



UNIVERSITÀ DEL PIEMONTE ORIENTALE

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DEL PIEMONTE ORIENTALE  
"AMEDEO AVOGADRO"  
Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica

*Corso di Laurea magistrale in Biologia  
Curriculum Nutrizione e Ambiente*

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

*Uso di microrganismi benefici del suolo per la coltura di  
pomodoro da industria in condizioni semi-controllate e in campo*

Relatore: Prof.ssa Valeria Todeschini

**Candidata: Giulia Di Stefano**

*Anno accademico 2023/2024*



## Sommario

INTRODUZIONE.....	6
1. Il pomodoro: <i>Solanum lycopersicum</i> L. ....	6
1.1. Caratteristiche botaniche e diffusione della coltura di pomodoro.....	7
1.2 Domesticazione del pomodoro.....	11
1.3 Metodo di coltivazione e diverse varietà.....	13
1.4 Lavorazione del pomodoro e il pomodoro da industria.....	17
1.5 Valori nutrizionali e nutraceutici del pomodoro.....	21
1.6 Effetti benefici dei composti bioattivi del pomodoro.....	25
2. Composti del metabolismo primario e secondario nel pomodoro.....	28
2.1 I composti del metabolismo primario.....	29
2.2 I composti del metabolismo secondario.....	31
2.3 Il controllo ormonale nella maturazione del frutto.....	33
3. Simbiosi delle piante con diversi microorganismi benefici del suolo (MBS).....	34
3.1 Batteri promuoventi la crescita della pianta (PGPB).....	36
3.1.1 Meccanismi diretti dei PGPB.....	37
3.1.2 Meccanismi indiretti dei PGPB.....	42
3.2 Funghi micorrizici arbuscolari AMF.....	45
3.3 Funghi filamentosi: <i>Trichoderma</i> .....	47
4. Effetti dell'inoculazione di microrganismi benefici del suolo sulle piante, in particolare sul pomodoro.....	49
4.1 Effetti dell'inoculazione di PGPB in piante di pomodoro.....	50
4.2 Effetti dell'inoculazione di AMF in piante di pomodoro.....	51
4.3 Effetti dell'inoculazione di <i>Trichoderma</i> in piante di pomodoro.....	51
5. Utilizzo di biostimolanti in agricoltura.....	52
SCOPO DEL LAVORO.....	55

MATERIALI E METODI.....	55
SERRA	
1. Preparazione degli inoculi di funghi micorrizici arbuscolari (AMF).....	56
2. Preparazione degli inoculi di <i>Trichoderma ssp</i> .....	56
3. Preparazione dell'inoculo di PGPB.....	57
4. Disegno sperimentale.....	58
5. Parametri analizzati.....	59
5.1 Parametri morfometrici e ponderali.....	59
5.2 Valutazione del grado di colonizzazione fungina della radice.....	60
5.3 Analisi del contenuto di pigmenti fogliari (clorofille).....	62
5.4 Attività fotosintetica.....	62
5.5 Analisi relativa ai frutti di pomodoro.....	63
5.5.1 Pezzatura dei frutti: lunghezza, diametro maggiore e minore, peso, numero di frutti per trattamento.....	63
5.5.2 Valutazione del pH e dell'acidità totale.....	64
5.6 Analisi statistica dei dati.....	64
CAMPO SPERIMENTALE	
1. Disegno sperimentale in campo e valutazione della produttività.....	65
2. Analisi statistica dei dati.....	66
RISULTATI.....	67
SERRA	
1. Parametri analizzati a 45 GDT.....	67
1.1 Valutazione della colonizzazione fungina nell'apparato radicale.....	67
1.2 Parametri morfometrici e ponderali.....	70

1.3	Analisi del contenuto di pigmenti fogliari.....	76
1.4	Analisi della fluorescenza delle clorofille (PEA).....	79
2.	Parametri analizzati a 100 GDT.....	80
2.1	Valutazione della colonizzazione fungina nell'apparato radicale.....	80
2.2	Parametri morfometrici ponderali.....	82
2.3	Analisi del contenuto di pigmenti fogliari.....	87
2.4	Produttività e pezzatura dei frutti.....	90
2.5	Valori del pH e di acidità totale.....	92
2.6	Analisi della fluorescenza delle clorofille (PEA).....	94
 CAMPO SPERIMENTALE		
1.	Confronto campo ASTER e campo convenzionale.....	94
 DISCUSSIONE.....		
		97
 CONCLUSIONI.....		
		102
 BIBLIOGRAFIA.....		
		103
 RINGRAZIAMENTI.....		
		136

## INTRODUZIONE

### *1. Il pomodoro: Solanum lycopersicum L.*

Originaria delle regioni centro e sudamericane, la pianta di pomodoro, *Solanum lycopersicum*, appartenente alla famiglia delle *Solanaceae* fu introdotta in Europa nel XVI secolo conquistando un posto centrale nelle colture mondiali (Gilgenkrantz, 2012; Van Andel et al., 2022). Dopo la patata (*Solanum tuberosum* L.), il pomodoro è uno degli ortaggi più consumati al mondo (sia fresco, sia sottoforma di prodotti trasformati come zuppe, paste, succhi, salse e concentrati) (Li et al., 2018); rappresentando, inoltre, una delle colture più importanti dal punto di vista economico dopo il mais, il riso, il grano, la soia e la manioca (Knapp, 2002; Bergounoux, 2013). Il pomodoro contiene una cospicua fonte nutrienti che hanno impatti positivi sulla salute umana, tra cui vitamine, carotenoidi e composti fenolici (Rao e Agarwal 2000; Causse et al., 2007; Bergounoux 2014; Wu et al., 2022). Negli ultimi anni, infatti, i consumatori sono diventati più attenti all'alimentazione, cercando di introdurre nella dieta quotidiana cibi dall'elevato contenuto di "healthy compounds", cioè sostanze benefiche per la salute umana in quanto in grado di prevenire o in alcuni casi curare diversi tipi di patologie (Palozza et al. 2012; Holzapfel et al. 2013; Pem e Jeewon, 2015; Cheng et al. 2019; Przybylska et al., 2022; Vats et al., 2022).

Oltre al loro valore economico e nutrizionale, i pomodori sono stati adottati come modello per investigare lo sviluppo dei frutti carnosì (Quinet et al., 2019) e la tolleranza agli stress biotici e abiotici (Panthee et al., 2010; Kissoudis et al., 2016; Naik et al., 2023).

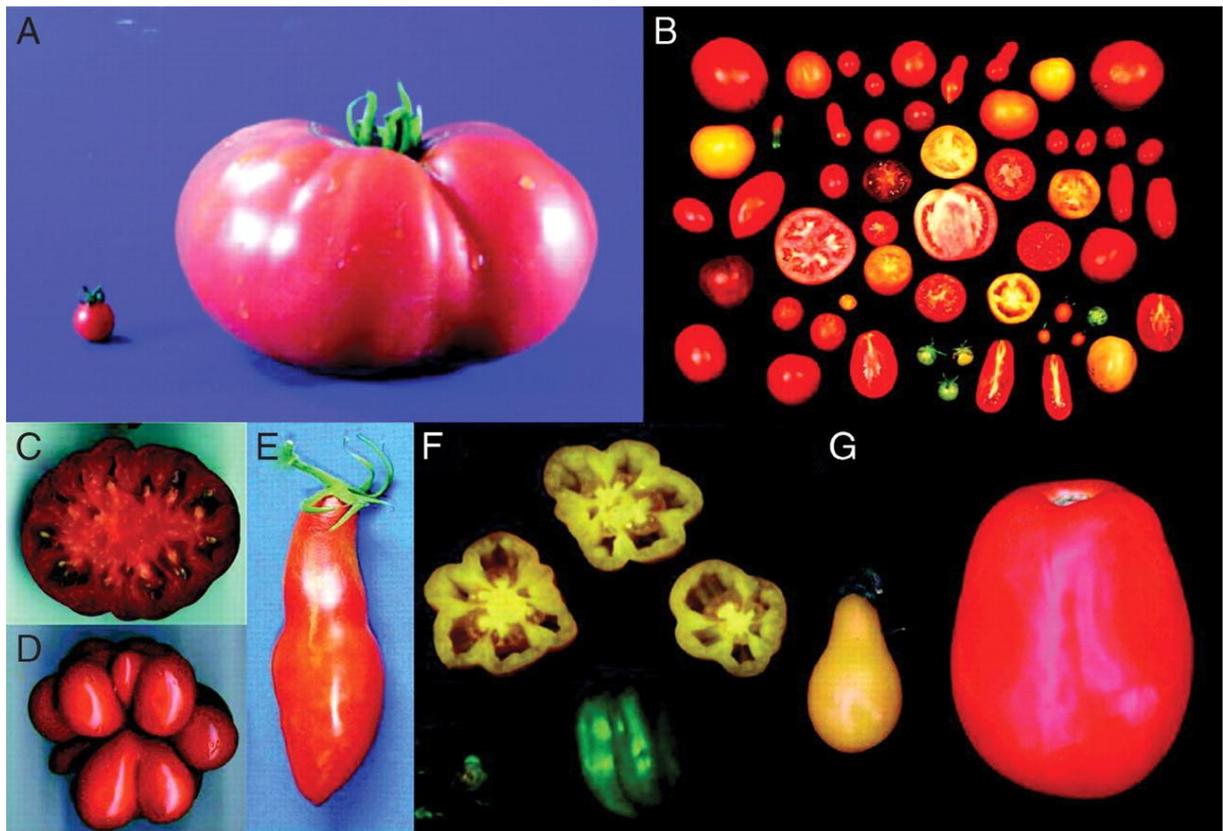
### *1.1 Caratteristiche botaniche e diffusione della coltura*

La famiglia delle Solanacee comprende oltre al pomodoro coltivato (*Solanum lycopersicum*) altri 12 generi selvatici, diffusi in varie regioni del Sud America occidentale, tra cui Ecuador, Bolivia, Cile, Isole Galapagos, Colombia e Perù (Peralta et al., 2008).

Nella famiglia sono comprese oltre 3000 specie originarie sia del Vecchio Mondo, come le melanzane provenienti dalla Cina e dall'India, sia del Nuovo Mondo, come la patata, il peperone e il pomodoro provenienti dall' America Centrale e Meridionale (Knapp et al., 2002).

Dopo la conquista spagnola, intorno al XVI secolo, i primi pomodori arrivarono in Europa. In Italia i botanici rinascimentali diedero loro il nome di “mele d'oro” o “pomi d'oro”: i frutti, rotondi e/o segmentati presentavano differenti forme, dimensioni varietà di colori, mentre i fiori si potevano ritrovare sia “fasciati”, ossia in una condizione per cui fiori o parte di essi si fondono formando un'unica struttura, sia semplici (van Andel et al. 2022).

Inizialmente il pomodoro non venne subito utilizzato come alimento a causa delle sue connessioni con piante velenose come, ad esempio, la belladonna; in particolare la presenza nel pomodoro dell'alcaloide tomatina aveva destato qualche preoccupazione per la sua tossicità, anche se successivamente è stato osservato che tale molecola è più concentrata nelle foglie e nei frutti verdi, mentre nel frutto maturo essa ha un contenuto davvero molto basso. Tuttavia, le paure riguardanti la sua tossicità sono durate fino al XX secolo in Nord Europa e Nord America (McCue, 1952).



**Figura 1.** In figura sono visibili frutti di pomodoro di dimensioni e forme diverse. A) pomodoro moderno, di grosse dimensioni a confronto con il frutto tipico di una specie selvatica (*L. pimpinellifolium*); B) varietà diverse di pomodoro producono frutti di dimensioni e forme diverse. C) frutto di pomodoro sezionato trasversalmente ove sono distinguibili loculi multipli; D) frutto con carpelli non fusi; E) la selezione di alcuni caratteri nel tempo ha portato alla formazione di frutti stretti e lunghi; F) alcuni frutti di pomodoro possono assomigliare al peperone; G) il pomodoro "perino" deriva anch'esso dalla selezione di caratteri particolari che hanno portato alla manifestazione del "carattere allungato e ristretto all'estremità del gambo" rendendo il frutto del pomodoro simile a una pera (Tanksley, et al. 2004)

Al contrario del pomodoro selvatico (*S. pimpinellifolium*), che presenta frutti piccoli, rossi e tondeggianti con due cavità e un peso di pochi grammi, il pomodoro coltivato mostra, in generale, una dimensione maggiore del frutto (seppur variabile da varietà a varietà) che è correlata anche ad un aumento del peso, oltre ad avere diverse forme e colori (Vazquez et al., 2022), come risultato della domesticazione (Figura 1, Tanksley et al., 2004).

La selezione dei pomodori è cambiata nel corso degli anni per rispondere a diverse esigenze, risorse disponibili e contesti geografici. Gli obiettivi di questa selezione hanno attraversato quattro fasi principali. Negli anni '70, si puntava principalmente a massimizzare la resa produttiva; negli anni '80, la priorità era migliorare la conservabilità del prodotto; negli anni

'90, l'accento è stato posto sul miglioramento del gusto; mentre oggi, l'attenzione si concentra sulla qualità nutrizionale (Semel et al., 2006; Bai e Lindhout, 2007).

I coltivatori per essere competitivi sul mercato si pongono come obiettivo quello di ottenere una resa elevata della coltura cercando di mantenere i costi ridotti, offrendo al consumatore frutti di ottima qualità sia dal punto di vista dell'aroma sia dal punto di vista nutrizionale (Fridmann, et al. 2004; Klee e Resende, 2020).

Nel corso del tempo, i pomodori sono stati selezionati non solo per variazioni di peso, ma anche per una vasta gamma di forme diverse dalla tradizionale forma tonda ancestrale. Sono emerse forme olate, a pera, a siluro, a campana e altre ancora, rispondendo sia alla richiesta dei consumatori, sia alle esigenze della raccolta meccanica dei frutti (Tanksley et al., 1996). Anche i semi hanno subito trasformazioni significative: quelli delle piante moderne sono generalmente più grandi e pesanti rispetto a quelli delle piante selvatiche, e il peso dei semi è positivamente correlato a quello dei frutti, anch'essi più grandi rispetto alla controparte selvatica. I semi possono presentarsi in varie forme, come ovoidi, compressi, lisci, brunastri, o ricoperti da una sostanza mucillaginosa (Goldman et al., 1995; Doganlar et al., 2000).

Le foglie invece sono generalmente a perimetro ovale con una dimensione di 8-15 x 13-25 cm, i segmenti sono ovali. Anche la larghezza delle foglie è molto ineguale a causa di diverse condizioni della pianta quali condizioni ambientali, stress biotici o abiotici e stato nutrizionale della pianta, possono passare da uno spessore di 3-6 cm ad uno di 1 cm o anche meno. Possono essere di forma lobata o composte quindi formate da 2 a 6 piccole foglie collegate attraverso un picciolo (Pignatti Sandro in "Flora d'Italia" 2019). Le foglie del pomodoro sono inoltre dotate di tricomi, non ghiandolari e ghiandolari, quest'ultimi a base sferica che contengono e secernono diverse sostanze come flavonoidi, terpenoidi e zuccheri che conferiscono il tipico aroma della pianta e che hanno un ruolo essenziale nella difesa contro gli erbivori, poiché causando tossicità, interferiscono con lo sviluppo degli insetti, li intrappolano o attraggono insetti predatori (Schuurink e Tisser, 2020; Zhang et al., 2020; Kortbeek et al., 2023). I tricomi

non ghiandolari formano una barriera fisica, ad esempio impedendo il movimento sulla superficie della pianta, perturbando il comportamento alimentare degli insetti (Keruyat et al., 2017; Adama et al., 2020).

I fusti del pomodoro sono molto deboli, spesso si allungano sul terreno e vanno a unirsi ad altre piante, la loro altezza varia dai 1 ai 3 metri; anch'essi come le foglie, sono ricoperti di tricomi ghiandolari e non ghiandolari pelosi (Story et al., 2010).

L'apparato radicale di *S. lycopersicum* è costituito da una radice centrale ramificata con numerose radici laterali, molto robuste di colorazione chiara tendente al bianco, indice di salute della pianta; pertanto, un imbrunimento della radice viene correlato ad un cattivo stato di salute della pianta dovuto ad esempio ad un'eccessiva irrigazione o ad una condizione di stress o malattia (Giaquinto et al., 2022).

I fiori sono l'organo riproduttivo sessuale delle angiosperme, attirando sia l'attenzione degli insetti, sia degli uccelli, promuovendo una riproduzione efficace quindi non più basata solo sul vento e acqua (Craine et al., 2012; Thakur e Bhatnagar, 2013). Le principali caratteristiche dei fiori che attraggono gli impollinatori, e che si trovano anche nei frutti per attirare i frugivori e favorire la dispersione dei semi, comprendono colori vivaci, profumi intensi dovuti alle sostanze volatili e l'accumulo di composti specifici nel nettare (Miller et al., 2011). I fiori, di colore giallo, presentano antere fuse lateralmente a formare un cono e si trovano in infiorescenze che possono essere a fiori singoli, cime semplici o cime ramificate (Peralta e Spooner, 2006). Il perianzio è formato da due strati e ha una struttura tubolare, mentre l'ipanzio è assente. Ogni verticillo ha 5 elementi: il calice è composto da 5 sepali uniti tra loro, e la corolla da 5 petali. Ci sono 5 stami, con filamenti attaccati alla corolla, mentre le antere, che contengono due loculi, si aprono attraverso fessure longitudinali o piccoli pori. Il gineceo, composto da 2 a 5 carpelli, presenta un ovario supero con due loculi, ciascuno dei quali contiene uno o più ovuli (Simpson, 2010).

## *1.2 Domesticazione del pomodoro*

Dal XX secolo in poi, l'uomo ha sviluppato una vasta gamma di cultivar di pomodoro con caratteristiche morfologiche molto diverse partendo dalla specie *S. lycopersicum*, grazie alla riproduzione e selezione delle piante. La domesticazione, insieme agli sforzi di ricerca e selezione da parte di scienziati e coltivatori di tutto il mondo, ha portato alla creazione di moderne varietà di pomodori, per lo più ibridi, disponibili in una grande varietà di forme, colori e dimensioni (Bai e Lindhout, 2007).

I pomodori sono stati originariamente addomesticati nelle Americhe, anche se i dettagli precisi riguardanti il luogo e i primi eventi di domesticazione restano in gran parte incerti (Peralta and Spooner, 2007). Esistono due principali teorie sul luogo d'origine della domesticazione del pomodoro: una lo colloca in Perù, l'altra in Messico. Sebbene non vi siano prove definitive riguardo al periodo e al luogo esatti della domesticazione, il Messico è considerato il candidato più probabile, mentre il Perù è ritenuto il centro di diversità dei parenti selvatici (Larry e Joanne, 2007).

La domesticazione include una serie di cambiamenti morfologici e fisiologici che fanno sì che le colture domestiche siano diverse dai loro antenati selvatici. Questi tratti variano tra le diverse colture, ma generalmente comprendono una crescita più compatta, una maggiore precocità nella crescita, la riduzione della dispersione dei semi e della dormienza, e un aumento delle dimensioni e della diversità morfologica delle parti edibili della pianta (Frery e Doganlar, 2003). Nel pomodoro, sono stati analizzati tratti come la crescita e le caratteristiche del frutto, rivelando somiglianze genetiche con altre piante della famiglia delle Solanacee, come peperoni e melanzane, nonostante la loro domesticazione sia avvenuta in continenti diversi (Frery et al., 2000; Tanksley, 2004).

Una caratteristica evidente della domesticazione del pomodoro è l'aumento significativo delle dimensioni del frutto. Le specie selvatiche di pomodoro, come già detto in precedenza, producono frutti molto piccoli, destinati alla propagazione naturale, mentre la domesticazione

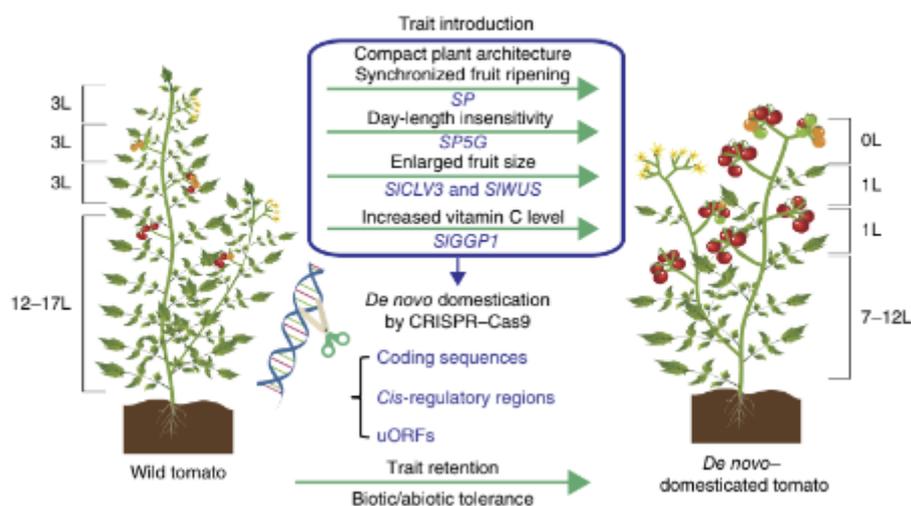
ha portato alla creazione di cultivar moderne con frutti molto più grandi (Bai e Lindhout, 2007). Sebbene il percorso evolutivo esatto della crescita del frutto rimanga sconosciuto, è probabile che le mutazioni che favorivano frutti più grandi siano state selezionate dai primi coltivatori. Infatti, studi su incroci tra pomodori selvatici e coltivati indicano che circa sei loci di tratti quantitativi (QTL) sono coinvolti in questa trasformazione (Tanksley, 2004). In particolare, il locus “peso del frutto 2.2” (fw2.2) è noto per aumentare il peso del frutto fino al 30% ed è stato identificato come uno dei primi passi cruciali nella domesticazione del pomodoro (Alpert et al., 1995; Frary et al., 2000). La clonazione di fw2.2 ha rivelato che questo locus regola negativamente la divisione cellulare, con mutazioni nella sequenza del promotore che portano a frutti più grandi attraverso una minore espressione del gene durante la fase di sviluppo del frutto (Cong et al., 2002). La selezione per aumentare le dimensioni del frutto potrebbe aver anche influenzato la forma del pomodoro (Tanksley et al., 1996; Grandillo et al., 1999). Inoltre, cambiamenti nella forma del frutto sono stati influenzati da fattori, come accennato in precedenza, come la crescente domanda di pomodori adatti alla raccolta meccanica dagli anni '60 e la tendenza dell'uomo a cercare caratteristiche diverse e innovative (Van der Knaap e Tanksley, 2001).

All'inizio del XX secolo, gli istituti pubblici negli Stati Uniti intensificarono il loro impegno nella selezione del pomodoro, mentre le aziende private iniziarono a sviluppare pomodori ibridi. Gli ibridi, che uniscono le migliori caratteristiche dei parentali, hanno scoraggiato al contempo la propagazione dei semi da parte degli agricoltori, poiché i tratti desiderati si sarebbero “diluiti” nelle generazioni successive. Oggi, la maggior parte delle cultivar di pomodoro, destinate al mercato fresco e molte di quelle destinate alla lavorazione, sono ibridi. Il primo ibrido commerciale prodotto è stato denominato ‘Single Cross’ e fu introdotto nel 1946 (Dorst, 1946). Con il "Single Cross" la produzione di ibridi portò gradualmente alla scomparsa delle varietà autoctone, sia nel mercato fresco che nell'industria di trasformazione (Dorst, 1946; Li et al., 2018). Oggi la selezione del pomodoro consiste nel riconoscere e combinare le specifiche

richieste di ciascun mercato con le aziende sementiere al fine di sviluppare nuove varietà con valore aggiunto.

Per ottenere risultati ottimali, i coltivatori devono garantire una produzione elevata di frutti di alta qualità, mantenendo i costi di produzione ridotti (Klee e Resende, 2020).

Tuttavia, la domesticazione tradizionale delle piante, pur aumentando la produttività, tende a ridurre la resistenza e la diversità genetica, rendendo le colture più vulnerabili alle condizioni ambientali avverse (Zhang et al., 2018). Per affrontare questo problema, è stata sviluppata una strategia alternativa: la domesticazione *de novo* delle specie selvatiche, utilizzando strumenti come CRISPR-Cas9 per accelerare il processo di ibridazione (Yin et al., 2017). Questa tecnica ha permesso di superare le sfide ambientali, portando a un aumento delle dimensioni dei frutti, un incremento del contenuto di vitamina C, una maggiore resistenza alle malattie e una migliore tolleranza agli stress (Li et al., 2018).



**Figura 2.** Rappresentazione schematica della domesticazione del pomodoro selvatico con CRISPR-Cas9 (Yin et al., 2017).

### 1.3 Metodi di coltivazione e diverse varietà

Alla fine del XIX secolo vi è stato un crescente numero di varietà di pomodoro, con un assortimento variegato di colori e usi. Le prime varietà richiedevano un'impollinazione naturale

e consentivano una facile propagazione da parte degli agricoltori, i quali potevano agevolmente ottenere semi dai frutti per la generazione successiva (Watson, 1996). Tuttavia, nel XX secolo, come accennato in precedenza, l'approccio alla coltivazione del pomodoro subì un cambiamento significativo, con istituti pubblici e aziende private che iniziarono a privilegiare ibridi selezionati a fini commerciali rispetto alle varietà tradizionali (UPOV Breeders Rights, 1961).

Il pomodoro può essere facilmente coltivato in serre o camere di crescita; i semi germinano uniformemente in media dopo 4 giorni se conservati a 25-27 °C, le piante crescono, fioriscono e fruttificano a cicli di luce compresi tra 8 e 16 ore (Schwarz et al., 2014). A seconda della varietà, la temperatura ideale cambia ed è compresa in un range compreso tra 10-35 °C. L'umidità relativa varia tra 30 e 90% a seconda delle aree di coltivazione e la concentrazione di CO<sub>2</sub> è stimata tra 200-1500 μmol mol<sup>-1</sup>. La temperatura è un fattore molto importante per la crescita delle piante, in quanto regola, insieme alla luce, l'alternarsi dei diversi stadi fenologici della pianta quali quello vegetativo, di fioritura e di fruttificazione. La luce (specialmente a certe lunghezze d'onda) insieme alla concentrazione di CO<sub>2</sub> influenzano fortemente la fotosintesi e di conseguenza anche la produzione di biomassa (Bakker, 1991; Zheng et al., 2008; Kocsy et al., 2023; Li et al., 2023). Il pomodoro può essere coltivato su suolo, in substrati artificiali (come ad esempio sabbie di quarzo, perliti, agriperliti, etc) o aeroponicamente, cioè senza alcun substrato, con le radici che crescono chiuse in canaline. Il volume della radice e le richieste di assorbimento dell'acqua sono determinati principalmente dalle esigenze di traspirazione delle piante (Benton-Jones, 2008). Nel terreno o nei substrati la soluzione nutritizia è comunemente fornita da un sistema di irrigazione a goccia. Tale sistema, da un lato semplifica la fornitura della soluzione nutritizia e fa risparmiare tempo, dall'altro lato deve esserci un controllo delle quantità di nutrienti fornite al fine di garantire un apporto uniforme di soluzione nutritizia. Questo parametro è strettamente dipendente dal tipo e dalla qualità dei gocciolatori (Costa e Heuvelink, 2005). La densità di piante per unità di superficie è un

parametro molto importante da considerare affinché tutte le piante possano ricevere il giusto quantitativo di luce e non vadano in competizione. Quando si coltivano pomodori a crescita indeterminata in esperimenti a lungo termine, viene suggerito di non coltivare più di 3,5 piante per m<sup>2</sup>, poiché essi devono avere sufficiente spazio per continuare a crescere. A livelli di luce inferiori questa densità diminuisce (Heuvelink, 1995; Hogewoning et al., 2010).

Oltre al fabbisogno nutrizionale, anche l'apporto idrico è molto importante nella coltivazione del pomodoro. Le diverse tipologie di acqua (es. deionizzata, piovana, di rubinetto, di pozzo, acque superficiali di laghi o altre fonti) può impattare diversamente sulla coltura, a causa sia della diversa concentrazione di ioni in esse contenuti, sia per il fatto che in alcune tipologie di acque potrebbero essere presenti contaminazioni da agenti biologici (Schwarz et al., 2004).

Molte sono le soluzioni nutritive utilizzate per la coltura delle piante, soprattutto in condizione controllate. Tra di esse troviamo ad esempio, la cosiddetta Hoagland (1944) migliorata da Hoagland e Arnon nel 1950 e la soluzione Long Ashton, ma spesso devono essere modificate a seconda della coltura cui vengono somministrate (Higashide, 2013). La ricetta più testata, studiata e applicata è quella di un gruppo olandese, che ha valutato e ottimizzato una composizione di una soluzione nutritiva adattata alle condizioni di crescita, al mezzo utilizzato e allo stadio di sviluppo del pomodoro (De Kreij et al., 1997). Le piante di pomodoro sono molto sensibili alla mancanza di ossigeno, ipossia, nell'ambiente delle radici, infatti i sintomi dell'ipossia, come l'avvizzimento, diventano temporaneamente visibili quando le piante sono danneggiate in modo irreversibile ed è per questo che la soluzione nutritiva deve essere sempre aerata e con una concentrazione di ossigeno superiore a 4 mg l<sup>-1</sup> (Kläring e Zude, 2009).

Le varietà di pomodoro si distinguono tra quelle destinate al mercato fresco, spesso coltivate in serra, e quelle destinate alla trasformazione industriale, comunemente coltivate in campo (Zsögön et al., 2017). Oltre all'irrigazione e alla fertilizzazione, una produzione di successo richiede una gestione colturale ottimizzata, il controllo dei parassiti e un appropriato trattamento post-raccolta (Liu et al., 2017). Attualmente, Cina e Stati Uniti rappresentano i principali paesi

produttori di pomodori a livello mondiale con circa 189 milioni di tonnellate coltivate (Conti et al., 2023; FAOSTAT, 2023), l'Italia invece è il primo produttore europeo, con 6.6 milioni di tonnellate prodotte, occupando una superficie totale di 772 ettari sia in campo aperto che in serra (Giuliani et al., 2019; FAOSTAT 2023; Istat 2023; Posadinu et al., 2023). Principalmente nel sud Italia, in particolare nella regione Campania nell'area denominata Agro Nocerino Sarnese vi è la maggior produzione di pomodori (Piscitelli et al., 2020).

Inoltre, il pomodoro con il suo relativamente breve ciclo di vita (90-120 giorni), è una coltura che ha destato l'interesse non solo delle grandi aziende, ma anche dei piccoli produttori interessati a un reddito stabile (Renna et al., 2018; Farionon et al., 2022). In condizioni ottimali, la produttività può facilmente superare le 20-50 tonnellate per ettaro (Tieman et al., 2017; Wang et al., 2017). Per soddisfare le esigenze della popolazione, le varietà commerciali di pomodoro vengono generalmente cambiate ogni cinque anni circa (Yuling et al., 2007). Le varietà coltivate in Italia sono più di 5000, differenti per forma, grandezza e colore del frutto, come accennato precedentemente. Il colore, ad esempio può andare dal rosso al giallo, al verde fino al nero. I pomodori più diffusi nel nostro paese sono il pomodoro a grappolo, il San Marzano, il Cobarino, il pomodoro nero, il pomodoro a cuore di bue, il pachino, il ciliegino, il datterino e infine il pomodorino vesuviano (Strazzullo et al., 2007; Barone et al., 2018;).

I pomodori comunemente utilizzati nell'industria in Italia appartengono a diverse varietà, alcune delle quali sono riportate nella Tabella 1.

Varietà			
Ciliegia	Roma	Lampo (Nun 0038)	Heinz 3406
Cuore di bue	Merida	UG812J	Heinz 2206
Tondo corto	Barone Rosso	Uno Rosso	Littano
Grappolo	Scarpariello	Podium	Ug Early (Ug 5102)
Riccio grosso	Donald	Progress	Safaix (Npt64)
Costoluto di Parma	Doppiopi	Rehus	Fokker NUN0104
Canestrino	Heinz 9478	Nermacrimson	Vulcan (Nun 0041)
Golden Sunrise	Jet	ISI 25533 (Vegas)	Everton (Isi 24458)
Green Zebra	Leader	Guadalete	Perfect Peel
Noire De Russie	Magnum 955	Pata Roja(ug 12065)	Torry Red (To 1420)
Tigrella	Stay Green	Gamlex (Ntp 66)	Licobrix
San Marzano	Np 63	Aragon (Es 6-05)	

**Tabella 1.** Principali varietà di pomodoro coltivate in Italia (Sardaro et al., 2013; Al Shave et al., 2018).

#### *1.4 Lavorazione del pomodoro e il pomodoro da industria*

La lavorazione industriale del pomodoro implica una serie di fasi che si adattano al tipo di prodotto finale desiderato. I prodotti più diffusi sono i pomodori in scatola (esempio i pelati), la passata di pomodoro, i succhi e i condimenti per insalata aromatizzati al pomodoro (Kamiloglu et al., 2013; Xianli et al., 2022). La lavorazione degli alimenti può offrire effetti benefici come una migliore digeribilità e biodisponibilità dei nutrienti e certamente aumenta la sicurezza alimentare (Weaver et al., 2014). Le diverse procedure per la lavorazione industriale del pomodoro sono schematizzate nella Figura 2 e seguono i passaggi chiave descritti in letteratura da Barringer nel 2004:

- Raccolta, conferimento e classificazione dei pomodori destinati alla trasformazione industriale noti come “pomodori da lavorazione”. Dopo la raccolta, i pomodori vengono trasportati all'impianto di lavorazione dove verranno sottoposti al processo di classificazione per determinarne la qualità in base alle dimensioni, maturazione e

varietà, poiché diverse varietà possono essere più adatte a specifici tipi di lavorazione, ad esempio, il san Marzano per i pelati e i pomodori tondi per la passata. Infine, abbiamo la fase di qualità visiva dove vengono controllati i pomodori se son presenti macchie, ammaccature, rotture della pelle o segni di malattie. I pomodori che non soddisfano tali caratteristiche vengono scartati.

- Nella fase successiva, il processo di lavaggio riveste un ruolo cruciale per garantire un basso tenore microbico durante la lavorazione. Ciò si ottiene aggiungendo cloro in concentrazioni che variano da 50 a 200 ppm (parti per milione) all'acqua utilizzata durante il lavaggio.
- Nella fase di peeling, si rimuove la buccia dai pomodori prima di sottoporli a ulteriori processi per l'ottenimento dei vari prodotti, come pomodori in scatola interi, a fette o a cubetti. Due metodi di peeling ampiamente adottati includono l'utilizzo del vapore e di una soluzione alcalina a base di carbonato di sodio che è la lisciva. Attualmente, l'approccio preferito è l'uso del vapore, ritenuto più efficiente per agevolare il processo di pelatura. Altri metodi meno diffusi comprendono il peeling a freddo e l'utilizzo di cloruro di calcio a caldo.
- Durante la fase di frammentazione, i pomodori subiscono taglio e pressatura. Esistono due approcci per lavorare i pomodori: il metodo "hot break" e il "cold break". Il primo si svolge a temperature comprese tra 93 e 99°C. Nel secondo, i pomodori vengono tritati e successivamente riscaldati leggermente per favorire l'attività degli enzimi e aumentare la resa. Il succo ottenuto con il metodo "cold break" presenta minori alterazioni di colore e sapore, ma ha una viscosità inferiore a causa dell'azione degli enzimi. Questa minore viscosità rappresenta un vantaggio particolare per il succo di pomodoro e le bevande a base di succo.
- Successivamente, i pomodori ridotti in pezzi vengono inviati attraverso un estrattore, a un "pulper" o un finitore per eliminare semi. L'estrazione del succo avviene tramite

estrattori a vite, che garantiscono maggior resa ma possono riscaldare il prodotto e causare ossigenazione, oppure tramite estrattori a paletta che, pur offrendo una resa inferiore, preservano meglio le caratteristiche organolettiche grazie ad un trattamento più delicato del prodotto.

- La fase di de-aerazione è cruciale per eliminare l'aria intrappolata durante la frammentazione o l'estrazione. Questo processo avviene aspirando il succo e serve a ridurre l'ossidazione del prodotto e a prevenire la formazione di schiuma durante la fase di concentrazione.
- Per aumentare la viscosità del prodotto e ridurre al minimo la separazione del siero, si procede poi con l'omogeneizzazione del succo. Qualora il prodotto finale non sia destinato ad essere succo, viene eseguita la concentrazione del succo per ottenere pasta o purea.
- Per garantire la sicurezza del prodotto, prima del confezionamento asettico, viene effettuata l'acidificazione, qualora alcune varietà di pomodori da trasformazione abbiano un pH superiore a 4,6. Per fare ciò si utilizzano succo di limone o acido citrico. Successivamente, il prodotto viene pastorizzato a 88°C, in modo da eliminare gli organismi patogeni e garantire la conservazione del prodotto integro. Esso viene poi raffreddato e imbottigliato in contenitori sterili.

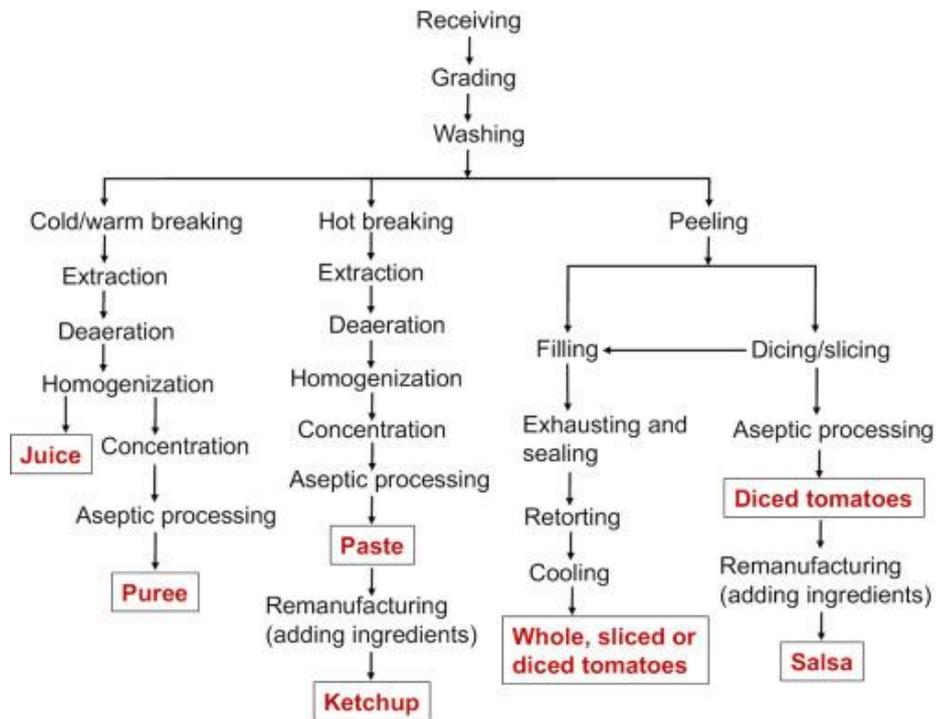


Figura 3: Schema generale della lavorazione del pomodoro industriale (Barringer et al., 2004).

### 1.5 Valori nutrizionali e nutraceutici del pomodoro

La polpa del frutto di pomodoro è ricca di diverse sostanze che ne determinano le proprietà organolettiche e nutraceutiche. In particolare, troviamo zuccheri, minerali, amminoacidi essenziali, fibre, acidi organici, minerali, lipidi, pigmenti, vitamine, composti volatili e pectine (Davies e Hobson 1981; Favier et al., 1997; Tan e Kerr 2015; Tilahun et al., 2017; Salehi et al., 2019; Ahmed et al., 2020; Kumar et al., 2021; Piazza et al., 2022). Le concentrazioni di tutti questi composti sono influenzate dallo stato di maturazione del frutto, dalle modalità di coltivazione, dalle condizioni di crescita e dai fattori ambientali (George et al., 2004; George et al., 2011; Garcia e Valverde et al. 2013). Nella Tabella 2 (di seguito) sono riportati il pH e i valori medi dei principali composti presenti nel pomodoro.

Parameters	Values	Range
Energy (kcal/100 g)	34.67 ± 18.74	18.00–75.00
Ash (%)	8.75 ± 1.69	5.90–10.60
Moisture (g/100 g)	91.18 ± 6.83	68.03–96.17
Total protein (g/100 g)	17.71 ± 5.40	10.50–25.03
Lipid (g/100 g)	4.96 ± 1.19	3.62–5.39
Carbohydrates (g/100 g)	5.96 ± 1.37	3.92–8.00
Total sugar (g/100 g)	50.60 ± 3.69	47.00–56.45
pH	3.83 ± 0.21	3.61–4.08
Acidity (%)	0.48 ± 0.07	0.39–0.55
Reducing sugar (%)	35.84 ± 4.57	30.03–41.21
Fructose (%)	2.88 ± 0.49	1.15–3.42
Glucose (%)	2.45 ± 0.48	1.74–3.18
Sucrose (%)	0.02 ± 0.05	0.01–0.02
Total fiber (g/100 g)	11.44 ± 9.31	1.32–19.36

Values are expressed as mean ± standard deviation.

**Tabella 1.** Composizione del pomodoro (Ali et al., 2020).

Tra i principali zuccheri troviamo il glucosio e il fruttosio, inoltre, sono state osservate in alcuni casi anche tracce di altri raffinosio, arabinosio e galattosio (Garcia e Barrett, 2006; Elbadrawwy et al. 2016).

Per quanto concerne i minerali, calcio (Ca), potassio (K), sodio (Na), fosforo (P), magnesio (Mg), zolfo (S) e cloro (Cl), sono macronutrienti necessari in quantità più elevate nella dieta,

mentre altri oligoelementi come ferro (Fe), iodio (I), zinco (Zn), fluoro (F), rame (Cu), manganese (Mn), cobalto (Co), cromo (Cr), nichel (Ni), molibdeno (Mo) e selenio (Se) sono necessari in quantità minori. Alluminio (Al), arsenico (As), boro (B), bario (Ba), bismuto (Bi), bromo (Br), piombo (Pb), cadmio (Cd), cesio (Cs), germanio (Ge), litio (Li), mercurio (Hg), rubidio (Rb), silicio (Si), antimonio (Sb), stagno (Sn), samario (Sm), stronzio (Sr), tungsteno (W), titanio (Ti) e tallio (Tl), che sono necessari in quantità ancora più piccole (1 µg/giorno) e sono noti come elementi “in tracce” (Nielsen et al., 1984; Odriozola-Serrano et al., 2009; Abdullahi et al., 2016; Ionete et al., 2016; Solayman et al., 2016; Ivanova et al., 2018). As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn sono metalli pesanti tossici anche a basse concentrazioni, poiché tendono ad accumularsi nelle cellule (Zugrava et al., 2009).

