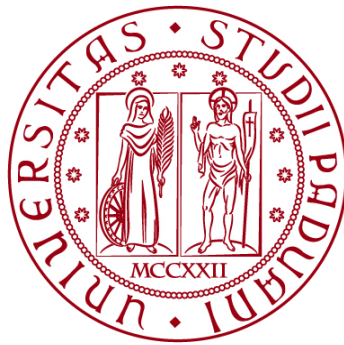


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA**

**Corso di Laurea in Biologia**



**ELABORATO DI LAUREA**

## **Micorrize e agricoltura: influenze e relazioni**

**Tutor:**

Prof. Zane Lorenzo

Dipartimento di Biologia, Università degli Studi di Padova

**Laureanda:** Chiara Colella

**ANNO ACCADEMICO 2022/2023**

## INDICE

<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	3
<b>2. I FUNGHI</b> .....	3
<b>2.1. Generalità sui funghi</b> .....	3
<b>2.2. Interazioni pianta-fungo: la simbiosi micorrizica</b> .....	5
<b>2.3. Effetti benefici</b> .....	6
<b>3. AGRICOLTURA SOSTENIBILE CON L'USO DI FUNGHI MICORRIZICI</b> .....	7
<b>3.1. Le comunità di funghi dipendono dal tipo di suolo e dall'intensità dell'uso</b> .....	7
<b>3.2. Impatto di diversi tipi di sfruttamento del terreno sui funghi micorrizici</b> .....	9
3.2.1. Materiali e Metodi .....	10
3.2.2. Analisi dei dati .....	13
3.2.3. Risultati .....	17
<b>4. CONCLUSIONI</b> .....	19
<b>5. BIBLIOGRAFIA</b> .....	22

## 1.INTRODUZIONE

Ormai da diversi anni si cercano di risolvere alcune problematiche ambientali legate al mantenimento della biodiversità e alla sostenibilità e, se per alcuni ambiti sono state trovate delle soluzioni (Zhu et al., 2000), per molti altri si è ancora lontani dall'obiettivo (Tschardt et al., 2012).

In particolare, l'agricoltura moderna rappresenta tutt'oggi una sfida per gli scienziati, che cercano di risolvere problemi quali l'inquinamento dei suoli, dell'aria o dell'acqua e la perdita di elementi faunistici (Tilman et al., 2002).

Inoltre, molto spesso le tecniche agricole prevedono lo sfruttamento dei terreni coltivati fino al massimo delle loro possibilità, impoverendoli (Kopittke et al., 2019).

In questo elaborato ho voluto approfondire questo aspetto; esaminando le recenti ricerche scientifiche, l'articolo intitolato *Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi* (Säle et al., 2015) pubblicato dalla rivista *Soil Biology and Biochemistry* ha attirato la mia attenzione.

L'uso dei miceti in associazione con le radici delle piante apporta diversi benefici, come per esempio un miglior assorbimento delle sostanze nutritive e una diminuzione della presenza di metalli pesanti nei germogli. Tuttavia, nei terreni coltivati il loro insediamento non è semplice a causa di un utilizzo troppo intensivo del suolo e di pratiche agricole altrettanto aggressive.

L'articolo si basa sull'esperimento effettuato nel 2015 nella valle di Sissle (Frick, Svizzera) da diversi studiosi, tra cui Verena Säle, Paula Aguilera e Endre Laczko, per indagare l'impatto di diverse tecniche agricole sulle comunità di funghi micorrizici in simbiosi con le piante coltivate.

Lo scopo di tale lavoro era verificare se, con un uso meno intenso dei suoli, le coltivazioni potessero beneficiare degli effetti dei funghi, arrivando a bilanciare produttività e sostenibilità.

Questa è appunto la domanda alla quale tenterò di rispondere.

## 2.I FUNGHI

### 2.1.Generalità sui funghi

Il regno dei funghi comprende una grande varietà di organismi eucarioti, che si differenziano per molteplici aspetti, dalla morfologia alla modalità di riproduzione.

La maggior parte dei funghi è pluricellulare, ma vi sono anche organismi unicellulari, come i lieviti e alcune specie primitive. Sono tutti organismi eterotrofi: la loro modalità di nutrizione avviene per assorbimento di molecole organiche in soluzione, recuperate dall'ambiente circostante o tramite digestione esterna grazie al rilascio di specifici enzimi digestivi.

Sono organismi ubiquitari che hanno buone capacità di adattamento e questo permette loro di crescere su diversi tipi di substrato.

In generale possiamo suddividerli in: specie saprofiti, che dal punto di vista ecologico sono decompositori molto efficienti permettendo il riciclaggio della materia organica dispersa nell'ambiente; specie parassite, che vivono in simbiosi con organismi ospiti, da cui assorbono le sostanze nutritive causando dei danni; e infine specie mutualistiche, che vivono anch'esse in simbiosi con altri organismi, ma senza danneggiarli.

La struttura dei funghi pluricellulari è caratterizzata dalle ife, ovvero da ammassi di filamenti che compongono il micelio. Questa porzione è sotterranea, ma in molti gruppi di funghi emerge periodicamente dal terreno una struttura composta da ife organizzate, che nel loro insieme formano un elemento visibile atto alla riproduzione, detto corpo fruttifero.

La riproduzione può avvenire sia sessualmente che asessualmente, ad eccezione di alcune specie, del phylum dei Deuteromiceti (in cui essa è solamente asessuata). Ci sono più modalità in cui può avvenire la riproduzione asessuata: per frammentazione, per gemmazione, per scissione binaria e per sporogenesi.

La riproduzione sessuata prevede un ciclo ad alternanza di generazioni diploidi e aploidi, in cui giocano un ruolo fondamentale le spore, prodotte da organismi diploidi per meiosi, che si diffondono nell'ambiente e poi germinano, generando un organismo aploide. Successivamente, con la fusione di ife aploidi appartenenti a ceppi d'accoppiamento diversi e compatibili, si formano strutture dette gametangi.

Negli zigomiceti, i gametangi si fondono e generano zigosporangi diploidi. In seguito, il giovane zigosporangio si svilupperà in una zigospora, che in condizioni favorevoli germinerà e darà origine ad uno sporangio, che per meiosi formerà nuovamente le spore.

Negli ascomiceti e nei basidiomiceti vi è un ciclo vitale complesso che prevede la fusione delle ife aploidi, ma un ritardo nella fusione dei rispettivi nuclei: si sviluppa un dicarion, che permette la formazione del corpo fruttifero, struttura in cui vi sarà poi la fusione dei nuclei a formare gli zigoti diploidi.

I corpi fruttiferi si distinguono in ascocarpi negli ascomiceti e basidiocarpi nei basidiomiceti (Curtis et al., 2009).

## 2.2. Interazioni pianta-fungo: la simbiosi micorrizica

Il termine simbiosi indica i fenomeni di associazione stretta di organismi di specie diverse che persiste nel tempo; nello specifico solitamente viene intesa come fenomeno di mutualismo, in cui entrambi gli organismi traggono vantaggi reciproci (Owen, 1947).

Per quanto riguarda il regno dei funghi, esistono molte specie parassite che provocano danni all'ospite: ne sono un esempio i funghi del gruppo dei dermatofiti, come il genere *Microsporum*, che aderiscono alle cellule epiteliali causando quelle che vengono comunemente definite micosi.

Tuttavia, vi sono anche specie da cui le piante traggono dei notevoli vantaggi: un esempio di queste specie commensali sono le comunità di funghi micorrizici, che vivono in simbiosi con le radici non lignificate di piante vascolari. La loro presenza nei suoli ha un'elevata importanza a livello ecologico e le capacità di adattamento permettono loro di insediarsi nelle radici del 90 % delle specie di piante viventi (Bonfante et al., 2010).

