indici derivati e indicativi dell'eventuale presenza di fattori di stress della fertilità di ciascun suolo.

Il qCO_2 rappresenta la quota oraria di CO_2 sviluppata per unità in peso di biomassa microbica, il qM rappresenta la percentuale di carbonio mineralizzato sul contenuto di carbonio organico totale iniziale e il CO_2bas rappresenta la CO_2 che viene prodotta al giorno dalla biomassa microbica.

La debole correlazione complessiva riscontrata tra il contenuto di sostanza organica e il contenuto di biomassa microbica, insieme a valori elevati di qCO_2 e bassi valori di qM, evidenziati durante il primo anno di sperimentazione, suggerisce la presenza di possibili fattori di stress (e.g. condizioni di salinità temporanea, condizioni temporanee di anaerobiosi etc.), tuttavia il secondo anno di sperimentazione si è osservato un incremento del contenuto di biomassa microbica e una sua migliore correlazione con il contenuto di sostanza organica e con i livelli di respirazione misurati.

Lo studio degli indicatori di qualità assume valore con il monitoraggio continuo di questi indicatori nel tempo al fine di valutare se il valore medio individuato nel periodo di studio (in questo caso due anni di sperimentazione) tende ad aumentare o a diminuire.

Nel caso dell'applicazione di pratiche agricole sostenibili, tali indicatori tenderanno ad aumentare, mentre l'attuazione di pratiche troppo invasive rispetto al consumo di sostanza organica o all'inibizione dell'attività microbica, tenderanno a diminuire il valore medio degli indicatori nel tempo.

A tale fine, per attenuare eventuali variabilità e avere un'idea più precisa e significativa del livello di fertilità media dei suoli presi in esame, i dati del primo e del secondo anno sono stati mediati per ottenere un valore medio complessivo dei due anni di sperimentazione.

I dati così ottenuti sono stati elaborati ed interpretati secondo il lavoro di alcuni ricercatori (Francaviglia et al., 2017) che facendo riferimento alla letteratura disponibile internazionale hanno individuato per gli indicatori analizzati nel presente studio delle classi di intervallo a cui attribuire un punteggio e ricavare quello che è stato definito con l'acronimo BFI (Biological Fertility Index) ovvero Indice di Fertilità Biologica.

Per il calcolo è stato assegnato un punteggio da 1 a 5 ad ognuno dei sei parametri biochimici presi in considerazione, sia quelli effettivamente misurati (SO, CO2cum, Cbiom) che quelli derivati (qCO_2, qM, e CO_2bas).

Gli intervalli di valore assegnati ai singoli indicatori e ai quozienti derivati punteggi sono riportati nella tabella 4-4.

Tabella 4-4- Punteggio assegnato ad ogni intervallo di valori individuato per gli indicatori di fertilità biochimica presi in esame

Parametri utilizzati	**Punteggio**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Sostanza organica TOC*1.724	< 1,0	≥ 1,0 ≤ 1,5	> 1,5 ≤ 2,0	> 2,0 ≤ 3,0	> 3,0
Respirazione basale Cbas	< 5	≥ 5 ≤ 10	> 10 ≤ 15	> 15 ≤ 20	> 20
Respirazione cumulativa Ccum	< 100	≥ 100 ≤ 250	> 250 ≤ 400	> 400 ≤ 600	> 600
Carbonio microbico Cmic	< 100	≥ 100 ≤ 200	> 200 ≤ 300	> 300 ≤ 400	> 400
Quoziente metabolico qCO_2	≥ 0,4	< 0,4 ≥ 0,3	< 0,3 ≥ 0,2	< 0,2 ≥ 0,1	< 0,1
Quoziente di mineralizzazione qM	< 1,0	≥ 1 ≤ 2	> 2 ≤ 3	> 3 ≤ 4	> 4

Fonte Francaviglia et al., 2017

Il BFI dei suoli si ricava dalla somma aritmetica dei punteggi di ciascuno dei fattori che lo compongono.