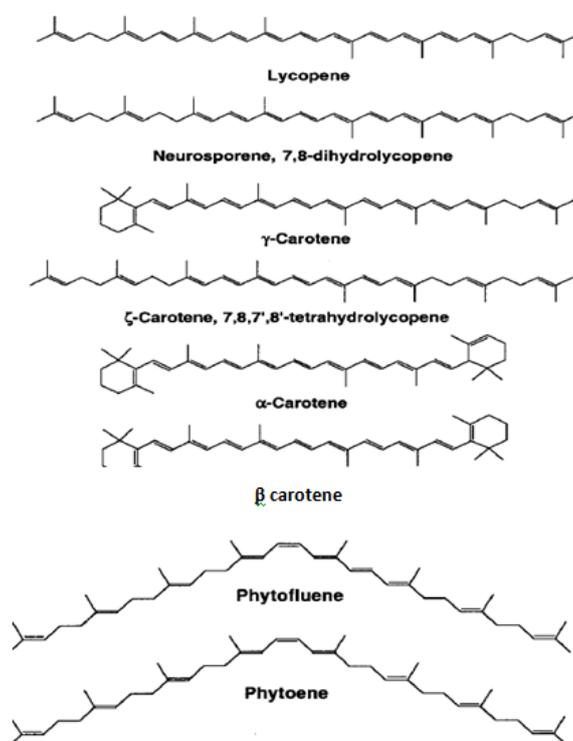
I pomodori sono ricchi di vitamina C (acido ascorbico), provitamina A, vitamina B9 (acido folico), vitamina E e K. In particolare, la vitamina C è in quantità maggiori rispetto alle altre (Garcia, et al. 2006; Borguini et al., 2009). Le vitamine svolgono diverse funzioni essenziali nell'uomo, tra cui quella di dare supporto al sistema nervoso e di avere un ruolo chiave nella produzione di globuli rossi e nella regolazione dell'attività enzimatica (Sure, 1933; Marcus et al., 1990; Ali et al., 2021)

Nel pomodoro sono stati identificati complessivamente 17 amminoacidi, con gli amminoacidi essenziali che rappresentano circa il 39,75% delle proteine totali. Tra tutti gli amminoacidi presenti, l'acido glutammico risulta essere il più abbondante, con una concentrazione di circa 10,13 g per 100 g di proteine. Esso è il più comune amminoacido non essenziale, mentre la cisteina è quello meno rappresentato. Relativamente agli amminoacidi essenziali, invece, la leucina è la più presente, mentre la metionina si trova in quantità minori (Elango e Laviano, 2017; Ali et al., 2021).

Il pomodoro è anche un'ottima fonte di fitosteroli, circa 1283 mg per kg di pomodoro. Essi si presentano comunemente come una miscela di β-sitosterolo, campesterolo e stigmasterolo, e sono importanti per la salute umana (Ostlund et al., 2003; Ali et al., 2021).

La maggior parte dell'attività antiossidante deriva dalla miscela naturale di vari composti fitochimici benefici per la salute dell'uomo. In particolare, questo effetto è attribuibile alla presenza di carotenoidi, acido ascorbico e composti fenolici, i quali possono agire sinergicamente e/o in modo antagonista (Raffo et al., 2002; Gonzalez-Cebrino et al., 2011).

I carotenoidi sono tra i composti bioattivi più rilevanti nel pomodoro (Figura 4). Si dividono in due grandi gruppi: il primo è costituito dai caroteni, che includono il licopene (uno dei maggiori rappresentanti), il  $\beta$ -carotene, l' $\alpha$ -carotene, il  $\xi$ -carotene, il fitoene, il fitofluene e il neurosporene (Clinton et al. 1998; Perveen, et al. 2015). Il secondo gruppo è invece



**Figura 4.** Struttura chimica dei carotenoidi nelle piante di pomodoro (Perveen et al., 2015).

rappresentato dalle xantofille, contenenti composti come  $\beta$ -criptoxantina, luteina, zethanxina, neoxantina e cantaxantina (Martì et al., 2016). Il  $\beta$ -carotene, l' $\alpha$ -carotene e la  $\beta$ -criptoxantina sono le forme di provitamina A che possono essere convertite in vitamina A nel corpo umano (Sies, 1991; Singh et al., 2010).

Oltre ai carotenoidi, i pomodori contengono una vasta gamma di acidi fenolici e di flavonoidi, che vengono accumulati per lo più nella buccia. Infatti, nonostante siano prodotti di scarto, sia

i semi che la buccia sono ricchi di proteine, fibre alimentari, composti bioattivi e licopene (Muir et al., 2001; Calvenzani et al. 2010; Lu et al., 2019). Tra i flavonoidi più importanti ci sono la rutina, la naringenina calcione e la quercetina, mentre tra gli acidi fenolici principali troviamo l'acido clorogenico e caffeico, insieme ai loro derivati (Bovy et al., 2007). Inoltre vi sono nel frutto anche acidi fenolici minori come l'acido p-cumarico e ferulico, insieme ai loro glucosidi (Chaudhary et al. 2018). Sono presenti anche dei flavonoli come la miricetina e i suoi prodotti (Shen et al., 2007). Diversi studi hanno mostrato che i pomodori coltivati in serra mostrano una minore concentrazione di flavonoidi nella loro buccia rispetto a quelli coltivati in campo aperto. Ciò sembra essere dovuto principalmente alla diversa lunghezza d'onda della luce sotto cui le piante si trovano a crescere (Stewart et al., 2000; Toor et al., 2006).

I flavonoidi e gli acidi fenolici, insieme ai carotenoidi, contribuiscono alle proprietà antiossidanti e benefiche per la salute dell'uomo associate al consumo di pomodori nella dieta quotidiana (Williams et al., 2004; Kalebek et al., 2017; Sofy et al., 2020).

Considerando nello specifico il licopene, è emerso che sia il maggior responsabile della pigmentazione rossa dei pomodori (Favati et al., 2009; Alì et al., 2021). Il contenuto è diverso a seconda della varietà che si prende in considerazione, e a seconda dello stadio di maturazione del frutto; inoltre, variazioni del contenuto di licopene possono dipendere dalla fertilizzazione del suolo, dalla disponibilità di acqua oppure ancora dall'intensità della luce (Heinonen et al., 1989; Giovannucci, 1999; Trejo-Solis et al., 2013). In particolare, le varietà di pomodori a frutto rosso tendono ad avere un contenuto di licopene più elevato rispetto a quelle di pomodori gialli o arancioni, poiché esso è il pigmento che dà appunto il colore rosso al frutto (Tilahun et al., 2019). Per quanto riguarda la concentrazione di questo composto nei pomodori coltivati in campo ha valori compresi tra 4,3-18,1 mg/100g (Adalid et al., 2010). Tuttavia, i livelli di licopene variano significativamente tra la buccia e la polpa del pomodoro, così come tra le diverse varietà, come accennato sopra. Infatti, è stato osservato che la buccia del pomodoro può contenere fino a cinque volte più licopene dalla polpa (Sharma e Le Maguer, 1996) con un

range compreso tra 9,78 e 26,75 mg su100g nelle cultivar rosse e 1,47-5,28 mg su100g nelle cultivar gialle (Singh et al., 2010).

Alcune varietà moderne di pomodori invece, sviluppano una colorazione scura della buccia, tendente al nero o al viola, a causa di mutazioni che influenzano la biosintesi dei carotenoidi o il processo di degradazione della clorofilla (Mes et al., 2008). Come già citato in precedenza, il caratteristico colore rosso del pomodoro convenzionale è principalmente dovuto all'accumulo di licopene, mentre gli antociani vengono accumulati solo nei tessuti vegetativi (Bovy et al., 2002), tuttavia, diverse specie selvatiche di *Solanum* mostrano la capacità di accumularli anche nella buccia (Jones et al., 2003; Mes et al., 2008).

Gli antociani, appartenenti alla famiglia dei flavonoidi, rappresentano un gruppo di pigmenti naturali che conta oltre 700 strutture chimiche diverse, responsabili delle colorazioni rosso-blu di molti frutti e verdure (Andersen et al., 2014) e dotati di forti proprietà antiossidanti (Wu, 2014). Questi composti sono di particolare interesse per l'industria agroalimentare, grazie ai loro potenziali benefici per la salute e alla loro capacità di conferire colori vivaci a una varietà di prodotti (Tsuda, 2012; Gerardi et al., 2018).

### *1.6 Effetti benefici dei composti bioattivi del pomodoro*

È noto che tutte le sostanze contenute nel pomodoro (nominate nel paragrafo 1.5), assunte regolarmente con la dieta quotidiana, possono avere effetti positivi sulla salute umana e prevenire o curare anche alcune patologie date le loro proprietà antinfiammatorie, antiallergiche, antimicrobiche, vasodilatatorie, antitrombotiche, cardioprotettive e antiossidanti (Raiola et al., 2014; Pem e Jeewon, 2015; Ali et al., 2021).

Alcuni studi evidenziano una riduzione del colesterolo cattivo LDL. In particolare, Tan di Chujun e collaboratori (2024) hanno dimostrato che una dieta ad alta concentrazione di tomatina e licopene può ridurre il colesterolo LDL plasmatico senza modificare il livello di colesterolo HDL. Ciò è dovuto al fatto che l'ossidazione delle lipoproteine a bassa densità

(LDL) danneggia le pareti arteriose, favorendo così la formazione di placche aterosclerotiche (Badimon et al., 2010; Cheng et al., 2017; Sakemi et al., 2020; Zhu et al., 2020). L'integrazione di licopene e tomatina nella dieta, insieme ad altri antiossidanti, inibisce quindi l'ossidazione delle LDL (Fuhrman et al., 1997; Gu et al., 2008). Inoltre, la presenza dei fitosteroli nel pomodoro contribuisce a bloccare i siti di assorbimento del colesterolo nell'intestino, riducendone l'assorbimento e quindi portando anche in questo caso ad una riduzione delle LDL nel circolo sanguigno (Ostund et al., 2003).

Oltre ai benefici sul colesterolo, è stato osservato che il consumo di pomodori può avere effetti positivi sull'obesità, che è un fattore di rischio per lo sviluppo di malattie croniche come le malattie cardiovascolari, coronariche, epatiche e l'insorgenza di alcune tipologie di cancro (Cummings e Schwartz, 2003; Hung et al., 2004; Boeing et al., 2012; Slavin et al., 2012; Imran et al., 2020; Saini et al., 2020). Alcuni lavori riportati in letteratura evidenziano che prodotti a base di pomodoro, contenenti licopene, possono inibire l'aumento di peso corporeo nei ratti alimentati con una dieta ricca di grassi (A-Young et al., 2012; Dalzenne et al., 2020). Tuttavia, nell'uomo non è ancora stata dimostrata l'efficacia del licopene nella soppressione dell'aumento di peso. Nonostante ciò, diversi studi hanno mostrato un'evidente riduzione del tessuto adiposo bianco nei mammiferi, come nei ratti sopraccitati, alimentati con prodotti a base di pomodoro; perciò, ulteriori studi sull'uomo, potrebbero avere un riscontro positivo anche in questo ambito (Markovits et al., 2009; Merenkova et al., 2020).

Sono stati studiati anche i benefici dei pomodori sull'insorgenza di alcune tipologie di cancro (Franceschini et al., 1998; Ezzat et al., 2019). Il licopene, grazie alla sua capacità di proteggere le cellule dai danni ossidativi, contribuisce a prevenire le aberrazioni cromosomiche che possono verificarsi nel DNA danneggiato dalle specie reattive dell'ossigeno (ROS) o da agenti cancerogeni (Alshatwi et al., 2010; Liskova et al., 2019; Choudhari et al., 2020). È stato dimostrato che l'assunzione di prodotti a base di pomodoro, ricchi di licopene, è significativamente associata a una riduzione del rischio di cancro alla prostata, del tratto

gastrointestinale, di quello alla ghiandola mammaria, del polmone, dell'endometrio e di leucemia (Franceschini et al., 1994; Levy et al. 1995; Amir et al., 1999; Gloria et al., 2014; Siler et al., 2004). In particolare, il consumo di prodotti a base di pomodori cotti è risultato più efficace rispetto ai pomodori crudi, grazie alla maggiore biodisponibilità del licopene, che aumenta con l'uso del calore e la presenza di grassi (Etminan et al., 2004).

Per quanto riguarda studi sulle malattie neurodegenerative come l'Alzheimer, il Parkinson e l'ischemia cerebrale associata all'ictus, è stato visto che grazie alla presenza di vitamina C, vitamina E e licopene, l'assunzione di pomodoro può aumentare l'attività di enzimi antiossidanti quali la glutatione perossidasi e la superossido dismutasi, riducendo così la perossidazione lipidica nell'area dell'ippocampo e della corteccia cerebrale del cervello, in generale diminuendo lo stress ossidativo ma anche l'apoptosi neuronale (Karppi et al., 2012; Li e Xu, 2014; Asokan et al., 2015).

I carotenoidi possono inoltre svolgere un ruolo nella riduzione della resistenza insulinica e dello sviluppo del diabete, in letteratura è stato visto come il beta-carotene e il licopene siano responsabili della riduzione dell'intolleranza al glucosio in pazienti diabetici e un miglioramento dei livelli di emoglobina glicata nei pazienti anziani con diabete mellito di tipo 2 (Ford et al., 1999; Polidori et al., 2000; Bates et al., 2004; Buttris and Stokes, 2008; Lui et al; 2018; Abdel-Daim et al., 2019).

Alcuni studiosi hanno valutato l'efficacia di alcune sostanze contenute nei pomodori anche sulla salute della pelle (Saewan et al., 2015): le loro proprietà antiossidanti prevengono gli effetti dannosi delle radiazioni UV durante l'esposizione solare, prevenendo malattie quali cancro della pelle (melanoma maligno), fotoinvecchiamento, fotosensibilità (Matsumura et al., 2004; Gu et al., 2020).

Altri benefici segnalati dei composti del pomodoro per la salute della pelle includono la protezione dalla tossicità dei metalli pesanti e dalle punture di zecche proteggendo così da

infezioni trasmesse da questi organismi come la malattia di Lyme (Tito et al. 2011; Boulanger et al., 2015).

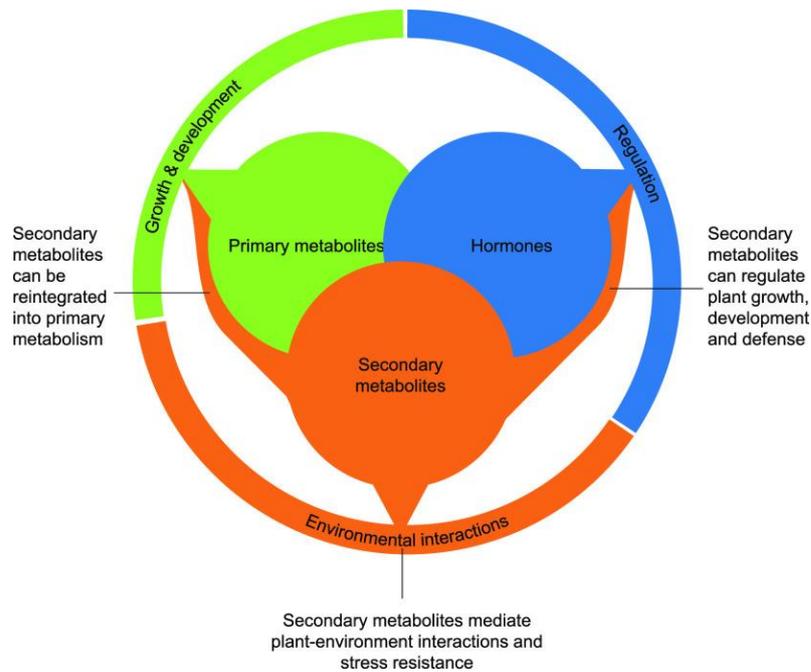
Per quanto riguarda il microbioma intestinale è stato dimostrato, in diversi studi presenti in letteratura, che i pomodori liofilizzati ricchi di flavanoli, possono migliorare la composizione del microbioma intestinale aumentando le popolazioni di *Flavobacterium* e *Lactobacillus*, diminuendo quelle di *Oscillospira*, con conseguente riduzione delle risposte infiammatorie a livello intestinale (Liso et al., 2018; Scarano et al., 2018).

Licopene, beta-carotene e vitamina C hanno quindi in generale un impatto positivo anche sul sistema immunitario, in quanto favoriscono la riduzione dei ROS a livello plasmatico, migliorano la comunicazione cellula-cellula (Caisero et al., 2020), aumentano la produzione di linfociti T e l'attività litica delle cellule natural killer (Van Gorkom et al., 2018).

Pur offrendo numerosi benefici per la salute, l'assunzione in determinate condizioni fisiche o il consumo eccessivo di pomodori può provocare effetti indesiderati sull'organismo. Gli effetti avversi dell'assunzione di pomodoro sono associati a problemi renali, allergie, artrite, bruciore di stomaco ed emicrania (Salehi et al., 2019).

## *2. Composti del metabolismo primario e secondario nel pomodoro*

Il regno vegetale è in grado di sintetizzare un'enorme varietà di composti organici a basso peso molecolare. Questi composti sono stati suddivisi dalla comunità scientifica in tre principali categorie in base alle loro funzioni: i metaboliti primari, essenziali per la crescita e lo sviluppo delle piante; i metaboliti secondari (o specializzati), che facilitano le interazioni tra la pianta e il suo ambiente; infine, gli ormoni, che regolano i processi biologici e il metabolismo degli organismi vegetali (Figura 5; Erb e Kliebenstein 2020).



**Figura 5.** I composti a basso peso molecolare nelle piante sono suddivisi in metaboliti primari, secondari e ormoni. (Erb e Kliebenstein 2020).

La biosintesi dei metaboliti è influenzata dalle condizioni di crescita della pianta (Diouf et al., 2018) che è messa a dura prova dalla presenza di condizioni avverse quali scarsità delle risorse idriche, la salinità del suolo, la temperatura e altri stress abiotici (Fahad et al., 2017; Gharbi et al., 2017).

### *2.1 I composti del metabolismo primario*

Il metabolismo primario include processi biochimici fondamentali per la crescita, lo sviluppo e la riproduzione della pianta come la sintesi e la degradazione delle principali molecole organiche quali carboidrati, proteine, lipidi e acidi organici (Fàbregas and Fernie, 2021). I metaboliti primari sono sempre presenti nelle specie vegetali e sono più abbondanti dei metaboliti secondari (Erb et al., 2020). Il pomodoro è un frutto definito climaterico, in quanto presenta un picco nella respirazione e nella produzione di etilene nella prima parte della maturazione (Li et al., 2019). Successivamente, con l'avanzare della maturazione, i tessuti del

pomodoro passano da essere tessuti parzialmente fotosintetici a veri e propri tessuti eterotrofi attraverso la parallela differenziazione dei cloroplasti in cromoplasti con un aumento di carotenoidi e licopene nelle cellule dei frutti maturi (Carrari and Fernie, 2006). Il numero di plastidi e il contenuto di clorofilla e carotenoidi sono strettamente correlati con l'attività fotosintetica e l'accumulo di fotosintati che, a loro volta, sono influenzati sia da fattori ambientali sia genetici (Quinet et al., 2019).

Nei frutti di pomodoro, gli zuccheri, derivati dalla fotosintesi, forniscono dolcezza al frutto maturo e sono importanti per generare la pressione di turgore e per promuovere l'espansione cellulare, ma agiscono anche da controllori dello sviluppo e del metabolismo dei frutti (Kanayama, 2017).

Gli acidi organici, prodotti nel metabolismo primario all'interno del pomodoro, sono i principali attori del sapore acido del frutto attribuito alla presenza di acido malico e acido citrico che costituiscono insieme oltre il 90% del pool totale di acidi organici nei frutti maturi (Bastias et al., 2011). Di conseguenza per ottenere un sapore gradevole nel pomodoro, è necessario avere un alto contenuto di zucchero e un elevato livello di acidi. Se il livello di acidi è alto ma quello di zucchero è basso, il pomodoro risulterà troppo aspro, mentre un alto contenuto di zuccheri con bassi livelli di acidi produrrà un sapore insipido (Davies and Hobson, 1981; Huang et al., 2015; Tieman et al., 2017). Gli acidi organici infine partecipano attivamente al ciclo di Krebs essendo degli intermedi, sono coinvolti nella regolazione del pH e nel metabolismo energetico della pianta (Farre et al., 2001; Yin et al., 2010; Nguyen et al., 2023).

Per quanto riguarda le proteine vengono sintetizzate a partire dal carbonio fissato durante la fotosintesi e l'azoto assorbito dal suolo, la concentrazione totale di amminoacidi liberi nei frutti di pomodoro varia tra il 2,0% e il 2,5% del peso secco (Sorrequieta et al., 2010). Tra gli amminoacidi più abbondanti vi sono l'acido glutammico (Glu), l'acido aspartico (Asp) e l'acido  $\gamma$ -amminobutirrico (GABA) (Snowden et al., 2015). In particolare, il GABA, un amminoacido non proteico a quattro atomi di carbonio, è noto per le sue proprietà funzionali nella riduzione

della pressione sanguigna nel corpo umano (Zhao et al., 2018). Nelle piante, il GABA è un metabolita importante che regola il pH citosolico. La sua concentrazione è elevata nella fase di maturazione verde dei pomodori, ma diminuisce progressivamente durante la maturazione (Klee and Giovannoni, 2011). Anche gli amminoacidi aromatici aumentano di concentrazione e sono di particolare interesse poiché fungono da precursori per i composti volatili del sapore durante il processo di maturazione (Mounet et al., 2009).

I lipidi, tra cui fosfolipidi, glicerolipidi e galattolipidi, svolgono una vasta gamma di funzioni essenziali. Essi contribuiscono all'immagazzinamento del carbonio attraverso i componenti delle membrane cellulari e funzionano anche come molecole di segnalazione. (Farre, et al., 2001; Aid, 2019). Molti studi si sono anche concentrati sui semi di pomodoro in quanto l'olio di questi semi è un'eccellente fonte di acidi grassi coinvolti nella crescita delle piante (Aluyor and Ori-Jesu 2008; Botinestean et al., 2012).

Il metabolismo primario è anche essenziale in quanto fornisce i precursori per il metabolismo secondario (Carrari e Fernie, 2006; Pott et al., 2019; Luo et al., 2023).

## 2.2 I composti del metabolismo secondario

Il metabolismo secondario delle piante comprende diversi gruppi di composti, alcuni dei quali sono stati già menzionati nei paragrafi precedenti. Tra le sostanze di maggior interesse troviamo i fenoli, i terpeni e alcuni composti quaternari contenenti azoto: la presenza di queste sostanze nelle piante può avere un valore tassonomico (es. alcune famiglie possono avere certi determinati composti che non sono presenti in altre). Tali molecole possono svolgere il ruolo di mediatori ecologici tra le piante e l'ambiente che le circonda (considerando come tale sia la parte biotica che abiotica) (Hartmann et al., 2007). I metaboliti secondari sono importanti nella difesa delle piante contro i patogeni. La loro produzione e attivazione viene stimolata dal riconoscimento dei patogeni tramite proteine di difesa (Ahuja et al., 2012). La sintesi e l'accumulo di metaboliti secondari sono influenzati da una varietà di fattori, tra cui quelli

genetici, ontogenici e ambientali, come la luce, la temperatura, la fertilità e la salinità del suolo (Ramakrishna et al., 2011; Yang et al., 2018; Noglia et al., 2021).

In particolare, per quanto riguarda la pianta di pomodoro, alcuni dei principali metaboliti secondari che vengono prodotti fanno parte della categoria degli alcaloidi, generalmente considerati fattori antinutrizionali della nostra dieta, ossia fattori che impediscono l'assorbimento di sostanze nutritive, e talvolta possono essere tossici. Fanno parte di questo gruppo l' $\alpha$ -tomatina e la deidrotomatina con proprietà antifungine e antibatteriche (Friedman, 2015). Esse conferiscono un sapore amaro al frutto ed è presente ad alte concentrazioni nelle prime fasi di sviluppo del frutto, per poi diminuire durante il corso della maturazione (Tohge e Fernie, 2015).

Nel gruppo dei fenoli abbiamo gli acidi fenolici a cui appartengono l'acido clorogenico, l'acido caffeico e l'acido ferulico, noti per le loro proprietà antiossidanti, e i flavonoidi che includono la quercetina, il kaempferolo e la rutina, il cui accumulo è limitato nella buccia. questi composti hanno un effetto per lo più antiossidante e antinfiammatorio (Bovy et al. 2007; Ballester et al., 2016; Tamasi et al., 2019).

Un'altra categoria è quella dei terpeni di cui fanno parte i carotenoidi, già descritti in precedenza per le loro proprietà bioattive (Shinozaki et al., 2018). I terpeni sono secreti da strutture specializzate, i tricomi ghiandolari, che producono una miscela di monoterpeni e sesquiterpeni (Zabel et al., 2021). I tricomi sono presenti sia nel frutto che sulla superficie di foglie e fusti del pomodoro, in particolare vi sono sette diversi tipi di tricomi: tipo non ghiandolare II, III, V e tipi ghiandolari I, IV, VI e VII (Luckiwill et al., 1943). La loro presenza e distribuzione dipendono dalla specie di pomodoro, dal tessuto e possono essere influenzate anche dalle condizioni ambientali (es. stress biotici o abiotici) (Chen et al., 2018; Escobar-Bravo et al., 2018). In particolare, i tricomi di tipo VI producono elevate quantità di sesquiterpenoidi e sono costituiti da quattro cellule secretorie in cima a un asse multicellulare. Si possono trovare sulle

parti verdi della maggior parte delle specie di pomodoro, incluso il pomodoro coltivato (Glas et al., 2012; Nakashima et al., 2016).

Infine, i composti organici volatili (VOC) come il linalolo presente nel frutto maturo e il beta-cariofillene, contribuiscono all'aroma e al sapore dei frutti di pomodoro e possono avere proprietà antimicrobiche e repellenti per i patogeni e gli erbivori (Shinozaki et al., 2018) perciò, essi sono prodotti come parte di una strategia di difesa contro lo stress biotico e abiotico, oltre che a contribuire alle funzioni fisiologiche dell'organismo produttore (Maffei et al., 2011).

Questi composti volatili sono derivati da vari precursori, tra cui acidi grassi, carotenoidi e amminoacidi (Bauchet et al., 2017). Tra i principali contribuenti al sapore del frutto ci sono cis-3-esanale, , esanale, 3-metilbutanale, 6-metil-5-epten-2-one, 1-pentan-3-one, trans-2-esanale, salicilato di metile, 2-isobutiltiazolo e  $\beta$ -ionone (Carrari and Fernie, 2006). Altri invece presenti nelle foglie verdi della pianta che danno il caratteristico aroma fresco di erba tagliata sono C6 1-esanolo, (Z)-3-esenale, (E)-2-esenale o esanale, e la sostanza volatile C5 1-penten-3-one (Rambla et al., 2014). Tutti questi composti contribuiscono al processo di maturazione del frutto. La maturazione del frutto attiva percorsi che generalmente influenzano i livelli di pigmenti, zuccheri, acidi e sostanze volatili associate all'aroma per rendere il frutto più attraente, promuovendo contemporaneamente l'ammorbidimento e la degradazione dei tessuti per consentire un più facile rilascio dei semi (Matas et al., 2009).

### *2.3 Il controllo ormonale nella maturazione del frutto*

I fitormoni sono parte integrante della regolazione dello sviluppo dei frutti, che comprende diversi step tra cui l'allegagione, la crescita e la maturazione. L'allegagione avviene in seguito alla fecondazione ed è associata alla segnalazione di auxina e acido gibberellico (GA) (Srivastava and Handa, 2005). La crescita dei frutti invece consiste nella divisione cellulare, influenzata dall'auxina, e nell'espansione cellulare mediata dall'interazione sinergica tra auxina e GA (acido gibberellico) (Hu et al., 2019). La maturazione del frutto si verifica nel momento

in cui i livelli di auxina e GA diminuiscono e in concomitanza aumentano quelli di acido abscissico (ABA) ed etilene (Biale 1964; Pasaresi et al., 2014).

Si riconosce comunemente che i frutti carnosì possono essere classificati in due categorie: frutti climaterici, come mela, albicocca, avocado, banana e pomodoro, e frutti non climaterici (come agrumi, uva lampone e fragola (Klee and Giovannoni, 2011)). La principale distinzione tra questi due gruppi risiede nell'aumento repentino della respirazione e nella produzione di etilene che avviene all'inizio della maturazione nei frutti climaterici (Karlova et al., 2014). In conclusione, quindi oltre all'etilene vi sono altri ormoni che sono coinvolti nello sviluppo e maturazione del frutto (Serrani et al., 2010), in particolare l'auxina e le gibberelline sono gli ormoni predominanti richiesti per l'inizio della maturazione del frutto in risposta alla fecondazione ed entrambi portano allo sviluppo partenocarpico (De Jong et al., 2009). È stato poi dimostrato un ruolo importante di citochinine, acido jasmonico (JA) e acido abscissico (ABA) insieme all'etilene nella formazione del frutto (Ding et al., 2013; Kumar et al., 2014). In particolare, sarebbe un segnale derivante dall'ABA a innescare il vero e proprio inizio della maturazione del frutto (Joldersma e Lui, 2018).

### *3. Simbiosi delle piante con i microrganismi benefici del suolo (MBS)*

Le comunità microbiche sono essenziali per lo sviluppo e il metabolismo delle piante. La ricerca ha dimostrato che numerosi microrganismi benefici del suolo (MBS) associati alle piante possono influenzare significativamente la germinazione dei semi, il vigore delle piantine, la crescita e lo sviluppo delle piante, la nutrizione, la resistenza alle malattie e la produttività (Van der Heijden et al., 1998, 2006, 2008). Questi microrganismi fanno parte di quello che viene definito microbioma vegetale. I MBS apportano numerosi benefici alla salute dell'organismo vegetale. Gli scambi tra la pianta e questi microrganismi sono dovuti a relazioni di tipo simbiotico, spesso mutualistiche, in cui la pianta cede il carbonio fissato fotosinteticamente. Esso viene depositato in distretti come spermosfera, fillosfera, rizosfera e micorrizosfera,

fornendo ai microrganismi ciò di cui necessitano per svolgere il loro ciclo vitale ( Nelson, 2004; Frey-Klett et al., 2007; Berendsen et al., 2012; Vorholt, 2012 ). La rizosfera, la stretta area che circonda e influenza le radici delle piante, è un punto focale per un'ampia varietà di organismi ed è considerata uno degli ecosistemi più complessi del pianeta (Hinsinger et al., 2009; Raaijmakers et al., 2009). Questa zona ospita un'ampia gamma di organismi, tra cui batteri promuoventi la crescita della pianta (PGPB – dall'inglese Plant Growth Promoting Bacteria), funghi micorrizici arbuscolari (AMF - dall'inglese Arbuscular Mycorrhizal Fungi), oomiceti, nematodi, protozoi, alghe, virus, archei e artropodi (Bonkowski et al., 2009; Buée et al., 2009; Bona et al., 2018). In particolare, AMF e PGPB sono noti per migliorare la crescita delle piante e aumentare la produttività della biomassa. Infatti, è ben noto che questi microrganismi influenzino anche il metabolismo secondario della pianta e siano impiegati anche in strategie volte a migliorare la concentrazione di metaboliti secondari con attività antiossidante in diversi organi della pianta (Tiepo et al., 2018; Stegelmeier et al., 2022).

Le piante inoculate con AMF e PGPB diventano più resistenti ai patogeni e migliorano l'assorbimento di acqua e nutrienti dal suolo (Bona et al., 2016; Berger et al., 2017; Nasuelli et al., 2023; Todeschini et al., 2018; Balderas- Ruiz et al., 2021; Chandrasekaran et al., 2021). In cambio, i microrganismi simbiotici ricevono zuccheri prodotti dalla fotosintesi della pianta, che fungono da fonte di nutrimento essenziale per il loro ciclo vitale, in particolare per i funghi micorrizici (Berta et al. 2015; Hempel, 2018).

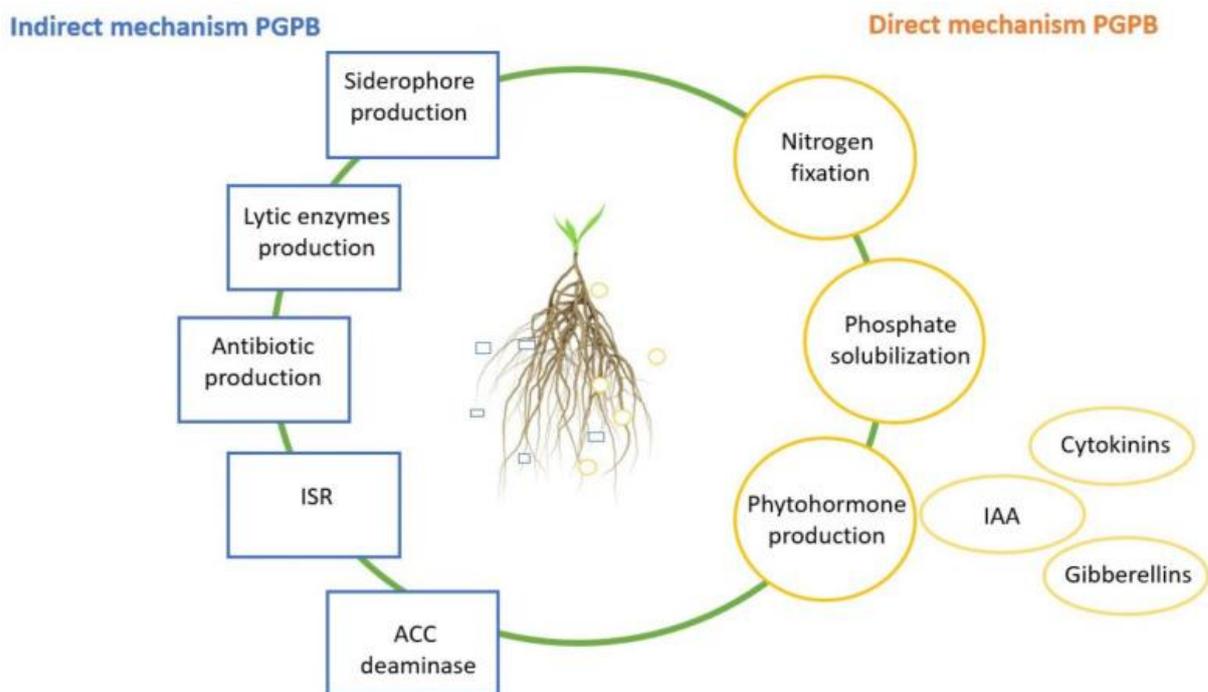
Le interazioni tra piante e AMF/PGPB possono avere effetti variabili sulla crescita e sul metabolismo delle piante. Tali effetti possono essere infatti positivi, negativi o neutri. Questi effetti dipendono da diversi fattori, come le condizioni ambientali, le specie vegetali coinvolte e le specie o i ceppi fungini o batterici. D'altro canto, la compatibilità tra i diversi microrganismi può influenzare il risultato dell'inoculazione. Spesso, gli inoculi contengono una combinazione di microrganismi selezionati per massimizzare la performance e la fitness della pianta (Desai et al., 2016).

### 3.1 Batteri promuoventi la crescita della pianta (PGPB)

I PGPB comprendono un'ampia gamma di generi che interagiscono positivamente con le colture. Tra i principali ritroviamo *Acinetobacter*, *Agrobacter*, *Arthobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Burkholderia*, *Bradyrhizobium*, *Rhizobium*, *Frankia*, *Serratia*, *Thiobacillus*, *Pseudomonas* e *Bacillus* (Vessey, 2003; Glick 2015). Questi batteri possono migliorare la salute delle piante attraverso meccanismi diretti e indiretti, come la fornitura di nutrienti non altrimenti accessibili alle radici, l'influenza sulla morfologia e sulla biomassa delle piante e l'aumento della resistenza contro fitopatogeni e stress abiotici (Figura 6; Antoszewski et al., 2022; Kulkova et al., 2023).

Tra i meccanismi d'azione **diretti** vi sono i meccanismi che si verificano all'interno della pianta e influenzano direttamente il metabolismo della stessa (Vessey, 2003), tra cui sequestro del ferro (Fe) grazie alla produzione di siderofori, solubilizzazione del fosforo (P), fissazione dell'azoto (N<sub>2</sub>) (Hayat et al., 2010), la regolazione dei livelli di fitormoni, inclusa la produzione di auxine (Mishra et al., 2010), citochinine, gibberelline e la riduzione dell'etilene (Glick et al. 2007; Saleem et al. 2007; Frapton et al., 2012).

I meccanismi d'azione **indiretti**, invece, sono principalmente legati ai processi di biocontrollo, inibendo il funzionamento di uno o più organismi patogeni delle piante. Si riferiscono a meccanismi che quindi si verificano all'esterno della pianta (Vessey, 2003). Questi includono la competizione per nicchie nella rizosfera, la chelazione del ferro disponibile, l'interferenza con la produzione di tossine da parte di patogeni (Beneduzi et al. 2012), l'induzione di resistenza sistemica (van Loon, 2007; Lugtenberg and Kamilova 2009; Sanchez et al., 2023), la produzione di lipopolipeptidi, antibiotici, amminociclopropano-1-acido carbossilico deaminasi (ACC), enzimi idrolitici (chitinasi, cellulasi, proteasi, glucanasi), l'induzione di una resistenza sistemica nelle piante ISR, e la produzione di siderofori e di esopolisaccaridi (Gupta et al. 2015; Saxena et al., 2020; Dobrzyński et al., 2022; Sarmiento-López et al., 2022;).



**Figura 6.** Meccanismi diretti e indiretti dei PGPB ( Kulkova et al.,2023).

### 3.1.1 Meccanismi diretti dei PGPB

#### Auxina

I PGPB migliorano lo sviluppo delle piante principalmente producendo auxine, con l'acido indol-3-acetico (IAA) come il più rilevante, pertanto, circa l'80% dei microbi della rizosfera è in grado di sintetizzare auxina come metabolita secondario (Patten e Glick, 1996). L'auxina regola processi chiave come geotropia, fototropia, differenziazione dei tessuti vascolari, dominanza apicale, formazione delle radici, divisione cellulare e allungamento radicale e del fusto (Grobelak et al., 2015). Inoltre, l'IAA prodotto dai batteri può aumentare le riserve di auxina nelle piante, migliorando la lunghezza, l'area delle radici e aumentando la produzione di essudati radicali per una migliore assorbimento dei nutrienti (Ali et al., 2010). L'IAA si produce prevalentemente nell'apice del fusto e viene trasportato verso la radice, dove si accumula nel centro quiescente, ossia un gruppo di cellule indifferenziate con attività di divisione ridotta che mantiene le cellule staminali del meristema radicale in uno stato indifferenziato e contribuisce

alla riparazione dei tessuti in caso di danno, fondamentale quindi per lo sviluppo delle radici (Brunoud et al., 2012). Le proteine che trasportano l'auxina più conosciute sono quelle del gruppo PINs, ABCB e AUX1/LAX, che sono attivate da una cascata di segnalazione che coinvolge il recettore dell'auxina Transport Inhibitor Response 1, TIR1 (Petrášek e Friml, 2009). La concentrazione di auxina è fondamentale per determinare se essa stimola o inibisce la crescita delle piante. Diverse piante e cultivar hanno sensibilità differenti all'auxina, e il suo effetto varia a seconda delle concentrazioni di auxina endogena (Cheng et al., 2013). Se i livelli di auxina di una pianta sono sub-ottimali, l'IAA batterico può stimolare lo sviluppo delle radici; tuttavia, se i livelli sono ottimali o supraottimali, l'IAA può inibire la crescita (Spaepen et al., 2007, Glick 2012). L'IAA può essere sintetizzato nei batteri attraverso diverse vie biosintetiche, come la via dell'acido indol piruvico (IPyA), la via dell'indol acetamide (IAM) e la via dell'indol acetaldossima (IAOx) (Duca et al., 2014). La presenza di tre vie biosintetiche dell'IAA riflette l'importanza di quest'ultima nella vita e nel funzionamento dei batteri. Inoltre, è stato studiato come il gene *ipdC*, responsabile della produzione di IAA, sia regolato da un meccanismo di retroazione positiva, dove una maggiore quantità di IAA prodotto incrementa l'espressione del gene (Spaepen e Vanderleyden 2011).

### Etilene - ACC deaminasi

L'etilene è un ormone presente in tutte le piante superiori ed è coinvolto nella regolazione dello sviluppo cellulare e della crescita delle piante, oltre a svolgere un ruolo cruciale nella risposta agli stress biotici e abiotici (Abeles et al., 1992; Ibort et al., 2017; Orozco-Mosqueda et al., 2020). La sintesi dell'etilene nelle piante è influenzata da vari fattori come altri ormoni vegetali, temperatura, luce e stress (Gamalero e Glick, 2015). Un aumento eccessivo di etilene, mediante l'azione dell'enzima ACC ossidasi, causa un evento noto come "stress da etilene": si verifica in risposta a condizioni avverse, come la presenza di metalli, temperature estreme, patogeni o danni fisici, e può danneggiare lo sviluppo di radici e germogli (Barnawal et al., 2012; Ali et

al., 2014). I PGPB, che producono ACC deaminasi, possono ridurre i livelli di etilene da stress convertendo l'ACC, il precursore dell'etilene, in  $\alpha$ -chetobutirrato e ammoniaca, alleviando così le piante dai danni indotti dallo stress e ristabilendo la normale crescita (Glick, 2012, 2014). Durante lo stress, la sintesi dell'etilene avviene in due fasi: il primo piccolo picco consuma l'ACC esistente e attiva la produzione di proteine di difesa, mentre il secondo picco, più ampio, causa senescenza, clorosi e caduta delle foglie. Ridurre la concentrazione dell'etilene della seconda fase può mitigare i danni dovuti allo stress (Yim et al., 2013).