Le micorrize costituiscono un gruppo eterogeneo di organismi classificati in diversi taxa fungini.

In generale, si possono identificare due gruppi: gli Endofiti con ife prive di setti, i Glomeromiceti, e gli Ascomiceti o Basidiomiceti provvisti di ife settate.

In alternativa è possibile una diversa classificazione delle micorrize: si possono distinguere le endomicorrize e le ectomicorrize. Nelle ectomicorrize (EM) non vi è una penetrazione nella radice, ma le ife ne circondano la superficie esterna, formando una guaina, detta mantello, e una rete detta rete Hartig che si sviluppa intorno alle cellule epidermiche e corticali. Nelle endomicorrize invece le ife penetrano attraverso la parete cellulare e creano delle strutture ovoidali (vescicole) o ramificate (arbuscoli).

Fanno parte delle endomicorrize le ericoidi, le micorrize delle orchidee e le micorrize arbuscolari, identificate con la sigla AM o AMF. Nello specifico, tutte le AM appartengono al phylum Glomeromycota; la loro struttura riflette le caratteristiche delle endomicorrize: le ife si insediano occupando gli spazi intracellulari interni alla radice e si sviluppano in una serie di protrusioni, come per esempio gli arbuscoli; inoltre si sviluppa una struttura esterna della superficie radicale, detta ipopodio.

### 2.3. Effetti benefici

La simbiosi micorrizica permette alla pianta ospite di ottenere alcuni vantaggi, migliorando il suo stato di salute generale.

Il primo aspetto che si può considerare è l'assorbimento dei nutrienti, che aumenta nelle piante in associazione fungina, grazie alla capacità di assorbimento delle reti ifali nel suolo (Fortuna, 2008).

Nello specifico viene incrementato il numero di macronutrienti e di micronutrienti, come per esempio il fosforo.

Tuttavia, il fosforo non è l'unico elemento che si può ritrovare in maggior quantità nelle piante in simbiosi con AM; vi è un aumento infatti anche di micronutrienti, come Zn e Cu, che sono traslocati a livello dell'arbuscolo.

Un altro esempio degli effetti benefici a livello nutrizionale è stato verificato nelle piante di pomodoro: in quelle inoculate con AM è stato riscontrato un aumento di N, P, Mg, Ca, Mn e Fe (Balliu et al., 2015). È bene ricordare che la capacità dei funghi di decomporre la sostanza morta nei suoli si può associare al riutilizzo di grandi quantità di N, che può successivamente essere trasferito alle piante anche in percentuali elevate.

Valutando questo primo aspetto è possibile osservare due conseguenze: la prima è un ulteriore aumento di tutte quelle sostanze create a partire dagli elementi nutrizionali, attraverso specifiche trasformazioni; ne sono esempi i metaboliti secondari antiossidanti e i carotenoidi. Questa maggiore disponibilità di molecole utili alla pianta permette una migliore resa biologica.

La seconda conseguenza si rispecchia nelle dimensioni della pianta stessa: l'aumento di nutrienti comporta uno stato di salute e di vigore migliore, incrementando per esempio le attività fotosintetiche; questa situazione permette una crescita superiore dell'apparato sia radicale che fogliare.

I benefici della simbiosi micorrizica non sono terminati: vi sono infatti ulteriori aspetti che riguardano la resistenza agli stress abiotici di siccità, salinità, metalli pesanti e temperatura.

La mancanza di acqua può provocare diversi problemi alle piante, che tuttavia sono notevolmente aiutate se si trovano in uno stato di simbiosi micorrizica: le ife fungine infatti permettono di assorbire le molecole di H<sub>2</sub>O in una superficie più estesa nel suolo; inoltre incrementano la conducibilità idraulica dei sistemi interni alla pianta (Morte et al., 2000).

Per quanto riguarda la salinizzazione del suolo, le AM contribuiscono a mantenere il rapporto tra le concentrazioni di Na e Cl costanti, allo stesso tempo diminuendone l'assorbimento; inoltre permettono di continuare un'attività fotosintetica regolare, di aumentare la conduttanza a livello degli stomi e di ridurre i danni ossidativi (Begum et al., 2019).

In aggiunta alla salinizzazione dei suoli vi è un'altra problematica a cui si cerca una soluzione da diversi anni, ovvero la contaminazione da metalli pesanti. Anche in questo caso è stato verificato che i funghi micorrizici apportano dei benefici alle specie vegetali ospiti; nello specifico si è visto che diverse specie di AM, come *F. mosseae* e *D. spurcum*, hanno la tendenza a trattenere Pb, Zn e Cd nelle radici, limitando il loro trasferimento nei germogli (Zhan et al., 2018). Un ulteriore beneficio che la simbiosi apporta alle piante si riscontra negli stress biotici: è stato dimostrato che le AMF, quindi i funghi micorrizici arbuscolari, cresciute negli agroecosistemi permettono di sopprimere alcune piante infestanti (Rinaudo et al., 2009).

### **3.AGRICOLTURA SOSTENIBILE CON L'USO DI FUNGHI MICORRIZICI**

#### **3.1.Le comunità di funghi dipendono dal tipo di suolo e dall'intensità dell'uso**

Nell'ambito dell'agricoltura è importante considerare un aspetto delle comunità fungine micorriziche, ovvero la diversa composizione di specie che si instaura sia in base al tipo di suolo, sia in base al suo tipo di sfruttamento.

In questo senso, le micorrize costituiscono un buon bioindicatore della qualità del terreno.

Nel 2010 è stato pubblicato dalla rivista *Soil Biology and Biochemistry* uno studio, intitolato *Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities* (Oehl et al., 2010), in cui sono state analizzate composizioni di funghi micorrizici arbuscolari in diversi terreni nell'Europa centrale.

La novità dell'esperimento effettuato è stata la comparazione diretta tra diversi tipi di suolo (Cambisol, Fluvisol e Leptosol) l'intensità d'uso eseguito su di esso e le comunità di micorrize.

Le domande a cui gli autori hanno cercato di dare una risposta sono state: vi è una dipendenza tra la composizione delle comunità fungine e il tipo di suolo? L'intensità dell'uso dei campi influenza queste comunità? Vi sono delle micorrize caratteristiche di un suolo o di un uso specifico?

Per lo svolgimento dell'esperimento sono stati scelti 16 siti situati intorno alla pianura della valle del Reno, il cui clima è temperato (8-9.5°C) e presenta un regime di precipitazioni che si aggira intorno ai 700-1000 mm annui.

Sono state in seguito studiate le caratteristiche del terreno e alcuni parametri, come le pratiche agricole svolte sui campi, come riassunto in figura 1.