Nel presente studio è stato possibile ricavare valori medi, relativi ai due anni di sperimentazione, per ciascun indicatore e ricavare un punteggio da assegnare ad ogni singolo suolo (tabella 4-5)

Tabella 4-5- Punteggio assegnato ad ogni indicatore misurato e derivato nei suoli di pereto

SUOLI	PUNTEGGIO							
	%SO	CO_2 bas	CO_2cum	Cbiom	qCO2	qM	Totale	Giudizio fertilità
FR-BA29	4	2	3	2	3	3	17	media
GA-BA29	3	2	2	2	3	3	15	media
GOL-BA29	3	2	2	2	3	3	15	media
AB-SY	4	3	3	3	3	3	19	buona
AB-FA	4	3	3	3	3	3	19	buona
Al-MA	4	3	3	2	2	3	17	media
AL-MC	4	3	3	3	2	3	18	media
AL-MH	4	3	3	2	2	3	17	media
PE-AD	3	2	2	2	2	3	14	media
BE-FA	3	2	2	2	2	3	14	media
TO-SY	4	3	3	2	2	3	17	media
BE-SY	3	2	2	2	3	3	15	media

I punteggi per singolo indicatore sono stati sommati per ricavare la classe di fertilità biochimica di appartenenza di ogni singolo suolo analizzato (tabella 4-6)

Tabella 4-6- Punteggio associato alla fertilità biochimica dei suoli

Classe di fertilità	I	II	III	IV	V
	Stanchezza allarme	Stress pre-allarme	media	buona	Alta
punteggio	6	7-12	13-18	19-24	25-30

Fonte Francaviglia et al., 2017

Dal calcolo dell'IBF risulta dunque che la maggior parte dei suoli analizzati rientrano in una classe di fertilità media (10 suoli) al limite con la buona (2 suoli) (tabella 4-5).

Lo studio è stato condotto suddividendo i suoli per singolo portainnesto sebbene l'analisi statistica (qui non riportata) non abbia evidenziato nessuna differenza significativa attribuibile alla diversità dei portainnesti.

CONCLUSIONI

La fertilità dei suoli agricoli è spesso associata alla pratica di distribuzione di fertilizzanti e quindi al contenuto di elementi presenti nel suolo. In realtà la fertilità è uno stato dinamico e complesso che coinvolge le proprietà fisiche, chimiche e biologiche del suolo.

Un suolo agricolo fertile e di qualità è definito come un suolo in grado di sostenere la produzione primaria promuovendo la qualità delle acque, dell'aria, la biodiversità e il naturale ciclo biogeochimico degli elementi ed in grado di rendere le colture più resistenti/resilienti agli stress di tipo biotico e abiotico.

L'agricoltore può trarre enorme vantaggio nella messa a dimora di colture in un suolo agricolo di qualità perché la pianta diventa abile a meglio reperire acqua ed elementi nutritivi, a instaurare relazioni mutualistiche. La qualità del suolo può aiutare la pianta a incrementare la resistenza/resilienza della pianta verso tali fenomeni o diversamente aggravare condizioni di stress, soprattutto nel caso della pera Abate che, probabilmente, rappresenta la varietà di pero più suscettibile a condizioni di elevate temperature e scarsa piovosità, fenomeni che negli ultimi anni, si ripetono con maggiore frequenza.

Il presente studio ha messo in evidenza alcuni aspetti dei suoli di coltivazione della pera Abate che, sebbene non riconducibili direttamente a fenomeni di moria, possono, aggravare lo stress fisiologico della pianta. Gli stessi aspetti possono poi contribuire a diminuire il numero e l'attività dei microrganismi del suolo, diminuendone la salute e la fertilità.

I principali fattori potenzialmente rischiosi per il corretto funzionamento fisiologico della pianta e per la componente biotica del suolo evidenziati in questo studio sono:

- presenza di un contenuto di calcare attivo maggiore del 5% (ABB, BER, FRE e GAR) a cui la maggior parte dei porta-innesti risulta sensibile
- salinità di alcuni suoli (ALD, TOM, FRE) superiore a 0,4mS cm^{-1}
- alcuni suoli (ALD, PELL, TOM, FRE e GAR) presentano contenuti di Na solubile elevati (< 20 mg kg^{-1}). In particolare, ALD, TOM e FRE presentano sia elevato contenuto di sodio solubile sia salinità