### Citochinine

Le citochinine sono ampiamente distribuite in alghe, batteri e piante superiori. Nelle piante, vengono principalmente sintetizzate nelle radici e trasportate tramite lo xilema ai germogli, dove regolano la differenziazione cellulare nei tessuti meristematici (De Rybel et al., 2016). La prima citochinina scoperta è stata la kinetina, isolata in lievito e non dalle piante (Miller et al., 1955). La zeatina, invece, è la forma più comune nelle piante ed è stata isolata per la prima volta dal mais (*Zea mays*) (Schäfer et al., 2015).

Le citochinine, in base alla loro struttura, possono essere di tipo adenina (come la kinetina e la zeatina) o di tipo fenilurea (come la difenilurea e il thidiazuron), regolano numerosi processi fisiologici, tra cui la dominanza apicale, la divisione cellulare favorendo lo sviluppo dei tessuti, la germinazione dei semi, l'allungamento delle radici, la formazione di peli radicali, lo sviluppo di fiori e frutti. Sono inoltre coinvolte nella crescita del fusto, nell'espansione delle foglie, nella differenziazione dello xilema e dei cloroplasti e nelle interazioni pianta-patogeno. Ritardano inoltre la senescenza fogliare accumulando la clorofilla (Sakakibara, 2006). Le citochinine antagonizzano l'azione dell'auxina nello sviluppo delle radici primarie, inibendo la formazione delle radici laterali, come dimostrano alcuni studi su *Arabidopsis* (Chang et al., 2013; Schaller et al., 2015). La presenza di geni legati alle citochinine è evidente in diversi PGPB, e l'inoculazione di batteri come, ad esempio, *Bacillus subtilis* può aumentare il

contenuto di citochinine promuovendo la crescita delle piante, come è stato dimostrato in studi su *Lactuca sativa* (Arkhipova et al., 2005).

### Gibberelline

Le gibberelline sono un ampio gruppo di acidi carbossilici diterpenoidi tetraciclici con scheletri di carbonio C20 o C19. Ne sono state identificate circa 136, denominate da GA1 a GA136 (Dodd et al., 2010; Hedden and Thomas, 2012). Tuttavia, solo quattro di esse sono state identificate nei batteri: GA1, GA3, GA4 e GA20, di cui GA1 e GA4 risultano le più attive (Gupta et al., 2016; Nelson e Steber 2016). Le gibberelline sono note per stimolare la crescita e attivare processi chiave come la germinazione dei semi, l'allungamento del fusto, la fioritura e lo sviluppo dei frutti, oltre a migliorare il tasso di fotosintesi e il contenuto di clorofilla (You et al., 2012; Khan et al., 2015; Zaidi et al., 2015). Sono note però anche per inibire la crescita delle radici attraverso il sistema di segnalazione delle gibberelline e il repressore DELLA, che attiva i geni che stimolano le gibberelline (Minguet et al. 2014; Wang et al. 2015; Nelson e Steber 2016; Martínez et al. 2016).

La produzione di gibberelline da parte di batteri promotori della crescita delle piante (PGPB) è stata osservata in generi come *Achromobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Rhizobium*, *Herbaspirillum* e *Gluconobacter* (Deka et al. 2015).

### Fissazione azoto

L'azoto è essenziale per la crescita delle piante, ma l'azoto atmosferico (N<sub>2</sub>) non è utilizzabile direttamente dalle piante, di conseguenza, deve essere convertito in ammoniaca attraverso processi che richiedono molta energia, che può provenire da combustibili fossili o dalla fissazione biologica dell'azoto, che utilizza ATP (Baas et al., 2014; Zhang et al., 2015). I batteri fissatori di azoto, come *Rhizobium*, *Sinorhizobium*, *Azorhizobium*, *Allorhizobium*, *Mesorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Frankia*, *Azoarcus*, *Achromobacter*, *Burkholderia* e

*Herbaspirillum* (Pérez-Montaño et al., 2014; Turan et al., 2016), stabiliscono simbiosi con piante, principalmente della famiglia delle Leguminose, formando noduli radicali in cui è presente l'enzima nitrogenasi che è in grado di fissare l'azoto atmosferico producendo come prodotto finale ammoniaca (Gage, 2004; Tac et al., 2020; Yang et al., 2022).

Un problema associato all'attività dell'enzima nitrogenasi è la riduzione di  $H^+$  a  $H_2$  (gas idrogeno), che rappresenta uno spreco di ATP e riduce l'efficienza complessiva del processo di fissazione dell'azoto di circa il 30%. Tuttavia, alcune ceppi batterici possiedono un enzima chiamato idrogenasi che può recuperare l' $H_2$  perso dall'atmosfera e convertirlo nuovamente in  $H^+$  per la produzione di ATP, migliorando così l'efficienza della fissazione dell'azoto (Adams et al., 1981; Berger et al., 2021).

#### Solubilizzazione del fosfato

I batteri solubilizzatori di fosforo (PSB) migliorano l'apporto di fosforo alle piante trasformando fosfati organici e inorganici insolubili in forme assimilabili attraverso dei meccanismi di solubilizzazione che comprendono l'uso di ioni idrossile, acidi organici, protoni, siderofori e  $CO_2$  (Rodríguez e Fraga, 1999). I principali generi di questi batteri includono *Bacillus*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Azotobacter* e *Azospirillum* (Banerjee et al. 2005; Saharan e Nehra 2011). Gli acidi organici prodotti, come l'acido gluconico, abbassano il pH e rilasciano i fosfati (Khosro, 2012). La maggior parte del fosforo organico nel suolo, presente come fitato, non è facilmente disponibile per le piante poiché nelle radici vegetali l'attività dell'enzima fitasi è ridotta. Al contrario, molti PGPB sono in grado di solubilizzare il fitato e altri composti organici del fosforo (Rodríguez e Fraga 1999; Peix et al. 2001; Sharma et al. 2017).

#### Assorbimento del ferro

I siderofori sono piccole molecole peptidiche che legano gli ioni ferro e servono come trasportatori di questo elemento (Goswami et al., 2016). I batteri che producono siderofori

hanno un'alta affinità per il ferro, lo legano e lo rendono disponibile per la pianta o per il batterio stesso; di conseguenza, possono inibire la proliferazione dei patogeni riducendo la quantità di ferro disponibile per questi ultimi (Sandy e Butler, 2009; Shen et al., 2013). Alcuni studi hanno dimostrato l'efficacia dei siderofori, come quelli prodotti da *Chryseobacterium* spp. C138 che migliora l'approvvigionamento di ferro nelle piante di pomodoro (Radzki et al., 2013), e ceppi di *Pseudomonas* che hanno incrementato germinazione e crescita delle piante (Sharma e Johri, 2003).

### 3.1.2 Meccanismi indiretti dei PGPB

#### Antibiotici

Il principale meccanismo attraverso il quale i batteri promotori della crescita delle piante contrastano gli effetti dannosi dei fitopatogeni è la sintesi di antibiotici (Haas e Keel 2003; Couillerot et al., 2009; Raaijmakers e Mazzola, 2012). Tuttavia, un antibiotico efficace contro un certo patogeno potrebbe non essere altrettanto efficace contro un altro patogeno presente sulla stessa pianta. L'efficacia dei PGPB produttori di antibiotici può variare in base alle condizioni ambientali e al metodo di applicazione (Glick, 2015).

Molti antibiotici derivano da batteri dei generi *Bacillus* e *Pseudomonas*, i quali producono metaboliti con proprietà antifungine, antibatteriche, antihelmintiche, antivirali, antimicrobiche, fitotossiche, antiossidanti, citotossiche e antitumorali (Chang et al., 2007; Heimpel e Mills, 2017).

#### Enzimi che degradano la parete cellulare

Le piante combattono le infezioni fungine producendo enzimi che degradano la parete cellulare dei funghi, come chitinasiche e  $\beta$ -1,3-glucanasiche. Anche alcuni PGPB sono in grado di produrre questi enzimi, migliorando l'efficacia del biocontrollo (Kim et al., 2015).

### Competizione

I PGPB possono anche competere con i fitopatogeni per risorse come nutrienti o siti di legame sulle radici delle piante. Questa competizione può limitare l'adesione e la proliferazione dei patogeni (Barahona et al., 2011). Studi come quello di Porcel et al. (2014) evidenzia la competitività di *Bacillus megaterium* nel miglioramento della crescita del pomodoro. Tuttavia, ci sono poche dimostrazioni chiare dell'efficacia di questo meccanismo da solo. Infatti, spesso, la competitività dei PGPB è associata ad altri meccanismi di biocontrollo (Innerebner et al., 2011).

### Resistenza indotta

La resistenza sistemica indotta (ISR) è un meccanismo di difesa delle piante attivato da batteri non patogeni, come alcuni PGPB, che preparano le piante a rispondere meglio ai futuri attacchi patogeni. Questa resistenza non è specifica per patogeni ma migliora la risposta generale della pianta (Van Loon et al., 1998). Viceversa, la resistenza sistemica acquisita (SAR), spesso attivata dall'acido salicilico (SA), è una risposta più specifica ai patogeni (Chen et al., 1999), ma è meno comune nei PGPB rispetto all'ISR (Abo-Elyousr et al., 2009).

### Acido cianidrico

Alcuni PGPB con spiccata azione di biocontrollo sono in grado di sintetizzare acido cianidrico (HCN). Esso, sebbene da solo non sia particolarmente efficace contro i fitopatogeni fungini, agisce in sinergia con antibiotici o enzimi degradanti la parete cellulare prodotti dagli stessi batteri, migliorando l'efficacia dei trattamenti antifungini e impedendo lo sviluppo di resistenza dei funghi all'antimicotico (Ramette et al., 2006). L'HCN inibisce la citocromo c ossidasi e altri metalloenzimi (Nandi et al., 2017). Generi batterici come *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Alcaligenes* e *Aeromonas* sono produttori di HCN. Quest'ultimo è coinvolto nella soppressione di malattie causate da *Meloidogyne javanica* (un nematode galligeno responsabile di patologie

anche su pomodoro) e nel controllo di altre tipologie di parassiti agricoli come, ad esempio, *Odontotermes obesus* (Siddiqui et al., 2006; Kumar et al., 2015).

### Spegnimento del quorum

Il "quorum sensing" è un meccanismo utilizzato dai batteri per rilevare la densità cellulare e attivare la regolazione genica coordinata, spesso aumentando la virulenza (Cornforth et al., 2014). I batteri producono autoinduttori, piccole molecole segnale che, raggiunta una certa concentrazione, attivano la trasduzione del segnale e modificano l'espressione genica dell'intera popolazione batterica (Huang et al., 2016). Il "quorum quenching" mira a interrompere questo processo, impedendo che i patogeni diventino più virulenti. Un esempio per attivare questo meccanismo è l'uso di PGPB che producono lattonasi, un enzima che degrada gli autoinduttori dei patogeni, riducendone così la capacità di danneggiare le piante (Glick, 2015).

### Batteriofagi

I batteriofagi sono virus specifici che possono lisare i fitopatogeni batterici (Frampton et al., 2012). Per utilizzare questa strategia, è necessario identificare il fitopatogeno batterico fino al livello del ceppo, successivamente si isolano i batteriofagi specifici in grado di attaccare esclusivamente il fitopatogeno target. Un mix di due o tre ceppi di batteriofagi viene spruzzato sulle piante infette per ridurre il rischio di mutanti resistenti (Glick, 2015). Poiché i batteriofagi sono sensibili alla luce UV, vengono applicati di sera, ma possono necessitare di trattamenti frequenti (Buttimer et al., 2017). Il trattamento con questi batteriofagi, o terapia fagica, è promettente per combattere le malattie delle piante; un esempio sono gli studi contro il patogeno *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* che causa la "macchia batterica" su piante di pomodoro e peperoni (Yu et al., 2016; Álvarez e Biosca 2017; Peitl et al., 2017).

### 3.2 Funghi micorrizici arbuscolari (AMF)

Il termine "micorrizza" deriva dalle parole greche "fungo" e "radice". Infatti, si definisce tale la simbiosi tra un fungo (ascomicete, basidiomicete o glomeromicete, a seconda del tipo di simbiosi) e l'apparato radicale della maggior parte delle piante terrestri. Le micorrize, in generale, possono essere distinte in due grosse categorie: le ectomicorrize che sviluppano una rete ifale all'esterno della radice della pianta, chiamata reticolo di Hartig e le endomicorrize in cui invece le ife penetrano all'interno del parenchima corticale radicale andando a formare delle strutture particolari, a seconda del tipo di endomicorrizza in cui ci troviamo (Shi et al., 2018).

Tramite lo sviluppo della rete extraradicale di ife nel suolo, o intraradicale nella radice, questi funghi micorrizici collegano intere comunità vegetali e facilitano il trasferimento di nutrienti come fosforo e azoto dal fungo alla pianta (Bonfante and Genre, 2010; Giovannini et al., 2020; Corona Ramirez et al., 2023; Singh et al., 2024). Sono, infatti, differenti dalle altre interazioni pianta-fungo in quanto le ife fungine assorbono nutrienti minerali e li cedono alla pianta (Grez et al., 2018), che per contro cede fotosintati al fungo.

In particolare, i funghi micorrizici arbuscolari appartengono al phylum *Glomeromycota*, (Naranjo-Ortiz e Gabaldón, 2019) e sono simbionti obbligati che instaurano associazioni endomicorriziche con le radici delle piante. andando a formare strutture detti arbuscoli, sito attivo di scambio di sostanze tra pianta e fungo (Harrison, 2005; Spatafora et al., 2016). Tra le radici della pianta e il fungo avviene quindi una simbiosi di tipo mutualistico, con un trasferimento bidirezionale di sostanze. Da un lato gli AMF migliorano lo stato nutrizionale delle piante ospiti, aumentando l'assorbimento di acqua e nutrienti (in particolare P e N), promuovendo la crescita, la resistenza alle malattie, competizione tra microrganismi simbiotici e patogeni. In cambio i funghi ricevono i fotosintati come fonte di carbonio (Smith et al., 2003; Smith e Smith, 2012; Keymer et al., 2017), grazie ai quali riescono a concludere il loro ciclo vitale (Jiang et al., 2017).

Questa associazione risulta stabile nel tempo ed è estremamente efficace, migliorando crescita, salute, resa e idoneità complessiva delle colture (Raaijmakers et al., 2009; Hao et al., 2021). Tuttavia, diversi fattori come temperature troppo alte o troppo basse, concentrazioni elevate di azoto e/o fosforo nel suolo o anche fattori dipendenti dal genotipo della pianta e del fungo simbionte, possono inibire questa simbiosi (Hazard e Jhonson, 2018).

Il fosforo (P) ha un ruolo importantissimo nella crescita e nella riproduzione delle piante, inclusa la formazione di semi, fiori ma soprattutto frutti (Sainju et al., 2003). In particolare, l'assorbimento di P è facilitato sia dalla presenza di trasportatori presenti sulla superficie ifale del fungo, sia da trasportatori presenti sulla radice della pianta. Una volta entrato nella cellula fungina il fosforo viene trasferito dal citoplasma al vacuolo, dove viene immagazzinato e convertito in polifosfato, il quale può essere trasferito dal fungo e utilizzato dalla pianta (Ezawa et al. 2003; Bonfante and Genre, 2010; Kleinert et al., 2018). In alcune condizioni, come detto in precedenza, lo scambio non avviene e la micorrizzazione viene inibita, per cui la pianta non godrà più dei benefici della simbiosi e uno dei primi effetti visibili sarà il diminuito "effetto crescita" (Smith et al., 2011; Agren et al., 2019). Inoltre, i funghi micorrizici arbuscolari rilasciano anche acido fenico e acidi organici a basso peso molecolare che si legano agli ioni metallici del suolo, come Al, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn e Zn, consentendo trasferimento di questi ioni dalle ife fungine alle radici delle piante (Kleinert et al., 2018). È noto che composti volatili (come 1-octen-3-olo, acido acetico, metil isobutil chetone e acido indol-3-acetico) rilasciati dal fungo agiscono da segnale per lo sviluppo delle radici laterali (Ditengou et al., 2015).

La simbiosi con AMF può aumentare la tolleranza delle piante a diversi stress biotici e abiotici (es. salinità, siccità, variazioni di temperatura e tossicità ai metalli pesanti), migliorando l'assorbimento di nutrienti e acqua, aumentando l'attività fotosintetica e controllando le specie reattive dell'ossigeno tramite una maggiore attività degli enzimi antiossidanti (Smith 2008; Miransari et al., 2010; Seguel et al., 2017; Ruiz- Lozano et al., 2018). Nonostante la simbiosi avvenga a livello radicale, i suoi effetti sono rinvenibili anche nella porzione epigea della pianta.

È ormai assodato che tale associazione sia in grado di andare a modulare il metabolismo secondario della pianta, migliorando la produzione e la qualità dei frutti, influenzandone l'aroma e incrementando il contenuto di zuccheri, vitamine e altre sostanze antiossidanti (Zuluaga et al., 2021; Felföldi et al., 2022).

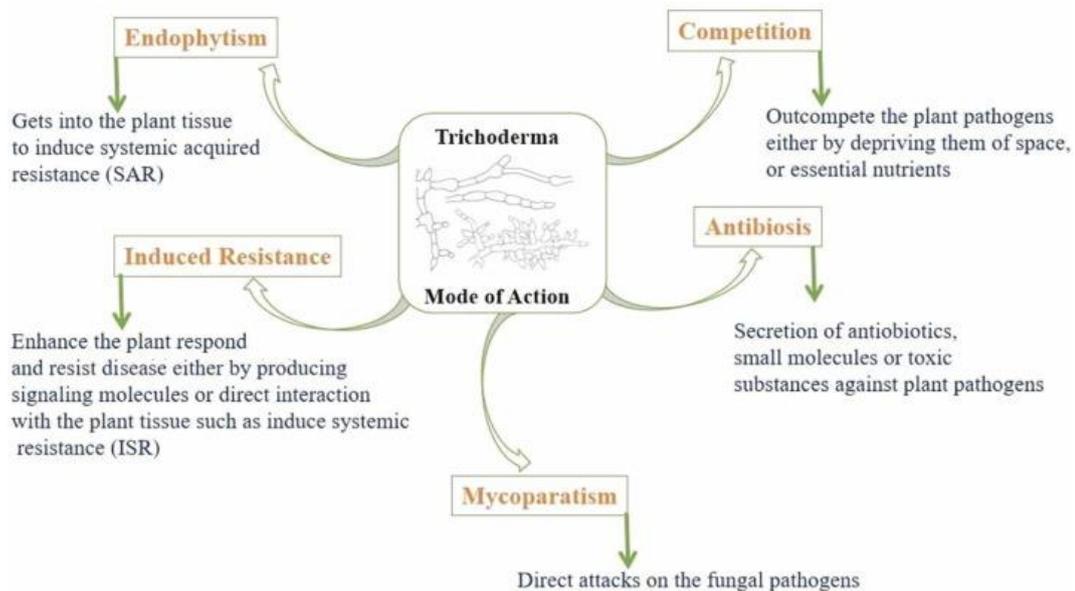
Inoltre, questi funghi, così come i PGPB, supportano i meccanismi di resistenza delle piante, contro patogeni e parassiti (Hempel et al., 2009) attraverso quella che viene conosciuta come “resistenza indotta da micorrize” (MIR), che si basa sulla resistenza sistemica indotta (ISR), una forma di difesa che induce la sensibilizzazione del sistema immunitario delle piante (Jung et al., 2012; Miozzi et al., 2019), migliorando sia le difese dirette che indirette (Pozo et al., 2007).

### 3.3 Funghi filamentosi: Trichoderma

Altri microorganismi in grado di promuovere la crescita delle piante sono i funghi del genere *Trichoderma*, simbionti non micorrizici, estremamente capaci di adattarsi a condizioni ambientali diverse. Questa loro adattabilità fa sì che essi siano presenti in terreni dalla più svariate caratteristiche chimico-fisiche e biologiche. Si stima che un grammo di terreno contenga  $10-10^3$  CFU (unità formanti colonie) di funghi appartenenti al genere *Trichoderma* (Harman et al., 2004; Wojtkowiak- Gerbarowska, 2006; Contreras-Cornejo et al., 2024). Vi sono circa 438 isolati nel genere *Trichoderma*, raggruppate in 10 specie: *T. Brevicompactum*, *T. Deliquescens*, *T. Harzianum*, *T. Hypocreanum*, *T. Longibrachiatum*, *T. Polysporum*, *T. Psychrophilum*, *T. Semiorbis*, *T. Stromaticum* e *T. Viride* (Bustamante et al., 2021). Interagendo con i funghi del genere *Trichoderma*, le piante possono beneficiare di una nicchia favorevole per la crescita e lo sviluppo (TariqJaveed et al., 2021, Woo et al., 2022). La presenza di *Trichoderma* nel suolo non solo migliora la crescita delle piante e ne aumenta la resa (Pascale et al., 2016), ma ottimizza anche l'assorbimento dei nutrienti minerali come azoto, fosforo e potassio (Colla et al., 2015), conferisce un maggiore vigore ai frutti e incrementa la percentuale

di germinazione dei semi (Khomari et al., 2018). Inoltre, questi funghi aumentano il livello di fotosintesi, la sintesi degli amminoacidi, il tasso di traspirazione e il contenuto d'acqua nei tessuti vegetali durante periodi di siccità (Brotman et al., 2012; Carillo et al., 2020; Sesan et al., 2020). I funghi del genere *Trichoderma* sono capaci di colonizzare le radici sia di piante monocotiledoni (Shoresh et al., 2008), sia dicotiledoni (Nuangmek et al., 2021), e si dimostrano efficaci anche in terreni acidi, alcalini o contaminati da metalli pesanti (Zhang et al., 2020).

Questi funghi hanno diversi effetti biologici a livello dell'interazione pianta-suolo (come mostrato in Figura 7), tra cui competere efficacemente con i patogeni per le nicchie ecologiche e i nutrienti, limitando così la crescita dei patogeni stessi (Gomes et al., 2015). Sono infatti ben noti come agenti di biocontrollo contro vari patogeni vegetali come virus, batteri, funghi, nematodi, protozoi, insetti, piante o patogeni animali (Samuels, 1996; Woo et al., 2006; Contreras-Cornejo et al., 2021). I funghi del genere *Trichoderma* sono in grado di secernere antibiotici e siderofori (Latorre et al., 2001) oltre a una varietà di composti sia volatili che non (come n-alcani, cicloesano, ciclopentano, esteri, alcoli, composti contenenti zolfo, pirano e derivati del benzene). Possono praticare il micoparassitismo, attaccando direttamente i patogeni fungini. Interagendo con le piante anche *Trichoderma* può innescare la resistenza sistemica indotta (ISR) contro patogeni o malattie, inibendo l'azione infettiva del parassita producendo segnali chimici come l'acido salicilico (SA) o l'acido jasmonico (JA) per migliorare il meccanismo di difesa della pianta (Herman et al., 2001). Gli endofiti colonizzano i tessuti interni delle piante ospiti senza causar loro danni, questo fenomeno ricorda la resistenza indotta, ma in questo caso le piante sviluppano una maggiore resistenza contro malattie legate a stress abiotici come siccità, tossine o radiazioni (Gazis e Chaverri, 2010; Chaverri e Gazis, 2011). I funghi del genere *Trichoderma* possono comportarsi sia come commensali sia come veri e propri simbiotici; stimolano i meccanismi di difesa delle piante ospiti, promuovono la loro crescita e il tasso di fotosintesi e migliorano la solubilizzazione e l'assorbimento dei nutrienti dal suolo (Ikram et al., 2019; Kiarie et al., 2020).



**Figura 7.** Modalità d'azione di funghi del genere *Trichoderma* come agente biologico (Olumayowa et al., 2022).

#### 4. Effetti dell'inoculazione di microrganismi benefici del suolo sull'ambiente

I microrganismi benefici del suolo svolgono quindi un ruolo cruciale nella salute e nella sostenibilità dell'ambiente. I loro effetti sull'ambiente sono molteplici e generalmente positivi:

- Nutrizione delle piante: questi microrganismi aiutano a decomporre la materia organica nel suolo, rendendo i nutrienti disponibili per le piante che li assorbono a livello radicale e contribuisce al ciclo dei nutrienti, fondamentale per lo sviluppo della pianta stessa (Maji et al., 2016; Suman et al., 2015).
- Struttura del suolo: i funghi micorrizici, ad esempio, contribuiscono a migliorare la struttura, la fertilità e il microambiente del suolo (Dick, 1992; Yang et al., 2018)
- Biocontrollo: alcuni microrganismi benefici possono aiutare a controllare le popolazioni di patogeni nel suolo, riducendo la necessità di pesticidi chimici. Infatti, alcuni batteri e funghi

come *Trichoderma* ad esempio antagonisti possono competere con patogeni o produrre sostanze che li inibiscono (Sessitsch, 2010; Wang et al., 2010; Dukare A.S. et al., 2011).

- Biodiversità: i microrganismi benefici del suolo contribuiscono alla biodiversità migliorando la nutrizione e la salute delle piante, favorendo la crescita di una varietà di specie vegetali. Essi decompongono la materia organica, arricchendo il suolo di nutrienti e migliorandone la struttura, il che supporta una vasta gamma di organismi (Pozo et al., 2021). Inoltre, essendo utilizzati come agenti biostimolatori per la crescita della pianta, vengono meno l'uso di input chimici che porterebbero solo ad inquinamento ambientale e perdita della biodiversità (Bartucca et al., 2022).

- Biorisanamento: i microrganismi che promuovono la crescita delle piante possiedono anche un'ampia gamma di effetti positivi per aiutare le piante a ripulire gli inquinanti del suolo stimolando la crescita delle piante e aumentando la biodisponibilità e l'assorbibilità dei contaminanti per migliorare l'efficacia della fitodepurazione (Wang G. et al., 2022).

- Resilienza ambientale: un suolo ricco di microrganismi benefici è più resistente agli stress ambientali, migliorano la produttività e la resilienza delle colture, offrendo la possibilità di migliorare la sostenibilità agricola (Arif et al., 2020 ; Hohmann et al., 2020).

#### *4.1. Effetti dell'inoculazione di PGPB in piante di pomodoro*

I PGPB, solitamente appartenenti ai generi *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Kocuria* e *Azospirillum* (Ruzzi e Aroca, 2015) come già accennato in precedenza, giocano un ruolo importante nel miglioramento di alcuni processi morfo-fisiologici, cellulari e molecolari della pianta di pomodoro, aumentandone la fitness, la produttività, la resa e la qualità. Questi processi includono la produzione e la regolazione di fitormoni, metaboliti secondari e composti organici volatili (VOCs); la disponibilità di nutrienti per le piante tramite fissazione dell'azoto (N), solubilizzazione del fosforo (P) e apporto di ferro (Fe) attraverso la produzione di acidi organici, fosfatasi acide e siderofori; il miglioramento dell'efficienza fotosintetica; portano ad un

aumento di un aumento di licopene e beta carotene, ad una maggiore percentuale di allegagione, diminuendo così la produzione di fiori sterili; la modulazione della crescita e dell'architettura delle radici; e infine l'incremento della resistenza agli stress abiotici e biotici, come siccità e patogeni (De Andrade et al., 2023).

#### 4.2. Effetti dell'inoculazione di AMF in piante di pomodoro

L'inoculazione con AMF ha mostrato risultati promettenti sulla resa del pomodoro, con effetti significativi derivanti dall'uso di fertilizzanti a base di N, P, K (azoto, fosforo, potassio) o vari livelli di fosforo (P). L'inoculazione di AMF ha avuto quindi impatti positivi sulla fioritura con effetti induttori sulla resa complessiva dei frutti (Conversa et al., 2013). Inoltre, studi hanno dimostrato che nelle piante di pomodoro inoculate con una combinazione di AMF (*Rhizophagus clarum* e *R. intraradicessi*) aveva un significativo miglioramento della crescita e un aumento delle concentrazioni di vitamina C, zuccheri solubili, licopene beta carotene nei frutti e un aumento della percentuale di allegagione (Kong et al., 2020). Rispetto ai controlli, il peso dei singoli frutti e la resa per pianta sono aumentati in modo significativo nelle piante trattate con inoculo di *Rhizophagus clarum* e *R. intraradices* (Kong et al., 2020).

#### 4.3 Effetti dell'inoculazione di *Trichoderma* in piante di pomodoro

Vi sono diversi studi in letteratura che dimostrano una correlazione positiva tra inoculazione delle piante con trichoderma e qualità del frutto di pomodoro. Ad esempio, Ruiz-Cisneros (2018) ha evidenziato che *T. longibrachiatum* ha promosso significativamente la crescita e la resa del pomodoro, ottenendo frutti con un'acidità titolabile più elevata e un contenuto di solidi solubili totali (TSS) inferiore. Mentre un altro studio ha dimostrato come la resa totale, i contenuti di licopene e alcuni amminoacidi venissero aumentati nei frutti del pomodoro datterino dopo l'applicazione di *T. harzianum* (Carillo et al., 2020). Per quanto riguarda invece l'assorbimento dei nutrienti della pianta grazie alla presenza di *Trichoderma*, vi sono degli studi

in cui l'assorbimento viene aumentato, come ad esempio nell'esperimento sul pomodoro condotto da Khan et al. (2017), e altri studi invece che dimostrano una diminuzione dell'assorbimento di nutrienti, come quelli condotti sul grano di de Santiago et al. (2011). In un altro esperimento è stato osservato che l'inoculazione di *T. crassum* può far sviluppare la comparsa di macchie di colore grigio scuro irregolari sulla punta delle foglie delle piante di pomodoro. Con il progredire della malattia sono state poi osservate delle lesioni necrotiche intorno alle macchie preformate e di conseguenza le foglie infette apparivano arcciate e appassite (Zhao et al., 2022).

##### *5. Utilizzo di biostimolanti in agricoltura*

Le tecniche agricole tradizionali fanno uso di fertilizzanti chimici, pesticidi, fungicidi ed erbicidi per proteggere le colture dagli agenti patogeni e assicurare una resa ottimale. Tuttavia, i composti chimici presenti in questi prodotti sono dannosi per l'ambiente, contribuendo all'inquinamento del suolo, dell'aria e dell'acqua (Al-Ani, 2018). Questo inquinamento è responsabile dell'estinzione di diverse specie animali e vegetali (Bruni et al., 2013; Weltje et al., 2013), divenendo una minaccia per la biodiversità delle comunità batteriche (Zilli et al., 2009) e fungine del suolo (Streletskii et al., 2022). I prodotti chimici utilizzati in agricoltura, infatti, alterano negativamente le proprietà fisiche del suolo (come consistenza, permeabilità e porosità), impattano negativamente sul ciclo degli elementi essenziali come fosforo e azoto, e riducono la complessità del microbiota del suolo (Santoyo et al., 2021). Pertanto, per salvaguardare l'ambiente, l'Unione Europea ha sviluppato una serie di direttive per la protezione dei suoli (Ambiente UE, 2021).

Con l'aumento della popolazione mondiale e la conseguente crescita della domanda di cibo sia in quantità che in qualità, l'uso di inoculi come biostimolanti, agenti di biocontrollo e biofertilizzanti per incrementare la resa e proteggere le colture, rappresenta una soluzione

promettente per il futuro dell'agricoltura (Maitra et al., 2022). Conseguentemente, l'uso di biostimolanti vegetali può rappresentare uno strumento ecologico e innovativo per un'agricoltura sostenibile, diminuendo la pressione ambientale dei sistemi colturali (Rouphael e Colla, 2020). Attualmente l'uso di biofertilizzanti a base di PGPB e AMF rientra nella strategia generale di modulazione del microbioma vegetale a favore della crescita delle piante ed è considerata una strategia valida in alternativa alla manipolazione genetica e alle tecniche agricole tradizionali (Ray et al., 2020).

I bioinoculi hanno un grande potenziale non solo per aumentare la produttività delle colture, ma anche per la bonifica dei terreni degradati (Romano et al., 2020) e ne fanno parte vari taxa di batteri, funghi e alghe (Cai et al., 2015).

Uno dei principali svantaggi dell'applicazione di bioinoculanti è che molti di questi, testati in condizioni di laboratorio o serra, non riescono a ottenere gli stessi risultati delle prove sul campo. Questo fallimento è spesso dovuto alla necessità dei microrganismi introdotti di competere per una nicchia con i microrganismi nativi (Pandey et al., 2019). Una maggiore biodiversità del microbioma del suolo nativo può influire negativamente sulla sopravvivenza dei microrganismi bioinoculati, indicando una correlazione negativa tra la diversità microbica del suolo e il tasso di sopravvivenza del ceppo introdotto (Van Elsas et al., 2012). Spesso, infatti l'introduzione di microrganismi mediante inoculazione diventa molto vantaggiosa in suoli poveri o perturbati. L'utilizzo di bioinoculi, in generale, migliora significativamente il tasso di germinazione (Saravanakumar K. et al., 2016), aumenta la crescita e l'allungamento del germoglio e della radice (Zahir et al., 2009), accelera la fioritura e aumenta il tasso di fotosintesi (Khan et al., 2011).

I meccanismi che stanno alla base della promozione della crescita delle piante impiegando sia batteri che funghi sono ad esempio, la degradazione dell'etilene tramite ACC deaminasi, la produzione di fitormoni e la solubilizzazione di vari composti del suolo per aumentare la biodisponibilità dei nutrienti e il meccanismo di maggiore importanza è la fissazione dell'azoto

atmosferico tramite nitrogenasi (nel caso dei batteri) (Soumare et al., 2020; Aasfar et al., 2021). Considerando il pomodoro, vari ceppi di PGPB come *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus spp.*, *Azotobacter*, *Serratia* e *Micromonospora* sono riconosciuti per il loro ruolo di biostimolanti oltre che nella gestione e nel controllo delle malattie (Pastor et al. 2012; Babu et al., 2015). Diversi studi hanno anche dimostrato che i PGPB, che favoriscono la crescita di una specifica specie vegetale, possono anche non essere altrettanto efficaci per altre specie di piante. Le interazioni tra piante e microrganismi possono essere classificate in tre categorie: neutre, negative o positive, in base ai loro effetti sulla pianta ospite (Shivanna et al., 1994).

Esperimenti condotti su pomodoro e cetriolo hanno mostrato come la stessa specie di microrganismo possa avere effetti diversi su colture differenti e di come varie combinazioni di microrganismi possano influenzare la qualità dei frutti e la produttività della stessa pianta (Bona et al., 2016). Per esempio, l'inoculazione del pomodoro con funghi micorrizici arbuscolari (AMF) come *Glomus mosseae* in combinazione con *Trichoderma* ha portato ad un aumento del numero di frutti commerciabili e a una maggiore concentrazione di nutrienti come fosforo, potassio, magnesio e vitamina C, insieme a un aumento del licopene e dei flavonoidi totali (Sirichaiwetchakul et al., 2011; Giovannetti et al. 2012; Nzanza et al., 2012). Allo stesso modo, nel cetriolo, studi sull'uso di *Glomus mosseae* e altre specie di AMF hanno mostrato incrementi di zuccheri solubili, amminoacidi e proteine nei frutti, migliorando significativamente la qualità del raccolto (Lu et al., 2006). Questi effetti variano però in base alla specie di microrganismo e alla combinazione usata: ad esempio, l'inoculazione con un mix di AMF (costituito da *Glomus mosseae*, *G. etunicatum*, *G. clarum*, e *G. caledonium*, ha portato a un miglioramento della concentrazione di fosforo e zinco nei frutti del cetriolo (Ortas, 2010).

## SCOPO DEL LAVORO

Lo scopo di questo lavoro, inquadrato nell'ambito di un progetto internazionale (PRIMA) ASTER (Agroecology-inspired Strategies and Tools to Enhance Resilience and ecosystem services in tomato crop) è stato quello di isolare e selezionare diversi microrganismi benefici del suolo (funghi e batteri) al fine di testarli in singolo o in combinazione su piante di una specifica varietà di pomodoro da industria, Heinz 1301, e valutarne gli effetti sui parametri di crescita della pianta (biomassa radicale e aerea), sia in termini di produttività e resa dei frutti. Oltre agli aspetti quantitativi del frutto, gli effetti dell'inoculazione sono stati indagati anche su quelli qualitativi .

## MATERIALI E METODI

La sperimentazione è stata condotta sia in condizioni semi-controllate (serra) sia in campo su piante di pomodoro *S. lycopersicum* var. Heinz 1301.

I microrganismi testati sono stati i seguenti:

- due inoculi micorrizici, uno (FM) costituito da una coltura pura di *Funneliformis mosseae* e l'altro (AMF MIX) da una miscela di diverse specie di AMF quali *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideoglobus claroideum*, *C. etunicatum*;
- tre diversi isolate di *Trichoderma* provenienti dalla collezione del CNR-IPSP [Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) di Portici e l'Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante (IPSP)] ossia *T. asperellum* (T1), *T. viride* (T2) e *T. polysporum* (T3);
- un mix di batteri PGPB (PGPB MIX) composto da *Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacterium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas* sp., *Pseudomonas brassicacerum*, *P. protegens*.

## **SERRA** – Condizioni semi-controllate

### *1. Preparazione degli inoculi di funghi micorrizici arbuscolari (AMF)*

L'inoculo AMF MIX è stato propagato in un substrato costituito da una miscela di zeolite, torba bionda, pomice e vermiculite (5:3:2,5:2 v/v/v/v) utilizzando piante di *Sorghum bicolor L.* e *Trifolium pratense L.*, mentre quello puro di *F. mosseae* (FM) è stato propagato in un substrato formato da sabbia di quarzo di granulometria 2/3 mm (2:1 v/v) utilizzando piante di *Sorghum bicolor L.* In entrambe i casi le piante sono state coltivate per quattro mesi e irrigate una volta a settimana con acqua corrente sterile. I semi utilizzati per entrambe le specie vegetali sono stati sterilizzati in candeggina 20% e fatti pregerminare a 25°C per 72 ore prima di essere seminati nei vasi.

Tutte le piante sono poi state lasciate a secco per quattro mesi per stimolare la sporulazione del fungo. Quindi una volta private della porzione epigea, l'apparato radicale è stato ridotto in piccoli pezzi ed è stato miscelato al substrato di crescita per poi essere utilizzato come inoculo per i successivi esperimenti.

Gli inoculi erano quindi costituiti da spore e pezzi di radice colonizzate dai funghi micorrizici in un substrato costituito dalle diverse componenti in base ai funghi utilizzati.

### *2. Preparazione degli inoculi di *Trichoderma ssp**

Le tre diverse specie di *Trichoderma* (T1, T2, T3), isolate e caratterizzate in collaborazione con il CNR di Portici e l'IPSP, sono state coltivate in piastre Petri su un terreno di coltura Potato Dextrose Agar (PDA) precedentemente sterilizzato in autoclave a 121°C per 20 min. Le piastre con il fungo sono state messe in incubatore a 28 °C al buio per una settimana. Dopo questo periodo sono state raccolte le conidiospore ed è stato preparato l'inoculo costituito da 10<sup>7</sup> spore/ml in magnesio solfato (0,1 M).

### 3. Preparazione dell'inoculo di PGPB

Come detto in precedenza, l'inoculo PGPB MIX era composto da diversi batteri, alcuni dei quali isolati da suoli aridi Algerini tra cui: *Bacillus subtilis* (ceppo ZS11), *Bacillus mojavensis* (ceppo SF1), *Bacillus muralis* (ceppo AA14), *Bacillus simplex* (ceppo AH24), *Microbacterium paludicola* (ceppo AEA23), *Microbacterium arborescens* (ceppo PV10) e *Pseudomonas brassicacearum* (ceppo SVB6R1).