Soil type on parent material	Land use (Site code)	Farming system	Type and level of fertilization (kg ha <sup>-1</sup> )	Land use intensity (scale)	Standing vegetation in April 2003 (number of plant species in grasslands) <sup>a</sup>	Location (m above sea level) and Geographic position (km) <sup>b</sup>
<b>Siliceous soils</b>						
<i>Cambisols on Permian Sandstones (PS)</i>						
Chromi-humic Cambisol	Grassland (PS-hg)	Meadow, conventional, mown 2 × a <sup>-1</sup>	Mineral N-P-K fertilizer N (110), P (60)	Very low (1)	Arrhenatheretum (36)	Sankt Peter (780) 427.7 E, 5,319.3 N
Chromi-stagnic Cambisol	Grassland (PS-g)	Pasture, conventional grazed 3 × a <sup>-1</sup>	Horse manure and cow slurry N (110), P (50)	Low (2)	Arrhenatheretum (42)	Steinen-Weitenau (420) 408.6 E, 5,281.9 N
Chromi-stagnic Cambisol	Arable land (PS-a)	Maize-wheat crop rotation, conventional	Mineral + slurry N (190), P (50)	High (4)	Bare Soil	Steinen-Weitenau (390) 407.7 E, 5,282.0 N
<i>Cambisols on lower Triassic sandstones (TS)</i>						
Chromi-humic Cambisol	Grassland (TS-g)	Meadow, conventional, mown 2 × a <sup>-1</sup>	Mineral N (110), P (50)	Very low (1)	Arrhenatheretum (36)	Sexau-Tennenbach (260) 417.8 E, 5,330.0 N
Chromi-humic Cambisol	Arable land (TS-a)	Maize-maize-wheat crop rotation, conventional	Mineral N (170), P (80)	High (4)	Bare Soil	Sexau-Staudenhöfe (250) 418.3 E, 5,331.7 N
<i>Cambisols on Granite rocks (GR) or diluvial crystalline granite/gneiss sediments (DG)</i>						
Humic Cambisol	Grassland (GR-hg)	Pasture, conventional, grazed 3 × a <sup>-1</sup>	Mineral and manure N (100), P (20)	Low (2)	Arrhenatheretum (32)	Gresgen (700) 411.7 E, 5,285.4 N
Humic Cambisol	Grassland (DG-g1)	Meadow, conventional, mown 2 × a <sup>-1</sup>	Mineral N (70), P (0)	Very low (1)	Arrhenatheretum (41)	Wintzenheim-La Forge (230) 368.8 E, 5,324.5 N
Humic Cambisol	Arable land (DG-a1)	Maize mono-cropping, conventional	Mineral N (190), P (40)	Very high (5)	Bare Soil	Wintzenheim-La Forge (230) 368.7 E, 5,324.5 N
Stagnic Cambisol	Grassland (DG-g2)	Meadow, conventional, mown 3 × a <sup>-1</sup>	Cow manure and slurry N (140), P (60)	Low (2)	Arrhenatheretum (24)	Glottertal (350) 420.7 E, 5,322.1 N
Stagnic Cambisol	Arable land (DG-a2)	Maize-wheat crop rotation, conventional	Mineral + cow manure + slurry N (200), P (70)	High (4)	Bare Soil	Glottertal (350m) 420.5 E, 5,322.1 N
<i>Fluvisols on alluvial crystalline granite/gneiss sediments (AG)</i>						
Gleyic Fluvisol	Grassland (AG-g)	Meadow, conventional, mown 3 × a <sup>-1</sup>	Cow manure and slurry N (140), P (70)	Low (2)	Arrhenatheretum (25)	Staufen-Grünern (320) 406.7 E, 5,301.8 N
Gleyic Fluvisol	Arable land (AG-a)	Maize mono-cropping conventional	Mineral N (190), P (60)	Very high (5)	Bare Soil	Staufen-Grünern (325) 405.9 E, 5,302.1 N
<b>Calcareous soils</b>						
<i>Leptosols on Jurassic limestones (JL)</i>						
Rendzic Leptosol	Grassland (JL-hg)	Meadow, bio-organic, mown 2 ×, grazed 1 × a <sup>-1</sup>	Sheep manure N (50), P (10)	Very low (1)	Arrhenatheretum (46)	Läufelfingen (610) 413.9 E, 5,251.5 N
Rendzic Leptosol	Arable land (JL-ha)	Grass/clover-cereals-medicinal plants crop rotation, bio-organic	Composted cow manure & slurry N (120), P (50)	Moderate (3)	Grass-clover; 1st year	Läufelfingen (820) 415.3 E, 5,251.0 N
Rendzic Leptosol	Grassland (JL-g)	Pasture (sheep), extensive-conventional	None	Very low (1)	Mesobrometum (64)	Nenzlingen (470) 391.8 E, 5,256.9 N
Rendzic Leptosol	Arable land (JL-a)	Potatoes-cereals-onion crop rotation, bio-organic, no-tillage	Cow manure N (50), P (25)	Moderate (3)	Bare Soil; planted potatoes	Reigoldswil (470) 401.8 E, 5,253.0 N

**Figura 1:** La figura riporta il tipo di suolo, l'uso del terreno, il sistema agricolo, il tipo e la quantità di fertilizzante, l'intensità d'uso del terreno, il numero di specie registrate nel mese di aprile (2003) e le località dei siti analizzati nell'articolo sopra citato (Oehl et al, 2010).

L'intensità d'uso è indicata con termini diversi: molto alto (monocoltura di mais); alto (con sistemi di rotazione delle colture di mais e cereali); moderato (con sistemi estensivi di rotazione delle colture); basso (sistemi di prati con più di 2 raccolti come talee); molto basso (prati con 1-2 raccolti o pascoli estensivi).

Nella stagione di crescita specifica di quella regione, che corrisponde al mese di aprile, sono stati campionati i siti e sono stati utilizzati dei carotatori di 6 cm di



diametro che prelevavano il terreno fino ad una profondità di 10 cm. Il terreno raccolto è stato poi utilizzato per allestire delle “colture trappola” per le micorrize.

Dopo 2 mesi sono state fatte le analisi delle spore fungine, ripetute periodicamente fino ad un tempo massimo di 20 mesi.

Gli autori dell’articolo hanno tratto le seguenti conclusioni: è certo che l’intensità dell’uso del suolo giochi un ruolo fondamentale nella composizione delle comunità micorriziche, permettendo l’insediamento di alcune specie, ed escludendone altre.

Tuttavia, sono state ritrovate alcune specie generaliste in tutti i siti, ne è un esempio *Glomus diaphanum*.

La densità delle spore variava a seconda del tipo di terreno e del tipo di pratiche agricole effettuate su di esso: nelle praterie si è riscontrato un numero di spore più elevato rispetto ai terreni destinati alla semina.

Un aspetto comune sia per i terreni coltivati che per le praterie era che, in generale, i suoli di Leptosols avevano una maggior abbondanza di spore rispetto a suoli di Cambiosols o Fluviosols.

Tuttavia, analizzando l’abbondanza, la ricchezza e la diversità di genere, nel Cambiosols e nel Fluviosols sono state trovate popolazioni più diversificate.

In generale, è stato possibile trarre una conclusione importante: nello sviluppo delle comunità fungine micorriziche, il tipo di pratiche agricole o comunque il tipo di uso del terreno ha un maggior impatto rispetto alla composizione e al tipo di suolo stesso.

Nel prossimo capitolo analizzerò proprio questo aspetto, ricercando esattamente gli effetti delle pratiche agricole sulle comunità di micorrize.

### **3.2.Impatto di diversi tipi di sfruttamento del terreno sui funghi micorrizici**

L’aspetto centrale di questo elaborato si basa sullo studio e la comparazione dell’impatto di diverse tecniche agricole sulle comunità di funghi micorrizici.

Per farlo, analizzerò la ricerca pubblicata da *Soil Biology and Biochemistry* nel 2015, intitolata *Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi* (Såle et al., 2015).

L’articolo ha come obiettivo quello di comprendere la risposta dei funghi AMF a diversi tipi di coltivazione, comprendendo quella biologica, in cui quindi si utilizzano sostanze naturali come fertilizzanti e pesticidi e si tende ad avere basso un impatto ambientale.

### 3.2.1. Materiali e Metodi

L'esperimento è stato effettuato nella valle di Sissle in Svizzera in sette diversi siti, localizzati a poca distanza l'uno dall'altro e circa a 400 metri dal fiume Sissle. Prima di iniziare lo studio sono stati analizzati diversi parametri: il tipo di suolo corrisponde ad un Vertic Cambiosols, sviluppatosi su sedimenti giurassici alluvionali e colluviali con una temperatura media ed un regime di precipitazione annui di rispettivamente 9°C e 1000 mm.

Nei sette siti sono state adottate tecniche differenti: i primi quattro erano a gestione biologica, con due tipi di lavorazione (ridotta e convenzionale), un sito corrispondeva ad una prateria, anch'essa a gestione biologica, ed infine gli ultimi due siti non erano a gestione biologica ma erano coltivati con sistemi convenzionali seguendo le linee guida della produzione integrata svizzera (IP).