- elevato contenuto di microelementi, in particolare Cu e Zn che possono reprimere il contenuto di microrganismi e la loro attività. Inoltre, l'elevata disponibilità di questi microelementi e del Fe può portare a fenomeni di fitotossicità alla pianta
- elevato contenuto di macroelementi disponibili che può determinare picchi di salinità e condizioni, anche temporanee, favorevoli a fenomeni di stress osmotico in concomitanza della distribuzione, fogliare o su suolo, dei fertilizzanti o per l'uso di acque più concentrate in sali per fenomeni di evaporazione o risalita del cuneo salino
- disequilibrio nel rapporto Mg/K che può portare a disequilibrio fisiologico nella pianta dovuto ad antagonismo per l'assorbimento tra i due elementi. Quando il rapporto è basso si verifica scarso assorbimento magnesio che determina minore sintesi della clorofilla, quando il rapporto alto si verifica scarso assorbimento del potassio che determina minore resistenza della pianta agli stress abiotici (e.g. stress idrico) o biotici (e.g. minore resistenza all'attacco dei patogeni)
- durante il primo anno di sperimentazione è stato evidenziato un minore contenuto di biomassa microbica e una bassa mineralizzazione di sostanza organica forse per stress metabolico riconducibile allo stato chimico dei suoli (e.g. salinità, sodio solubile, elevato contenuto di Cu e Zn assimilabili)
- la misura degli indicatori biochimici e dei quozienti metabolici derivati permette di attribuire ai suoli analizzati una condizione di fertilità biochimica media.

I risultati ottenuti durante due anni di sperimentazione suggeriscono la necessità di un approccio più razionale nella distribuzione dei concimi basata sulla determinazione periodica dello stato nutrizionale dei suoli e la verifica della qualità delle acque di irrigazione al fine di prevenire l'instaurarsi di condizioni che possano aggravare le difficoltà della pera Abate a mantenersi produttiva negli areali agricoli dell'Emilia Romagna e il deterioramento dello stato di salute dei suoli in cui i pereti sono messi a dimora.

BIBLIOGRAFIA

R.G. Burns, J.L. DeForest, J. Marxsen, R.L. Sinsabaugh, M.E. Stromberger, M.D. Wallenstein, M.N. Weintraub, A. Zoppini. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. Soil Biology & Biochemistry, 58 (2013), pp 216-234.

Monaci, E., Polverigiani, S., Neri, D., Bianchelli, M., Santilocchi, R., Toderi, M., D'Ottavio, P., Vischetti, C. (2017). Effect of contrasting crop rotation systems on soil chemical and biochemical properties and plant root growth in organic farming: First results. Italian Journal of Agronomy, 12:831, 364-374.

S. Musacchi, M. Quartieri, M. Tagliavini: Pear (Pyrus communis) and quince (Cydonia oblonga) roots exhibit different ability to prevent sodium and chloride uptake when irrigated with saline water. Europ. J. Agronomy 24 (2006) 268–275.

Myers, B.A., West, D.W., Callinan, L., Hunter, C.C., 1995. Long term effects of saline irrigation on the yield and growth of mature William pear trees. Irrig. Sci. 16, 35–46.

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L. Soil Biology and Biochemistry, 120 (2018), pp105-125.

D. Bhaduri; T.J. Purakayastha. Long-term tillage, water and nutrient management in rice–wheat cropping system: Assessment and response of soil quality. Soil & Tillage Research, 144 (2014), pp 83-95.

Krauss, M., Berner, A., Perrochet, F. *et al.* Enhanced soil quality with reduced tillage and solid manures in organic farming – a synthesis of 15 years. *Sci Rep* 10, 4403 (2020).

M. Kuntz, A. Berner, A. Gattinger, J.M. Scholberg, P. Mäder, L. Pfiffner. Influence of reduced tillage on earthworm and microbial communities under organic arable farming. Pedobiologia - International Journal of Soil Biology, 56 (2013), pp 251-260.

Desjardins, T.; Barros, E.; Sarrazin, M.; Girardin, C.; Mariotti, A. Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia. Agriculture, Ecosystems and Environment 103 (2004), 365–373.

Y. Kooch; Z.M. Kartalaei; K. Haghverdi; N. Praeg. Soil function indicators are influenced by land use of different ages: A case study in a semi-arid region. Science of the Total Environment 861 (2023), 160570.

M. De Feudis, C. Selmi, G. Falsone, D. Missere, M. Di Bonito, Livia Vittori Antisari. The importance of incorporating soil in the life cycle assessment procedure to improve the sustainability of agricultural management. Catena, 218 (2022), 106563.

Poeplau, C.; Don, A.; Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment 200 (2015), pp 33-41.

S.G. Keel; T. Ankenb; L. Büchic; A. Chervetd; A. Fliessbache; R. Flischf; O. Huguenin-Elieg; P. Mädere; J. Mayerf; S. Sinaj; W. Sturnyd; C. Wüst-Galleya; U. Zihlmannh; J. Leifeld. Loss of soil organic carbon in Swiss long-term agricultural experiments over a wide range of management practices. Agriculture, Ecosystems and Environment 286 (2019), 106654.