Altri due batteri, ossia *Pseudomonas brassicacearum* (ceppo SVB6R) e *P. protegens* (ceppo Pf7) sono stati invece isolati da suoli del Nord Italia. Tutti sono stati caratterizzati per le diverse attività di promozione della crescita delle piante nei laboratori di Microbiologia del DiSIT in collaborazione con la Prof.ssa Gamalero e la Dr.ssa Novello. Per quanto riguarda la preparazione dell'inoculo, i batteri sono stati coltivati per 48 ore su Tryptic Soy Agar (TSA) e successivamente è stato preparato l'inoculo liquido (in magnesio solfato 0,1 M) contenente  $10^8$  CFU (Unità Formante Colonia)/ml. Per ciascun trattamento sono state utilizzate 10 piante. I diversi trattamenti dell'esperimento svolto in serra sono riportati nella tabella seguente:

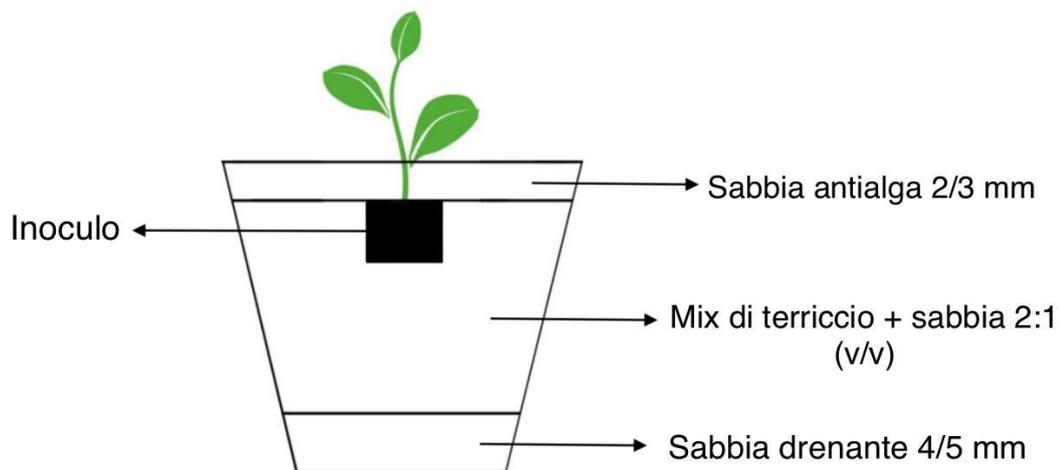
TRATTAMENTI	SIMBIONTI
FM	<i>Funnelliformis mosseae</i>
AMF MIX	<i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>R. aggregatus</i> , <i>Septoglomus viscosum</i> , <i>Claroideglomus cloroideum</i> , <i>C. etunicatum</i>
T1	<i>T. viride</i>
T2	<i>T. asperellum</i>
T3	<i>T. polysporum</i>
AMF MIX +T1	<i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>R. aggregatus</i> , <i>Septoglomus viscosum</i> , <i>Claroideglomus cloroideum</i> , <i>C. etunicatum</i> + <i>T. viride</i>
AMF MIX +T2	<i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>R. aggregatus</i> , <i>Septoglomus viscosum</i> , <i>Claroideglomus cloroideum</i> , <i>C. etunicatum</i> + <i>T. asperellum</i>
AMF MIX+ T3	<i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>R. aggregatus</i> , <i>Septoglomus viscosum</i> , <i>Claroideglomus cloroideum</i> , <i>C. etunicatum</i> + <i>T. polysporum</i>
FmT1	<i>F. mosseae</i> + <i>Trichoderma viride</i>
FmT2	<i>F. mosseae</i> + <i>Trichoderma asperellum</i>
FmT3	<i>F. mosseae</i> + <i>Trichoderma polysporum</i>
MIX TOT (FM + AMF MIX + T1 + T2 + T3 + PGPB MIX)	<i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>R. aggregatus</i> , <i>Septoglomus viscosum</i> , <i>Claroideglomus cloroideum</i> , <i>C. etunicatum</i> + <i>T. viride</i> , <i>T. asperellum</i> , <i>T. polysporum</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>B. mojavensis</i> , <i>B. muralis</i> , <i>Microbacterium paludicola</i> , <i>M. arborescens</i> , <i>Pseudomonas brassicacearum</i> , <i>P. protegens</i> , <i>Pseudomonas sp.</i>
CNT	Controllo (non inoculato)

**Tabella 3.** Illustrazione delle diverse combinazioni di microorganismi inoculati nelle piante di pomodoro.

#### 4. Disegno sperimentale / allestimento esperimento

Le piante di pomodoro utilizzate appartenevano alla varietà Heinz 1301 a crescita determinata. Esse sono state coltivate in una serra in condizioni semi controllate in un substrato misto costituito da terriccio e sabbie a diverse granulometrie in rapporto 2:1 (v/v). Il terriccio era composto da una miscela di due diverse tipologie: Radicom (VigorPlant) e K-Substrates Select (Klassmann-Deilmann) in rapporto 1:1 (v/v). Invece le sabbie di quarzo erano formate da una miscela di 2 sabbie con granulometria 2/3 mm e 4/5 mm in rapporto 1:1(v/v). Le plantule, acquistate già in alveolo sono state trapiantate in vasi della capacità di 3.5 l (Figura 8), trattate precedentemente con Tellus WP (Syngenta), ponendo alla base uno strato di sabbia di granulometria 4/5 mm come drenante e in superficie uno strato di sabbia 2/3 mm per evitare la formazione di alghe, come mostrato in Figura 8. I vasi e i sottovasi e tutto il materiale utilizzato per la messa a dimora delle piantine sono stati precedentemente sterilizzati in una soluzione di candeggina commerciale al 20% (NaClO). Le piante sono state inoculate o meno con diverse combinazioni di microrganismi benefici del suolo (vd. Tabella 3). Gli inoculi dei funghi micorrizici AMF MIX e FM sono stati posizionati vicino alle radici durante il trapianto (250 ml), mentre gli inoculi di *Trichoderma* e PGPB vicino al colletto in forma liquida (10 ml per ciascuna pianta). Alle piante di controllo sono stati somministrati 10 ml MgSO<sub>4</sub> 0,1M. Dopo 30 giorni è stato effettuato un re-inoculo di rinforzo di PGPB e *Trichoderma* (10 ml MgSO<sub>4</sub> 0,1M). Per ciascun trattamento sono state utilizzate dieci piante, sono stati effettuati due campionamenti, rispettivamente dopo 45 e 100 giorni dal trapianto (GDT). Durante la coltivazione le piante sono state irrigate 3 volte a settimana, 2 volte con acqua di rubinetto e 1 volta con soluzione nutritizia Long Ashton a 32 µM di fosfato (P). Una volta a settimana sono stati contati il numero di fiori e di frutti, nel momento in cui quest'ultimi risultavano maturi venivano raccolti e ne venivano registrati il peso con una bilancia tecnica, il diametro maggiore e minore facendo uso di un calibro. Una volta effettuate queste misure, i frutti sono stati congelati in azoto liquido e conservati a -80 °C per le successive analisi qualitative.

In entrambi i campionamenti, al momento dello svaso sono stati analizzati i seguenti parametri: colonizzazione fungina della radice, produzione di biomassa epigea e ipogea (pesi freschi e secchi) e analisi del contenuto di pigmenti fogliari. Prima di svasare le piante è stata misurata *in vivo* la fluorescenza delle clorofille, mediante un fluorimetro portatile Handy-PEA. Solo al secondo campionamento sono state effettuate le analisi qualitative e quantitative sui frutti di pomodoro.



**Figura 8.** Schema di riempimento dei vasi da 7,5 L per la propagazione dell'inoculo.

## 5. Parametri analizzati

### 5.1 Parametri morfometrici e ponderali della pianta

L'altezza del fusto e la lunghezza della radice di ogni pianta sono state misurate quindi sono stati determinati i pesi freschi e secchi dei diversi organi della pianta (foglie, fusti e radici). Per la misura del peso secco, i campioni sono stati messi in stufa a 60 °C ad essiccare per una settimana.

## 5.2 Valutazione del grado di colonizzazione fungina nella radice

Al momento dello svaso la parte epigea della pianta è stata separata dalla porzione radicale, in modo da poter pulire quest'ultima dal substrato. La radice è stata misurata nella sua lunghezza, dopo di che parte di essa è stata posta in etanolo al 75% per la successiva determinazione dell'indice di micorrizzazione. Tale indice è stato calcolato mediante il metodo descritto da Trouvelot et al. (1986). I campioni di radice, raccolti casualmente dall'apparato radicale evitando accuratamente gli apici, sono stati lavati con acqua deionizzata e successivamente asciugati. Le radici sono state poi inserite in provette contenenti una soluzione di potassa (KOH 10%) e chiarificate in un bagno d'acqua a 60°C per 25 minuti. Una volta completata la chiarificazione, le radici sono state nuovamente risciacquate con acqua deionizzata e asciugate con carta assorbente. Successivamente, sono state colorate con una soluzione di blu lattico (blu di metile all'1% in acido lattico). Il colorante in eccesso è stato rimosso attraverso una serie di lavaggi con acido lattico. Per ogni pianta sono stati preparati due vetrini, ciascuno contenente 30 frammenti di radice (di circa 1 cm l'uno), che sono stati poi esaminati al microscopio ottico.

Dopo aver classificato ciascun frammento di radice nella classe appropriata, è stata calcolata la percentuale di micorrizzazione (M%) utilizzando la formula:

$$M\% = (95n_5 + 70n_4 + 30n_3 + 5n_2 + n_1) / N$$

Dove “n<sub>5</sub>, n<sub>4</sub>...n<sub>1</sub>” rappresentano il numero dei frammenti inseriti nelle rispettive categorie, mentre N indica il numero totale dei frammenti analizzati. Per calcolare la frequenza di micorrizzazione (F%), è stata utilizzata la seguente formula:

$$F\% = 100 * (N - n_0) / N$$

Dove N è il numero totale dei frammenti analizzati e n0 rappresenta il numero di frammenti non micorizzati.

La percentuale di arbuscoli (A%) viene calcolata esclusivamente sui frammenti micorizzati utilizzando la seguente formula:

$$a\% = (100m_{\underline{\underline{A}}} + 50m_{\underline{A}} + 10mA) / 100$$

Dove  $m_{\underline{\underline{A}}}$ ,  $m_{\underline{A}}$ , mA sono determinati utilizzando la formula:

$$mA = (95n_{5A} + 70n_{4A} + 30n_{3A} + 5n_{2A} + n_{1A}) * F / [M * (N - n_0)]$$

in cui  $n_{5A} \dots n_{1A}$  indicano rispettivamente il numero dei frammenti appartenenti alla classe di micorizzazione e alla classe di arbuscolarizzazione.  $\underline{\underline{A}}$ ,  $\underline{A}$ , A rappresentano arbuscoli molto abbondanti, mediamente abbondanti e poco abbondanti. La percentuale di arbuscoli nell'intero apparato radicale (A%) viene calcolata come segue:

$$A\% = a * M / 100$$

Per calcolare la percentuale di vescicole presenti negli arbuscoli (%V), si utilizza la seguente formula:

$$v\% = (100m_{\underline{\underline{V}}} + 50m_{\underline{V}} + 10mV) / 100$$

Dove i valori di mV sono determinati con la formula:

$$mV = (95n_{5V} + 70n_{4V} + 30n_{3V} + 5n_{2V} + n_{1V}) * F / [M (N - n_0)]$$

In questa formula,  $n5V...n1V$  rappresentano il numero di frammenti corrispondenti alle diverse classi di micorrizzazione e vescicolarizzazione, mentre i valori  $\underline{V}$ ,  $\underline{V}$  e  $V$  indicano rispettivamente radici con vescicole molto abbondanti, mediamente abbondanti e poco abbondanti. La percentuale di vescicole presenti nel sistema radicale ( $V\%$ ) viene infine calcolata come:

$$V\% = v * M / 100$$

### 5.3 Analisi del contenuto di pigmenti fogliari (clorofille)

Dalle foglie di ciascuna pianta sono stati prelevati 0,02 grammi di tessuto fresco. Ad essi sono stati addizionati, in una provetta di vetro, 1,5 ml di N,N-dimetilformamide (DMF; VWR). Le provette sono state poste in frigo a 4 °C al buio per una settimana e l'estrazione totale dei pigmenti. A completo sbiancamento del tessuto fogliare, l'estratto è stato utilizzato per valutare spettrofotometricamente la concentrazione delle clorofille a e b e dei carotenoidi secondo il metodo di Porra et al. (2002), utilizzando le seguenti formule:

$$[\text{Chl a}] \mu\text{g/mL} = 12A_{663,8} - 3.11 A_{646,8}$$

$$[\text{Chl b}] \mu\text{g/mL} = 20.78 A_{646,8} - 4.88 A_{663,8}$$

$$[\text{Car}] \mu\text{g/mL} = (1000 A_{480} - 1.12 [\text{Chl a}] - 34.7 [\text{Chl b}] / 245)$$

### 5.4 Attività fotosintetica

Prima dello svaso, l'efficienza fotosintetica di ogni pianta è stata valutata direttamente *in vivo* utilizzando un fluorimetro portatile Handy PEA (Hansatech Instruments). Questo strumento consente di analizzare l'efficienza del fotosistema II (PSII) attraverso la misurazione della fluorescenza della clorofilla a, grazie all'applicazione di una luce saturante e continua su campioni di foglie precedentemente adattati al buio. Nello specifico, i dischi fogliari sono stati oscurati utilizzando apposite clips per circa 30 minuti, tempo necessario per raggiungere il massimo livello di ossidazione dell' accettore primario del PSII, cioè il plastochinone A, QA.

Dopo questo periodo di adattamento, un impulso di luce (LED) con intensità luminosa saturante ( $3000 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ) viene applicato per stimolare la fluorescenza. Lo strumento ha permesso di misurare vari parametri importanti per l'analisi della cinetica di emissione della fluorescenza indotta dalla clorofilla  $\alpha$  nel PSII, tra cui:

- $F_0$ , che rappresenta l'emissione iniziale di fluorescenza da parte delle molecole di clorofilla  $\alpha$  nel PSII quando  $Q_A$  è completamente ossidato.
- $F_m$ , che indica il livello massimo di fluorescenza ottenibile nelle stesse condizioni sperimentali e varia in base al grado di inibizione del PSII. Per ottenere un valore corretto di  $F_m$  è essenziale che l'intensità luminosa sia completamente saturante, così da ridurre del tutto  $Q_A$ .
- $F_v$ , che rappresenta la fluorescenza variabile, calcolata come differenza tra  $F_0$  e  $F_m$ .
- $F_v/F_m$ , il rapporto tra fluorescenza variabile ( $F_v$ ) e fluorescenza massima ( $F_m$ ), che esprime l'attività fotochimica del PSII ed è direttamente collegato all'efficienza fotosintetica netta. In condizioni normali di crescita delle piante, il rapporto  $F_v/F_m$  si mantiene tra 0,78 e 0,8.

### *5.5 Analisi relativa ai frutti di pomodoro*

#### *5.5.1 Pezzatura dei frutti: lunghezza, diametro maggiore e minore, peso, numero di frutti per trattamento*

Per ciascun frutto di pomodoro sono stati utilizzati un calibro e una bilancia tecnica per misurare rispettivamente la lunghezza, il diametro maggiore e minore del frutto e il peso di quest'ultimo. Inoltre, sono stati contati tutti i frutti prodotti per pianta e per trattamento. Questo procedimento è stato effettuato al fine di valutare la pezzatura dei pomodori e la produttività in termini di numero e peso.

### *5.5.2 Valutazione del pH e dell'acidità totale*

Tutti i frutti di ciascuna pianta sono stati congelati in azoto liquido e frullati fino all'ottenimento di un omogenato che è stato conservato a -80°C fino al momento delle analisi biochimiche da effettuare.

#### *- Analisi del pH*

Per ogni pianta, 5 g di omogenato sono stati pesati e miscelati con 45 ml di acqua deionizzata e degasata. Dopo un'accurata agitazione, il campione è stato sottoposto a centrifugazione a 11.000 rpm per 25 minuti a temperatura ambiente. Al termine della centrifugazione, il pH del surnatante è stato misurato mediante l'uso di un pHmetro.

#### *- Analisi dell'acidità totale*

L'acidità totale è stata valutata su 5 grammi di omogenato di pomodoro. Essi sono stati disciolti in 45 ml di acqua deionizzata e degasata, successivamente il campione è stato centrifugato a 10.000 rpm per 25 minuti a temperatura ambiente. Il pH è stato portato ad un valore di 8,1 con idrossido di sodio (NaOH) 0,1 N, aggiungendolo goccia a goccia. L'acidità totale viene riferita all'acido organico maggiormente presente, in questo caso l'acido citrico.

L'acidità totale è stata calcolata la seguente formula:

$$\text{Acidità totale} = (\text{ml NaOH} * 0,1019 * 64,04) / \text{g di campione} * 100$$

### *5.6 Analisi statistica dei dati*

Per ogni parametro analizzato, sono stati calcolati la media e l'errore standard associato. I dati ottenuti sono stati esaminati utilizzando un'ANOVA a una via, considerando significative le differenze tra i parametri per  $p \leq 0,05$ , altamente significative per  $p \leq 0,001$  e non significative

per valori di p superiori a 0,05. Nei casi in cui l'ANOVA ha indicato risultati statisticamente significativi, è stato applicato successivamente un test di Tukey HSD in R.

## CAMPO SPERIMENTALE

### 1. Disegno sperimentale (esperimento in campo) e valutazione della produttività

In entrambi gli esperimenti di campo e serra è stata utilizzata la stessa varietà di pomodoro (Heinz 1301).

Il campo sperimentale ASTER, sito in Bosco Marengo (AL Italy), era composto da quattro file costituite da 60 piante per ciascun trattamento per un totale di quattro trattamenti per fila. Al centro del campo era stata seminata una striscia di veccia (*Vicia sativa* L.) per aumentare la presenza degli insetti impollinatori (vd Figura 9).

- Per questo esperimento sono stati testati 4 diversi inoculi batterici (MIX 1, MIX 2, MIX 3 e MIX 4) costituiti ciascuno da un mix di ceppi diversi di PGPB, come dettagliato di seguito: MIX 1: *Bacillus simplex* (AH24), *B. mojavensis* (SF1), *Pseudomonas sp.* (SAT5), *P. brassicacearum* (SVB6R1)
- MIX 2: *P. protegens* (PF7), *Microbacterium arborescens* (PU10), *P. brassicacearum* (SVB6R1), *B. muralis* (AA14)
- MIX 3: *B. subtilis* (ZS11), *M. paludicola* (AEA23), *P. brassicacearum* (SVB6R1)
- MIX 4: *Bacillus simplex* (AH24), *B. mojavensis* (SF1), *Pseudomonas sp.* (SAT5), *P. brassicacearum* (SVB6R1), *P. protegens* (PF7), *Microbacterium arborescens* (PU10), *B. muralis* (AA14), *B. subtilis* (ZS11), *M. paludicola* (AEA23).

Tutti i batteri utilizzati per la composizione degli inoculi erano stati precedentemente testati per la loro compatibilità di crescita e per le loro caratteristiche di promozione della crescita. Le 4 miscele sono state fatte cercando di mettere insieme batteri con attività diversa.



**Figura 9.** L'immagine illustra il campo sperimentale e il campo ASTER agro-ecologico.

Le piante sono state inoculate con i consorzi batterici dopo due settimane dalla messa a dimora (giugno 2023); l'inoculo era in forma liquida (riferimento paragrafo descrizione inoculo liquido). Ciascuna pianta è stata inoculata con 20 ml di inoculo batterico, fatta eccezione per le piante di controllo a cui sono stati somministrati 20 ml di  $MgSO_4$  (0.1 M). Dopo un mese, è stato effettuato un inoculo di rinforzo. Nel campo agro-ecologico (ASTER) non sono stati effettuati i trattamenti chimici convenzionali.

Invece nel campo di confronto (campo convenzionale, in nero nella Figura 9 ) le piante non sono state inoculate con microrganismi benefici del suolo e la gestione è stata condotta seguendo le convenzionali metodologie di coltivazione del pomodoro da industria.

A settembre 2023, in entrambi i campi, è stata valutata la produzione complessiva di frutti in termini di numero e peso.

## 2. *Analisi statistica dei dati*

Per ogni parametro analizzato, sono stati calcolati la media e l'errore standard associato. I dati ottenuti sono stati esaminati utilizzando un'ANOVA a una via con il test di Fisher, considerando

significative le differenze tra i parametri per  $p \leq 0,05$ , altamente significative per  $p \leq 0,001$  e non significative per valori di  $p$  superiori a 0,05.

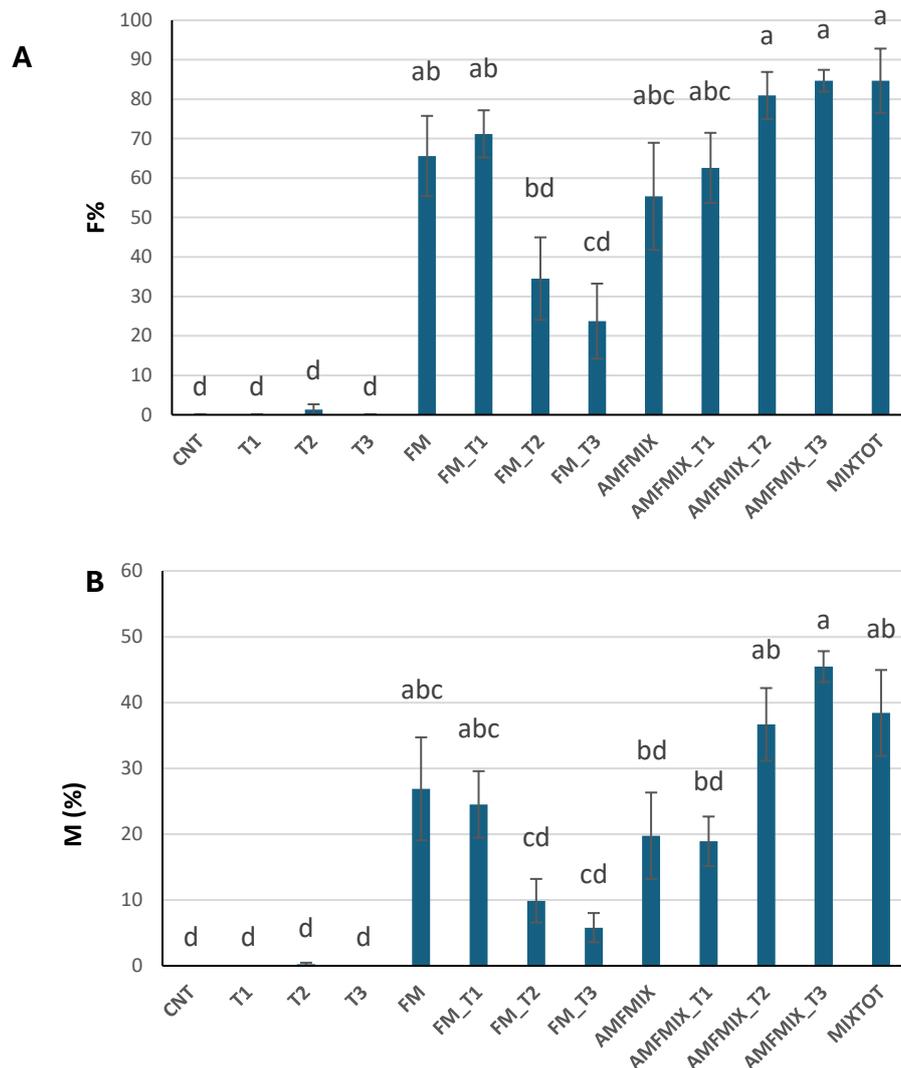
## RISULTATI

### SERRA

#### ***1. Parametri analizzati a 45 GDT***

##### *1.1 Valutazione della colonizzazione fungina nell'apparato radicale*

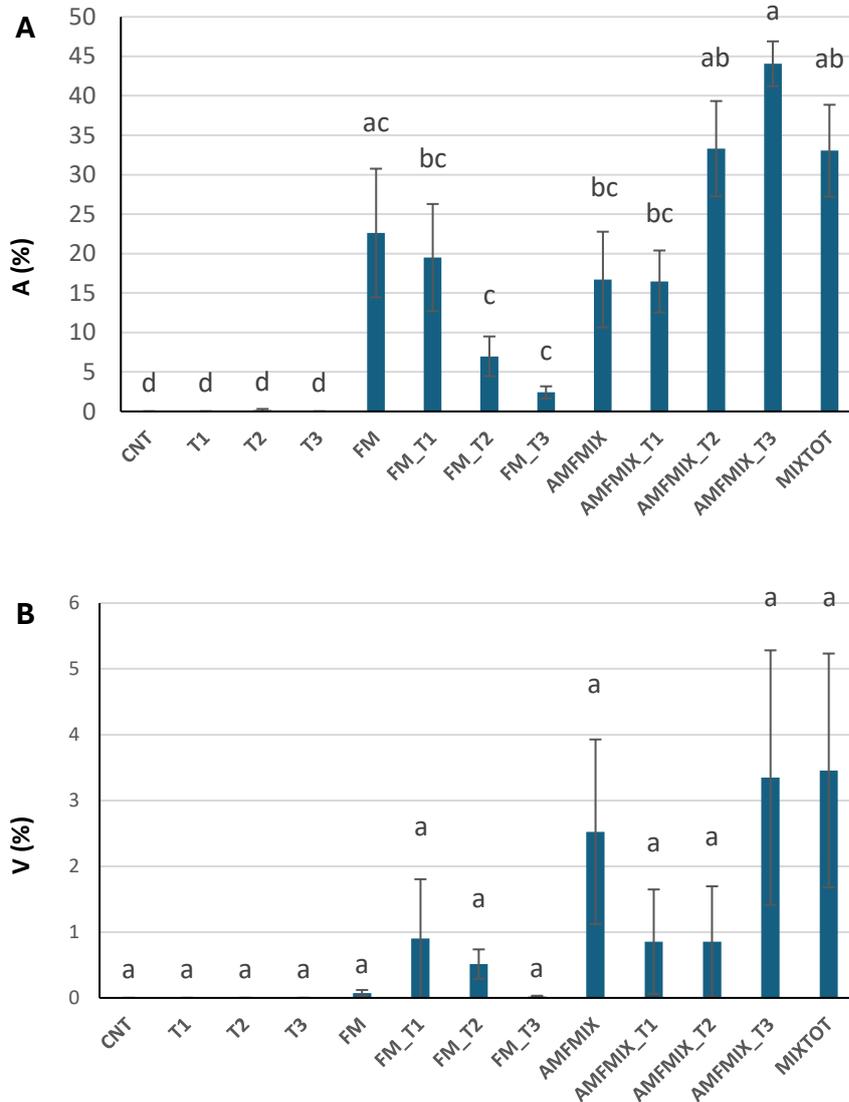
L'indice di micorrizzazione ha evidenziato che coerentemente con quanto ci si aspettava, le piante di controllo non presentavano tracce di colonizzazione da parte dei funghi AMF, così come anche le piante inoculate con il solo *Trichoderma* (T1, T2, T3), ad eccezione di qualche traccia nelle piante inoculate con il solo T2. I livelli di colonizzazione non erano significativamente differenti tra FM e AMF MIX, come osservato guardando la frequenza di colonizzazione (F%, Figura 10 A) e il grado di colonizzazione (M%, Figura 10 B). Questi due parametri invece si abbassavano, anche se non in maniera significativa, nel caso di FM quando erano presenti T2 e T3 (Figura 10 A e B).



**Figura 10.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della frequenza di micorrizzazione F% (A) e della percentuale di colonizzazione M% (B), delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglosum viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglosum viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglosum viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglosum viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglosum viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

Un andamento del tutto simile era osservabile anche per la presenza di arbuscoli (Figura 11): una diminuzione di arbuscoli era osservabile nelle radici delle piante inoculate con FM sia in presenza di T2, sia di T3 rispetto al solo utilizzo di FM. Mentre nei trattamenti con AMF MIX

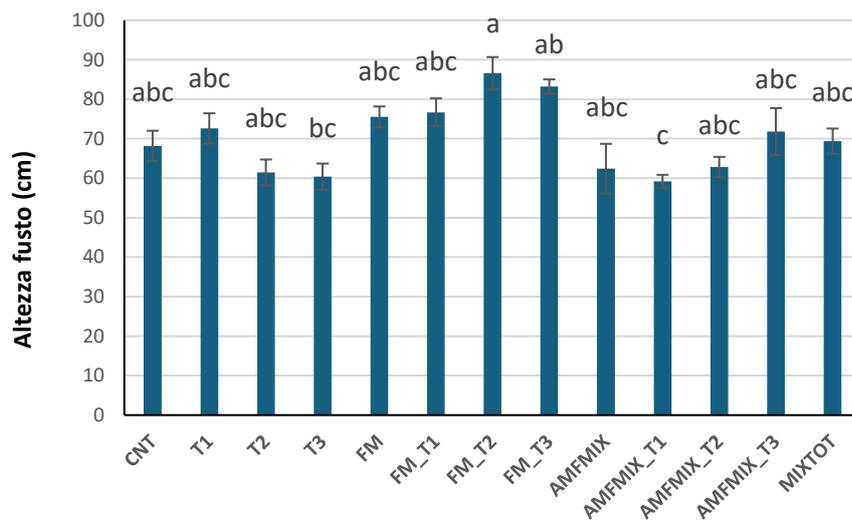
vi è stato un aumento di tale parametro quando le piante venivano co-inoculate con T3 (Figura 11 A). Per quanto riguarda la percentuale di vescicole (V%, Figura 11 B) non sono state osservate differenze statisticamente significative tra i diversi trattamenti anche se MIX TOT e AMF MIX\_T3 avevano dei valori più elevati rispetto a tutte le altre piante.



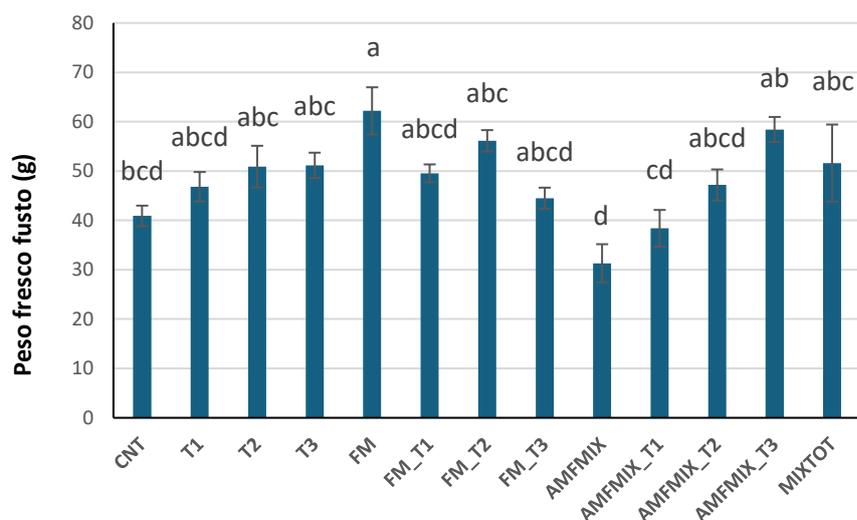
**Figura 11.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della percentuale di arbuscoli A% (A) e della percentuale di vescicole V% (B), delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX(*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

## 1.2 Parametri morfometrici e ponderali

Dall'analisi dei dati sulla porzione epigea della pianta si è osservato come non fossero evidenti differenze statisticamente significative tra l'altezza delle piante inoculate con microrganismi benefici del suolo e le piante di controllo non inoculate, anche se le piante FM\_T2 e FM\_T3 avevano dei valori più elevati rispetto a tutte le altre piante e significativamente superiori rispetto alle AMF MIX\_T1 (Figura 12). Il peso fresco del fusto era significativamente più elevato nelle piante inoculate con FM rispetto alle piante di controllo, mentre tutti gli altri trattamenti non mostravano differenze rispetto a queste ultime. Inoltre, c'erano delle differenze significative nel peso fresco del fusto delle piante inoculate con AMF MIX e quelle inoculate con FM, le prime infatti avevano dei valori più bassi rispetto alle ultime (Figura 13).

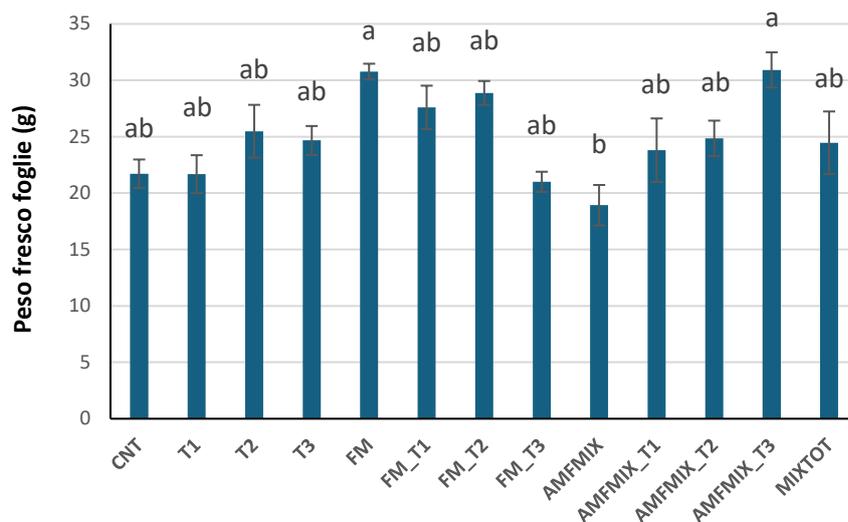


**Figura 12.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard dell'altezza del fusto delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).



**Figura 13.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del peso fresco del fusto delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

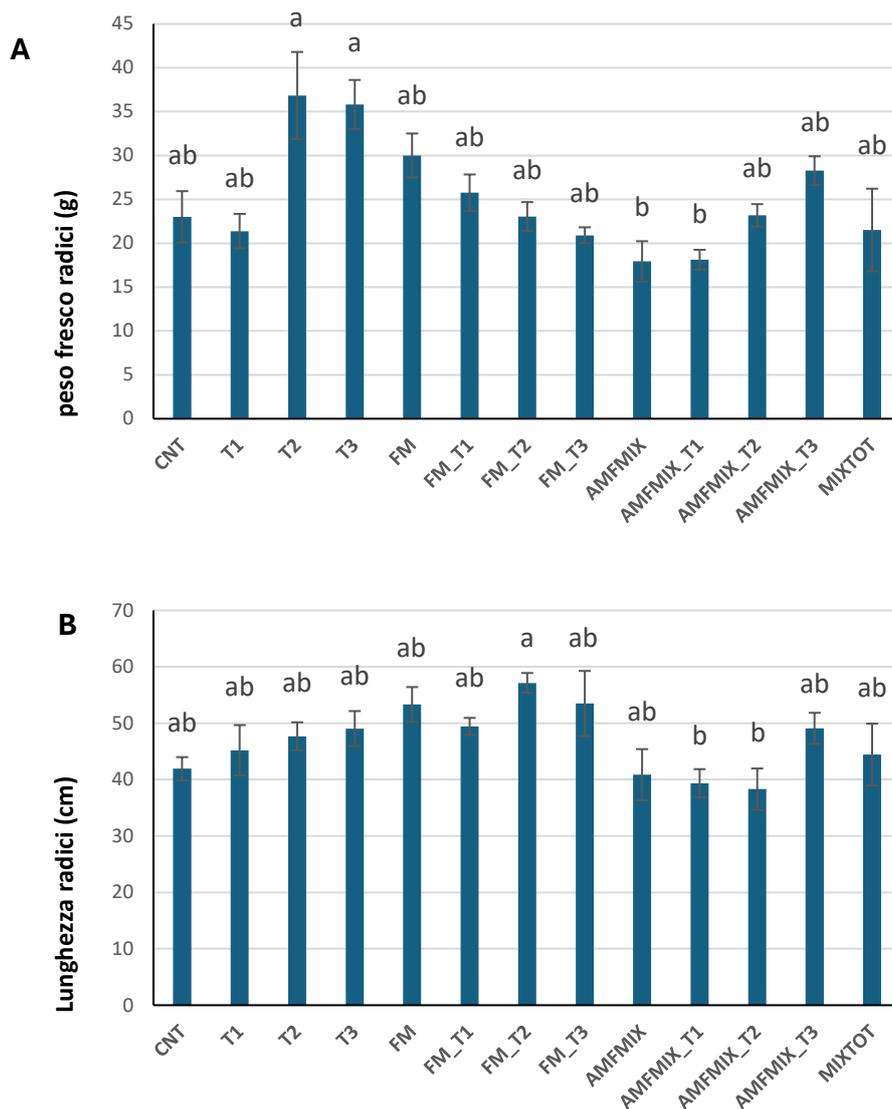
Analizzando il peso fresco delle foglie, le piante inoculate con FM e quelle co-inoculate con AMF MIX\_T3 avevano valori significativamente maggiori rispetto a quelle inoculate con AMF MIX (Figura 14). Tuttavia, non sono state riscontrate differenze significative tra le piante di controllo e i diversi trattamenti.



**Figura 14.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del peso fresco delle foglie, delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

Per il peso fresco delle radici, i valori delle piante inoculate con le diverse combinazioni di microrganismi non hanno mostrato differenze significative rispetto alle piante di controllo. Invece, le piante inoculate con T2 e T3 avevano dei valori più alti rispetto a quelle inoculate con AMF MIX e quelle co-inoculate con AMFMIX\_T1 (Figura 15 A).

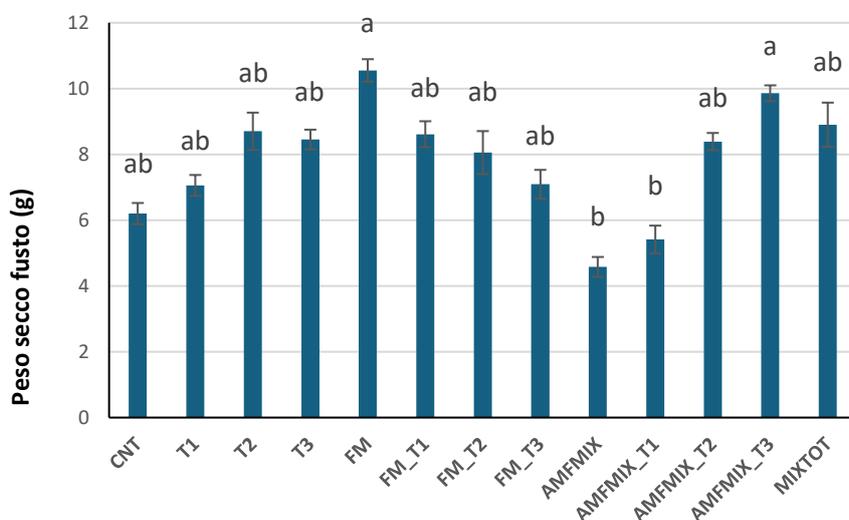
Analizzando anche i dati riguardanti la lunghezza delle radici non erano presenti differenze tra le piante inoculate con microrganismi benefici del suolo e le piante non inoculate. Erano invece presenti differenze statisticamente significative tra le piante FM\_T2 e quelle trattate con AMF MIX e coinoculate con T1 o T2 (Figura 15 B).



**Figura 15.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del peso delle radici fresche (A) e la lunghezza delle radici fresche (B), delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

La biomassa secca dei fusti relativa a tutti i trattamenti con le diverse combinazioni di microrganismi non aveva differenze significative rispetto alle piante CNT. Tuttavia, le piante inoculate con FM da solo e quelle coinoculate con AMF MIX e T3 presentavano i valori più

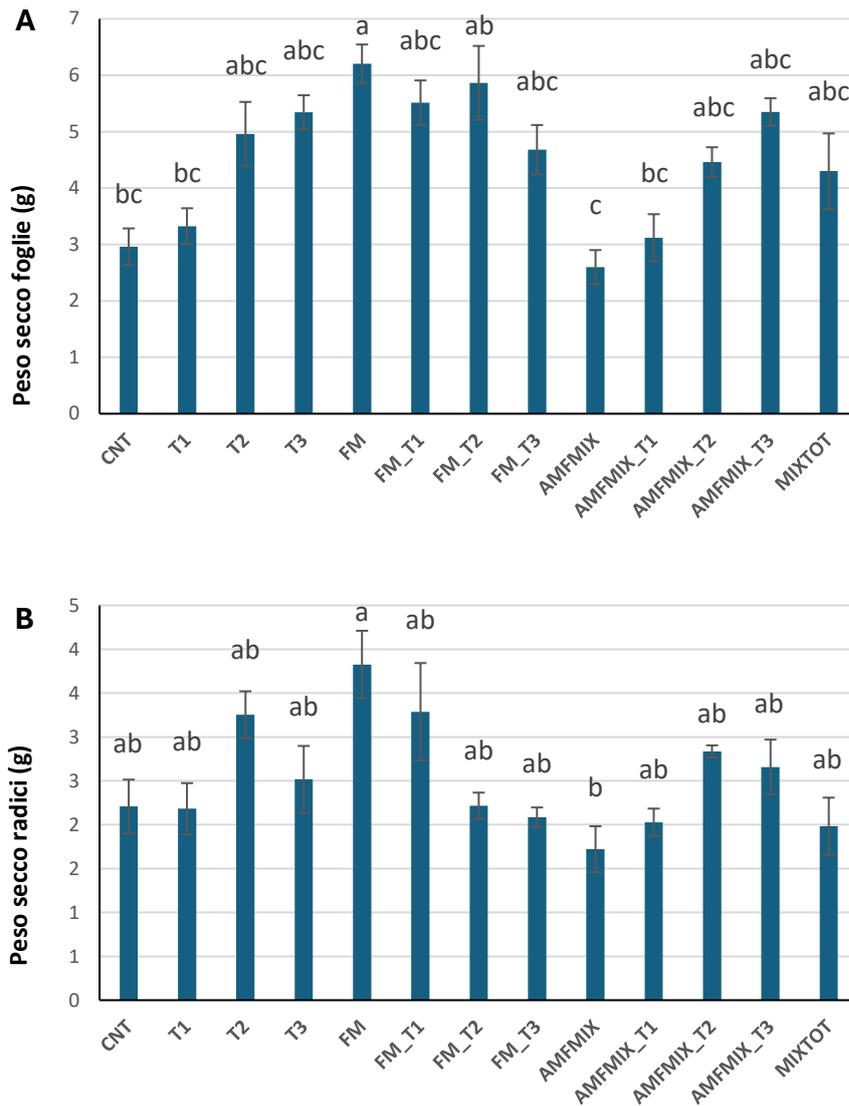
elevati di questo parametro, con differenze statisticamente significative verso le piante AMF MIX e AMF MIX\_T3 (Figura 16), che invece avevano i valori più bassi.



**Figura 16.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del peso dei fusti secchi (A) delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

Il peso secco delle foglie delle piante inoculate con FM era significativamente maggiore rispetto alle piante CNT, alle piante inoculate con AMF MIX e quelle co-inoculate con AMF MIX e T1 (Figura 17 A).

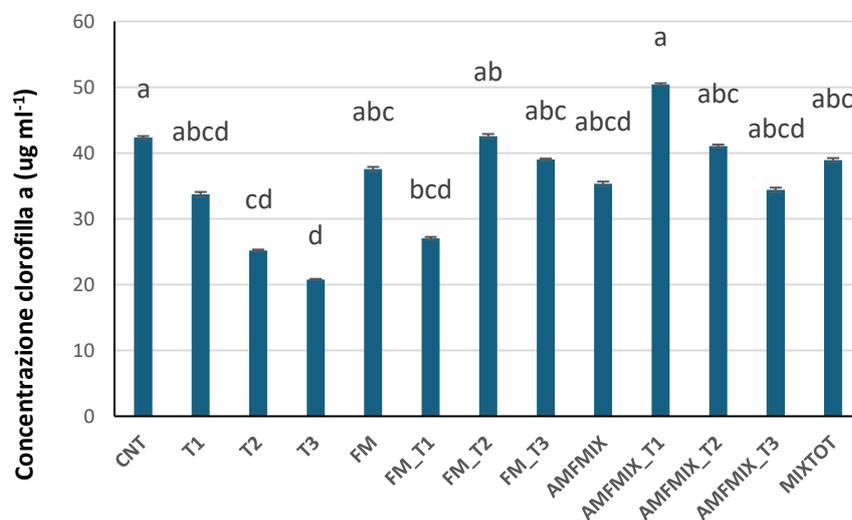
Per quanto riguarda il peso secco delle radici esso non era significativamente diverso tra le piante CNT e e tutti gli altri trattamenti. Le uniche differenze statisticamente significative erano riscontrabili tra le piante FM (il cui valore era elevato) e le piante inoculate con AMF MIX da solo o in presenza di T1 (Figura 17 B).