Quattro siti inoltre sono stati utilizzati per un esperimento a lungo termine dell'Istituto di ricerca per l'agricoltura biologica (FiBL) per il confronto tra la lavorazione ridotta e quella convenzionale (Berner et al., 2008).

La lavorazione ridotta (RO) si distingue da quella convenzionale (CO) principalmente per l'uso di attrezzi che non effettuano un rimescolamento degli strati profondi del terreno, ma che restano più superficiali. Un esempio comune è la differenza di profondità con cui l'aratro penetra nei suoli: con la lavorazione ridotta essa è di circa sette centimetri, nella lavorazione convenzionale arriva fino a quindici centimetri.

La preparazione del letto di semina è stata la medesima sia per i trattamenti ridotti che convenzionali ed è stato utilizzato un motocoltivatore con una profondità di circa cinque centimetri.

Nei due campi non a gestione biologica (IP) è stato preparato il terreno in due modi differenti: nel primo campo si è arrivati ad una profondità dell'aratro di 18-20 centimetri con l'utilizzo di un erpice rotante prima della semina, mentre nel secondo, a dipendenza del raccolto scelto, è stato utilizzato un aratro a profondità di 16-18 centimetri o il motocoltivatore a 5 cm.

Vi sono state quattro repliche dell'esperimento sul campo e sono stati utilizzati due tipi di fertilizzanti: letame integrato a liquame, distinto nella tabella con la lettera M; solamente liquame, indicato con la lettera S.

Nella figura 2 sono riportati alcuni dati dell'esperimento e sono stati distinti i due tipi di fertilizzanti impiegati: con la lettera M il letame integrato a liquame e con la lettera S unicamente il liquame.

Nr.	Land use type	Farming system	Type and level of fertilization	Site code	Land use intensity (crop rotation) (scale)	Standing vegetation at sampling date
1	Grassland organic	Extensive grassland (GL)	No	GL	0	Arrhenatheretum with randomly dispersed apple trees
2	Arable land Organic farming	Reduced tillage (RO)	Organic; Manure compost (M), & slurry; 1.4 livestock units ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	RO-M	1	Long-term tillage field experiment (Berner et al., 2008) with winter wheat
3	Arable land Organic farming	Reduced tillage (RO)	Organic; Slurry (S); 1.4 livestock units ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	RO-S	1	(6 year: maize–winter wheat (oat-clover intercrop)-sunflower-spelt-2.5 year of grass-clover)
4	Arable land Organic farming	Conventional tillage (CO)	Organic; Manure compost (M), & slurry; 1.4 livestock units ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	CO-M	2	
5	Arable land Organic farming	Conventional tillage (CO)	Organic; Slurry (S); 1.4 livestock units ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	CO-S	2	
6	Arable land Conventional farming	Conventional tillage (IP1)	Mineral: 90–120 kg N ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	IP1	4	Winter wheat (3 year: winter wheat-winter barley- maize)
7	Arable land Conventional farming	Semi-reduced tillage (IP2)	Mineral: 60 kg N ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> Organic: 24 m <sup>3</sup> poultry manure ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	IP2	3	Winter wheat- (4 year: winter wheat-rye-pea-maize)

**Figura 2:** Sono riportati i dati di uso del suolo, le pratiche agricole, il tipo e livello di fertilizzazione, il codice del sito, l'intensità d'uso del terreno e infine è indicata la rotazione delle colture.

Tratta da Säle et al., 2015.

Il processo di campionamento è stato eseguito nel 2019 in quattro repliche per sito e a 4 profondità diverse, ovvero a 0-10 cm, a 10-20 cm, 20-30 cm, e a 30-40 cm. Il numero complessivo dei campioni risultava quindi essere 112.

Per l'analisi dei parametri chimici, quali PH, carbonio organico e fosforo, e delle spore fungine, determinati campioni sono stati macinati e successivamente asciugati. Altri campioni sono stati prelevati e mantenuti ad una temperatura costante di 4°C per due giorni, per poi essere utilizzati come inoculi nelle trappole AMF, ovvero per le micorrize arbuscolari.

Per le colture trappola sono state utilizzate quattro piante ospiti per le micorrize, ovvero *Plantago lanceolata*, *Lolium perenne*, *Trifolium pratense s.l.* e *Hieracium pilosella* e sono stati tenuti sotto controllo alcuni parametri: i vasi erano da 3500 mL e contenevano 1500 g di substrato autoclavato Terragreen e Miscela Loess 3:1; il pH-H<sub>2</sub>O era ad un livello di 6,8 e il carbonio organico 3,0 g/kg<sup>1</sup>; il fosforo e il potassio disponibili corrispondevano rispettivamente a 15,6 mg/kg<sup>1</sup> e 350 mg/kg<sup>1</sup>. Circa quattro giorni dopo l'emergenza sono stati mantenuti solo tre esemplari per pianta ospite e vaso.

Nella serra contenente le colture, nello specifico la serra di Agroscope a Zürich-Reckholz, sono state mantenute condizioni di luce naturale per una durata di 20 mesi e di temperatura costante a circa 20°-30°C per il giorno e 15°-22 °C per la notte in estate, mentre in inverno di 15°-20°C per il giorno e 10°-12°C per la notte.

All'interno della serra vi era un sistema di irrigazione per prevenire lo stress idrico nelle piante e per ridurre la contaminazione tra le comunità fungine;

mentre per evitare l'attacco di insetti o acari nocivi, quando necessario, sono stati usati agenti di biocontrollo o specifici fungicida a base di zolfo.

Le spore formatesi durante l'esperimento sono state controllate a distanza di 4, 8, 16 e 20 mesi e sono state estratte dal terreno tramite setacciatura a umido e centrifugazione in gradiente di densità di saccarosio.

L'analisi e il successivo riconoscimento e classificazione sono stati eseguiti tramite microscopio, posizionando le spore su vetrini con l'utilizzo di polivinile-acido lattico-glicerolo (PLVG) o PLVG miscelato 1:1 con il reagente di Melzer.

La classificazione è stata fatta basandosi sul "Glomeromycota system" di Oehl et al. (Oehl et al., 2011) recentemente pubblicato dalla *International Mycological Association* (IMA).

Dopo il riconoscimento le spore sono state identificate come rare se comprese in meno del 5%, frequenti se comprese tra il 15% e il 25% e dominanti se comprese in più del 25%.

Per le analisi statistiche sono stati utilizzati diversi modelli per i sette siti: le differenze di pH, il carbonio organico, il fosforo disponibile, la densità delle spore, la ricchezza e diversità di specie fungine sono stati testati utilizzando l'analisi della varianza (ANOVA): sono state studiate le variabilità dei gruppi utilizzando le pratiche agricole e la fertilizzazione come uno o due fattori separati e la profondità del suolo come secondo o terzo fattore principale.

A questo è seguito l'uso di altri modelli, come l'HSD di Tukey per testare le differenze significative dei trattamenti o della profondità del suolo, oppure il test Kruskal-Wallis non parametrico con i valori di probabilità p regolati da Bonferroni per l'abbondanza di specie micorriziche.

I risultati delle analisi statistiche e i rispettivi grafici sono stati ottenuti grazie a diversi software, come il "pacchetto multcomp" (Hothorn et al., 2008).