S. Bhattacharjya; D. Bhaduri; S. Chauhan; R. Chandra; K.P. Raverkar; N. Pareek. Comparative evaluation of three contrasting land use systems for soil carbon, microbial and biochemical indicators in North-Western Himalaya. Ecological Engineering 103 (2017), pp 21-30.

M. von Lützow; I. Kögel-Knabner; K. Ekschmittb; H. Flessac; G. Guggenbergerd; E. Matznere; B. Marschner. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. Soil Biology & Biochemistry 39 (2007), pp 2183–2207.

D.K. Benbi; K. Brar; A.S. Toor; S. Sharma. Sensitivity of Labile Soil Organic Carbon Pools to Long-Term Fertilizer, Straw and Manure Management in Rice-Wheat System. Pedosphere 25, Agosto 2015 , pp 534-545.

C.A. Cambardella; E.T. Elliott. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. Soil Science Society of American Journal (1992), pp 777-783.

A.J. Franzlübbers; R.L. Haney; F.M. Hons. Relationships of chloroform fumigation±incubation to soil organic matter pools. Soil Biology and Biochemistry 31 (1999), pp 395-405.

M. Cheng; Y. Xiang; Z. Xue; A. Shaoshan; F. Darboux. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. Catena 124 (2015), pp 77-84.

J.W. Raich; A. Tufekciogul. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. Biogeochemistry, 48, (2000), pp 71-90.

K. Singh, B. Singh, R.R. Singh. Changes in physico-chemical, microbial and enzymatic activities during restoration of degraded sodic land: Ecological suitability of mixed forest over monoculture plantation. Catena, 96 (2012) pp 57-67.

D. I. Arnon, P. R. Stout. The Essentiality of Certain Elements in Minute Quantity For Plants With Special Reference to Copper. *Plant Physiology*, Volume 14 (1939), pp 371–375.

Cumhur, A.; Stuart, M; :The Effects of Global Climate Change on Agriculture, January 2008.

Stöckle, C. O., Marsal, J., & Villar, J. M. (2011). IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON IRRIGATED TREE FRUIT PRODUCTION. Acta Horticulturae, (889), 41–52.

Nektarios, N.K.; Zoi, D. Water management and salinity adaptation approaches of Avocado trees: A review for hot-summer Mediterranean climate. Agricultural Water Management, 252 (2021), 106923.

Zhang, M., Xu, Z., Teng, Y., Christie, P., Wang, J., Ren, W., Luo, Y., Li, Z. (2016) Non-target effects of repeated chlorothalonil application on soil nitrogen cycling: The key functional gene study. Science of the Total Environment 543 636–643.

Egbe C.C., G.O. Oyetibo, M.O. Ilori (2021). Ecological impact of organochlorine pesticides consortium on autochthonous microbial community in agricultural soil. Ecotoxicol. Environ. Saf., 207, Article 111319.

Chavarriaa, D.N., Pérez-Brandanb C., Serria D. L.,. Merilesc J.M, Restovichd S. B., Andriulod, A. E., Jacquelind L., Vargas-Gila S. Response of soil microbial communities to agroecological versus conventional systems of extensive agriculture. Agriculture, Ecosystems and Environment 264 (2018) 1–8.

Jayaraman, S., Naorem, A., Lal, R. et al. (2021). Disease-Suppressive Soils—Beyond Food Production: a Critical Review. J Soil Sci Plant Nutr 21, 1437–1465.

Khatri S., S. Dubey, Y.S. Shivay, S. Sharma, L. Jelsbak, (2023) Organic farming induces changes in bacterial community and disease suppressiveness against fungal phytopathogens, Applied Soil Ecology, 181, 104658.

Yan D., X. Long, L. Ye, G. Zhang, A. Hu, D. Wang, S. Ding (2021). Effects of salinity on microbial utilization of straw carbon and microbial residues retention in newly reclaimed coastal soil. Eur. J. Soil Biol., (107), Article 103364.

Francaviglia R., Renzi G., Ledda L, Benedetti, A. (2017) Organic carbon pools and soil biological fertility are affected by land use intensity in Mediterranean ecosystems of Sardinia, Italy. Science of the Total Environment 599–600, 789–796.

SITOGRAFIA

- EU-https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication
- https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Agricoltura-Sviluppo-Rurale-e-Pesca/Produzione-Integrata
- https://european-union.europa.eu
- www.fao.org
- www.gazzettaufficiale.it
- https://agricoltura.regione.emilia-romagna.it/