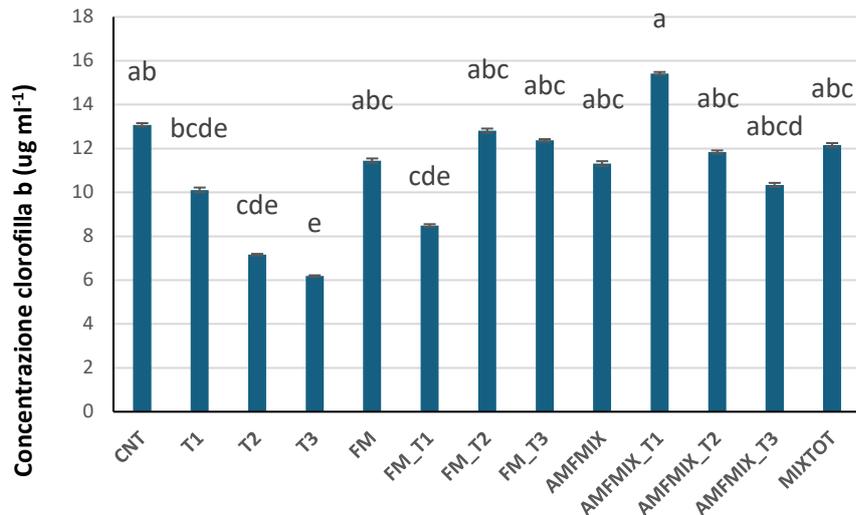
**Figura 17.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard delle foglie secche (A) e il peso delle radici secche (B), delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viridae*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viridae*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viridae*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

### 1.3 Analisi del contenuto di pigmenti fogliari

Nell'analisi della concentrazione di clorofilla *a* e *b* è stato osservato che solo tre trattamenti presentavano delle differenze statisticamente significative rispetto alle piante CNT, ovvero i trattamenti T2, T3 e FM\_T1, che avevano delle concentrazioni minori (Figura 18 e 19). Stessa situazione è stata osservata per quanto riguarda la concentrazione di carotenoidi, fatta eccezione per le piante inoculate con FM\_T1 che non erano differenti dalle piante CNT (Figura 20 C). In generale le piante AMF MIX\_T1 presentavano i valori più elevati di clorofille e carotenoidi.

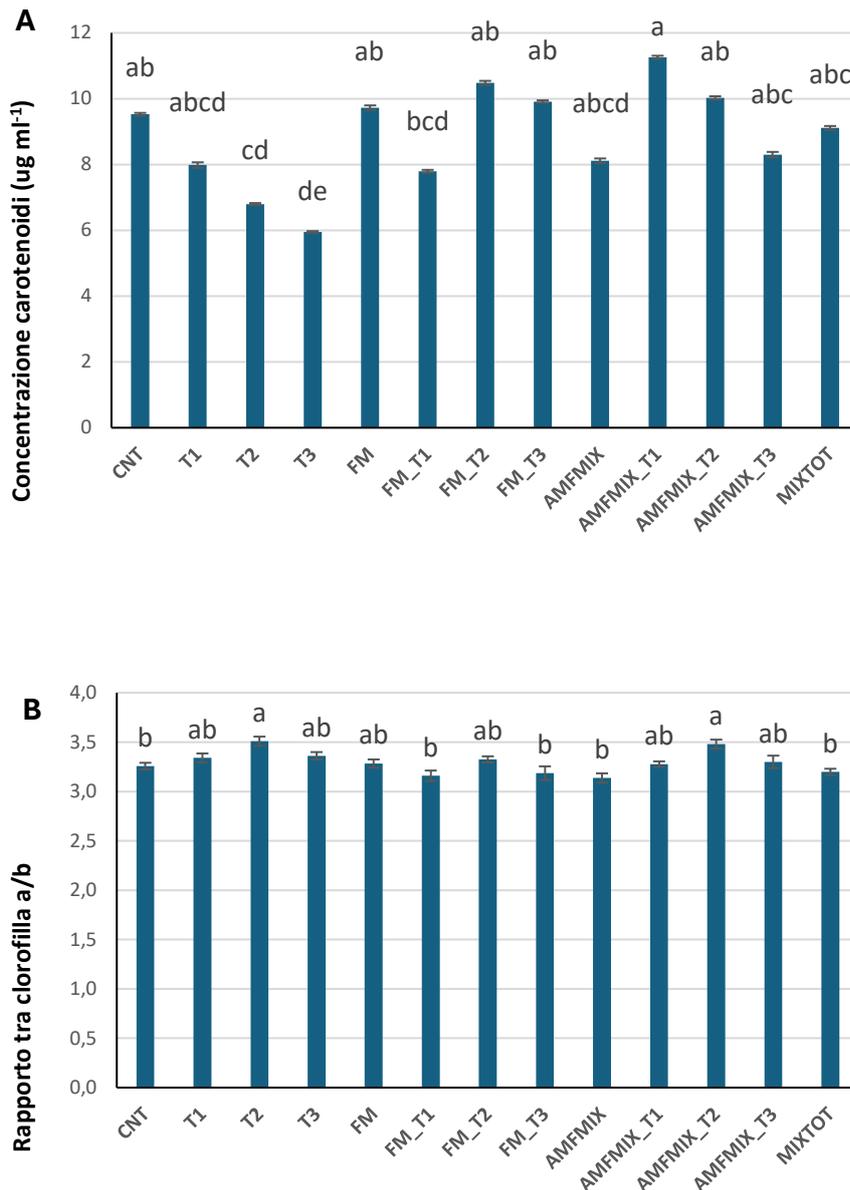


**Figura 18.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della concentrazione di clorofilla *a* delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).



**Figura 19.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della concentrazione di clorofilla b delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

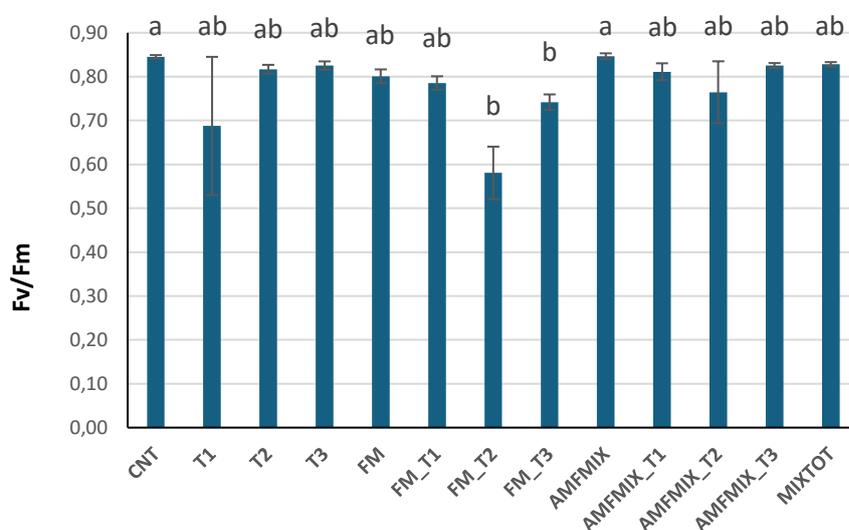
Il rapporto Chla/Chlb (Figura 20 B) decresceva significativamente nelle piante non inoculate (CNT), in quelle trattate con FM e coinoculate o con T1 o con T3, e in quelle trattate con MIX TOT, se confrontate con le piante inoculate e con il solo T<sup>o</sup> o coinoculate con T2 e AMF MIX.



**Figura 20.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della concentrazione di carotenoidi (A) e del rapporto del contenuto di clorofilla a/b (B) delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

#### 1.4 Analisi della fluorescenza fogliare (PEA)

Il parametro preso in considerazione è stato Fv/Fm, cioè il rapporto tra la fluorescenza variabile e la fluorescenza massima. Come si può osservare dal grafico in Figura 21 quasi tutte le piante mostravano valori di Fv/Fm ottimali, cioè vicini a 0.8 (considerato come valore tipico di piante in buono stato di salute). Tuttavia, alcune avevano valori di efficienza fotosintetica significativamente più bassi: si trattava delle piante inoculate con FM e coinoculate o con T2 o T3.

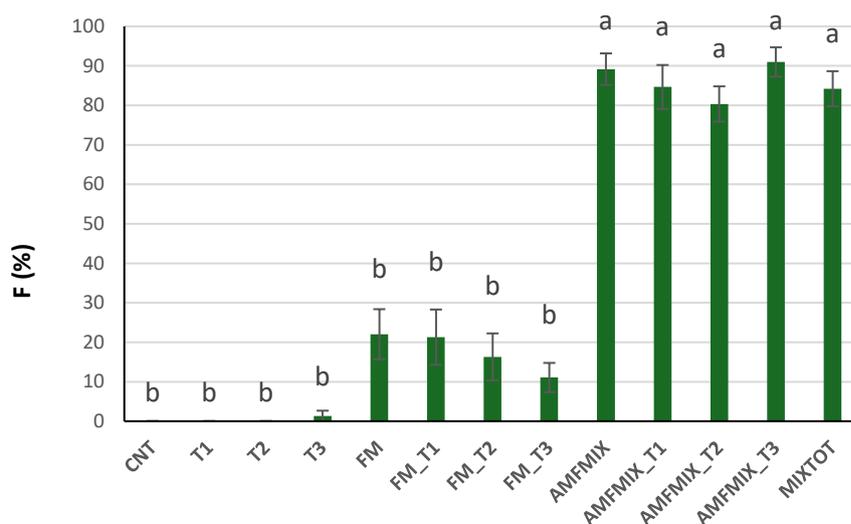


**Figura 21.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del Fv/Fm delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

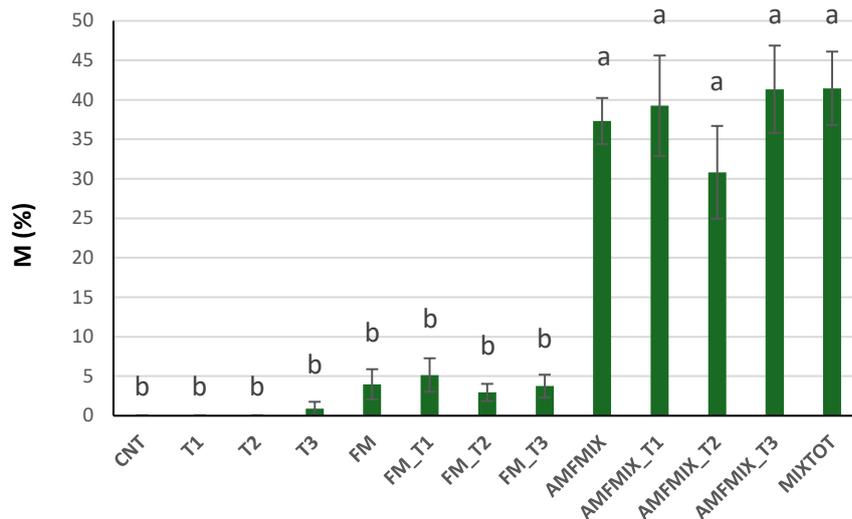
## 2. Parametri analizzati a 100 GDT

### 2.1 Valutazione della colonizzazione fungina nell'apparato radicale

Le piante di controllo e quelle inoculate con i ceppi di *Trichoderma* in singolo (ad eccezione di T3) non presentavano tracce di colonizzazione da parte dei funghi micorrizici. I livelli di colonizzazione erano significativamente differenti tra FM e AMF MIX, come si poteva osservare dai valori della frequenza (F%) e della micorrizzazione percentuale (M%). In entrambi i casi l'inoculo misto di AMF, sia utilizzato in singolo che co-inoculato con le tre diverse specie di *Trichoderma* (compreso MIX TOT), presentava dei valori di micorrizzazione significativamente più elevati rispetto a quelli dell'inoculo puro FM somministrato in singolo o coinoculato con altri microrganismi (Figura 22 e 23).



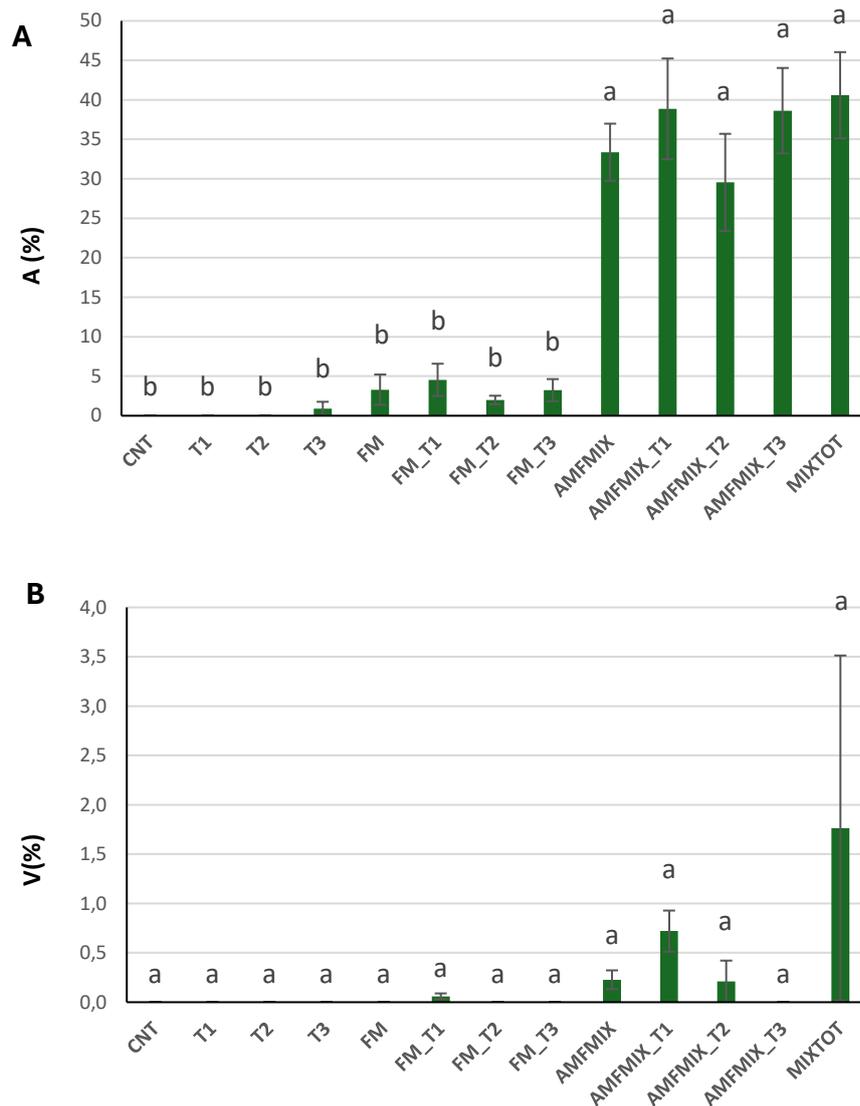
**Figura 22.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della frequenza di micorrizzazione F% delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).



**Figura 23.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della frequenza di micorrizzazione F% (A) e della percentuale di colonizzazione M% (B), delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

L'utilizzo dei due diversi inoculi micorrizici ha influenzato significativamente anche la produzione di arbuscoli (A%) ricalcando sostanzialmente l'andamento dei due grafici precedenti (Figura 24 A, 23, 22).

Non si sono evidenziate differenze statisticamente significative tra i diversi trattamenti per la produzione di vescicole (V%, Figura 24 B).

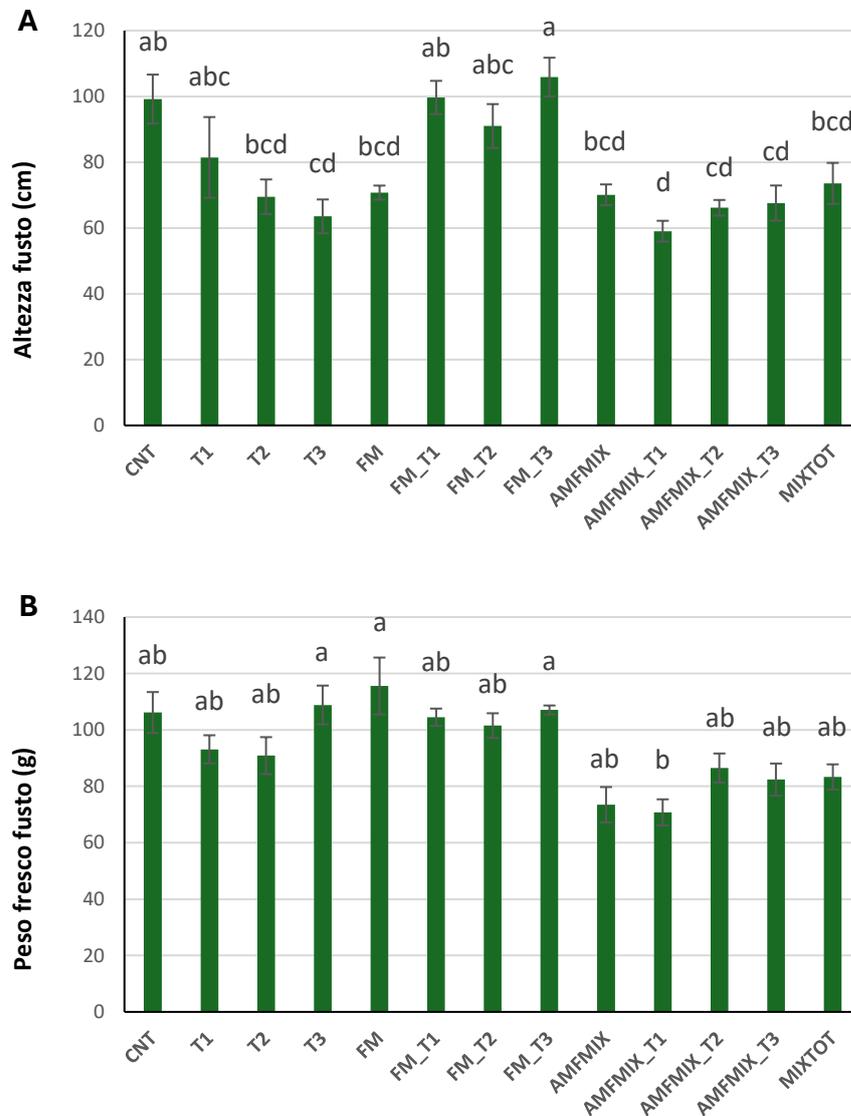


**Figura 24.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della percentuale di arbuscoli A% (A) e della percentuale di vescicole V% (B), delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

## 2.2. Parametri morfometrici ponderali

Dall'analisi dei dati effettuata sulla biomassa fresca delle piante di pomodoro dopo 100 GDT, l'altezza delle piante inoculate con T3, AMF MIX\_T1, AMF MIX\_T2 e AMF

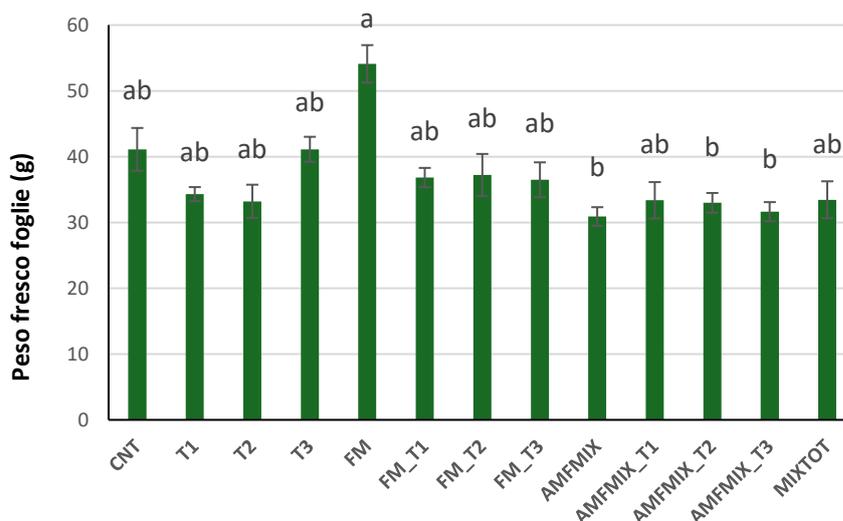
MIX\_T3 era più bassa delle piante CNT (Figura 25 A). Il peso fresco del fusto nelle piante inoculate con le diverse combinazioni di microrganismi benefici del suolo non era differente rispetto al controllo; tuttavia, FM e FM\_T3 avevano valori maggiori se confrontati con AMF MIX\_T1 (Figura 25 B).



**Figura 25.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard dell' altezza del fusto (A) e peso fresco del fusto (B), delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

Analizzando il peso fresco delle foglie si è potuto constatare che non vi erano differenze significative delle piante inoculate con i microrganismi a confronto con le piante CTN.

Nonostante questo, le piante inoculate con FM in singolo avevano valori significativamente maggiori rispetto a quelle inoculate con AMF MIX e co-inoculate con AMF MIX\_T2 e AMF MIX\_T3 (Figura 26).



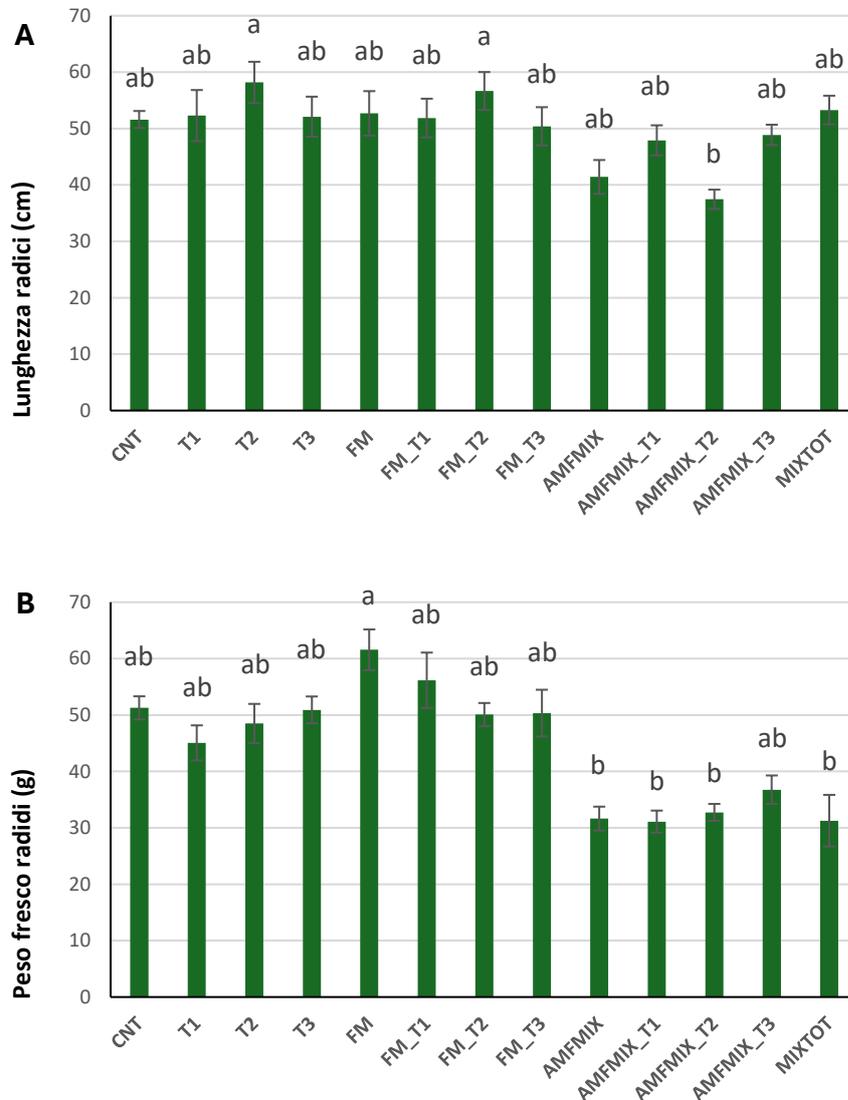
**Figura 26.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del peso fresco delle foglie, delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

La lunghezza delle radici non mostrava differenze significative con le piante di controllo e tutti gli altri diversi trattamenti. Invece erano presenti delle differenze tra i trattamenti AMF MIX\_T2, T2 e FM\_T2, in particolare le piante co-inoculate con AMF MIX\_T2 avevano una lunghezza minore rispetto agli altri due trattamenti appena menzionati (Figura 27 A).

Per il peso fresco delle radici, i valori erano simili tra le piante CNT e tutti gli altri trattamenti.

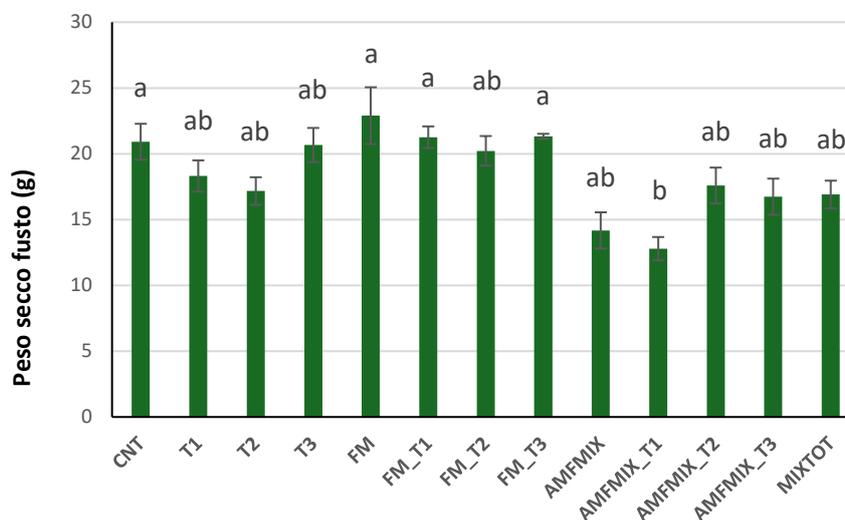
Guardando solo le piante inoculate con i microrganismi, AMF MIX, AMF MIX\_T1, AMF

MIX\_T2 e MIX TOT avevano un peso significativamente minore rispetto alle piante FM (Figura 27 B).



**Figura 27.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della lunghezza delle radici (A) e il peso fresco delle radici (B), delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viridae*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viridae*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viridae*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

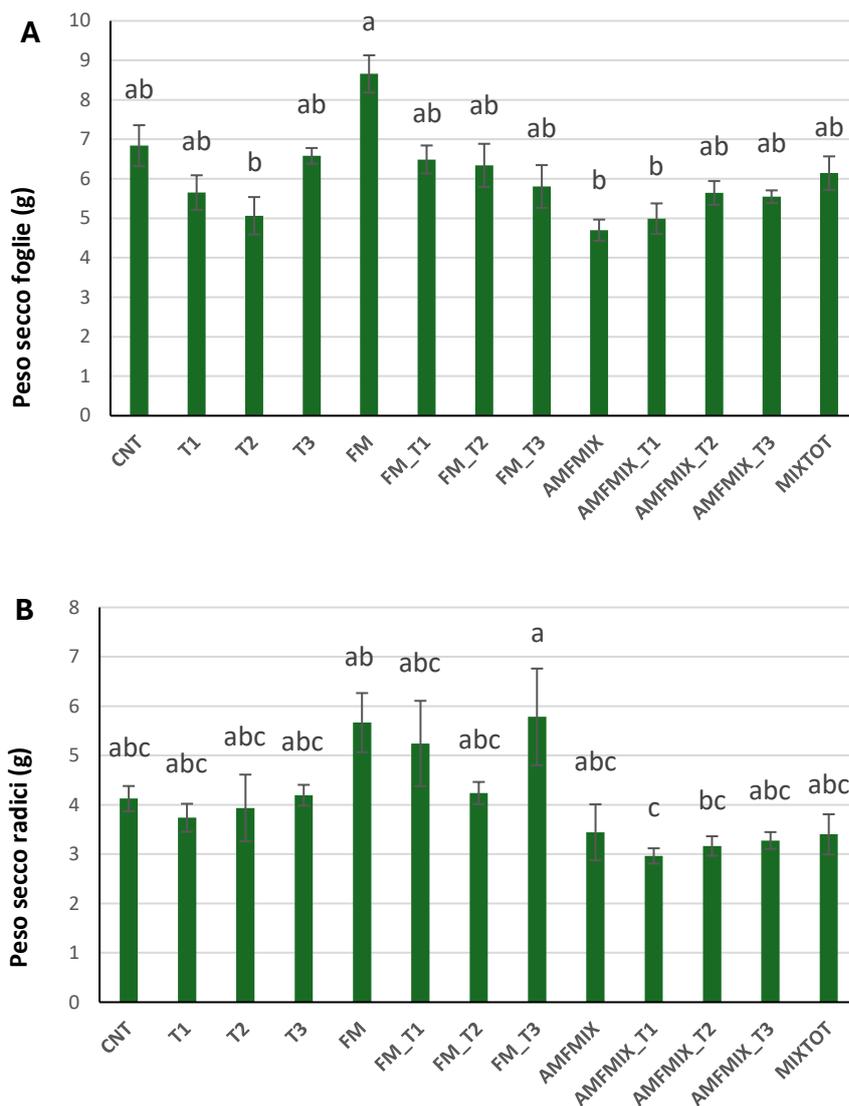
Le analisi effettuate sulla biomassa secca hanno mostrato che per quanto riguarda i fusti, le piante co-inoculate con AMF MIX e T1 avevano un peso significativamente inferiore rispetto alle piante CNT e a tutte quelle inoculate con FM ad eccezione di FM\_T2 (Figura 28).



**Figura 28.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del peso dei fusti secchi delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

Dalle analisi del peso secco foglie invece non sono state riscontrate differenze statisticamente significative tra le piante di controllo e tutti gli altri trattamenti. Tuttavia, differenze apprezzabili erano presenti tra le piante T2, AMF MIX e AMF MIX\_T1, che avevano bassi valori di questo parametro più bassi rispetto a quelli registrati nelle piante FM (Figura 29 A).

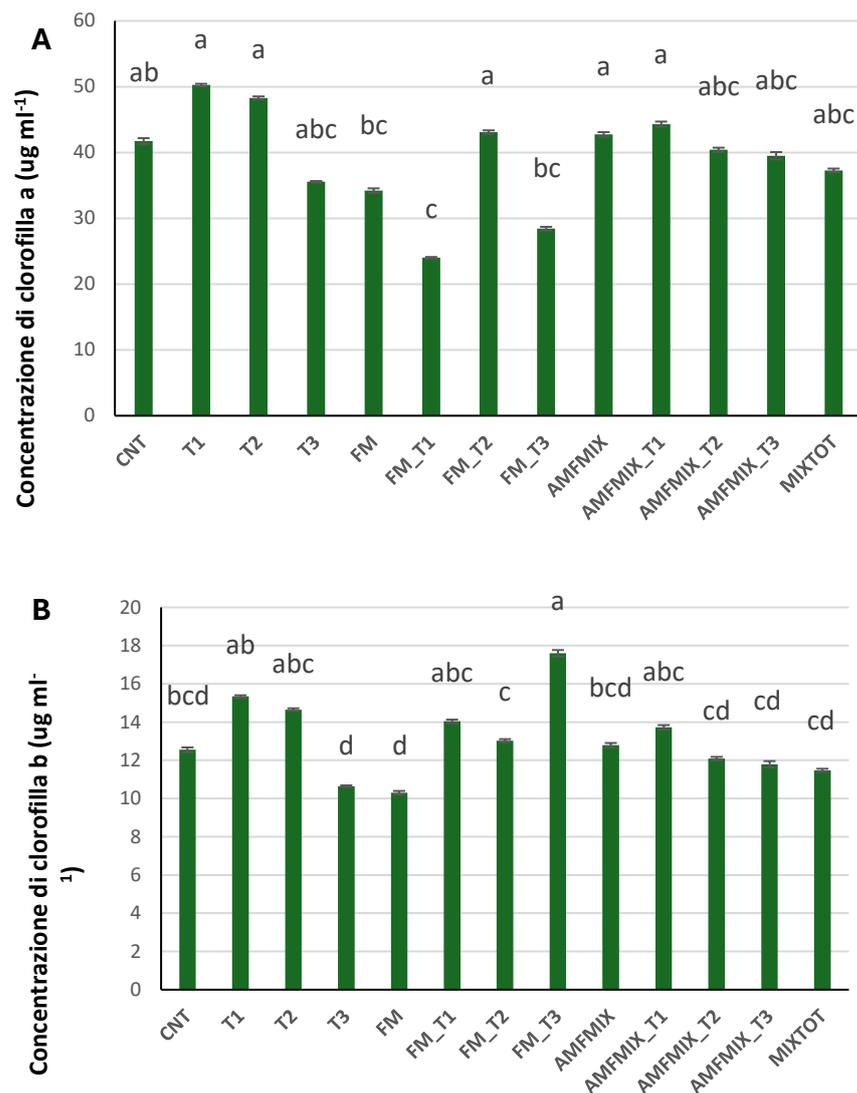
Per quanto riguarda la biomassa secca delle radici non erano stati riscontrate differenze significative tra i controlli e i diversi trattamenti, ma, nonostante ciò, le piante co-inoculate con FM e T3 avevano dei valori maggiori rispetto a quelle co-inoculate con AMF MIX\_T1 e AMF MIX\_T2 (Figura 29 B).



**Figura 29.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del peso delle foglie secche (A) e il peso delle radici secche (B), delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

### 2.3 Analisi della concentrazione di pigmenti fogliari

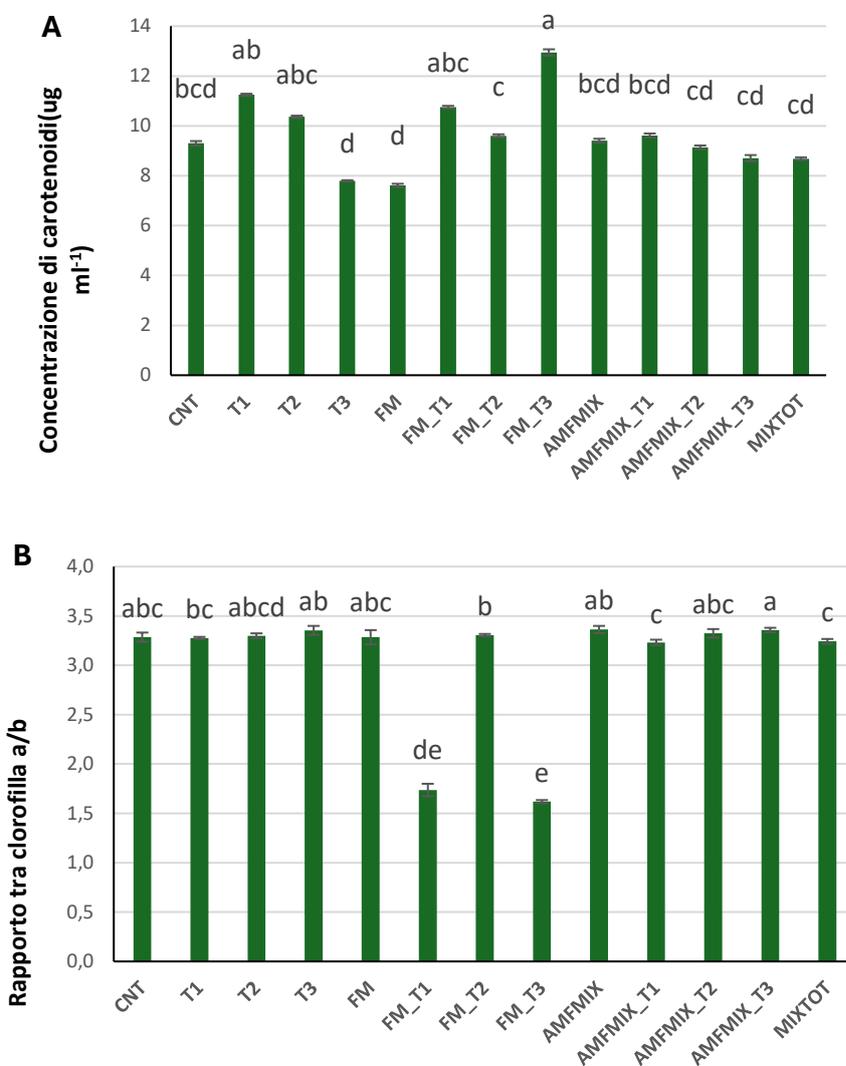
Nell'analisi della concentrazione di clorofilla *a* è stato osservato che le piante inoculate con FM\_T1 avevano dei valori significativamente inferiori rispetto alle piante CNT, T1, T2, FM\_T2, AMF MIX e AMF MIX\_T1 (Figura 30 A).



**Figura 30.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della concentrazione di clorofilla a (A) e della concentrazione di clorofilla b (B) delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX(*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

Per quanto riguarda invece la concentrazione di clorofilla b e dei carotenoidi (Figura 30 B e 31 A) i valori delle piante inoculate con FM\_T3 erano maggiori rispetto a tutte le altre piante inoculate/co-inoculate e di controllo, fatta eccezione per quelle T1, T2, FM\_T1 e AMF MIX\_T1. Analizzando invece il rapporto tra la concentrazione di clorofilla a e b è stato visto

che i trattamenti FM\_T1 e FM\_T3 avevano valori significativamente inferiori rispetto al controllo e a tutte le altre piante inoculate con i diversi microrganismi (Figura 31 B).

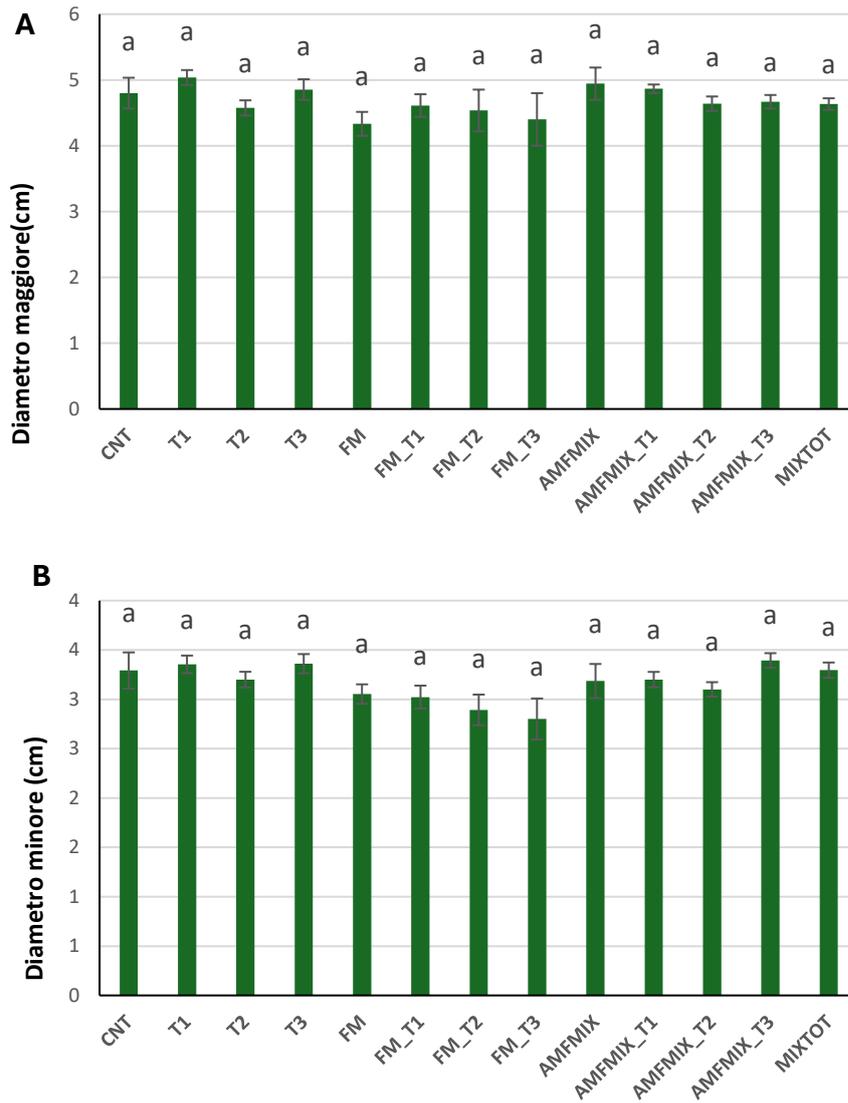


**Figura 31.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard della concentrazione di carotenoidi (A) e del rapporto del contenuto di colorifilla a/b (B) delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacterium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

## 2.4 Produttività e pezzatura di frutti

Per quanto riguarda lo studio del diametro maggiore e minore dei frutti è stato osservato che non vi erano differenze statisticamente significative tra i diversi trattamenti (Figura 32 A e B).

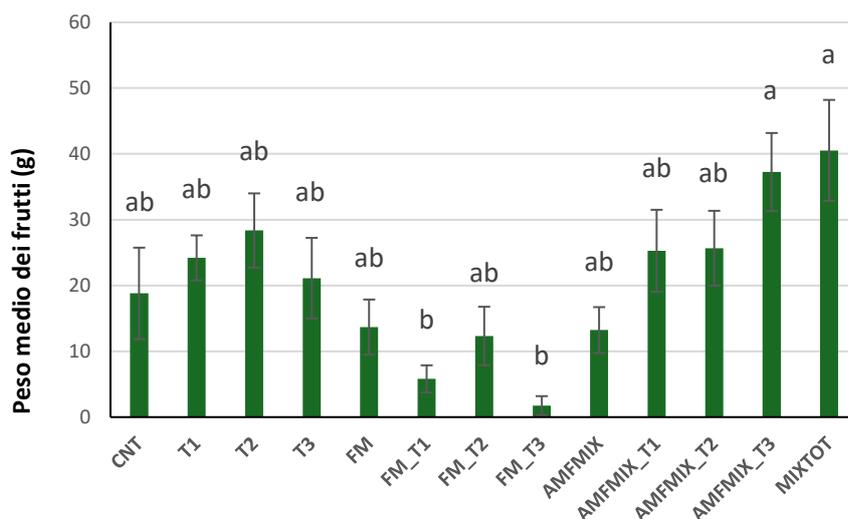
La media del peso dei frutti di pomodoro non ha mostrato delle differenze significative confrontando i risultati delle piante inoculate con quelle di controllo.