### 3.2.2. Analisi dei dati

L'esperimento si è composto di numerose misurazioni dei diversi terreni: si possono fare alcune osservazioni riguardo ai dati misurati e riportati nella figura

Soil depth (cm)	Grassland	Reduced tillage (organic)		Conventional tillage (organic)		Conventional farming (IP)		LSD
	GL	RO-M	RO-S	CO-M	CO-S	IP1	IP2	
<b>Soil pH (H<sub>2</sub>O)</b>								
0–10	7.5 a B	7.6 a A	7.6 a B	7.6 a A	7.7 a A	6.6 b B	6.5 b B	0.30
10–20	8.1 a A	7.8 ab A	7.8 ab B	7.7 b A	7.7 b A	6.8 c AB	6.8 c A	0.27
20–30	8.2 a A	8.1 ab A	8.2 a A	7.8 b A	7.8 b A	7.2 c A	6.7 d A	0.23
30–40	8.1 a A	8.0 a A	8.2 a A	8.0 a A	7.9 a A	7.1 b A	6.8 b A	0.21
LSD	0.10	0.35	0.21	0.42	0.22	0.26	0.15	
<b>Organic carbon (g kg<sup>-1</sup>)</b>								
0–10	31.8 a A	29.5 a A	24.5 a A	26.1 a A	25.5 a A	23.7 a A	23.6 a A	7.3
10–20	14.8 b B	23.2 a A	23.7 a A	24.4 a A	24.7 a A	22.4 a AB	23.2 a A	4.6
20–30	12.5 b B	12.5 b B	12.9 b B	14.8 ab B	16.6 ab B	19.6 a B	18.5 ab A	4.2
30–40	18.1 a B	11.3 b B	11.0 b B	10.9 b B	13.1 b B	22.1 a AB	20.0 a A	2.7
LSD	7.6	5.3	5.5	4.3	4.1	2.5	5.7	
<b>Available P (mg kg<sup>-1</sup>)</b>								
0–10	32.5 b A	161.0 a A	149.3 a A	128.0 a A	126.8 a A	50.8 b A	56.6 b A	23.7
10–20	12.4 c B	120.9 a B	122.6 a B	131.4 a A	137.6 a A	54.1 b A	53.0 b A	19.4
20–30	17.7 b B	33.3 ab C	44.7 a C	55.9 a B	58.1 a B	38.2 ab B	52.4 a A	16.0
30–40	17.3 c B	23.4 bc C	41.1 ab C	32.0 abc B	35.6 ab C	42.3 a B	46.4 a A	11.4
LSD	9.1	21.1	19.2	31.3	21.3	8.3	11.6	

3.

**Figura 3:** Sono indicati i valori di pH, carbonio organico e fosforo disponibile nei diversi siti. È inoltre mostrato il valore di LSD di Fisher (Least Significant Difference).

Tratta da Säle et al., 2015.

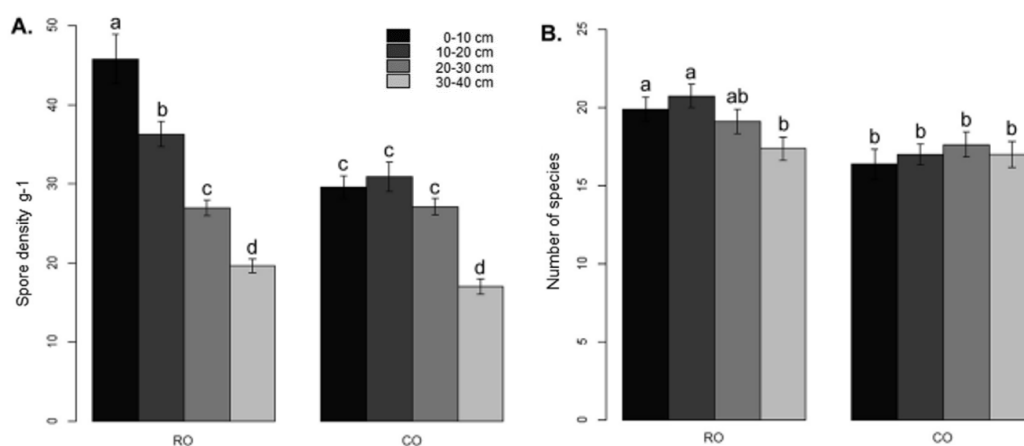
Innanzitutto, si nota che il pH è risultato essere simile nei campi a gestione biologica e nella prateria, ma con una differenza di circa un'unità rispetto ai siti IP gestiti convenzionalmente. Questa differenza potrebbe essere dovuta all'uso a lungo termine di fertilizzanti minerali acidificanti utilizzati nei siti IP.

Un altro parametro analizzato è stato il carbonio organico: è presente in maggior quantità nel terreno della prateria, in quantità minore nel terreno prelevato dal campo a lavorazione ridotta concimato con letame e liquame; i valori più bassi sono stati misurati nei siti IP.

Per il carbonio organico si nota nei siti IP un'elevata quantità sia in superficie che nel sottosuolo, mentre negli altri siti la quantità subisce una diminuzione molto più accentuata dagli strati superficiali a quelli più profondi. Questa stranezza può essere spiegata dall'origine alluvionale e colluviale dei suoli nei campi IP.

Analizzando invece il fosforo disponibile, si osserva un'abbondanza maggiore nei campi a lavorazione biologica, valori intermedi nei siti IP e i valori minori nella prateria. La quantità è però sempre diminuita con l'aumentare della profondità.

Per quanto riguarda la densità delle spore fungine è stato costruito un grafico (figura 4) che ne esplicita le quantità nei diversi siti, tenendo conto, come per i parametri chimici, delle diverse profondità.



**Figura 4:** I grafici mostrano i valori di densità delle spore e di numero di specie nei siti RO e CO a diverse profondità (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm).

Tratta da Säle et al., 2015.

Le considerazioni che si possono fare riguardanti il grafico A sono molteplici: alla profondità di 0-10 cm la densità era maggiore nei siti a lavorazione ridotta rispetto a quelli a lavorazione convenzionale, mentre risultavano simili ai valori della prateria.

Nelle praterie e nei terreni a lavorazione ridotta, si osserva una netta diminuzione delle spore con l'aumento della profondità; questa differenza è meno visibile negli appezzamenti con lavorazione convenzionale e nei siti IP in cui il numero di spore è rimasto più costante o con piccole variazioni.

Nello strato più profondo, corrispondente al range di 30-40 cm, le densità maggiori sono state ritrovate nella prateria, seguite da quelle dei campi a lavorazione ridotta.

In generale le minor quantità di spore sono state trovate nei terreni a lavorazione convenzionale e nei campi IP.

Il secondo grafico, indicato con la lettera B, indica la ricchezza di specie ritrovata nei diversi siti.

In totale, considerando tutti i campioni studiati, sono state rilevate 48 specie di micorrize e più di 31.000 spore. Le specie maggiormente ritrovate appartenevano alle Glomeraceae, ma vi erano anche 5 specie appartenenti alle Paraglomeraceae e Archeosporaceae, 4 specie di Entrophosporaceae, 3 di Ambisporaxae e Acaulosporaceae, 2 di Diversisporaceae ed infine 1 di Pacisporaceae.

Confrontando i diversi siti, quello con una maggior ricchezza di specie a tutte le profondità di suolo è stato la prateria permanente con 38 specie totali; nei siti RO e IP2 ne sono invece state rilevate meno, ovvero 32 per ciascun sito; mentre nei siti di COM erano presenti 31 specie e nei siti COS e IP1 ve ne erano

rispettivamente 28 e 27. È quindi evidente che la minor ricchezza media si riscontra nei siti COS e IP1.

Queste stesse differenze si possono ritrovare analizzando gli strati di terreno più in profondità; bisogna però considerare che alla profondità di 30-40 cm non vi era alcuna differenza significativa tra i terreni di RO e CO, i cui valori erano anche simili ai siti IP.

A livello statistico è stato calcolato l'indice di diversità Shannon-Weaver che dà un'indicazione della diversità fungina nei siti studiati: nella figura 5 ne sono riportati i valori, i quali risultano essere simili o con pochissima variabilità.