**Figura 32.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del diametro maggiore (A), diametro minore (B) delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX(*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*,

*Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

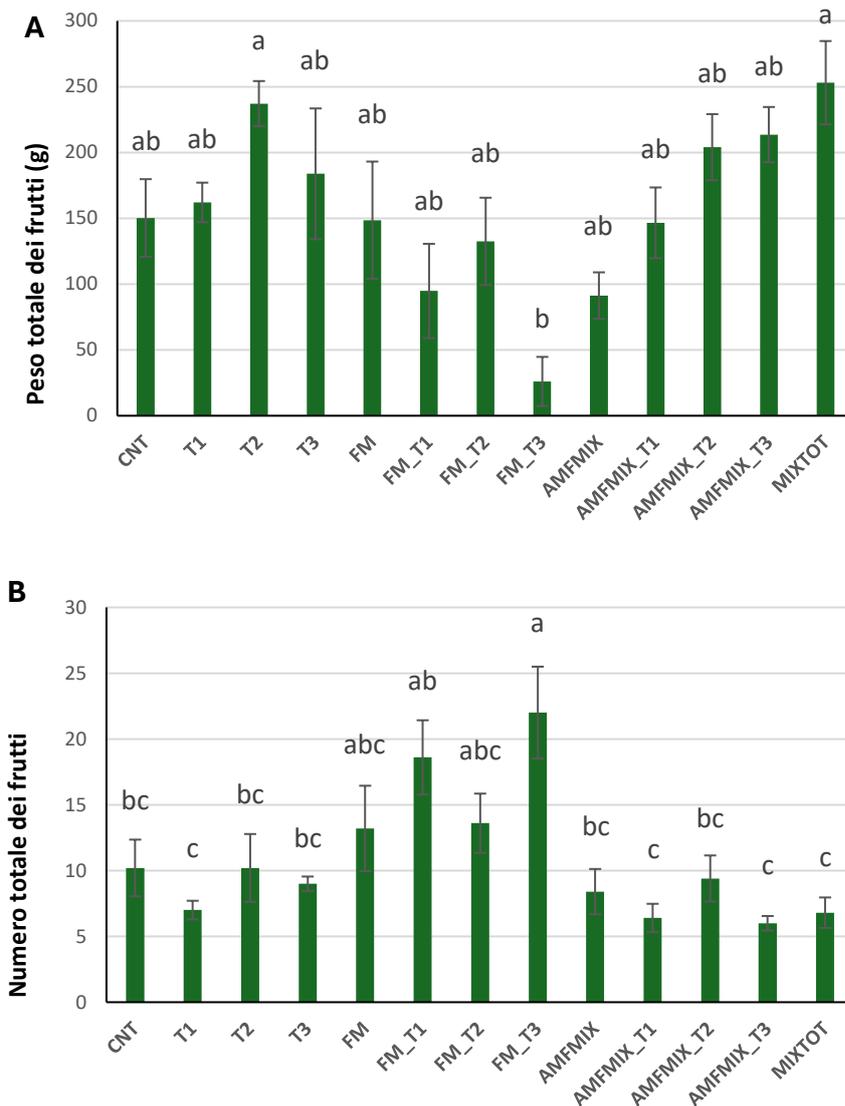
Nonostante questo, si è però osservato che i trattamenti FM\_T1 e FM\_T3 avevano dei valori minori rispetto al CNT, viceversa le piante inoculate con AMF MIX\_T3 e MIX TOT presentavano valori più elevati rispetto a tutte le altre piante (Figura 33).



**Figura 33** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del peso medio dei frutti (C) delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

Il peso totale dei frutti non variava significativamente tra i diversi trattamenti confrontandoli con le piante di controllo; tuttavia, il peso totale risultava numericamente più elevato nelle piante inoculate con T2 e MIX TOT; viceversa è stata riscontrata una significativa diminuzione del peso nelle piante co-inoculate con FM\_T3 (Figura 34 A).

Il numero totale dei frutti ha avuto un aumento significativo rispetto al controllo nelle piante inoculate con FM\_T3, mentre nel resto dei trattamenti non erano state osservate differenze statisticamente significative (Figura 34 B).

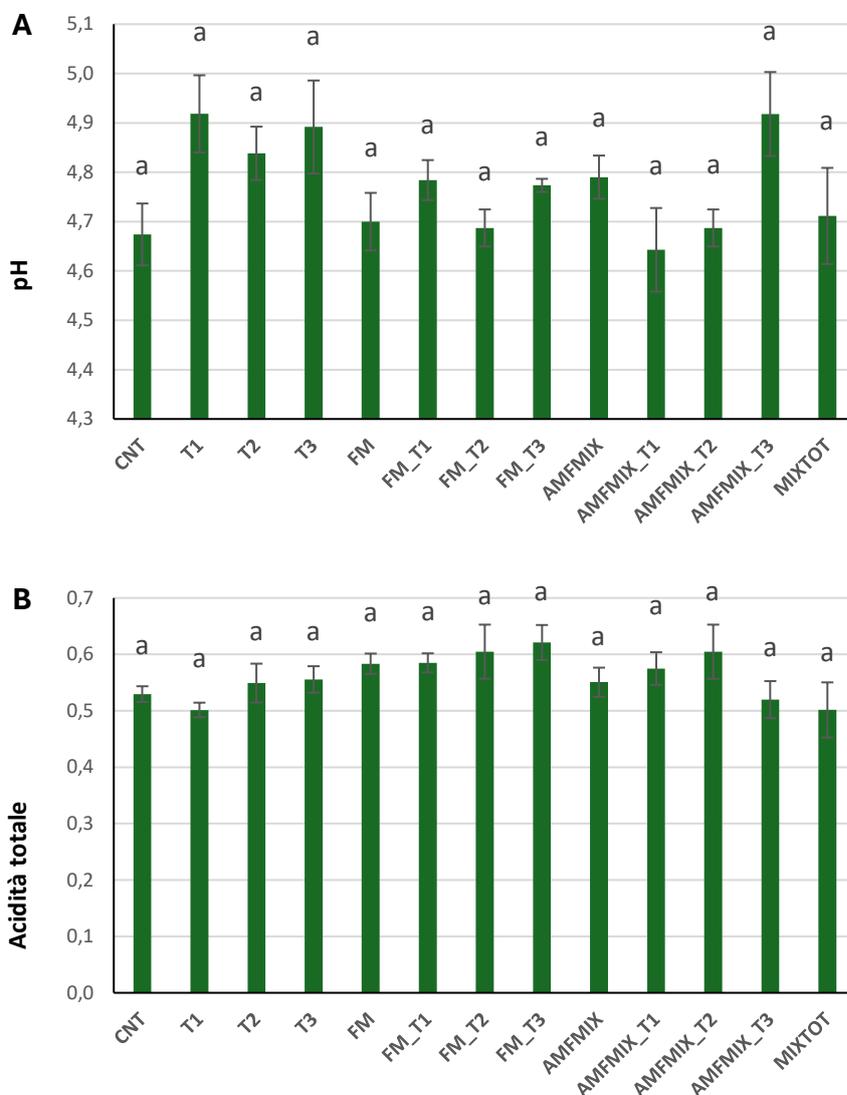


**Figura 34.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del peso totale dei frutti (A) e del numero totale di frutti (B) delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacterium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

### 2.5 Valori di pH e di acidità totale nei frutti

Il pH non variava significativamente tra i diversi trattamenti confrontandoli con le piante di controllo; tuttavia, il pH risultava più acido nelle piante inoculate con T1, T2, T3 e co-inoculato

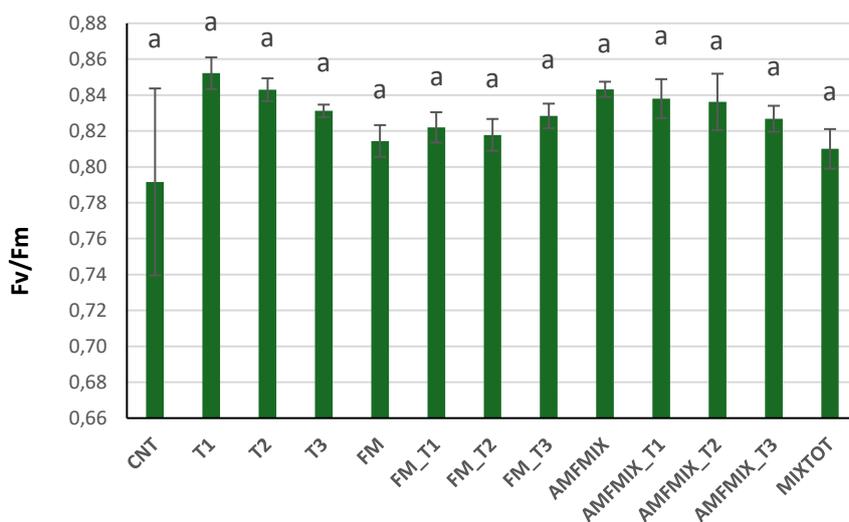
con AMF MIX\_T3 (Figura 35 A). Per quanto riguarda l'acidità totale non vi erano delle differenze statisticamente significative confrontando i risultati delle piante inoculate con quelle di controllo (Figura 35 B).



**Figura 35.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del pH dei frutti (A), dell'acidità totale dei frutti (B) delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septogloium viscosum*, *Claroidegloium cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbactrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

## 2.6 Analisi della fluorescenza delle clorofille (PEA)

Il parametro preso in considerazione, Fv/Fm, aveva dei valori compresi nell'intorno ideale 0,7-0,85. Non sono state osservate delle differenze significative tra le piante di controllo e tutte le altre piante inoculate e co-inoculate con MBS (Figura 36).

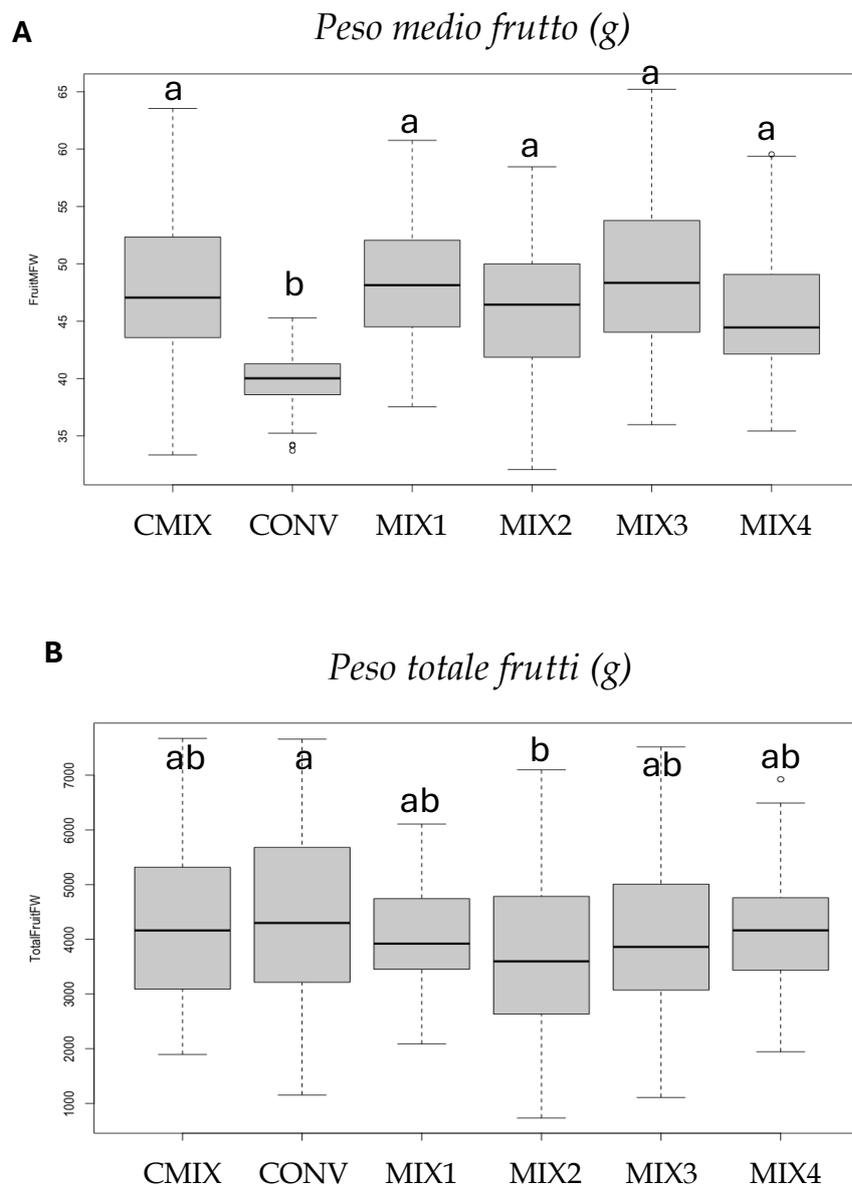


**Figura 36.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del valore di Fv/Fm delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 inoculate o meno con MBS. CNT: piante non inoculate; T1: piante inoculate con *T. viridae*; T2: piante inoculate con *T. asperellum*; T3: piante inoculate con *T. polysporum*; FM: piante inoculate con *F. mosseae*; FM\_T1: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. viride*; FM\_T2: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. asperellum*; FM\_T3: piante inoculate con *F. mosseae* + *T. polysporum*; AMF MIX: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum*; AMF MIX\_T1: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*; AMF MIX\_T2: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. asperellum*; AMF MIX\_T3: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. polysporum*; MIX TOT: piante inoculate con *Rhizophagus intraradices*, *R. aggregatus*, *Septoglomus viscosum*, *Claroideglomus cloroideum*, *C. etunicatum* + *T. viride*, *T. asperellum*, *T. polysporum* + PGPB MIX (*Bacillus subtilis*, *B. mojavensis*, *B. muralis*, *Microbacetrium paludicola*, *M. arborescens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *P. protegens*, *Pseudomonas sp.*). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

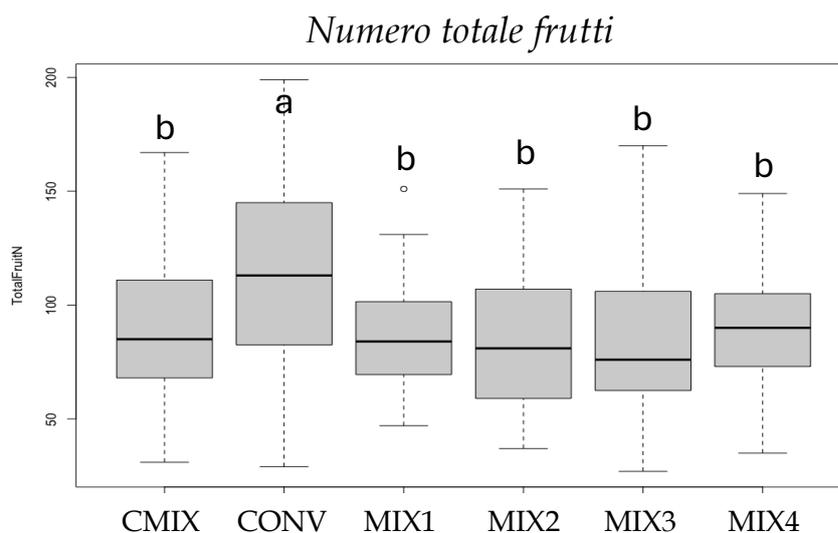
## CAMPO SPERIMENTALE

### 1. Confronto campo ASTER e campo convenzionale

I frutti del campo convenzionale presentavano un peso medio (Figura 37 A) inferiore rispetto a quello del campo Aster, indipendentemente dal trattamento anche se il numero di pomodori era maggiore (Figura 38). Per quanto riguarda il peso totale dei frutti non sono state osservate differenze significative tra il campo convenzionale e il campo Aster, fatta eccezione per il trattamento MIX 2 del campo Aster (Figura 37 B).



**Figura 37.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del peso medio dei frutti (A), del peso totale di frutti (B) delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 raccolti nel campo Aster e nel campo convenzionale. CMIX: controlli campo Aster; CONV: campo convenzionale; MIX1: campo Aster con *Bacillus simplex* (AH24), *B. mojavensis* (SF1), *Pseudomonas sp.* (SAT5), *P. brassicacearum* (SVB6R1); MIX2: campo Aster con *P. protegens* (PF7), *Microbacterium arborescens* (PU10), *P. brassicacearum* (SVB6R1), *B. muralis* (AA14); MIX3: campo Aster con *B. subtilis* (ZS11), *M. paludicola* (AEA23), *P. brassicacearum* (SVB6R1); MIX4: campo Aster con *Bacillus simplex* (AH24), *B. mojavensis* (SF1), *Pseudomonas sp.* (SAT5), *P. brassicacearum* (SVB6R1), *P. protegens* (PF7), *Microbacterium arborescens* (PU10), *B. muralis* (AA14), *B. subtilis* (ZS11), *M. paludicola* (AEA23). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).



**Figura 38.** Nella figura vengono mostrati la media e il relativo errore standard del numero totale di frutti delle piante di pomodoro varietà Heinz 1301 raccolti nel campo Aster e nel campo convenzionale. CMIX: controlli campo Aster; CONV: campo convenzionale; MIX1: campo Aster con *Bacillus simplex* (AH24), *B. mojavensis* (SF1), *Pseudomonas sp.* (SAT5), *P. brassicacearum* (SVB6R1); MIX2: campo Aster con *P. protegens* (PF7), *Microbacterium arborescens* (PU10), *P. brassicacearum* (SVB6R1), *B. muralis* (AA14); MIX3: campo Aster con *B. subtilis* (ZS11), *M. paludicola* (AEA23), *P. brassicacearum* (SVB6R1); MIX4: campo Aster con *Bacillus simplex* (AH24), *B. mojavensis* (SF1), *Pseudomonas sp.* (SAT5), *P. brassicacearum* (SVB6R1), *P. protegens* (PF7), *Microbacterium arborescens* (PU10), *B. muralis* (AA14), *B. subtilis* (ZS11), *M. paludicola* (AEA23). Lettere differenti tra i trattamenti esplicitano differenze statisticamente significative ( $p \leq 0,05$ ).

## DISCUSSIONE

La simbiosi tra le piante di pomodoro e i microrganismi del suolo, come PGPB e AMF, riveste un'importanza cruciale per la salute, la crescita e la produttività delle colture (Emmanuel et al., 2020). I PGPB, ad esempio, favoriscono l'assimilazione di nutrienti essenziali come l'azoto e il fosforo, mentre gli AMF migliorano l'assorbimento di minerali e proteggono le piante da patogeni del suolo (Gelvez-Pardo et al., 2023). Lo studio oggetto di questa tesi contribuisce significativamente alla letteratura esistente dimostrando come una combinazione di PGPB, e/o AMF e *Trichoderma* e la loro compatibilità, possa ottimizzare le pratiche agricole per la coltura del pomodoro, offrendo nuove prospettive per la gestione agro-ecologica e più sostenibile delle colture.

Nell'esperimento effettuato in serra in condizioni semi-controllate si è osservato come a 45 giorni, la colonizzazione fungina a livello radicale non era presente nelle piante di controllo, tantomeno in quelle inoculate con *Trichoderma*. Viceversa, utilizzando dei co-inoculi di *Trichoderma* in combinazione con microrganismi quali *Funneliformis mosseae* (FM) o il MIX di funghi micorrizici arbuscolari (AMF MIX), la frequenza (F%) e il grado (M%) di colonizzazione rimaneva simile tra i trattamenti. Allo stesso modo è stata influenzata l'abbondanza degli arbuscoli (A%) con valori simili tra le piante inoculate con questi funghi; tuttavia, sia per quanto riguarda F%, M% che A% diminuivano nelle piante inoculate con *F. mosseae* in presenza o di *T. asperellum* (T2) o di *T. polysporum* (T3).

Nel secondo campionamento condotto a 100 giorni, non è stata osservata micorrizzazione nelle piante di controllo né in quelle inoculate con *Trichoderma*, similmente a quanto avvenuto nel primo campionamento. Tuttavia, rispetto al primo campionamento, si sono osservati livelli di colonizzazione fungina significativamente diversi a seconda che le piante fossero inoculate con la coltura pura di *F. mosseae*, oppure con il mix di AMF, sottolineando come inoculi diversi possano comportarsi diversamente nei confronti della stessa pianta, modificando la loro performance di colonizzazione anche in risposta al passare del tempo e ai diversi stadi

fenologici della pianta, coerentemente con quanto osservato da Bueno de Mesquita et al. (2018). In questo caso è stata la miscela di funghi micorrizici (AMF MIX) che ha dato i migliori risultati a 100 GDT. Questa differenza significativa potrebbe essere dovuta anche al fatto che nell'inoculo misto sono presenti generi e specie di funghi diversi che possono rispondere diversamente alle condizioni di crescita in cui si trova la pianta mantenendo più stabile la simbiosi rispetto all'utilizzo di una singola specie fungina. In alcuni casi è stato osservato che nella fase finale di crescita, le piante hanno meno fotosintati disponibili, che vengono prioritariamente utilizzati per la crescita vegetativa piuttosto che per la micorrizzazione, risultando in una diminuzione della colonizzazione fungina (Zhao et al., 2022). L'efficienza della simbiosi dipende inoltre dalla compatibilità genetica tra il fungo e la pianta (Desai et al., 2016).

Nel nostro lavoro la produzione di biomassa aerea e radicale presentava valori diversi nei diversi trattamenti, sebbene le differenze riscontrate non fossero sempre significative, in particolare rispetto alle piante di controllo. Come detto in precedenza, l'uso di microrganismi benefici del suolo può avere effetti discordanti (positivi, negativi o neutri) sulla produzione di biomassa (Shivanna et al., 1994). Sebbene l'impatto diretto dei biostimolanti sulla biomassa possa sembrare limitato, la loro applicazione ha il potenziale di ottimizzare le condizioni di crescita e migliorare i risultati complessivi (Shahrajabian et al., 2023).

Le diverse combinazioni di microrganismi possono produrre effetti variabili sulla crescita delle piante e sulla produzione di biomassa, pertanto, la variabilità tra le piante e i microrganismi e le loro combinazioni (Mannino, 2023) possono risultare più efficaci in determinati contesti o in fasi specifiche della crescita, come ad esempio *F. mosseae* inoculato in singolo nel primo campionamento ha aumentato il peso fresco del fusto delle piante di pomodoro, mentre altre specie potrebbero avere effetti meno pronunciati. Tuttavia, si sono potute notare delle differenze tra il primo e il secondo campionamento, a 45 GDT la produzione di biomassa epigea e ipogea era maggiore rispetto alle piante del secondo campionamento. Questa variazione è spiegata

dalla fase fenologica della pianta poichè nelle prime fasi del ciclo di vita le piante hanno a disposizione maggiori riserve energetiche, favorendo così una più efficace instaurazione delle simbiosi. Di conseguenza, è normale riscontrare una produzione di biomassa più elevata nelle prime fasi di crescita quando le piante sono più capaci di supportare e trarre beneficio delle simbiosi (Monder et al., 2021; Quijia et al., 2024). Nonostante ci fossero delle differenze tra i trattamenti, quest'ultime non erano significative rispetto al controllo.

In questo studio sono stati analizzati anche i pigmenti fogliari, in particolare le clorofille, ed è stato visto come diverse combinazioni di microrganismi abbiano influenzato la concentrazione di quest'ultime sia nel primo che nel secondo campionamento. A 45 GDT si è registrato un rapporto tra la concentrazione di clorofilla *a* e *b* più elevato nelle piante inoculate con *T. asperellum* (T2) in singolo o in presenza di AMF MIX rispetto alle piante di controllo. Tuttavia, prese singolarmente le concentrazioni di entrambe le tipologie di clorofille, erano diminuite rispetto alle piante di controllo, probabilmente per una questione di compatibilità diversa tra i microrganismi utilizzati.

Invece, a differenza dal primo campionamento, nel secondo a 100 GDT il rapporto tra la concentrazione di clorofilla *a* e *b* nelle piante coinoculate con *F. mosseae* in combinazione con *T. viridae* (T1) e *T. polysporum* (T3) aveva valori significativamente inferiori rispetto al controllo e a tutte le altre piante inoculate con i diversi microrganismi. Tuttavia, vi è stato un aumento della concentrazione di clorofilla *b* in una sola combinazione di microrganismi: *F. mosseae* co-inoculato con *T. polysporum* (T3). A 45 giorni la concentrazione dei carotenoidi era aumentata nelle piante con il mix di funghi micorrizici arbuscolari insieme a *T. viridae* (T1), mentre a 100 giorni era aumentata con nelle piante FM\_T3. Quindi con ciò si dimostra come la diversa fase fenologica della pianta in combinazione con il corretto mix di microrganismi possa anche influenzare la sintesi di pigmenti fogliari (Brelsford et al., 2022).

Dal punto di vista della fotosintesi, è stato considerato il parametro Fv/Fm come indice comunemente utilizzato per misurare lo stato di salute delle piante. In letteratura, è noto che un

valore ottimale di Fv/Fm dovrebbe essere compreso tra 0,7 e 0,8, indicando che il fotosistema II funziona correttamente e la pianta si trova in buone condizioni fisiologiche (Guidi et al., 2019). Nel presente studio, i valori rilevati erano generalmente in linea con questi parametri, suggerendo che, nella maggior parte dei casi, le piante godevano di una buona efficienza fotosintetica. Tuttavia, in alcuni casi, sono stati registrati valori più bassi, in particolare nelle piante a 45 GDT. Questi valori inferiori possono essere attribuiti a condizioni di stress dovute alle elevate temperature che si sono verificate durante il mese di luglio 2023. È probabile che le piante abbiano sofferto lo stress termico più intensamente in quel periodo, con un impatto negativo sull'efficienza del fotosistema II (Jahan et al., 2021).

Studi recenti confermano che temperature elevate possono infatti ridurre i valori di Fv/Fm, compromettendo il funzionamento del PSII e indicano un probabile stress abiotico, come dimostrato nell'articolo di Bartold e Kluczek (2024). Questa correlazione tra stress termico e riduzione dell'efficienza fotosintetica suggerisce che la gestione delle condizioni ambientali durante le fasi critiche di crescita potrebbe essere fondamentale per mantenere la salute delle piante e ottimizzare la produzione agricola (Cao et al., 2023).

Anche la produttività dei pomodori è stata influenzata dall'uso di biostimolanti, come già detto in precedenza, diverse combinazioni di microrganismi inoculati nelle piante possano produrre effetti differenti che possono variare significativamente a seconda della compatibilità tra i microrganismi e le esigenze fisiologiche della pianta (Prigigallo et al., 2023). In particolare, il nostro studio ha mostrato variazioni che riguardano sia il peso totale dei frutti che il numero degli stessi. Sebbene i risultati complessivi non abbiano evidenziato differenze statisticamente significative rispetto alle piante di controllo, sono però state osservate alcune tendenze rilevanti. Ad esempio, le piante inoculate con *T. asperellum* (T2) e quelle trattate con la miscela totale di microrganismi (MIX TOT) hanno mostrato un incremento nel peso dei frutti. Al contrario, l'inoculazione di *F. mosseae* co-inoculato con *T. polysporum* (T3) ha determinato una riduzione

del peso dei frutti, suggerendo che non tutte le combinazioni di microrganismi portano a un miglioramento della produttività.

Per quanto riguarda il numero di frutti, l'aumento è stato rilevato solo nelle piante trattate con la combinazione di *F. mosseae* e *T. polysporum* (T3), suggerendo che questa specifica combinazione può favorire la fruttificazione, pur avendo un impatto negativo sul peso individuale dei frutti (De Andrade et al., 2023).

Per quanto riguarda la sperimentazione in campo, dai dati analizzati è emerso che, confrontando il campo ASTER con il campo convenzionale, la produttività e la pezzatura dei frutti di pomodoro possono variare significativamente. In particolare, nel nostro studio è stato osservato che, indipendentemente dal trattamento specifico, il peso medio dei frutti nel campo ASTER era superiore rispetto a quello del campo convenzionale. Questo risultato sottolinea l'efficacia dei biostimolanti nel migliorare la qualità e la dimensione dei frutti, dimostrando il potenziale di tali pratiche nella promozione di una produzione più sostenibile e redditizia (Garg et al., 2024).

Ad oggi possiamo affermare che il pomodoro da industria è una delle colture più rilevanti dal punto di vista alimentare, fondamentale per la produzione di salse, passate e concentrati, oltre che per il consumo fresco (Li et al., 2018). La qualità del frutto è cruciale per il successo del processo di trasformazione e dipende da diversi fattori, tra cui il contenuto di zuccheri e l'equilibrio tra acidi organici (Wu et al., 2022).

Oltre al contenuto di zuccheri, l'acidità totale e il pH giocano un ruolo essenziale nel determinare il gusto del pomodoro da industria, il pH del frutto, solitamente compreso tra 4,0 e 4,5, e l'equilibrio tra zuccheri e acidi influenza il sapore finale del frutto (Ahmed et al., 2020).

In questo lavoro, a 100 GDT vi sono stati dei risultati, anche se non significativi, con valori di pH inferiori rispetto al controllo nelle piante inoculate singolarmente con *T. viridae* (T1), *T. asperellum* (T2) e *T. polysporum* (T3) e nelle piante di pomodoro co-inoculate con il mix di funghi e il *T. polysporum* (T3). Un'acidità maggiore conferisce un gusto più fresco e pungente,

mentre un pH più basso, associato a una minore acidità, dona una maggiore percezione di dolcezza. Questo equilibrio è particolarmente importante nei prodotti trasformati, dove il bilanciamento tra dolce e acido è determinante per il gusto e la qualità del prodotto finito (Anthon et al., 2011).

## CONCLUSIONI

In conclusione, l'utilizzo degli MBS nella coltivazione del pomodoro da industria è una strategia agroecologica sostenibile che potrebbe effettivamente affiancarsi alle tecniche di coltivazione attualmente utilizzate. In questo progetto è stato evidenziato l'importante lavoro di selezione delle giuste combinazioni di MBS necessario per poter ottenere dei risultati paragonabili o anche migliori, sia in termini quantitativi che qualitativi, nella produzione del pomodoro. In tale contesto è risultato evidente che la colonizzazione della radice da parte dei funghi micorrizici arbuscolari può essere influenzata positivamente o negativamente dalla presenza di altri microrganismi benefici del suolo, ponendo così l'accento sulla compatibilità tra i microrganismi stessi.

Tale simbiosi ha influenzato la crescita delle piante, sia in termini di biomassa prodotta sia in termini di stato di salute, ed ha evidenziato la possibilità di migliorare effettivamente lo sviluppo e la crescita di una coltura largamente diffusa come il pomodoro.

Un importante aspetto da tenere in considerazione è risultato essere lo stadio fenologico della pianta, che unitamente all'effetto degli MBS, ha influenzato non solo la crescita ma anche la produzione e la qualità dei frutti. Quest'ultimo aspetto è fondamentale per poter ottenere dei prodotti di origine vegetale ad alto valore nutrizionale e nutraceutico, utili alla salute dell'uomo ma al contempo coltivati in maniera sostenibile.

## BIBLIOGRAFIA

- Aasfar A., Bargaz A., Yaakoubi K., Hilali A., Bennis I., Zeroual Y., Meftah Kadmiri I.** (2021). Nitrogen fixing *Azotobacter* species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. *Front. Microbiol* 12: 354.
- Abdullahi I.I., Abdullahi N., Abdu A.M., Ibrahim A.S.** (2016). Proximate, mineral and vitamin analysis of fresh and canned tomato. *Biosci. Biotechnol. Res. Asia*, 13: 1163–1169.
- Abdel-Daim M.M., El-Tawil O.S., Bungau S., Atanasov A.G.** (2019). Applications of antioxidants in metabolic disorders and degenerative diseases: mechanistic approach. *Oxidative Med. Cell. Longev.* 1:1–3.
- Abeles F., Morgan P., Saltveit M.** (1992). Ethylene in plant biology. N. Y.: Academic Press. 35:215- 226.
- Abo-Elyousr K.A.M., Hashem M., Ali E.H.** (2009). Integrated control of cotton root rot disease by mixing fungal biocontrol agents and resistance inducers. *Crop. Prot.* 28: 295–301.
- Adams M., Mortenson L., Chen J.** (1981). Hydrogenase. *Biochim. Biophys. Acta.* 594: 105–176.
- Adalid, A.M., Rosello S., Nuez F.** (2010). Evaluation and selection of tomato accessions (*Solanum* section *Lycopersicon*) for content of lycopene,  $\beta$ -carotene and ascorbic acid. *J. Food Compos. Anal.* 23(6): 613-618.
- Agren G.I., Hyvonen R., Baskaran P.** (2019). Ectomycorrhiza, friend or foe? *Ecosystems.* 22: 1561-1572.
- Ahuja I., Kissen R., Bones A.M.** (2012). Phytoalexins in defence against pathogens. *Trends. Plant Sci.* 17: 73–90.
- Ahmed M.J., Iya I.R., Dogara M.F.** (2020). Proximate, mineral and vitamin content of flesh, blanched and dried tomatoes (*Lycopersicon esculentum*). *Asian Food Sci. J.* 18: 11–18.
- Aid F.** (2019). Plant lipid metabolism. *Lipid Metabolism.* 56: 134-146.
- Al-Ani L.K.T.** (2018). Trichoderma: beneficial role in sustainable agriculture by plant disease management. In: Egamberdieva D., Ahmad P., editors. *Plant Microbiome: stress response.* Springer; Singapore. 5:105–126.
- Ali B., Sabri A.N., Hasnain S.** (2010). Rhizobacterial potential to alter auxin content and growth of *Vigna radiata* (L.). *World J Microbiol. Biotechnol.* 26: 1379–1384.
- Ali M.Y., Sina A.A., Khandker S.S., Neesa L., Tanvir E.M., Kabir A., Khalil M.I., Gan S.H.** (2020). Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their impact on human health and disease: a review. *Foods.* 10(1): 45.
- Ali S., Charles T.C., Glick B.R.** (2014). Amelioration of high salinity stress damage by plant growth-promoting bacterial endophytes that contain ACC deaminase. *Plant Physiol. Biochem.* 80: 160–167.

**Alpert K.B., Grandillo S., Tanksley S.D.** (1995). fw 2.2: a major QTL controlling fruit weight is common to both red- and green-fruited tomato species. *Theor. Appl. Genet.* 91: 994–1000.

**Alshatwi A.A., Al Obaaid M.A., Al Sedairy S.A., Al-Assaf A.H., Zhang J.J., Lei K.Y.** (2010). Tomato powder is more protective than lycopene supplement against lipid peroxidation in rats. *Nutr. Res.* 30: 66–73.

**Al Shaye N., Migdadi H., Charbaji A., Alsayegh S., Daoud S., AL-Anazi W., Alghamdi S.** (2018). Genetic variation among Saudi tomato (*Solanum lycopersicum* L.) landraces studied using SDS-PAGE and SRAP markers. *Saudi J. Biol. Sci.* 25(6): 1007-1015.

**Aluyor E.O., Ori-Jesu M.** (2008). The use of antioxidants in vegetable oils – a review. *Afr. J. Biotechnol.* 7: 4836–4842.

**Álvarez B., Biosca E.G.** (2017). Bacteriophage-based bacterial wilt biocontrol for an environmentally sustainable agriculture. *Front. Plant. Sci.* 8: 1218.

**Ambiente UE.** (2021). Suolo e territorio. [https://ec.europa.eu/environment/soil/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm)

**Amin H.P., Czank C., Raheem S., Zhang Q.Z., Botting N.P., Cassidy A.** (2015). Anthocyanin and their physiologically relevant metabolites alter the expression of IL-6 and VCAM-1 in CD40L and oxidized LDL challenged vascular endothelial cells. *Mol. Nutr. Food Res.* 59: 1095–106.

**Amir H., Karas M., Giat J., Danilenko M., Levy R., Yermiahu T., Sharoni Y.** (1999) Lycopene and 1,25-dihydroxyvitamin D3 cooperate in the inhibition of cell cycle progression and induction of differentiation in HL-60 leukemic cells. *Nutr. Cancer.* 33(1): 105–112.

**Andama J.B., Mujiono K., Hojo Y., Shinya T., Galis I.** (2020). Nonglandular silicified trichomes are essential for rice defence against chewing herbivores. *Plant Cell Environ.* 43 (9): 2019–2032.

**Andersen Ø.M., Jordheim M.** (2014). Basic anthocyanin chemistry and dietary sources. In: Wallace T.C., Giusti M.M., editors. *Anthocyanins in Health and Disease*. Boca Raton, FL: CRC Press; Taylor & Francis Group pp. 13–90.

**Anthon G.E., LeStrange M., Barrett D.M.** (2011). Changes in pH, acids, sugars and other quality parameters during extended vine holding of ripe processing tomatoes. *J. Sci. Food Agric.* 91(7): 1175-81.

**Antoszewski M., Mierek-Adamska A., Dąbrowska G.B.** (2022). The importance of microorganisms for sustainable agriculture - a Review. *Metabolites.* 12(11): 1100.

**Arkipova T., Veselov S., Melentiev A., Martynenko E., Kudoyarova G.** (2005) Ability of bacterium *Bacillus subtilis* to produce cytokinins and to influence the growth and endogenous hormone content of lettuce plants. *Plant Soil.* 272: 201–209.

**Arif I., Batool M., Schenk P.M.** (2020) Plant microbiome engineering: expected benefits for improved crop growth and resilience. *Trends. Biotechnol.* 38: 1385–1396.

**Asokan P., Janakiraman U., Manivasagam T., Thenmozhi A.J.** (2015). Neuroprotective effect of lycopene against MPTP induced experimental Parkinson's disease in mice. *Neurosci. Lett.* 599 :12–19.

**A-Young L., Thomas R., Kimball S., Daniels R., Debra A., Philip R., Susan M., Eichelberger L., Dolan M.** (1998). Nocturnal blood pressure in young patients with insulin-dependent diabetes mellitus: correlation with cardiac function. *J. Ped.* 133(1): 46-50.

**Baas P., Mohan J. E., Markewitz D., Knoepp J.D.** (2014). Assessing heterogeneity in soil nitrogen cycling: A plot-scale approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78: 237–247.

**Babu A.N., Jogaiah S., Ito S., Nagaraj A.K., Tran L.P.** (2015). Improvement of growth, fruit weight and early blight disease protection of tomato plants by rhizosphere bacteria is correlated with their beneficial traits and induced biosynthesis of antioxidant peroxidase and polyphenol oxidase. *Plant Sci.* 231: 62–73.

**Badimon L., Vilahur G., Padro T.** (2010). Nutraceuticals and atherosclerosis: human trials. *Cardiovasc. Ther.* 28(4): 202–215.

**Bai Y., Pim L.** (2007). Domestication and breeding of tomatoes: What have we gained and what can we gain in the future? *Ann. Bot.* 100: 1085–1094.

**Balderas-Ruíz K.A., Gómez-Guerrero C.I., Trujillo-Roldán M.A., Valdez-Cruz N.A., Aranda-Ocampo S., Juárez A.M., Leyva E., Galindo E., Serrano-Carreón L.** (2021). *Bacillus velezensis* 83 increases productivity and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.): pre and postharvest assessment. *Curr. Res. Microb. Sci.* 2: 100076.

**Bakker J.C.** (1991). Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables. Thesis, Agricultural University, Wageningen. 34: 126-129.

**Ballester A.R., Tikunov Y., Molthoff J., Grandillo S., Viquez-Zamora M., de Vos R.,** (2016). Identification of loci affecting accumulation of secondary metabolites in tomato fruit of a *Solanum lycopersicum* × *Solanum chmielewskii* introgression line population. *Front. Plant Sci.* 7: 1428.

**Banerjee M.R., Yesmin L., Vessey J.K., Rai M.** (2005). Plant-growth-promoting rhizobacteria as biofertilizers and biopesticides. In M. Rai (Ed.), *Handbook of microbial biofertilizers*. New York: Food Products Press. 137–181

**Barnawal D., Bharti N., Maji D., Chanotiya C.S., Kalra A.** (2012). 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminase-containing rhizobacteria protect *Ocimum sanctum* plants during waterlogging stress via reduced ethylene generation. *Plant Physiol. Biochem.* 58: 227–235.

**Barahona E., Navazo A., Martínez-Granero F., Zea-Bonilla T., Pérez-Jiménez R.M., Martín M., Rivilla R.** (2011). *Pseudomonas fluorescens* F113 mutant with enhanced competitive colonization ability and improved biocontrol activity against fungal root pathogens. *App. Environ. Microbiol.* 77: 5412–5419.

**Barone D., Cito L., Tommonaro G., Abate A.A., Penon D., De Prisco R., Penon A., Forte I.M., Benedetti E., Cimini A., Indovina P., Nicolaus B., Pentimalli F., Giordano A.** (2018). Antitumoral potential, antioxidant activity and carotenoid content of two Southern Italy tomato cultivars extracts: San Marzano and Corbarino. *J. Cell Physiol.* 233(2): 1266-1277.

**Barringer, S.A.** (2004). Vegetables: tomato processing. In: Smith J.S., Hui Y.H. (Eds.), *Food processing: principles and applications* (1st ed.). Ames, IA: Blackwell Publishing. 56: 235-239.

- Bartold M., Kluczek M.** (2024). Estimating of chlorophyll fluorescence parameter Fv/Fm for plant stress detection at peatlands under Ramsar Convention with Sentinel-2 satellite imagery. *Ecol. Inf.* 81: 1-12.
- Bartucca M.L., Cerri M., Del Buono D., Forni C.** (2022). Use of biostimulants as a new approach for the improvement of phytoremediation performance - a review. *Plants*, 11(15): 1946.
- Bastías A., López-Climent M., Valcárcel M., Rosello S., Gómez-Cadenas A., Casaretto J.A.** (2011). Modulation of organic acids and sugar content in tomato fruits by an abscisic acid-regulated transcription factor. *Physiol. Plant.* 141: 215–226.
- Bates C. J., Lean M. E., Mansoor M.A.** (2004). Nutrient intakes; biochemical and risk indices associated with Type 2 diabetes and glycosylated haemoglobin, in the British National Diet and Nutrition Survey of people aged 65 years and over. *Diabet. Med.* 21: 677–684.
- Bauchet G., Grenier S., Samson N., Segura V., Kende A., Beekwilder J.** (2017). Identification of major loci and genomic regions controlling acid and volatile content in tomato fruit: implications for flavor improvement. *New Phytol.* 215: 624–641.
- Beneduzi A., Ambrosini A., Passaglia L.M.P.** (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genet. Mol. Biol.* 35: 1044-1051.
- Benton-Jones, J.** (2008). *Tomato plant culture in the field, greenhouse, and home garden.* Boca Raton, FL: CRC Press. 67: 157-164.
- Berendsen R.L., Pieterse C.M.J., Bakker, P.A.H.M.** (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends Plant Sci.* 17(8): 478-486.
- Berger A, Boscari A, Puppo A, Brouquisse R.** (2021). Nitrate reductases and hemoglobins control nitrogen-fixing symbiosis by regulating nitric oxide accumulation. *J. Exp. Bot.* 72(3):873-884.
- Bergougnoux V.** (2014). The history of tomato: from domestication to biopharming. *Biotechnol. Adv.* 32(1): 170-189.
- Berta G., Massa N., Gamalero E.** (2015). Use of beneficial soil microorganisms (arbuscular mycorrhizal fungi and rhizospheric bacteria) as plant disease control agents. *Georgophiles.* 75-80.
- Berger B., Baldermann S., Ruppel S.** (2017). The plant growth-promoting bacterium *Kosakonia radicincitans* improves fruit yield and quality of *Solanum lycopersicum*. *J. Sci. Food Agric.* 97(14): 4865-4871.
- Biale J.B.** (1964). Growth, maturation, and senescence in fruits: Recent knowledge on growth regulation and on biological oxidations has been applied to studies with fruits. *Science* 146: 880–888.
- Blando F., Calabriso N., Berland H., Maiorano G., Gerardi C., Carluccio M.A.,** (2018). Radical scavenging and biological activities of representative anthocyanin groupings from pigment-rich fruits and vegetables. *Int. J. Mol. Sci.* 19: 169.

- Boeing H., Bechthold A., Bub A., Ellinger S., Haller D., Kroke A., Watzl B.** (2012). Critical review: vegetables and fruit in the prevention of chronic diseases. *Eur. J. Nutr.* 51, 637-663.
- Bona E., Lingua G., Todeschini V.** (2016). Effect of bioinoculants on the quality of crops. *Bioformulations: For Sustainable Agriculture.* 5: 93-124.
- Bona E., Todeschini V., Cantamessa S., Cesaro P., Copetta A., Lingua G., Gamalero E., Berta G., Massa N.** (2018). Combined bacterial and mycorrhizal inocula improve tomato quality at reduced fertilization. *Sci. Hortic.* 234: 160-165.
- Bonfante P., Genre A.** (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nat. Commun.* 1: 48.
- Bonkowski M., Villenave C., Griffiths B.** (2009). Rhizosphere fauna: the functional and structural diversity of intimate interactions of soil fauna with plant roots. 213-233.
- Boulangier N., Lipsker D.** (2015). Protection contre les piqûres de tiques. *Ann. Dermatol. Venereol.* 142: 245–251.
- Borguini R.G., Torres E.A.F.D.S.** (2009). Tomatoes and tomato products as dietary sources of antioxidants. *Food Rev.* 25: 313–325.
- Botineştean C., Hădărugă N.G., Hădărugă D.I., Jianu I.** (2012). Fatty acids composition by gas chromatography – mass spectrometry (GC-MS) and most important physical-chemical parameters of tomato seed oil. *J. Agroaliment. Process. Technol.* 18: 89–94.
- Bovy A., Schijlen E., Hall R.D.** (2007). Metabolic engineering of flavonoids in tomato (*Solanum lycopersicum*): the potential for metabolomics. *Metabolomics* 3: 399-412.
- Bovy A.G., de Vos R., Kemper M., Schijlen E.G.W.M., Almenar Pertejo M., Muir S.** (2002). High flavonol tomatoes resulting from the heterologous expression of the maize transcription factor genes LC and C1. *Plant Cell.* 14: 2509–2526.
- Brelsford C.C., Trasser M., Paris T., Hartikainen S.M., Robson T.M.** (2022). Understorey light quality affects leaf pigments and leaf phenology in different plant functional types. *Physiol. Plant.* 174(3): e13723.
- Brotman Y., Lisec J., Méret M., Chet I., Willmitzer L., Viterbo A.** (2012). Transcript and metabolite analysis of the *Trichoderma*-induced systemic resistance response to *Pseudomonas syringae* in *Arabidopsis thaliana*. *Microbiology.* 158: 139–146.
- Bruni I., Gentili R., de Mattia F., Cortis P., Rossi G., Labra M.** (2013). A multi-level analysis to evaluate the extinction risk of and conservation strategy for the aquatic fern *Marsilea quadrifolia* L. in Europe. *Aquat. Bot.* 111: 35–42.
- Brunoud G.** (2012). A novel sensor to map auxin response and distribution at high spatio-temporal resolution. *Nature.* 482:103.
- Buee M., De Boer W., Martin F.** (2009) The rhizosphere zoo: an overview of plant-associated communities of microorganisms, including phages, bacteria, archaea, and fungi, and of some of their structuring factors. *Science.* 189-212.

- Bueno de Mesquita C.P., Martínez Del Río C.M., Suding K.N., Schmidt S.K.** (2018) Rapid temporal changes in root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi and fine root endophytes, not dark septate endophytes, track plant activity and environment in an alpine ecosystem. *Mycorrhiza*. 28(8):717-726.
- Bustamante D.E., Calderon M.S., Leiva S., Mendoza J.E., Arce M., Oliva M.** (2021). Three new species of *Trichoderma* in the *Harzianum* and *Longibrachiatum* lineages from Peruvian cacao crop soils based on an integrative approach. *Mycologia* 113: 1056–1072.
- Buttimer C., McAuliffe O., Ross R.P., Hill C., O’Mahony J., Coffey A.** (2017) Bacteriophages and bacterial plant diseases. *Front. Microbiol.* 8: 24-30.
- Buttriss J., Stokes C.S.** (2008) Dietary fibre and health: an overview. *Nutr. Bull.* 33: 186–200.
- Cai F., Chen W., Wei Z., Pang G., Li R., Ran W., Shen Q.** (2015). Colonization of *Trichoderma harzianum* strain SQR-T037 on tomato roots and its relationship to plant growth, nutrient availability and soil microflora. *Plant Soil*, 388:337–350.
- Carillo P., Woo S.L., Comite E., El-Nakhel C., Roupael Y., Fusco G.M., Borzacchiello A., Lanzuise S., Vinale F.** (2020). Application of *Trichoderma harzianum*, 6-pentyl- $\alpha$ -pyrone and plant biopolymer formulations modulate plant metabolism and fruit quality of plum tomatoes. *Plants* 9: 771.
- Carrari F., Fernie A.R.** (2006). Metabolic regulation underlying tomato fruit development. *J. Exp. Bot.* 57: 1883–1897.
- Caseiro M., Ascenso A., Costa A., Creagh-Flynn J., Johnson M., Simões S.** (2020). Lycopene in human health. *LWT.* 127 :109323.
- Cao M., Narayanan M., Shi X., Chen X., Li Z., Ma Y.** (2023). Optimistic contributions of plant growth-promoting bacteria for sustainable agriculture and climate stress alleviation. *Environ. Res.* 217: 114924.
- Causse M., Damidaux R., Rousselle P.** (2007). Traditional and enhanced breeding for quality traits in tomato. In: Razdan MK, Mattoo AK, editors. Genetic improvement of Solanaceous crops. Tomato. Enfield, NH: Sci. Publ. 153–192.
- Chandrasekaran M., Boopathi T., Manivannan P.** (2021). Comprehensive Assessment of ameliorative effects of AMF in alleviating abiotic stress in tomato plants. *J. Fungi (Basel)*. 7(4): 303.
- Chang L., Ramireddy E., Schmölling T.** (2013). Lateral root formation and growth of *Arabidopsis* is redundantly regulated by cytokinin metabolism and signalling genes. *J. Exp. Bot.* 64:5021–5032.
- Chang W.T., Chen Y.C., Jao C.L.** (2007). Antifungal activity and enhancement of plant growth by *Bacillus cereus* grown on shellfish chitin wastes. *Biores. Technol.* 98: 1224–1230.
- Chaverri P., Gazis R., Samuels G.J.** (2011). *Trichoderma amazonicum*, a new endophytic species on *Hevea brasiliensis* and *H. guianensis* from the Amazon basin. *Mycologia*, 103: 139-151.

**Chen C, Bélanger RR, Benhamou N, Paulitz TC.** (1999). Role of salicylic acid in systemic resistance induced by *Pseudomonas* spp. against *Pythium aphanidermatum* in cucumber roots. *Eur. J. Plant Pathol.*, 105:477–486.

**Chen G., Klinkhamer P. G., Escobar-Bravo R., Leiss K. A.** (2018). Type VI glandular trichome density and their derived volatiles are differently induced by jasmonic acid in developing and fully developed tomato leaves: Implications for thrips resistance. *Plant Sci.*, 276: 87–98.

**Cheng H. M., Koutsidis, G., Lodge, J. K., Ashor, A., Siervo, M., & Lara, J.** (2017). Tomato and lycopene supplementation and cardiovascular risk factors: A systematic review and meta-analysis. *Atherosclerosis*, 257: 100-108.

**Cheng H. M., G. Koutsidis J. K., Lodge A. W., Ashor Siervo M., J. Lara.** (2019). Lycopene and tomato and risk of cardiovascular diseases: A systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence. *Crit. Rev. Food Sci. Nutri.* 59 (1): 141–158.

**Cheng X., Ruyter-Spira C., Bouwmeester H.** (2013). The interaction between strigolactones and other plant hormones in the regulation of plant development. *Front Plant Sci.* 4:199.

**Choudhari A.S., Mandave P.C., Deshpande M., Ranjekar P., Prakash O.** (2020). Phytochemicals in cancer treatment: From preclinical studies to clinical practice. *Front. Pharmacol.* 10:1614.

**Chaudhary P , Sharma A , Singh B , Nagpal AK** ( 2018 ). Bioactivity of phytochemicals present in tomatoes *J Food Sci Technol* , 55, pp. 2833 – 2849.

**Chandrasekaran M, Boopathi T, Manivannan P.** (2021). Comprehensive assessment of ameliorative effects of AMF in alleviating abiotic stress in tomato plants. *J. Fungi (Basel)*. 7(4):303.

**Claye S.S., Idouraine A., Weber C.W.** (1996). Extraction and fractionation of insoluble fiber from five fiber sources. *Food Chem.* 57:305–310.

**Clinton S.K., Carvalho L., Bernstein P.S., Muir G.J., Zhao D.Y., Katz N.B.** (1998). Lycopene: chimica, biologia e implicazioni per la salute e le malattie umane. *Nutr. Rev.* 56: 35-51.

**Colla G., Rouphael Y., di Mattia E., El-Nakhel C., Cardarelli M.** (2015). Co-inoculation of *Glomus intraradices* and *Trichoderma atroviride* acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of vegetable crops. *J. Sci. Food Agric.*, 95:1706–1715.

**Cong B., Liu J., Tanksley S.D.** (2002). Natural alleles at a tomato fruit size quantitative trait locus differ by heterochronic regulatory mutations *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA.* *Int. J. Mol. Sci.* 99: 13606– 13611.

**Conti V., Parrotta L., Romi M., Del Duca S., Cai G.** (2023). Tomato biodiversity and drought tolerance: a multilevel review. *Int. J. Mol. Sci.* 24(12):10044.

**Conversa G., Lazzizzera C., Bonasia A., Elia A.** (2013). Yield and phosphorus uptake of a processing tomato crop grown at different phosphorus levels in a calcareous soil as affected by mycorrhizal inoculation under field conditions. *Biol. Fertil. Soils.* 49:691–703.

- Corona Ramírez A, Symanczik S, Gallusser T, Bodenhausen N.** (2023). Quantification of arbuscular mycorrhizal fungi root colonization in wheat, tomato, and leek using absolute qPCR. *Mycorrhiza*. 33(5-6):387-397.
- Cornforth D.M.** (2014). Combinatorial quorum sensing allows bacteria to resolve their social and physical environment. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 111: 4280–4284.
- Craine J.M., Wolkovich E.M., Towne G.E., Kembe S.W.** (2012). Flowering phenology as a functional trait in a tallgrass prairie. *New Phytol.* 193: 673–682.
- Cummings, D.E., and Schwartz, M.W.** (2003). Genetics and pathophysiology of human obesity. *Annu. Rev. Med.* 54: 453–471.
- Contreras-Cornejo, H.A., Macías-Rodríguez, L., Real-Santillán, R.O., Lopez-Carmona, D., García-Gomez, G., Galicia-Gallardo, A.P., Alfaro-Cuervas, R., Gonzalez-Esquivel, C.E., Najera-Rincon, M.B., Adame-Garnica, S.G., Rebollar-Alviter, A., Alvarez-Navarrete, M., Larsen, J.** (2021). In a belowground multitrophic interaction, *Trichoderma harzianum* induces maize root herbivore tolerance against *Phyllophaga vetula*. *Pest. Manag. Sci.* 77: 3952–3963.
- Contreras-Cornejo H. A., Schmoll M., Esquivel-Ayala B.A., Carlos E. González-Esquivel E., Rocha-Ramírez V., Larsen J.** (2024). Mechanisms for plant growth promotion activated by *Trichoderma* in natural and managed terrestrial ecosystems. *Microbiol. Res.* 281: 127621
- Costa J. M., Heuvelink E.** (2005). The tomato crop and industry, in *Tomatoes*. Heuvelink E. (Oxfordshire: CAB International). 1–19.
- Davies J., Hobson G.E.** (1981). The constituents of tomato fruit-the influence of environment, nutrition and genotype. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 15(3):205-280.
- De Andrade L. A., Santos C. H. B., Frezarín E. T., Sales L. R., Rigobelo, E. C.** (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*. 11(4): 1088.
- De Jong M., Wolters-Arts M., Feron R., Mariani, C., Vriezen, W. H.** (2009). The *Solanum lycopersicum* auxin response factor 7 (SlARF7) regulates auxin signaling during tomato fruit set and development. *Plant J.* 57(1): 160-170.
- Deka H., Deka S., Baruah C.** (2015). *Plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and medicinal plants*. N.Y.: Springer. 305–321.
- De Kreij C., Voogt W., Van den Bos A. L., Baas R.** (1997). Voedingsoplossingen voor de teelt van Tomaat in Gesloten Teeltsystemen. Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente. Naaldwijk: Brochure 2:34-47.
- Delzenne N.M., Olivares M., Neyrinck A.M., Beaumont M., Larsen T.M., Benitez-Paez A., Romani-Perez M., Garcia-Campayo V., Bosscher D., Sanz Y.** (2020). Nutritional interest of dietary fiber and prebiotics in obesity: Lessons from the MyNewGut consortium. *Clin. Nutr.* 39:414–424.
- De Rybel B, Mähönen AP, Helariutta Y, Weijers D.** (2016). Plant vascular development: from early specification to differentiation. *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.* 17:30.

**Desai S., Kumar G. P., Bagyaraj D. J., Ashwin R.** (2016). Exploiting PGPR and AMF biodiversity for plant health management. In: Singh D., Singh H., Prabha R. (eds) *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity*. Springer, New Delhi. 89:237-242.

**De Santiago A., Quintero J.M., Avilés M., Delgado A.** (2011) Effect of *Trichoderma asperellum* strain T34 on iron, copper, manganese, and zinc uptake by wheat grown on a calcareous medium. *Plant Soil*. 342:97–104.

**Dick, R.P.** (1992). A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agric. Ecosyst. Environ.* 40: 25-36.

**Ding J., Chen B., Xia X., Mao W., Shi K., Zhou Y., Yu J.** (2013). Cytokinin-Induced Parthenocarpic Fruit Development in Tomato Is Partly Dependent on Enhanced Gibberellin and Auxin Biosynthesis. *PLoS ONE*, 8:70080.

**Diritti degli allevatori UPOV**, Convenzione internazionale per la protezione delle nuove varietà vegetali. 2 dicembre 1961, come riveduto a Ginevra il 10 novembre 1972, il 23 ottobre 1978 e il 19 marzo 1991.

**Ditengou F.A., Müller A., Rosenkranz M., Felten J., Lasok H., van Doorn M.M.** (2015). Volatile signalling by sesquiterpenes from ectomycorrhizal fungi reprogrammes root architecture. *Nat. Commun.* 6: 6279.

**Diouf I. A., Derivot L., Bitton F., Pascual L., Causse M.** (2018). Water deficit and salinity stress reveal many specific qtl for plant growth and fruit quality traits in tomato. *Front. Plant Sci.* 9: 279.

**Dobrzyński J., Wróbel B., Górska E.B.** (2022). Cellulolytic properties of a potentially lignocellulose-degrading *Bacillus* sp. 8E1A strain isolated from bulk soil. *Agronomy* 12: 665.

**Dodd I.C., Zinovkina N.Y., Safronova V.I., Belimov A.A.** (2010). Rhizobacterial mediation of plant hormone status. *Ann. Appl. Biol.* 157:361–379.

**Doganlar S., Frary O.N.U., Tanksley S.D.** (2000). The genetic basis of seed weight variation: tomato as a model system. *Theor. Appl. Genet.* 100: 1267-1273.

**Dorst J.C.E.A.** (1946). Een en twintigste beschrijvende rassenlijst voor landbouwgewassen. Wageningen, Rijkscommissie voor de samenstelling van de rassenlijst voor landbouwgewassen. 221-222.

**Duca D., Lorv J., Patten C., Rose D., Glick B.** (2014). Microbial indole-3-acetic acid and plant growth. *Anton Van Leeuwenhoek.* 106:85–125.

**Dukare A.S., Prasanna R., Chandra Dubey S., Nain L., Chaudhary V., Singh R., Saxena A.K.** (2011). Evaluating novel microbe amended composts as biocontrol agents in tomato. *Crop. Protect.* 30: 436-442.

**Elbadrawy, E.; Sello, A.** (2016). Evaluation of nutritional value and antioxidant activity of tomato peel extracts. *Arab. J. Chem.* 9: 1010- 1018.

**Elango R., Laviano A.** (2017). Protein and amino acids: Key players in modulating health and disease. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* 20: 69–70.

**Emmanuel O.C., Babalola O.O.** (2020). Productivity and quality of horticultural crops through co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting bacteria. *Microbiol Res.* 239: 126569.

**Escobar-Bravo R., Ruijgrok J., Kim H. K., Grosser K., Van Dam N. M., Klinkhamer P. G.** (2018). Light intensity-mediated induction of trichome-associated allelochemicals increases resistance against thrips in tomato. *Plant Cell. Physiol.* 59(12): 2462–2475.

**Erb M., Kliebenstein D.J.** (2020). Plant Secondary Metabolites as Defenses, Regulators, and Primary Metabolites: The Blurred Functional Trichotomy. *Plant Physiol.* 184(1):39-52.

**Etminan, M., Takkouche, B., Caamano-Isorna, F.** (2004). The role of tomato products and lycopene in the prevention of prostate cancer: a meta-analysis of observational studies. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 13(3): 340-345.

**Ezawa T., Cavagnaro T.R., Smith S.E., Smith F.A., Ohtomo R.** (2003). Rapid accumulation of polyphosphate in extraradical hyphae of an arbuscular mycorrhizal fungus as revealed by histochemistry and a polyphosphate kinase/luciferase system. *New Phytol.* 161: 387–392.

**Ezzat S.M., El-Halawany A.M., Hamed A.R., Abdel-Sattar E.A.** (2019). Role Phytochemicals Play in the Activation of Antioxidant Response Elements (AREs) and Phase II Enzymes and Their Relation to Cancer Progression and Prevention. *Stud. Nat. Prod. Chem.* Elsevier; Amsterdam, The Netherlands. 60: 345–369.

**Fàbregas N., Fernie A.R.** (2021). The interface of central metabolism with hormone signaling in plants. *Curr. Biol.* 31(23): 1535-1548.

**Fahad S., Bajwa A.A., Nazir U., Anjum S.A., Farooq A., Zohaib A.** (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Front. Plant Sci.* 8: 1147.

**FAOSTAT.** Food and Agriculture Organization of the United Nations—Food and agriculture data. Disponibile: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

**Farinon B., Picarella M.E., Siligato F., Rea R., Taviani P., Mazzucato A.** (2022). Phenotypic and genotypic diversity of the tomato germplasm from the Lazio Region in Central Italy, with a focus on landrace distinctiveness. *Front Plant Sci.* 13: 931233.

**Farre E.M., Tiessen A., Roessner U., Geigenberger P., Trethewey R.N., Willmitzer L.** (2001). Analysis of the compartmentation of glycolytic intermediates, nucleotides, sugars, organic acids, aminoacids, and sugar alcohols in potato tubers using a nonaqueous fractionation method. *Plant Physiol.* 127:685-700.

**Favati F., Lovelli S., Galgano F., Miccolis V., Di Tommaso T., Candido V.** (2009). Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling. *Sci. Hort.* 122(4):562-571.

**Favier J.C., Ireland-Ripert J., Toque C., Feinberg M.** (1997). Répertoire general des aliments, table de composition. *Mitt. Geb. Lebensm. Hyg.* 88: 209.

**Felföldi Z., Vidican R., Stoian V., Roman I.A., Sestras A.F., Rusu T., Sestras R.E.** (2022). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Fertilization Influence Yield, Growth and Root Colonization of Different Tomato Genotype. *Plants (Basel).* 11(13):1743.

- Ferrie A.M., Maughan A., McGee T.** (2006). Differences in the growth of tomato varieties in relation to the application of potassium. *J. Plant Nutr.* 29(10): 1847-1859.
- Ford E.S., Will J.C., Bowman B.A., Narayan K.M.** (1999). Diabete mellito e carotenoidi sierici: risultati della terza indagine nazionale sulla salute e l'alimentazione. *Am. J. Epidemiol.* 149 :168–176.
- Frampton R.A., Pitman A.R., Fineran P.C.** (2012). Advances in bacteriophage-mediated control of plant pathogens. *Int. J. Microbiol.* 65:134-140.
- Franceschi S., Bidoli E., La Vecchia C., Talamini R., D'Avanzo B., Negri E.** (1994). Tomatoes and risk of digestive-tract cancers. *Int. J. Cancer.* 59:181–184.
- Franceschi S., Parpinel M., La Vecchia C., Favero A., Talamini R., Negri E.** (1998). Role of different types of vegetables and fruit in the prevention of cancer of the colon, rectum, and breast. *Epidemiol.* 9:338–341.
- Frary A., Doganlar S.** (2003). Comparative genetics of crop plant domestication and evolution. *Turk. J. Agric.* 27: 59–69.
- Frary A., Nesbitt T.C., Grandillo S., Van der Knaap E., Cong B., Liu J.P.** (2000). fw2.2: a quantitative trait locus key to evolution of tomato fruit size. *Science.* 289: 85–88.
- Frey-Klett P., Garbaye J., Tarkka M.** (2007). The mycorrhiza helper bacteria revisited. *New Phytol.* 176.1: 22-36.
- Fridman E., Carrari F., Liu Y.S., Fernie A.R., Zamir D.** (2004). Zooming in on a quantitative trait for tomato yield using interspecific introgressions. *Science.* 305(5691):1786-9.
- Friedman M.** (2002). Glicoalcaloidi del pomodoro: ruolo nella pianta e nella dieta. *J. Agric. Food Chem.*, 50: 5751–5780.
- Friedman M.** (2015). Chimica e meccanismi anticancerogeni dei glicoalcaloidi prodotti da melanzane, patate e pomodori. *J. Agric. Food Chem.*, 63, 3323–3337.
- Fuhrman B., Elis A., Aviram M.** (1997). Hypocholesterolemic effect of lycopene and betacarotene is related to suppression of cholesterol synthesis and augmentation of LDL receptor activity in macrophages. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 233(3): 658-662.
- Gage D.J.** (2004). Infection and invasion of roots by symbiotic, nitrogen-fixing rhizobia during nodulation of temperate legumes. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 68: 280–300.
- Gamalero E., Glick B.R.** (2015). Bacterial modulation of plant ethylene levels. *Plant Physiol.* 169: 13.
- Garcia E., Barrett D.M., Nelson P.E.** (2006). Evaluation of processing tomatoes from two consecutive growing seasons: quality attributes, peelability, and yield. *J. Food Process Preserv.* 30: 20–36.
- Garg S., Nain P., Kumar A., Joshi S., Punetha H., Sharma P.K., Siddiqui S., Alshaharni M.O., Algopishi U.B., Mittal A.** (2024). Next generation plant biostimulants & genome

sequencing strategies for sustainable agriculture development. *Front. Microbiol.* 17(15):1439561.

**Gazis R., Chaverri P.** (2010). Diversity of fungal endophytes in leaves and stems of wild rubber trees (*Hevea brasiliensis*) in Perù. *Fungal Ecol.* 240-254.

**Gelvez-Pardo I., Lobo-Berbesi L., Santos-Díaz A.** (2023). Biological Efficacy of Plant Growth-Promoting Bacteria and Arbuscular Mycorrhizae Fungi: Assessments in Laboratory and Greenhouse Conditions. *Curr Protoc.* 3(4):e732.

**Giaquinto G.** (2022). Il Pomodoro. Coltivazione. Coltura e cultura. 2-3. <https://issuu.com/colturaecultura/docs/pomodoro-05-coltivazione>

**Gilgenkrantz S.** (2012). Histoire de la tomate à travers son génome [Story of the tomato through its genome]. *Med. Sci. (Paris).* 28(11): 1000-1002.

**George B., Kaur C., Khurdiya D.S., Kapoor H.C.** (2004). Antioxidants in tomato (*Lycopersium esculentum*) as a function of genotype. *Food Chem.* 84(1): 45-51.

**George S., Tourniaire F., Gautier H., Goupy P., Rock E., Caris-Veyrat C.** (2011). Changes in the contents of carotenoids, phenolic compounds and vitamin C during technical processing and lyophilisation of red and yellow tomatoes. *Food Chem.*, 124(4):1603-1611.

**Gerardi C., Albano C., Calabriso N., Carluccio M., Durante M., Mita G.,** (2018). Techno-functional properties of tomato puree fortified with anthocyanin pigments. *Food Chem.* 240:1184–92.

**Gerz M., Bueno C.G., Ozinga W.A., Zobel M., Moora M.** (2018). Niche differentiation and expansion of plant species are associated with mycorrhizal symbiosis. *J. Ecol.* 106: 254-264.

**Gharbi E., Martínez J.-P., Benahmed H., Lepoint G., Vanpee B., Quinet M.** (2017). Inhibition of ethylene synthesis reduces salt-tolerance in tomato wild relative species *Solanum chilense*. *J. Plant Physiol.* 210: 24–37.

**Giovanetti M., Avio L., Barale R., Boychinova M.M., Mincheva N.H., Yonova P.A.** (2012). Nutraceutical value and safety of tomato fruits produced by mycorrhizal plants. *Br. J. Nutr.* 107:242–251.

**Giovannucci E.** (1999). Tomatoes, tomato-based products, lycopene, and cancer: Review of the epidemiologic literature. *J. Natl. Cancer Inst.* 91:317–331.

**Giovannini L., Palla M., Agnolucci M., Avio L., Sbrana C., Turrini A., Giovannetti M.** (2020). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Associated Microbiota as Plant Biostimulants: Research Strategies for the Selection of the Best Performing Inocula. *Agronomy.* 10:106.

**Giuliani M.M., Gatta G., Cappelli G., Gagliardi A., Donatelli M., Fanchini D., De Nart D., Mongiano G., Bregaglio S.** (2019). Identifying the most promising agronomic adaptation strategies for the tomato growing systems in Southern Italy *via* simulation modeling. *Eur. J. Agron.* 111:125937.

**Glas J.J., Schimmel B.C., Alba J.M., Escobar-Bravo R., Schuurink R.C., Kant M.R.** (2012). Plant glandular trichomes as targets for breeding or engineering of resistance to herbivores. *Int. J. Mol. Sci.* 13 (12): 17077–17103.

- Glick B.R.** (2007). Promotion of plant growth by ACC deaminase-producing soil bacteria. *Eur. J. Plant Pathol.* 119:329-339.
- Glick B.R.** (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica.* 2012:963401.
- Glick B.R.** (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiol Res.* 169:30–39.
- Glick B.R.** (2015). Biocontrol mechanisms. In: *Beneficial plant-bacterial interactions.* Heidelberg: Springer. pp. 139-180.
- Glick B.R.** (2015). *Beneficial plant-bacterial interactions.* N.Y. Springer; Resource acquisition. 29–63.
- Glafirova G., Chatzopoulou P.** (2020). Changes in the contents of carotenoids, phenolic compounds, and vitamin C during technical processing and lyophilisation of red and yellow tomatoes. *Food Chem.* 124(4): 1603-1611.
- Gloria N.F., Soares N., Brand C., Oliveira F.L., Borojevic R., Teodoro A.J.** (2014). Lycopene and beta-carotene induce cell-cycle arrest and apoptosis in human breast cancer cell lines. *Anticancer Res.* 34(3): 1377–1386.
- Gomes E.V., Costa M.D.N., de Paula R.G., Ricci De Azevedo R., da Silva F.L., Noronha E.F., José Ulhoa C., Neves Monteiro V., Elena Cardoza R., Gutiérrez S.** (2015). The ceratoplatanin protein Epl-1 from *Trichoderma harzianum* is involved in mycoparasitism, plant resistance induction and self cell wall protection. *Sci. Rep.* 5: 17998.
- Gonzalez-Cebrino F., Lozano M., Ayuso M.C., Bernalte M.J., Vidal-Aragon M.C., Gonzalez-Gomez D.** (2011). Characterization of traditional tomato varieties grown in organic conditions. *Spanish J. Agr. Res.* 9(2):444-452.
- Goldschmidt E.E.** (2017). *Plant Genetics and Breeding: Genetic Basis of Fruit Quality.* Cambridge Univ. Press. 57:146-158.
- Goldman I.L., Paran I., Zamir D.** (1995). Quantitative trait locus analysis of a recombinant inbred line population derived from a *Lycopersicon esculentum* x *Lycopersicon cheesmanii* cross. *Theor. Appl. Genet.* 90(7-8):925-32.
- Goswami D., Thakker J.N., Dhandhukia P.C., Tejada Moral M.** (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. *Cogent. Food Agric.* 2:1127500.
- Grandillo S., Ku H.M., Tanksley S.D.** (1999.) Identifying loci responsible for natural variation in fruit size and shape in tomato. *Theor. Appl. Genet.* 99: 978–987.
- Grobelak A., Napora A., Kacprzak M.** (2015). Using plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to improve plant growth. *Ecol. Eng.* 84:22–28.
- Gu Y., Ajay S., Sharmila B., Neena S.** (2008). Pathogenic mutations in the glycosylphosphatidylinositol signal peptide of PrP modulate its topology in neuroblastoma cells. *Mol. Cellular Neurosci.* 4(37): 647-656.

- Gu Y., Han J., Jiang C., Zhang Y.B.** (2020). Oxidative stress and autophagy in skin aging. *Ageing Res. Rev.* 59: 101036.
- Guidi L., Lo Piccolo E., Landi M.** (2019). Chlorophyll Fluorescence, Photoinhibition and Abiotic Stress: Does it Make Any Difference the Fact to Be a C3 or C4 Species? *Front Plant Sci.* 10:174.
- Gupta G., Parihar S.S., Ahirwar N.K., Snehi S.K., Singh V.** (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. *J. Microb. Biochem. Technol.* 7: 96–102.
- Haas D., Keel C.** (2003). Regulation of antibiotic production in root-colonizing *Pseudomonas* spp. and relevance for biological control of plant disease. *Annu. Rev. Phytopathol.* 41:117–153.
- Hao L., Zhang Z., Hao B., Diao F., Zhang J., Bao Z.** (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi alter microbiome structure of rhizosphere soil to enhance maize tolerance to La. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 212:111996.
- Harman G.E., Howell C.R., Viterbo A., Chet I., Lorito M.** (2004). *Trichoderma* species opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nat. Rev. Microbiol.* 2:43–56.
- Harman G.E., Herrera-Estrella A., Benjamin A., Matteo L.** (2001). Special issue: *Trichoderma*. *Basic Biol. Biotechnol. Microbiol.* 58: 1-2.
- Harrison M.J.** (2005). Signalling in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Ann. Rev. Microbiol.* 59:19-42.
- Hartmann T.** (2007). From waste products to ecochemicals: fifty years research of plant secondary metabolism. *Phytochemistry.* 68(22-24): 2831-46.
- Hayat R., Ali S., Amara U., Khalid R., Ahmed I.** (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A review. *Ann. Microbiol.* 60: 579-598.
- Hazard C., Johnson D.** (2018). Does genotypic and species diversity of mycorrhizal plants and fungi affect ecosystem function? *New Phytol.* 220: 1122- 1128.
- Hedden P., Thomas S.G.** (2012). Gibberellin biosynthesis and its regulation. *Biochem. J.* 444:11–25.
- Heimpel G.E., Mills N.J.** (2017). *Biological control: ecology and applications.* Cambridge Univ. Press. 36: 257-269.
- Heinonen M.I., Ollilainen V., Linkola E.K., Varo P.T., Koivistoinen P.E.** (1989). Carotenoids in Finnish foods. *J. Agric. Food Chem.* 37:655–659.
- Hempel S., Stein C., Unsicker S.B., Renker C., Auge H., Weisser W.W., Buscot F.** (2009). Specific bottom-up effects of arbuscular mycorrhizal fungi in a plant-herbivore-parasite system. *Oecology,* 160:267-277.
- Hempel S.** (2018). Passengers and drivers of arbuscular mycorrhizal fungal communities at different scales. *New Phytol.* 220(4):952-953.
- Heuvelink E.** (1995). Growth, development and yield of a tomato crop: periodic destructive measurements in a greenhouse. *Sci. Hortic.* 61: 77–99.

- Higashide T.** (2013). Tomatoes: cultivation, varieties and nutrition. N.Y.: Nova Sci. Publ. 128-157.
- Hinsinger P.** (2009). Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. Plant Soil. 117-152.
- Hoagland D.R.** (1944). Lectures on the inorganic nutrition of plants. Waltham; N.Y.: Chronic. Bot. Co. 67: 197-205.
- Hoagland D.R., Arnon D.I.** (1950). The water-culture method for growing plant without soil. Berkeley, CA: College Agric. Univ. of California. 12:176-182.
- Hohmann P., Schlaeppli K., Sessitsch A.** (2020). miCROPe 2019 – priorità di ricerca emergenti verso la produzione di colture assistite da microbi. FEMS Microbiol. Ecol. 96:77-79.
- Holzapfel N., Holzapfel B., Champ S., Feldthusen J., Clements J., Hutmacher D.W.** (2013). The potential role of lycopene for the prevention and therapy of prostate cancer: From molecular mechanisms to clinical evidence. Int. J. Mol. Sci. 14(7): 14620–14646.
- Hogewoning S. W., Douwstra P., Trouwborst G., Van Ieperen W., Harbinson J.** (2010). An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance. J. Exp. Bot. 61: 1267–1276.
- Hu, Z., Lan, S., Zhao, N., Su, N., Xue, Q., Liu, J., Deng, Q., Yang, J., Zhang, M.** (2019) Soft-X-irradiated pollens induce parthenocarpy in watermelon via rapid changes of hormone-signalings and hormonal regulation. Sci. Hortic. (Amsterdam) 250: 317–328.
- Huang J.** (2016). Acyl-homoserine lactone-based quorum sensing and quorum quenching hold promise to determine the performance of biological wastewater treatments: an overview. Chemosphere 157: 137–151.
- Huang Y.X., Yin Y.G., Sanuki A., Fukuda N., Ezura H., Matsukura C.** (2015). Phosphoenolpyruvate carboxykinase (PEPCK) deficiency affects the germination, growth and fruit sugar content in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Plant Physiol. Biochem. 96:417-425.
- Hung H.C., Joshipura K.J., Jiang R., Hu F.B., Hunter D., Smith-Warner S.A., Willett W.C.** (2004). Fruit and vegetable intake and risk of major chronic disease. J. Nat. Cancer Instit. 96(21):1577-1584.
- Ibort P., Molina S., Núñez R., Zamarreño Á.M., García-Mina J.M., Ruiz-Lozano J.M., Orozco-Mosqueda M.D.C., Glick B.R., Aroca R.** (2017). Tomato ethylene sensitivity determines interaction with plant growth-promoting bacteria. Ann. Bot. 120(1):101-122.
- Ikram M., Ali N., Jan G., Iqbal A., Hamayun M., Jan F.G., Lee I.J.** (2019). Trichoderma reesei improved the nutrition status of wheat crop under salt stress. J. Plant Interact. 14(1), 590-602.
- Imran M., Ghorat F., Ul-Haq I., Ur-Rehman H., Aslam F., Heydari M., Shariati M.A., Okuskhanova E., Yessimbekov Z., Thiruvengadam M.** (2020). Lycopene as a natural antioxidant used to prevent human health disorders. Antioxidants. 9:706.

**Innerebner G., Knief C., Vorholt J.A.** (2011). Protection of *Arabidopsis thaliana* against leaf-pathogenic *Pseudomonas syringae* by *Sphingomonas* strains in a controlled model system. *Appl. Environ. Microbiol.* 77:3202–3210.

**Ionete R.E., Dinca O.R., Geana E.I., Costinel D.** (2016). Macro-and microelements as possible markers of quality and authenticity for fruits and derived products. *Prog. Cryog. Isot.* 19:55.

**Ivanova N.N., Khomich L.M., Beketova N.A.** (2018). Tomato juice nutritional profile. *Vopr. Pitan.* 87(2):53-64.

**Istat.** Istituto Nazionale di Statistica. Disponibile: <https://www.istat.it/>

**Jahan MS, Guo S, Sun J, Shu S, Wang Y, El-Yazied AA, Alabdallah NM, Hikal M, Mohamed MHM, Ibrahim MFM, Hasan MM.** (2021). Melatonin-mediated photosynthetic performance of tomato seedlings under high-temperature stress. *Plant. Physiol. Biochem.* 167:309-320.

**Jiang Y., Wang W., Xie Q., Liu N., Liu L., Wang D., Zhang X., Yang C., Chen X., Tang D.** (2017). Plants transfer lipids to sustain colonization by mutualistic mycorrhizal and parasitic fungi. *Science.* 356:1172–1175.

**Joldersma D., Liu Z.** (2018). The making of virgin fruit: The molecular and genetic basis of parthenocarpy. *J. Exp. Bot.*, 69:955–962.

**Jones C.M., Mes P.J., Myers J.R.** (2003). Characterization and inheritance of the Anthocyanin fruit (Aft) tomato. *J. Hered.* 94:449–56.

**Jung S.C., Martinez-Medina A., Lopez-Raez J.A., Pozo M.J.** (2012). Mycorrhiza-induced resistance and priming of plant defenses. *J. Chem. Ecol.* 38:651–664.

**Kamiloglu S., Boyacioglu D., Capanoglu E.** (2013). The effect of food processing on the bioavailability of tomato antioxidants. *J. Berry Res.* 3: 65-77.

**Kanayama Y.** (2017). Sugar metabolism and fruit development in the tomato. *Horti. J.* 86: 417–425.

**Karlova R., Chapman N., David K., Angenent G.C., Seymour G.B., De Maagd R.A.** (2014). Transcriptional control of fleshy fruit development and ripening. *J. Exp. Bot.* 65:4527–4541.

**Kariyat R. R., Smith J. D., Stephenson A. G., De Moraes C. M., Mescher M. C.** (2017). Non-glandular trichomes of *Solanum carolinense* deter feeding by *Manduca sexta* caterpillars and cause damage to the gut peritrophic matrix. *Proc. R. Soc. B: Biol. Sci.* 284(1849), 20162323.

**Karppi J., Laukkanen JA, Sivenius J., Ronkainen K., Kurl S.** (2012). Serum lycopene reduces stroke risk in men. A population-based follow-up study. *Neurology.* 79: 1540-1547.

**Kelebek H., Selli S., Kadiroğlu P., Kola O., Kesen S., Uçar B., Çetiner B.** (2017). Bioactive compounds and antioxidant potential in tomato pastes as affected by hot and cold break process. *Food Chem.* 220: 31–41.

**Khan A.L., Hamayun M., Kim Y.H., Kang S.M., Lee J.H., Lee I.J.** (2011). Gibberellins producing endophytic *Aspergillus fumigatus* sp. LH02 influenced endogenous phytohormonal levels, isoflavonoids production and plant growth in salinity stress. *Process. Biochem.* 46: 440–447.

**Khan M.Y., Haque M.M., Molla A.H., Rahman M.M., Alam M.Z.** (2017). Antioxidant compounds and minerals in tomatoes by *Trichoderma*-enriched biofertilizer and their relationship with the soil environments. *J. Integr. Agric.* 16: 691–703.

**Khomari S., Golshan-Doust S., Seyed-Sharifi R., Davari M.** (2018). Improvement of soybean seedling growth under salinity stress by biopriming of high-vigour seeds with salt-tolerant isolate of *Trichoderma harzianum*. *Crop Hortic. Sci.* 46: 117–132.

**Khosro M.** (2012). Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. *Resour. Environ.* 2: 80–85.

**Kiarie S., J.O. Nyasani, L.S. Gohole, N.K. Maniania, S. Subramanian** (2020). Impact of fungal endophytes on induced resistance to thrips- and aphid-transmitted viruses. *Plants* 416

**Kim J.S., Lee J., Lee C.H., Woo S.Y., Kang H., Seo S.G., Kim S.H.** (2015). Activation of pathogenesis-related genes by the hizobacterium, *Bacillus* sp. JS, which induces systemic resistance in tobacco plants. *Plant Pathol. J.* 31: 195–201.

**Kissoudis C., Sunarti S., van de Wiel C., Visser R.G., van der Linden C.G., Bai Y.** (2016). Responses to combined abiotic and biotic stress in tomato are governed by stress intensity and resistance mechanism. *J. Exp. Bot.* 67(17): 5119-32.

**Kleinert A., Benedito V., Morcillo R., Dames J., Cornejo-Rivas P., Zuniga-Feest A.** (2018). Morphological and symbiotic root modifications for mineral acquisition from nutrient-poor soils. *Soil Biol.* 85–142.

**Kläring H. P., Zude M.** (2009). Sensing of tomato plant response to hypoxia in the root environment. *Sci. Hortic.*, 122: 17–25.

**Klee H. J., Giovannoni J. J.** (2011). Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes. *Annu. Rev. Genet.* 45: 41–59.

**Klee H.J., Resende F.R.M.** (2020). Plant Domestication: Reconstructing the Route to Modern Tomatoes. *Cur. Biol.* 30: 340–361.

**Keymer A., Pimprikar P., Wewer V., Huber C., Brands M., Bucerius S.L., Delaux P.-M., Klingl V., von Röpenack-Lahaye E., Wang T.L.** (2017). Lipid transfer from plants to arbuscular mycorrhiza fungi. *ELife.* 6:29107.

**Knapp S.** (2002). Tobacco to tomatoes: a phylogenetic perspective on fruit diversity in the Solanaceae. *J. Exp. Bot.* 53(377): 2001-2022.