Soil depth (cm)	Grassland	Reduced tillage (organic)		Conventional tillage (organic)		Conventional farming (IP)		LSD
	GL	RO-M	RO-S	CO-M	CO-S	IP1	IP2	
<b>AMF species richness</b>								
0-40	34.0 a	26.8 b	24.8 bc	23.8 cd	21.8 d	23.3 cd	24.8 bc	2.5
0-10	24.3 a A	20.3 ab A	19.5 bc AB	17.0 bc A	15.8 c A	16.0 bc A	17.8 bc A	2.9
10-20	26.0 a A	21.0 b A	20.8 bc A	17.5 cde A	16.5 de A	15.5 e A	18.8 bcd A	2.1
20-30	25.0 a A	19.3 b A	19.0 b AB	17.5 b A	17.8 b A	16.5 b A	20.3 b A	2.6
30-40	25.3 a A	18.0 bc A	16.8 bc B	17.0 bc A	17.0 bc A	16.0 c A	19.8 b A	2.4
LSD	3.1	2.7	2.2	2.7	2.4	2.5	2.4	
<b>Shannon-Weaver-diversity index</b>								
0-40	2.45 a	2.49 a	2.38 a	2.38 a	2.41 a A	2.13 b	2.44 a	0.24*
0-10	2.16 ab A	2.39 a A	2.15 ab B	2.33 ab A	2.24 ab A	2.02 b A	2.16 ab A	0.22
10-20	2.46 a A	2.30 ab A	2.42 ab A	2.21 abc A	2.18 bc A	1.94 c A	2.31 ab A	0.17
20-30	2.26 ab A	2.28 a A	2.41 a A	2.27 ab A	2.21 ab A	1.92 b A	2.39 a A	0.22
30-40	2.18 a A	2.39 a A	2.27 a B	2.22 a A	2.28 a A	2.25 a A	2.38 a A	0.28
LSD	0.25*	0.25	0.20	0.28	0.19	0.27*	0.19*	

**Figura 5:** Sono indicati i valori di ricchezza di specie, l'indice di diversità di Shannon-Weaver e il valore LSD di Fisher (Least Significant Difference).

Tratta da Säle et al., 2015.

Osservando i dati nella tabella si può notare che per la prateria e i campi RO i valori tendono ad essere più alti a livello dei 10-20 cm.

Altre considerazioni constatabili sono che il sito IP1 ha valori più bassi tra gli 0-30 cm di profondità; a livello superficiale (0-10 cm) nei siti ROS e COS si riscontrano valori minori di ROM e COM, e questo può essere dovuto all'uso di concime composto da letame e liquame, piuttosto che solamente da liquame; in linea generale gli indici più bassi si osservano nei campi COS.

Un altro dato statistico che ci aiuta ad analizzare i diversi siti è la Canonical Correspondence Analysis (CCA), grazie alla quale si fa un'analisi del gradiente multivariato delle funzioni che permette di mettere in relazione due serie di variabili (Zhou et al., 2023), in questo caso le micorrize con i diversi siti.

Queste analisi hanno suggerito che l'uso del terreno, quindi le pratiche agricole, hanno un impatto maggiore rispetto alla strategia di fertilizzazione. Ciò però non toglie che entrambi questi aspetti influenzino la composizione delle micorrize.

Lo stesso risultato si è potuto osservare con le analisi ANOVA sulla densità delle spore e sulla ricchezza di specie, confermando che la coltivazione del suolo e la profondità hanno un impatto maggiore rispetto al tipo di fertilizzazione.

Per semplificare lo studio delle diverse specie fungine, nell'articolo sono stati contraddistinti sei gruppi, di cui ora elencherò le caratteristiche:

- Il primo gruppo, ovvero il gruppo A, comprende specie ubiquitarie ritrovate in tutti i siti. Le spore di queste specie sono state rinvenute in abbondanza, (alcuni esempi possono essere: *Dominikia aurea*, *Funneliformis geosporus*, *Fu. mosseae*, *Glomus badium*, *Gl. diaphanum*, *Septoglomus constrictum*).
- Il secondo gruppo, gruppo B, racchiude 17 specie diverse e anch'esse, come nel gruppo precedente, erano presenti in tutti i siti, con però la differenza sostanziale della minor abbondanza, del numero ridotto trovato in ogni singolo campione.
- Il gruppo C rappresenta unicamente le specie ritrovate nella prateria permanente. Un esempio di specie è la *Sclerocystis rubiformis* e *Gl. heterosporum*.
- Il quarto gruppo, indicato con la lettera D, mette insieme cinque specie che sono state rinvenute non solo nella prateria, ma anche in strati di suolo incolto di terreni agricoli o nello strato superficiale dei campi a coltivazione ridotta.
- Infine, il gruppo E, racchiude specie come *Funneliformis caledonius* e *Acaulospora longula*, le quali sono state recuperate dai siti IP con un pH del terreno ridotto.

Vi sono poi dieci specie che sono state inserite nel gruppo F e sono tutte specie trovate in numero molto basso e quindi troppo rare per poterle inserire nelle precedenti categorie. Alcuni esempi di specie sono *Fu. multiforum*, *Ac. cavernata* e *Ac. laevis*.

Malgrado alcune specie siano state ritrovate in tutti i siti studiati, con l'analisi dell'abbondanza nelle diverse aree, si comprende come mai alcune si siano insediate in maggior quantità in una zona rispetto ad un'altra.

Per esempio, studiando la specie *Septoglomus constrictum*, si nota come le sue spore siano state ritrovate in numero molto ridotto nei suoli arati.

Concentrandoci invece sulle colture trappola, in totale sono state identificate più di 19.000 spore fungine e 33 specie di micorrize. Nello specifico sono state riconosciute 22 specie appartenenti alle Glomeraceae; 2 specie ciascuna appartenevano alle Diversisporaceae (*Diversispora*), Paraglomeraceae (*Paraglomus*) e Archaeosporaceae (*Archaeospora*); infine vi erano altre due specie, una appartenente alle Acaulosporaceae (*Acaulospora*) e l'altra alle Ambisporaceae (*Ambispora*).

Inoltre, 5 specie (*Ac. spinosa*, *Fu. monosporus*, *Fu. sp. AG7*, *Glomus sp. AG8*, e *Se. xanthium*) identificate nelle colture trappola non sono state rilevate nello studio dei campioni del suolo.



Al contrario altre specie, in totale 20, non sono state ritrovate nelle colture trappola ma solamente nello studio diretto del suolo. Un esempio ne sono le specie *Sc. sinuoso*, *Sc. Pachycaulis* e *Gl. Badio*.

Visualizzando i valori numerici delle diverse specie nella figura 6, si possono fare alcune considerazioni: si può osservare che sia negli strati superficiali, quindi da 0 a 10 cm di profondità, che nel sottosuolo, da 30 a 40 cm, vi era una maggior ricchezza di micorrize nelle trappole RO, GI e IP1 rispetto a quello CO.

Le trappole che contenevano una ricchezza totale maggiore erano GL e RO.

L'analisi delle spore nelle colture trappola ha portato a concludere che sia il metodo di lavorazione del campo, sia il tipo di fertilizzazione hanno un impatto significativo sulle comunità fungine all'interno delle trappole.

È interessante notare che le specie tipiche dei suoli della prateria non hanno sporulato nelle colture trappola.

	Grassland	Reduced tillage (organic)		Conventional tillage (organic)		Conventional farming (IP)	
	GL	RO-M	RO-S	CO-M	CO-S	IP1	IP2 <sup>b</sup>
Average AMF species richness of top-soil <sup>a</sup>	10.3 (0.5)	13.3 (1.5)	11.3 (1.7)	6.5 (1.7)	7.8 (1.0)	10.0 (1.8)	n.d.
Average AMF species richness of sub-soil <sup>a</sup>	9.8 (1.5)	8.0 (3.5)	8.8 (1.5)	7.8 (1.7)	7.0 (2.4)	8.8 (1.5)	n.d.
Average AMF species richness of top- & subsoil (cumulated) <sup>a</sup>	13.0 (0.8)	16.3 (1.9)	13.5 (1.3)	11.0 (1.8)	11.3 (3.3)	12.0 (0.8)	n.d.
Total AMF species richness of topsoil	15	18	18	11	15	15	n.d.
Total AMF species richness of subsoil	15	15	14	15	12	14	n.d.
Total AMF species richness of top- & subsoil (cumulated)	20	21	20	17	18	16	n.d.
Total AMF species richness in field soils & trap cultures	38	33	33	33	28	28	(32) <sup>b</sup>

**Figura 6:** Sono mostrati i valori di ricchezza di specie nei diversi siti a diverse profondità: sono presenti la media e la deviazione standard, indicata tra parentesi.

Tratta da Säle et al., 2015

### 3.2.3. Risultati

I risultati dell'esperimento effettuato sono molteplici: durante il periodo di campionamento, della durata di 20 mesi, sono state identificate 53 specie di funghi micorrizici, considerando sia i siti a lavorazione biologica, che i campi con agricoltura convenzionale e la prateria. Questo valore ci indica un'elevata ricchezza di specie fungine in un'area ridotta, sorprendente se si considerano i suoli argillosi di Cambiosol della zona e il pH relativamente basso, (6,5-7 negli strati superficiali).

Nelle precedenti ricerche è stato raro ritrovare una simile ricchezza di specie: facendo l'esempio dello studio del 2002 intitolato *Diversity and structure of AMF*

*communities as affected by tillage in a temperate soil* (Jansa et al., 2002) sono state ritrovate 17 specie in suoli con climi temperati.

Tuttavia, anche in aree con un clima più caldo, mediterraneo o sub tropicale, la quantità di specie non aumenta in modo significativo, come dimostra lo studio del 2014 intitolato *Species composition and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in White Nile state, Central Sudan* (Abdelhalim et al., 2014) in cui le specie rilevate si limitavano a 42.

Sono state formulate delle ipotesi per cercare di spiegare tale ricchezza nella valle di Sissle: innanzitutto sia le proprietà del terreno che le pratiche agricole biologiche adottate durante lo studio hanno avuto un'influenza importante, ma soprattutto bisogna considerare che nel presente esperimento sono state scelte aree molto vaste di campionamento e, oltre agli studi del campo, sono state valutate le colture di trappola.

Un altro aspetto da considerare è che negli ultimi anni il riconoscimento delle specie si è affinato anche grazie ai progressi nell'isolamento.

I risultati delle diverse analisi hanno confermato la previsione per cui, nella prateria, vi è una ricchezza di specie e una densità di spore superiore rispetto agli altri siti.

Inoltre dallo studio emerge che nei campi a lavorazione ridotta gli insediamenti delle micorrize sono facilitati: la presenza di spore era in numero elevato e vi era una maggior ricchezza di specie rispetto ai campi a coltivazione convenzionale. Questi risultati sono confermati dalle analisi multivariate eseguite, che mostrano delle nette differenze tra le comunità AMF cresciute in condizioni di coltivazione ridotta e quelle cresciute in coltivazione convenzionale.

Un diverso studio effettuato nel 2003 ed intitolato *Soil Tillage Affects the Community Structure of Mycorrhizal Fungi in Maize Roots* (Jansa et al., 2003) ha ricercato dei possibili motivi di queste differenze: vi è un'interruzione delle ife fungine dovute alla lavorazione del terreno e vi sono cambiamenti dei nutrienti disponibili, oltre che nella composizione microbica e degli organismi infestanti.

La prateria ha avuto in assoluto i valori più alti di densità delle spore, anche se scendendo in profondità verso il suolo, questo valore diminuiva. Questo fenomeno in realtà si è verificato in tutti i siti, facendo in modo che nel sottosuolo, 30-40 cm di profondità, le densità fossero tutte simili.

Studi paralleli hanno mostrato un ulteriore aspetto, che si basa sull'analisi delle comunità di lombrichi e piante infestanti: ne è stato evidente un aumento nei campi a lavorazione ridotta rispetto a quelli a lavorazione convenzionale e

questo può aver avuto un'influenza sulle comunità di micorrize (Armengot et al., 2016).

Vi sono state delle differenze significative tra la densità delle spore e la diversità e ricchezza di specie: se per la prima c'è stata un'influenza considerevole data dalla coltivazione del terreno, per le seconde la correlazione è risultata meno pronunciata, mantenendo una composizione superficiale di specie simili nei diversi siti.

Confrontando le due modalità di fertilizzazione, quella con l'utilizzo di letame e liquame (M) o solamente di liquame (S), si possono distinguere delle differenze tra lo studio del suolo di campo e lo studio delle spore nelle colture trappola: nel primo caso l'impatto della diversa fertilizzazione risulta essere minimo, mentre nel secondo caso il tipo di fertilizzazione ha un impatto significativo sulle popolazioni di spore.

Probabilmente questa differenza è dovuta ai diversi apporti nutrizionali dei due concimi che nelle trappole hanno avuto un impatto maggiore in quanto gli altri fattori erano controllati e stabili perché in ambiente protetto.

Grazie alle colture trappola, circa due terzi delle specie micorriziche hanno prodotto spore; la riproduzione è stata più o meno abbondante a seconda dei suoli coltivati e della specie considerata.

## **4.CONCLUSIONI**

Nel contesto in cui ci troviamo oggi, in cui la ricerca verso un'agricoltura biologica più sostenibile è in aumento, è sempre più importante scoprire nuovi metodi per favorire una buona resa dei campi.

In questo elaborato ho approfondito proprio questa problematica e nello specifico un aspetto correlato all'agricoltura biologica: quanto l'uso di determinate pratiche agricole aggressive inibisca l'insediamento dei funghi micorrizici arbuscolari AMF in simbiosi con le radici delle piante, al contrario di alcuni tipi di lavorazioni più rispettose.

Il motivo per cui l'insediamento di micorrize può risultare importante nell'ambito dell'agricoltura è attribuibile agli effetti della simbiosi stessa.

All'inizio di questa tesi ho riassunto questi effetti, che sono benefici per le piante; ad esempio, essi permettono una maggior crescita, come anche un miglior assorbimento di sostanze nutritive e di acqua.

L'articolo da me scelto ed analizzato nei precedenti capitoli, è *Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi* (Säle et al., 2015).

Assodato che i funghi micorrizici aiutano le piante coltivate in diverse delle loro funzioni e che questo rende la loro presenza importante per la resa delle coltivazioni, i risultati della ricerca pubblicata dimostrano in modo univoco alcuni aspetti: con l'aumento dell'intensità d'uso del suolo si riduce la densità delle spore AMF; inoltre cambiano le composizioni fungine a seconda della modalità di utilizzo dei campi. Alcune comunità possono ritrovarsi unicamente in terreni coltivati con specifiche pratiche agricole, (si tratterebbe di funghi specialisti), altre si insediano in diversi terreni a prescindere dal loro utilizzo (funghi generalisti).

La modalità di sfruttamento del terreno ha quindi un grande impatto sulle comunità micorriziche.

Tuttavia, è spesso difficile adottare un tipo di lavorazione ridotta, perché ad essa sono associati alcuni problemi, tra cui l'insediamento di piante infestanti. Con la lavorazione convenzionale, l'uso di erbicidi chimici ne previene la crescita.

Consultando altre ricerche che avessero come obiettivo quello di studiare come migliorare la resa di coltivazioni biologiche, ho esaminato articoli diversi trovandone alcuni che avevano come oggetto di studio i funghi micorrizici, come *Effective farm management promotes native AMF and benefit organic farming systems* pubblicato nel 2023 (Soti et al., 2023). Quest'ultimo prevedeva un esperimento sul campo in Texas, dove i siti corrispondevano a una coltura di copertura, un campo coltivato con inoculi di AMF disponibile in commercio e infine un campo con inoculo di AMF indigeno prodotto in fattoria.

Lo studio conferma alcuni aspetti descritti in questo elaborato, come la relazione e l'influenza delle pratiche agricole e delle comunità di micorrize, e specifica uno scarso risultato delle AMF disponibili in commercio rispetto a quelle naturali indigene.

Per quanto riguarda l'uso delle micorrize in agricoltura, nella seconda edizione del libro *The mycota* (Jeffries et al., 2012) ho potuto trovare ulteriori prove dell'efficacia della simbiosi. In particolare, venivano esaminati i vantaggi che le piante traggono dalle AMF e venivano quindi indicate come una risorsa naturale essenziale per adottare pratiche agricole più sostenibili.

Un ulteriore articolo del 2014 intitolato *Effects of reduced tillage in organic farming on yield, weeds and soil carbon: Metaanalysis results from the TILMAN-ORG project* (Cooper et al., 2014) non è incentrato sulle micorrize, ma consiste in

una meta-analisi che dimostra un miglioramento della quantità di carbonio nel terreno con una riduzione della profondità di lavorazione dei suoli coltivati, senza un aumento delle erbe infestanti.

Un aspetto da considerare riguardante la ricerca di pratiche agricole sostenibili è correlato ai cambiamenti climatici attualmente in atto (Thuiller, 2007): come possono tali cambiamenti influire su queste ricerche, e soprattutto possono renderle più complesse cambiando continuamente i parametri ambientali?

È difficile poter dare una risposta certa a queste domande, ma sicuramente bisogna considerare che la variabilità di temperatura e di precipitazioni ha un impatto importante sulle coltivazioni, che può anche essere molto negativo (Karimi et al., 2018). Risulta quindi necessario un vero e proprio adattamento delle pratiche agricole.

Allo stesso tempo, dovendoci essere questa rivoluzione delle tecniche di coltivazione, è importante che vengano adottate quelle che permettano un'agricoltura più rispettosa e sostenibile e ridurre così gli impatti antropici negativi sull'ambiente (Zuma et al., 2023).

Un altro effetto positivo si riscontrerebbe nei suoli, infatti il sovra-sfruttamento degli ultimi decenni dei campi coltivati ha avuto come risultato la degradazione dei suoli stessi, impoverendoli e rendendoli inutilizzabili. Se queste pratiche aggressive persistessero, non solo ci sarebbero gravi danni dal punto di vista agricolo, ma si assisterebbe ad un aumento della perdita di biodiversità (Raj et al., 2023).

Malgrado ancora non siano state trovate tutte le soluzioni alle problematiche indicate sopra, in Svizzera, luogo dove è stato effettuato l'esperimento, negli ultimi decenni è aumentata la produzione biologica e anche il consumo dei suoi prodotti (UST, 2019) e questo da ben sperare: aumentando la consapevolezza e di conseguenza la richiesta di prodotti "biologici" anche la ricerca verrà ampliata e l'applicazione dei suoi risultati aprirà ulteriori prospettive nell'utilizzo delle AMF in agricoltura.

## 5. BIBLIOGRAFIA

Abdelhalim, T. S., et al. "Species composition and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in White Nile state, Central Sudan." *Archives of Agronomy and Soil Science* 60.3 (2014): 377-391.

Armengot, L., et al. "Tillage as a driver of change in weed communities: a functional perspective." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 222 (2016): 276-285.

Balliu, A., et al. "AMF inoculation enhances growth and improves the nutrient uptake rates of transplanted, salt-stressed tomato seedlings." *Sustainability* 7.12 (2015): 15967-15981.

Begum, N., et al. "Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance." *Frontiers in plant science* (2019): 10, 1068.

Berner, A., et al. "Crop yield and soil fertility response to reduced tillage under organic management." *Soil and Tillage Research* 101.1-2 (2008): 89-96.

Bonfante, P., et al. "Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis." *Nature Communications* 1, 48 (2010).

Cooper, J., et al. "Effects of reduced tillage in organic farming on yield, weeds and soil carbon: Meta-analysis results from the TILMAN-ORG project." *Building Organic Bridges* 4 (2014): 1163-1166.

Curtis, H., et al. "Invito alla biologia." Sesta Edizione, Bologna, Zanichelli, (2009).

Fortuna, P., "Contributo della simbiosi micorrizica alla realizzazione di agroecosistemi arborei sostenibili." [tesi di dottorato di ricerca]. Pisa: Università di Pisa, (2008).

Hothorn, T., et al. "Simultaneous inference in general parametric models." *Biometrical Journal* 50.3 (2008): 346-363.

Jansa, J., et al. "Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil." *Mycorrhiza* 12 (2002): 225-234.

Jansa, J., et al. "Soil tillage affects the community structure of mycorrhizal fungi in maize roots." *Ecological Applications* 13.4 (2003): 1164-1176.

Jeffries, P., et al. "4 Arbuscular Mycorrhiza: A Key Component of Sustainable Plant–Soil Ecosystems." In: Hock, B. (eds) *Fungal Associations. The Mycota*, vol 9. Springer, Berlin, Heidelberg (2012).

Karimi, V., et al. "Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran." *Journal of Integrative Agriculture* 17.1 (2018): 1-15.

Kopittke, P. M., et al. "Soil and the intensification of agriculture for global food security." *Environment international* 132 (2019): 105078.

Morte, A., et al. "Effect of drought stress on growth and water relations of the mycorrhizal association *Helianthemum almeriense*-*Terfezia clavaryi*." *Mycorrhiza* 10 (2000): 115-119.

Oehl, F., et al. "Advances in Glomeromycota taxonomy and classification." *IMA fungus* 2.2 (2011): 191-199.

Oehl, F., et al. "Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities." *Soil Biology and Biochemistry* 42.5 (2010): 724-738.

Owen, E., "Nutrition and Symbiosis\*." *Nature* 160 (1947): 78–81.

Raj, A., et al. "Land Degradation and Restoration." *Land and Environmental Management through Forestry*, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1–21. *Wiley Online Library* (2023).

Rinaudo, V., et al., "Mycorrhizal fungi suppress aggressive agricultural weeds." *Plant Soil* 333, 7–20 (2010).

Säle, V., et al. "Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi." *Soil Biology and Biochemistry* 84 (2015): 38-52.

Soti, P., et al. "Effective farm management promotes native AMF and benefit organic farming systems." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 342 (2023): 108240.

Thuiller, W. "Climate change and the ecologist." *Nature* 448, (2007) : 550–552.

Tilman, D., et al. "Agricultural sustainability and intensive production practices." *Nature* 418.6898 (2002): 671-677.

Tscharntke, T., et al. "Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification." *Biological conservation* 151.1 (2012): 53-59.

Ufficio federale di statistica (UST ) "L'agricoltura biologica in Svizzera, 1990–2017" Neuchâtel (2019)

Zhan, F., et al., "Arbuscular mycorrhizal fungi enhance antioxidant defense in the leaves and the retention of heavy metals in the roots of maize". *Environmental Science and Pollution Research* 25, (2018): 24338–24347.

Zhou, L., et al. "*Nonlinear canonical correspondence analysis and its application.*" *Scientific Reports* 13, (2023): 7518.

Zhu, Y., et al. "*Genetic diversity and disease control in rice.*" *Nature* 406.6797 (2000): 718-722.

Zuma, M., et al. "*Incorporating cropping systems with eco-friendly strategies and solutions to mitigate the effects of climate change on crop production.*" *Journal of Agriculture and Food Research* (2023): 100722.