**Kocsy G, Müller M.** (2023). Light-dependent control of metabolism in plants. *Int. J. Mol. Sci.* 24(18): 13861.

**Kortbeek R.W.J., Galland M.D., Muras A., Therezan R., Maia S., Haring M.A., Schuurink R.C., Bleeker P.M.** (2023). Genetic and physiological requirements for high-level sesquiterpene-production in tomato glandular trichomes. *Front. Plant Sci.* 14: 1139274.

**Kulkova I., Dobrzyński J., Kowalczyk P., Belžecki G., Kramkowski K.** (2023). Plant growth promotion using bacillus cereus. *Int. J. Mol. Sci.* 24(11): 9759.

**Kumar A., Bahadur I., Maurya B., Raghuwanshi R., Meena V., Singh D., Dixit J.** (2015). Does a plant growth promoting rhizobacteria enhance agricultural sustainability. *J. Pure. Appl. Microbiol.* 9: 715–724.

**Kumar M., Tomar M., Bhuyan D.J., Punia S., Grasso S., Sá A.G.A., Carciofi B.A.M., Arrutia F., Changan S., Radha L., Singh S., Dhumal S., Senapathy M., Satankar V., Anitha T., Sharma A., Pandiselvam R., Amarowicz R., Mekhemar M.** (2021). Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seed: A review on bioactives and biomedical activities. *Biomed Pharmacother.* 142:112018.

**Kumar, R., Khurana, A., & Sharma, A. K.** (2013). Role of plant hormones and their interplay in development and ripening of fleshy fruits. *J. Exp. Bot.* 65(16): 4561-4575.

**Kumari M., Swarupa P., Kesari K.K., Kumar A.** (2022) Microbial Inoculants as Plant Biostimulants: A Review on Risk Status. *Life (Basel).* 21;13(1):12.

**Larry R., Joanne L.** (2007). Genetic resources of tomato. In: Razdan MK, Mattoo AK, eds. Genetic improvement of solanaceous crops. Tomato. Enfield, NH: Science Publishers. 2

**Latorre B.A., Lillo C., Rioja M.E.** (2001). Eficacia de los tratamientos fungicidas para el control de Botrytis cinerea de la vid en función de la época de aplicación. *Cienc. Inv. Agric.* 28: 61-66.

**Levy J., Bosin E., Feldman B., Giat Y., Miinster A., Danilenko M., Sharoni Y.** (1995). Il licopene è un inibitore più potente della proliferazione delle cellule cancerose umane rispetto all' $\alpha$ -carotene o al  $\beta$ -carotene. *Nutr. Cancer.* 24: 257–266.

**Li F., Hao D., Zhu Q., Yuan K., Braghieri R.K., He L., Luo X., Wei S., Riley W.J., Zeng Y., Chen M.** (2023) Vegetation clumping modulates global photosynthesis through adjusting canopy light environment. *Glob. Chang. Biol.* 29(3):731-746.

**Li S., Chen K., Grierson D.** (2019). A critical evaluation of the role of ethylene and MADS transcription factors in the network controlling fleshy fruit ripening. *New Phytol.* 221: 1724–1741.

**Li T., Yang X., Yu Y.** (2018). Domestication of wild tomato is accelerated by genome editing. *Nat. Biotechnol.* 36: 1160–1163.

**Li X., Xu J.** (2014). Dietary and circulating lycopene and stroke risk: a meta-analysis of prospective studies. *Sci. Rep.* 4: 5031.

**Li Y., Wang H., Zhang Y., Martin C.** (2018). Can the world's favorite fruit, tomato, provide an effective biosynthetic chassis for high-value metabolites? *Plant Cell. Rep.* 37:1443–1450.

**Liskova A., Kubatka P., Samec M., Zubor P., Mlynček M., Bielik T., Samuel S.M., Zulli A., Kwon T.K., Büsselberg D.** (2019). Dietary phytochemicals targeting cancer stem cells. *Molecules.* 24: 899.

**Liso M., Santis D.D., Scarano A., Verna G., Dicarolo M., Galleggiante V., Campiglia P., Mastronardi M., Lippolis A., Vacca M.** (2018). A tomato and bronze-enriched diet influences the gut microbiome under homeostatic and inflammatory conditions. *Nutrients*. 10:1862.

**Liu X., Ding W., Jiang H.** (2017). Engineering microbial cell factories for the production of plant natural products: from design principles to industrial-scale production. *Microbial Cells*. 16: 125–134.

**Liu Y., Zhong Y., Chen H., Wang D., Wang M., Ou J.S., Xia M.** (2017). Retinol-binding protein-dependent cholesterol uptake regulates macrophage foam cell formation and promotes atherosclerosis. *Circulation*. 135: 1339–1354.

**Liu Z., Ren Z., Zhang J., Chuang C.-C., Kandaswamy E., Zhou T., Zuo L.** (2018). Role of ROS and nutritional antioxidants in human diseases. *Front. Physiol*. 9: 477.

**Lu G., Chen G., Qi G., Gao Z.** (2006). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and fruit quality of plastic greenhouse *Cucumis sativus* L. *J. Appl. Ecol*. 17: 2352-2356.

**Luckwill L. C.** (1943). The genus *Lycopersicon*: An historical, biological, and taxonomic survey of the wild and cultivated tomatoes. *Aberd. Univ. Stud*. 120: 1- 44.

**Lugtenberg B., Kamilova F.** (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annu. Rev. Microbiol*. 63: 541-556.

**Luo C, Qiu J, Zhang Y, Li M, Liu P.** (2023). Jasmonates coordinate secondary with primary metabolism. *Metabol*.13(9):1008.

**Maffei M. E., Gertsch J., Appendino G.** (2011). Plant volatiles: production, function and pharmacology. *Nat. Prod. Rep*. 28: 1359-1380.

**Maitra S., Brestic M., Bhadra P., Shankar T., Praharaj S., Palai J.B., Shah M.M.R., Berek V., Ondrisik P., Skalický M.** (2022). Bioinoculants-natural biological resources for sustainable plant production. *Microorganisms*. 10: 51.

**Maji, D., Misra, P., Singh, S., Kalra, A.** (2016). Humic acid rich vermicompost promotes plant growth by improving microbial community structure of soil as well as root nodulation and mycorrhizal colonization in the roots of *Pisum sativum*. *Appl. Soil Ecol*. 97:108.

**Mannino G.** (2023). A New Era of Sustainability: Plant Biostimulants. *Int. J. Mol. Sci*. 24(22):16329.

**Marcus R., Coulston A.M.** (1990). *The Pharmacological Basis of Therapeutics*. 10th ed. McGraw-Hill, New York, NY, USA: The vitamin B complex and ascorbic acid. Goodman and Gilman's. 12:56-63.

**Markovits, N., Ben Amotz, A., Levy, Y.** (2009). The effect of tomato-derived lycopene on low carotenoids and enhanced systemic inflammation and oxidation in severe obesity. *IMAJ*. 11(10): 598–601.

**Martí R., Roselló S., Cebolla-Cornejo J.** (2016). Tomato as a source of carotenoids and polyphenols targeted for cancer prevention. *Tumors*. 8: 58.

**Martínez C., Espinosa-Ruiz A., Prat S.** (2016). Gibberellins and plant vegetative growth. *Annu. Plant Rev.* 49: 285–322.

**Matas A.J., Gapper N.E., Chung M.-Y., Giovannoni J.J., Rose J.K.** (2009). Biologia e ingegneria genetica della maturazione della frutta per una migliore qualità e conservabilità. *Curr. Opin. in Biotechnol.* 20:197–203.

**Matsumura Y., Ananthaswamy H.N.** (2004). Effetti tossici delle radiazioni ultraviolette sulla pelle. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 195: 298–308.

**McCue G.A.** (1952). The history of the use of the tomato: An annotated bibliography. *Ann. Missouri Bot. Gdn.* 39: 289-348.

**Mes P.J., Boches P., Myers J.R., Durst R.** (2008). Characterization of tomatoes expressing anthocyanins in the fruit. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 133:262–9.

**Miller R., Owens S.J., Rørslett B.** (2011). Plants and color: flowers and pollination. *Opt. Laser Technol.* 43: 282–294.

**Minguet E.G., Alabadí D., Blázquez M.A.** (2014). Gibberellin implication in plant growth and stress responses. In: Tran L-SP, Pal S, editors. *Phytohormones: a window to metabolism, signaling and biotechnological applications*. N.Y.: Springer. 119–161.

**Miozzi L., Vaira A.M., Catoni M., Fiorilli V., Accotto G.P., Lanfranco L.** (2019). Arbuscular mycorrhizal symbiosis: plant friend or foe in the fight against viruses? *Front. Microbiol.* 10: 1238.

**Miransari M.** (2010). Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stress. *Plant Biol.* 12: 563–569.

**Mishra, M., Kumar, U., Mishra, P. K., Prakash, V.** (2010). Efficiency of plant growth promoting rhizobacteria for the enhancement of *Cicer arietinum* L. growth and germination under salinity. *Adv. Biol. Res. Rennes.* 4: 92-96.

**Monder M.J., Kozakiewicz P., Jankowska A.** (2021). The role of plant origin preparations and phenological stage in anatomy structure changes in the rhizogenesis of rosa "hurdal". *Front. Plant Sci.*12:696998.

**Mounet F., Moing A., Garcia V., Petit J., Maucourt M., Deborde C.** (2009). Gene and metabolite regulatory network analysis of early developing fruit tissues highlights new candidate genes for the control of tomato fruit composition and development. *Plant Physiol.* 149: 1505-1528.

**Muir S.R., Collins G.J., Robinson S., Hughes S., Bovy S., De Vos C.H., Van Tunen A.J., Verhoeven M.E.** (2001). Over expression of petunia chalcone isomerase in tomato results in fruit containing increased levels of flavonols. *Nature Biotechnol.* 19: 470-474.

**Naik B., Kumar V., Rizwanuddin S., Chauhan M., Choudhary M., Gupta A.K., Kumar P., Kumar V., Saris P.E.J., Rather M.A., Bhuyan S., Neog P.R., Mishra S., Rustagi S.** (2023). Genomics, proteomics, and metabolomics approaches to improve abiotic stress tolerance in tomato plant. *Int. J. Mol. Sci.* 24(3):3025.

- Nakashima T., Wada H., Morita S., Erra-Balsells R., Hiraoka K., Nonami H.** (2016). Single-cell metabolite profiling of stalk and glandular cells of intact trichomes with internal electrode capillary pressure probe electrospray ionization mass spectrometry. *Analytical Chem.* 88 (6):3049–3057.
- Nandi M., Selin C., Brawerman G., Fernando W.G.D., de Kievit T.** (2017). Hydrogen cyanide, which contributes to *Pseudomonas chlororaphis* strain PA23 biocontrol, is upregulated in the presence of glycine. *Biol. Control.* 108:47–54.
- Naranjo-Ortiz M.A., Gabaldón T.** (2019). Fungal evolution: diversity, taxonomy and phylogeny of the Fungi. *Biol. Rev.* 94, 2101-2137.
- Nasuelli M., Novello G., Gamalero E., Massa N., Gorrasi S., Sudiro C., Hochart M., Altissimo A., Vuolo F., Bona E.** (2023). PGPB and/or AM Fungi Consortia Affect Tomato Native Rhizosphere Microbiota. *Microorganisms.* 11(8):1891.
- Nelson S.K., Eric B.** (2004). Microbial dynamics and interactions in the spermosphere. *Annu. Rev. Phytol. thol.* 42: 271-309.
- Nelson S.K., Steber C.M.** (2016). Gibberellin hormone signal perception: down-regulating DELLA repressors of plant growth and development. *Annu. Plant Rev.* 49:153–188.
- Nguyen N.H., Bui T.P., Le N.T., Nguyen C.X., Le M.T.T., Dao N.T., Phan Q., Van Le T., To H.M.T., Pham N.B., Chu H.H., Do P.T.** (2023). Disrupting Sc-uORFs of a transcription factor bZIP1 using CRISPR/Cas9 enhances sugar and amino acid contents in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Planta.* 257(3):57.
- Nielsen F.H.** (1984). Ultratrace elements in nutrition. *Annu. Rev. Nutr.* 4:21–41.
- Nogia P., Pati P.K.** (2021) Plant Secondary Metabolite Transporters: Diversity, Functionality, and Their Modulation. *Front. Plant Sci.* 12:758202.
- Nuangmek W., Aiduang W., Kumla J., Lumyong S., Suwannarach N.** (2021). Evaluation of a newly identified endophytic fungus, *Trichoderma phayaoense* for plant growth promotion and biological control of gummy stem blight and wilt of muskmelon. *Front. Microbiol.* 12:410.
- Nzanza B., Marais D., Soundy P.** (2012). Yield and nutrient content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) as influenced by *Trichoderma harzianum* and *Glomus mosseae* inoculation. *Sci. Hortic.* 144:55–59.
- Olumayowa M.O., Lidia N., Dare Asemoloye M., Akinlolu Olalekan A., Olubukola O. B.** (2022). *Trichoderma*: Potential bio-resource for the management of tomato root rot diseases in Africa, *Microbiol. Res.* 257
- Ostlund R.E., Racette S.B., Stenson W.F.** (2003). Inhibition of cholesterol absorption by phytosterol-replete wheat germ compared with phytosterol-depleted wheat germ. *Am. J. Clin. Nutr.* 77:1385–1389.
- Ortas I.** (2010). Effect of mycorrhiza application on plant growth and nutrient uptake in cucumber production under field conditions. *Span J. Agric. Res.* 8:116–122.
- Orozco-Mosqueda M.D.C., Glick B.R., Santoyo G.** (2020). ACC deaminase in plant growth-promoting bacteria (PGPB): An efficient mechanism to counter salt stress in crops. *Microbiol Res.* 235:126439.

- Palozza, P., Catalano A., Simone R.E., Mele M.C., Cittadini A.** (2012) Effect of lycopene and tomato products on cholesterol metabolism. *Ann. Nutr. Metabol.* 61 (2):126–34.
- Panthee D.R., Chen F.** (2010) Genomics of fungal disease resistance in tomato. *Curr. Genom.* 11:30–39.
- Pandey A., Yarzabal L.A.** (2019) Bioprospecting cold-adapted plant growth promoting microorganisms from mountain environments. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 103:643–657.
- Pascale A., Vinale F., Manganiello G., Nigro M., Lanzuise S., Ruocco M., Marra R., Lombardi N., Woo S.L., Lorito M.** (2017) *Trichoderma* and its secondary metabolites improve yield and quality of grapes. *Crop. Prot.* 92:176–181.
- Pastor N., Carlier E., Andrés J., Rosas S.B., Rovera M.** (2012) Characterization of rhizosphere bacteria for control of phytopathogenic fungi of tomato. *J. Environ. Manag.* 95:S332–S337.
- Patten C.L., Glick B.R.** (1996) Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Can. J. Microbiol.* 42:207–220.
- Peitl D.C., Araujo F.A., Gonçalves R.M., Santiago D.C., Sumida C.H., Balbi-Peña M.I.** (2017). Biological control of tomato bacterial spot by saprobe fungi from semi-arid areas of northeastern Brazil Semina. *Ciências Agrárias.* 38:1251–1263.
- Peix A., Mateos P., Rodriguez-Barrueco C., Martinez-Molina E., Velazquez E.** (2001) Growth promotion of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by a strain of *Burkholderia cepacia* under growth chamber conditions. *Soil Biol. Biochem.* 33:1927–1935.
- Pem D., Jeewon R.** (2015) Fruit and Vegetable Intake: Benefits and Progress of Nutrition Education Interventions- Narrative Review Article. *Iran J. Public. Health.* 44(10):1309-21.
- Peralta I. E., Spooner D. M.** (2006) History, origin and early cultivation of tomato (*Solanaceae*). *Genetic Improvement of Solanaceous Crops: Tomato 2:* 1-24.
- Peralta I.E., Spooner DM.** (2007) History, origin and early cultivation of tomato (*Solanaceae*). In: Razdan MK, Mattoo AK, eds. *Genetic improvement of solanaceous crops. Tomato.* Enfield, NH: Sci. Publ. 2:1–27.
- Peralta, I. E., Spooner, DM e Knapp, S.** (2008) Tassonomia dei pomodori selvatici e dei loro parenti (*Solanum* sezioni *lycopersicoides*, *Juglandilolia*, *Lycopersicon*; *Solanaceae*). *Sist. Bot. Monogr.* 84:1-186.
- Pérez-Montaño F.** (2014). Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: from microorganism capacities to crop production. *Microbiol. Res.* 169:325–336.
- Perveen R., Suleria HA., Anjum FM., Butt MS., Pasha I., Ahmad S.** (2015) Chimica dei carotenoidi e dei licopeni del pomodoro (*Solanum lycopersicum*); metabolismo, assorbimento, nutrizione e indicazioni sulla salute correlate: una revisione completa. *Critic. Rev. Food Sci. Nutr.* 55:919–929.
- Pesaresi P., Mizzotti C., Colombo M., Masiero S.** (2014) Genetic regulation and structural changes during tomato fruit development and ripening. *Front. Plant Sci.* 5:124.
- Petrášek J., Friml J.** (2009) Auxin transport routes in plant development. *Development.* 136:2675–2688.

- Piazza L., Picchi V., Cortellino G., Faoro F., Masseroni E., Girotto F.** (2022) Effect of high frequency ultrasound pre-treatment on nutritional and technological properties of tomato paste. *Food Sci. Technol. Int.* 28(2):180-189.
- Pignatti S.** (2019) *Flora d'Italia, Solanum lycopersicum L.* Palombi Editori 3: 509.
- Piscitelli C., Lavorgna M., De Prisco R., Coppola E., Grilli E., Russo C., Isidori M.** (2020) Tomato plants (*Solanum lycopersicum L.*) grown in experimental contaminated soil: Bioconcentration of potentially toxic elements and free radical scavenging evaluation. *PLoS One.*15(8):0237031.
- Prigigallo M.I., Staropoli A., Vinale F., Bubici G.** (2023). Interactions between plant-beneficial microorganisms in a consortium: *Streptomyces microflavus* and *Trichoderma harzianum*. *Microb. Biotechnol.* 16(12):2292-2312.
- Pokluda R., Ragasová L., Jurica M., Kalisz A., Komorowska M., Niemiec M., Sekara A.** (2021) Effects of growth promoting microorganisms on tomato seedlings growing in different media conditions. *PLoS One.*16(11):0259380.
- Polidori M.C., Mecocci P., Stahl W., Parente B., Cecchetti R., Cherubini A., Cao P., Sies H., Senin U.** (2000) Plasma levels of lipophilic antioxidants in very elderly patients with type 2 diabetes. *Diabetes Metab. Res. Rev.* 16:15–19.
- Porcel R., Zamarreño ÁM., García-Mina JM., Aroca R.** (2014) Involvement of plant endogenous ABA in *Bacillus megaterium* PGPR activity in tomato plants. *BMC Plant Biol.* 14:36.
- Porra R. J.** (2002) The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. *Photosynthesis Research* 73:149–156.
- Pott D.M., Osorio S., Vallarino J.G.** (2019). From central to specialized metabolism: an overview of some secondary compounds derived from the primary metabolism for their role in conferring nutritional and organoleptic characteristics to fruit. *Front Plant Sci.* 10:835.
- Posadinu C.M., Rodriguez M., Conte P., Piga A., Attene G.** (2023) Fruit quality and shelf-life of Sardinian tomato (*Solanum lycopersicum L.*) landraces. *PLoS One.* 18(12):0290166.
- Poulton J.L., Bryla D., Koide R.T., Stephenson A.G.** (2002) Mycorrhizal infection and high soil phosphorus improve vegetative growth and the female and male functions in tomato. *New Phytol.* 154:255–264.
- Pozo M.J., Azcón-Aguilar C.** (2007) Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Curr. Opin. Plant Biol.* 10:393–398.
- Przybylska S., Tokarczyk G.** (2022) Lycopene in the prevention of cardiovascular diseases. *Int. J. Mol. Sci.* 23(4):1957.
- Quijia Pillajo J., Chapin L.J., Quiroz-Moreno C.D., Altland J.E., Jones M.L.** (2024). Nutrient availability and plant phenological stage influence the substrate microbiome in container-grown *Impatiens walleriana* 'Xtreme Red'. *BMC Plant Biol.* 24(1):176.
- Quinet M., Angosto T., Yuste-Lisbona F.J., Blanchard-Gros R., Bigot S., Martinez J.P., Lutts S.** (2019). tomato fruit development and metabolism. *Front Plant Sci.* 10:1554.
- Raaijmakers J.M.** (2009). The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. *Plant Soil.* 321(1–2):341–361

- Raaijmakers J.M., Paulitz T.C., Steinberg C., Alabouvette C., Moëgne-Loccoz Y.** (2009). The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. *Plant Soil*. 321(1–2):341–361.
- Raaijmakers J.M., Mazzola M.** (2012). Diversity and natural functions of antibiotics produced by beneficial and plant pathogenic bacteria. *Annu. Rev. Phytopathol.* 50:403–424.
- Radzki W., Gutierrez Mañero F.J., Algar E., Lucas García J.A., García-Villaraco A., Ramos Solano B.** (2013). Bacterial siderophores efficiently provide iron to iron-starved tomato plants in hydroponics culture. *Antonie Van Leeuwenhoek*. 104:321–330.
- Raiola A., Rigano M.M., Calafiore R., Frusciante L., Barone A.** (2014). Enhancement of the health effects of tomato fruit for biofortified foods. *Mediators Inflammation*. 67:230-234.
- Raffo A., Leonardo C., Fogliano V., Ambrosino P., Salucci M., Gennaro L., Bugianesi R., Giuffrida F., Quaglia G.** (2002). Nutritional value of cherry tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Cv. Naomi F1) harvested at different ripening stages. *J. Agric. Food Chem.* 50:6550–6556.
- Ramakrishna A., Ravishankar G.A.** (2011). Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant Signal. Behav.* 6(11):1720-31.
- Rambla J.L., Tikunov Y.M., Monforte A.J., Bovy A.G., Granell A.** (2014). Il paesaggio volatile espanso del frutto del pomodoro. *J. Exp. Bot.* 65: 4613–4623.
- Ramette A., Moëgne-Loccoz Y., Défago G.** (2006). Genetic diversity and biocontrol potential of fluorescent pseudomonads producing phloroglucinols and hydrogen cyanide from Swiss soils naturally suppressive or conducive to *Thielaviopsis basicola*-mediated black root rot of tobacco. *FEMS Microbiol. Ecol.* 55:369–381.
- Rao A.V., Agarwal S.** (2000). Role of antioxidant lycopene in cancer and heart disease. *J. Am. Coll. Nutr.* 19:563–9.
- Ray P., Lakshmanan V., Labbé J. L., Craven K. D.** (2020). Microbe to microbiome: a paradigm shift in the application of microorganisms for sustainable agriculture. *Front. in Microbiol.* 11:622926.
- Renna M., Durante M., Gonnella M., Buttaro D., D’Imperio M., Mita G.** (2018). Quality and Nutritional Evaluation of Regina Tomato, a Traditional Long-Storage Landrace of Puglia (Southern Italy). *Agriculture*. 8: 83.
- Rodríguez H., Fraga R.** (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnol Adv.* 17:319–339.
- Romano I., Venterino V., Pepe O.** (2020). Effectiveness of plant beneficial microbes: Overview of the methodological approaches for the assessment of root colonization and persistence. *Front. Plant Sci.* 11:6.
- Rouphael Y., Colla G.** (2020). Biostimulants in agriculture. *Front. Plant Sci.* 11:40.
- Ruiz-Cisneros M.F., Ornelas-Paz J.J., Olivas-Orozco G.I., Acosta-Muñiz C.H., Sepúlveda-Ahumada D.R., Pérez-Corral D.A., Rios-Velasco C., Salas-Marina M.A., Fernández-Pavía S.P.** (2018). Effect of *Trichoderma* spp. and phytopathogenic fungi on plant growth and tomato fruit quality. *Rev. Mex. Fitopatol.* 36:444–456.

- Ruiz-Lozano J.M., Porcel R., Calvo-Polanco M., Aroca R.** (2018). Improvement of Salt Tolerance in Rice Plants by Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis. *Root Biology, Soil Biology*. Springer International Publishing. 259–280.
- Ruzzi M., Aroca R.** (2015). Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture. *Sci. Hort.* 196:124-134.
- Saewan N., Jimtaisong A.** (2015). Prodotti naturali come fotoprotezione. *J. Cosmet. Dermatol.* 14:47–63.
- Saharan B.S., Nehra V.** (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Sci. Med. Res.* 21:1–30.
- Saini R.K., Rengasamy K.R., Mahomoodally F.M., Keum Y.-S.** (2020). Protective effects of lycopene in cancer, cardiovascular, and neurodegenerative diseases: An update on epidemiological and mechanistic perspectives. *Pharmacol. Res.* 155:104730.
- Sainju U. M., Dris R., Singh B.** (2003). Mineral nutrition of tomato. *J. Food Agric. Environ.* 1: 176-183.
- Sakakibara H.** (2006). Cytokinins: activity, biosynthesis, and translocation. *Annu. Rev. Plant Biol.* 57:431–449.
- Sakemi Y., Sato K., Hara K., Honda M., Shindo K.** (2020). Biological Activities of Z-Lycopenes Contained in Food. *J. Oleo Sci.* 69:1509–1516.
- Saleem M., Arshad M., Hussain S., Bhatti A. S.** (2007). Perspective of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) containing ACC deaminase in stress agriculture. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 34:635-648.
- Salehi B., Sharifi-Rad R., Sharopov F., Namiesnik J., Roointan A., Kamle M., Kumar P., Martins N., Sharifi-Rad J.** (2019). Beneficial effects and potential risks of tomato consumption for human health: An overview. *Nutrition* 62:201–208.
- Samuels G.J.** (1996). Trichoderma: a review of biology and systematics of the genus. *Mycol. Res.* 100:923-935.
- Sánchez P., Castro-Cegrí A., Sierra S., Garrido D., Llamas I., Sampedro I., Palma F.** (2023). The synergy of halotolerant PGPB and mauran mitigates salt stress in tomato (*Solanum lycopersicum*) via osmoprotectants accumulation. *Physiol. Plant.* 175(6):e14111.
- Sandy M., Butler A.** (2009). Microbial iron acquisition: marine and terrestrial siderophores. *Chem Rev.* 109:4580–4595.
- Santoyo G., Guzmán-Guzmán P., Parra-Cota F.I., de los Santos-Villalobos S., del Carmen Orozco-Mosqueda M., Glick B.R.** (2021). Plant growth stimulation by microbial consortia. *Agronomy.* 11:219.
- Saravanakumar K., Fan L., Fu K., Yu C., Wang M., Xia H., Sun J., Li Y., Chen J.** (2016). Cellulase from *Trichoderma harzianum* interacts with roots and triggers induced systemic resistance to foliar disease in maize. *Sci. Rep.* 6:35543.
- Sardaro M. L. S., Marmioli M., Maestri E., Marmioli N.** (2013). Genetic characterization of Italian tomato varieties and their traceability in tomato food products. *Food Sci. Nutr.* 1: 54–62.
- Sarmiento-López L.G., López-Meyer M., Maldonado-Mendoza I.E., Quiroz-Figueroa F.R., Sepúlveda-Jiménez G., Rodríguez-Monroy M.** (2022). Production of Indole-3-Acetic

Acid by *Bacillus Circulans* E9 in a Low-Cost Medium in a Bioreactor. *J. Biosci. Bioeng.* 134:21–28.

**Saxena A.K., Kumar M., Chakdar H., Anuroopa N., Bagyaraj D.J.** (2020). *Bacillus* species in soil as a natural resource for plant health and nutrition. *J. Appl. Microbiol.* 128:1583–1594.

**Scarano A., Butelli E., Santis SD, Cavalcanti E., Hill L., Angelis MD, Giovinazzo G., Chieppa M., Martin C., Santino A.** (2018). Antocianine, flavonoidi e stilbenoidi dietetici combinati alleviano i sintomi della malattia infiammatoria intestinale nei topi. *Front. Nutr.* 4:75.

**Schaller G.E, Bishopp A., Kieber J.J.** (2015). The yin-yang of hormones: cytokinin and auxin interactions in plant development. *Plant Cell.* 27:44–63.

**Schäfer M., Brütting C., Meza-Canales ID., Großkinsky DK., Vankova R., Baldwin IT., Meldau S.** (2015). The role of cis-zeatin-type cytokinins in plant growth regulation and mediating responses to environmental interactions. *J. Exp. Bot.* 66:4873–4884.

**Schuurink R., Tissier A.** (2020). Glandular trichomes: micro-organs with model status? *New Phytol.* 225 (6):2251–2266.

**Schwarz D., Grosch R., Groß W., Hoffmann-Hergarten S.** (2004). Water quality assessment of different reservoir types in relation to nutrient solution use in hydroponics. *Agric. Water Manag.* 71:145–166.

**Schwarz D., Thompson A.J., Kläring H.P.** (2014). Guidelines to use tomato in experiments with a controlled environment. *Front Plant Sci.* 5:625.

**Seguel A., Cornejo P., Ramos A., Von Baer E., Cumming J., Borie F.** (2017). Phosphorus acquisition by three wheat cultivars contrasting in aluminum tolerance growing in an aluminum-rich volcanic soil. *Crop. Pasture Sci.* 68:305–316.

**Semel Y., Nissenbaum J., Menda N., Zinder M., Krieger U., Issman N., Pleban T., Lippman Z., Gur A., Zamir D.** (2006). Overdominant quantitative trait loci for yield and fitness in tomato. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103(35):12981–12986.

**Şesan T.E., Oancea A.O., Ştefan L.M., Mănoiu V.S., Ghiurea M., Răut I., Pomohaci C.M.** (2020). Effects of foliar treatment with a *Trichoderma* plant biostimulant consortium on *Passiflora caerulea* L. yield and quality. *Microorganisms.* 8:123.

**Serrani J.C., Carrera E., Ruiz-Rivero O., Gallego-Giraldo L., Peres L.E.P., García-Martínez J.L.** (2010). Inhibition of auxin transport from the ovary or from the apical shoot induces parthenocarpic fruit-set in tomato mediated by gibberellins. *Plant Physiol.* 153:851–862.

**Serrano-Odriozola I., Soliva-Fortuny R., Hernández-Jover T., Martín-Belloso O.** (2009). Carotenoid and phenolic profile of tomato juices processed by high intensity pulsed electric fields compared with conventional thermal treatments. *Food Chem.* 112:258–266.

**Sessitsch C.C.C.** (2010). Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biol. Biochem.* 42:669–678.

**Shahrajabian M.H., Cheng Q., Sun W.** (2023). Using Bacteria and Fungi as Plant Biostimulants for Sustainable Agricultural Production Systems. *Recent. Pat. Biotechnol.* 17(3):206-244.

- Sharma A., Johri B.N.** (2003). Growth promoting influence of siderophore-producing *Pseudomonas* strains GRP3A and PRS9 in maize (*Zea mays* L.) under iron limiting conditions. *Microbiol. Res.* 158:243–248.
- Sharma S., Kumar V., Tripathi R.B.** (2017). Isolation of phosphate solubilizing microorganism (PSMs) from soil. *J. Microbiol. Biotechnol. Res.* 1:90–95.
- Sharma S.K., Le Maguer M.** (1996). Kinetics of lycopene degradation in tomato pulp solids under different processing and storage conditions. *Food Res. Int.* 29(3-4):309–315.
- Shen, Y.C., Chen, S.L., and Wang, C.K.** (2007). Contribution of tomato phenolics to antioxidation and down-regulation of blood lipids. *J. Agric. Food Chem.* 55:6475-6481.
- Shen X., Hu H., Peng H., Wang W., Zhang X.** (2013). Comparative genomic analysis of four representative plant growth-promoting rhizobacteria in *Pseudomonas*. *BMC Genomics.* 14:1471–2164.
- Shi W., Zhang Y., Chen S., Polle A., Rennenberg H., Luo Z.B.** (2018). Physiological and molecular mechanisms of heavy metal accumulation in nonmycorrhizal versus mycorrhizal plants. *Plant Cell Environ.* 1-18.
- Shinozaki Y., Nicolas P., Fernandez-Pozo N., Ma Q., Evanich D.J., Shi Y.** (2018). High-resolution spatiotemporal transcriptome mapping of tomato fruit development and ripening. *Nat. Commun.* 9:364.
- Shivanna M.B., Meera M.S., Hyakumachi M.** (1994). Sterile fungi from zoysiagrass rhizosphere as plant growth promoters in spring wheat. *Can. J. Microbiol.* 40:637–644.
- Shoresh M., Harman G.E.** (2008). The molecular basis of shoot responses of maize seedlings to *Trichoderma harzianum* T22 inoculation of the root: A proteomic approach. *Plant Physiol.* 147:2147–2163.
- Sies H.** (1991). Oxidative stress: oxidant and antioxidant. Academic Press, London. 5-57.
- Siddiqui I.A., Shaikat S.S., Sheikh I.H., Khan A.** (2006). Role of cyanide production by *Pseudomonas fluorescens* CHA0 in the suppression of root-knot nematode, *Meloidogyne javanica* in tomato. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 22:641–650.
- Siler U., Barella L., Spitzer V., Schnorr J., Lein M., Goralczyk R., Wertz K.** (2004). Lycopene and Vitamin E interfere with autocrine/paracrine loops in the dunning prostate cancer model. *FASEB J.* 18:1019–1021.
- Simpson M.G.** (2010). Diversity and classification of flowering plants: Eudicots. In: *Plant Systematics* (second edition). Academic Press. 12: 345-357.
- Singh M., Walia S., Kaur C., Kumar R., Joshi S.** (2010). Processing characteristics of tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivars. *Indian J. Agric. Sci.* 80:174-176.
- Singh M., Chauhan A., Srivastava D.K., Singh P.K.** (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi promote growth and enhance the accumulation of bioactive compounds in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Biol. Futur.* 75(2):251-257.
- Sirichaiwetchakul S., Sirithorn P., Manakasem Y.** (2011). Arbuscular mycorrhizal fungi on growth, fruit yield, and quality of cherry tomato under glasshouse conditions. *Suranaree J. Sci. Technol.* 18:273–280.
- Skirvin R.M., Perera L.E., Ahangaran S.L., Avendano P.J.** (2006). Re-evaluation of *Trichoderma* species for biological control of plant diseases. *Plant Pathol. J.* 5:20-30.

- Skirvin M.G.** (2010). Diversity and classification of flowering plants: Eudicots. In: *Plant Systematics* (second edition). Academic Press. 12-40.
- Slavin J.L., Lloyd B.** (2012). Health benefits of fruits and vegetables. *Advances in Nutrition*. 3(4):506-516.
- Smith S.E., Smith F.A., Jakobsen I.** (2003). Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. *Plant Physiol*. 133(1):16-20.
- Smith S.E., Smith F.A.** (2011). Roles of arbuscular mycorrhizal in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annu. Rev. Plant Biol*. 62:227-250.
- Smith S.E., Smith F.A.** (2012). Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth. *Mycologia*. 104:1–13.
- Snowden C.J., Thomas B., Baxter C.J., Smith J.A.C., Sweetlove L.J.** (2015). A tonoplast Glu/Asp/GABA exchanger that affects tomato fruit amino acid composition. *Plant J*. 81:651–660.
- Solayman M., Islam A., Paul S., Ali Y., Khalil I., Alam N., Gan S.H.** (2016). Physicochemical properties, minerals, trace elements, and heavy metals in honey of different origins: A comprehensive review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf*. 15:219–233.
- Sofy A.R., Dawoud R.A., Sofy M.R., Mohamed H.I., Hmed A.A., El-Dougdoug N.K.** (2020). Improving regulation of enzymatic and non-enzymatic antioxidants and stress-related gene stimulation in cucumber mosaic cucumovirus-infected cucumber plants treated with glycine betaine, chitosan and combination. *Molecules*. 25:2341.
- Sorrequieta A., Ferraro G., Boggio S.B., Valle E.M.** (2010). Free amino acid production during tomato fruit ripening: a focus on L-glutamate. *Amino Acids*. 38:1523–1532.
- Soumare A., Diedhiou A.G., Thuita M., Hafidi M., Ouhdouch Y., Gopalakrishnan S., Kouisni L.** (2020). Exploiting biological nitrogen fixation: A route towards sustainable agriculture. *Plants*. 9:1011.
- Spaepen S., Vanderleyden J., Remans R.** (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiol. Rev*. 31:425–448.
- Spaepen S., Vanderleyden J.** (2011). Auxin and plant-microbe interactions. *Cold. Spring. Harb. Perspect. Biol*. 3:001438.
- Spatafora J.W., Chang Y., Benny G.L., Lazarus K., Smith M.E., Berbee M.L., Bonito G., Corradi N., Grigoriev I., Gryganskyi A.** (2016). A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia*. 108:1028–1046.
- Srivastava A., Handa A.K.** (2005). Hormonal regulation of tomato fruit development: a molecular perspective. *J. Plant Growth Regul*. 24:67–82.
- Stegelmeier A.A., Rose D.M., Joris B.R., Glick B.R.** (2022). The use of PGPB to promote plant hydroponic growth. *Plants (Basel)*. 11(20):2783.
- Strazzullo, G., De Giulio, A., Tomonaro, G., La Pastina, C., Saturnino, C., Poli, A., Nicolaus, B., and De Prisco, R.** (2007). Attività antiossidante e contenuto di licopene e  $\beta$ -carotene in diverse cultivar di pomodoro (*Lycopersicon esculentum*). *Giornale internazionale delle proprietà alimentari*. 10(2):321–329.

- Story, E.N., Kopec, R.E., Schwartz, S.J., and Harris, G.K.** (2010). An update on the health effects of tomato lycopene. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* 1(1):189–210.
- Suman, S., Spehia, R.S., Sharma, V.** (2015). Humic acid improved efficiency of fertigation and productivity of tomato. *J. Plant Nutr.* 40:439–446.
- Sure B.** (1933). The vitamins in health and disease. *Nat.* 132:732.
- Streletskii R., Astaykina A., Krasnov G., Gorbato V.** (2022). Changes in bacterial and fungal community of soil under treatment of pesticides. *Agronomy.* 12:124.
- Tak N., Bissa G., Gehlot H.S.** (2022) Methods for isolation and characterization of nitrogen-fixing legume-nodulating bacteria. *Methods Mol. Biol.* 2057:119-143.
- Tamasi G., Pardini A., Bonechi C., Donati A., Pessina F., Marcolongo P.** (2019). Characterization of nutraceutical components in tomato pulp, peel, and locular gel. *Eur. Food Res. Technol.* 245: 907–918.
- Tan C., Chen J., Tu T., Chen L., Zou J.** (2024). Lycopene inhibits pyroptosis of endothelial progenitor cells induced by ox-LDL through the AMPK/mTOR/NLRP3 pathway. *Open Med. (Wars).* 19(1):20240973.
- Tan J., Kerr W.L.** (2015). Rheological properties and microstructure of tomato puree subject to continuous high pressure homogenization. *J. Food Eng.* 166: 45–54.
- Tanksley S.D.** (2004). The genetic, developmental, and molecular bases of fruit size and shape variation in tomato. *Plant Cell.* 16: 181-189.
- Tanksley S.D., Grandillo S., Fulton T.M., Zamir D., Eshed Y., Petiard V., Lopez J., Beck-Bunn T.** (1996). Advanced backcross QTL analysis in a cross between an elite processing line of tomato and its wild relative *L. pimpinellifolium*. *Theor. Appl. Genet.* 92(2):213-24.
- Tariq Javeed M., Farooq T., Al-Hazmi A.S., Hussain M.D., Rehman A.U.** (2021). Role of Trichoderma as a biocontrol agent (BCA) of phytoparasitic nematodes and plant growth inducer. *J. Invertebr. Pathol.* 183:107626.
- Thakur P., Bhatnagar A.K.** (2013). Pollination constraints in flowering plants – Human actions undoing over hundred million years of co-evolution and posing an unprecedented threat to biodiversity. *Int. J. Plant Reprod. Biol.* 5: 29–74.
- Tieman D., Zhu G., Resende M.F. Jr, Lin T., Nguyen C., Bies D., Rambla J.L., Beltran K.S., Taylor M., Zhang B., Ikeda H., Liu Z., Fisher J., Zemach I., Monforte A., Zamir D., Granell A., Kirst M., Huang S., Klee H.** (2017). A chemical genetic roadmap to improved tomato flavor. *Science.* 355: 391–394
- Tiepo A.N., Hertel M.F., Rocha S.S.** (2018). Enhanced drought tolerance in seedlings of Neotropical tree species inoculated with plant growth-promoting bacteria. *Plant. Physiol. Biochem.* 130:277–288.
- Tilahun, S., Park, D. S., Taye, A. M., & Jeong, C. S.** (2017). Effect of ripening conditions on the physicochemical and antioxidant properties of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Food Sci. Biotech.* 26: 473-479.
- Tilahun S., Park D.S., Solomon T., Choi H.R., Jeong C.S.** (2019). Maturity stages affect nutritional quality and storability of tomato cultivars. *CYTA J. Food.* 17:87–95.

- Tito A., Carola A., Bimonte M., Barbulova A., Arciello S., Laurentiis F., Monoli I., Hill J., Gibertoni S., Colucci G.** (2011). A tomato stem cell extract, containing antioxidant compounds and metal chelating factors, protects skin cells from heavy metal-induced damage. *Int. J. Cosmet. Sci.* 33:543–552.
- Todeschini V., Ait Lahmidi N., Mazzucco E., Marsano F., Gosetti F., Robotti E., Bona E., Massa N., Bonneau L., Marengo E., Wipf D., Berta G., Lingua G.** (2018). Impact of beneficial microorganisms on strawberry growth, fruit production, nutritional quality, and volatilome. *Front. Plant Sci.* 9:1611.
- Tohge T., Fernie A.R.** (2015). Metabolomics-inspired insights into the genetic, environmental and developmental aspects of the chemical composition and quality of tomato fruit. *Plant Cell. Physiol.* 56: 1681–1696.
- Toor R.K., Savage G.P., and Lister C.E.** (2006). Seasonal variations in the antioxidant composition of greenhouse grown tomatoes. *J. Food Compos. Anal.* 19:1-10.
- Trejo-Solis C., Pedraza-Chaverrí J., Torres-Ramos M., Jiménez-Farfán D., Salgado A.C., Serrano-García N., Osorio-Rico L., Sotelo J.** (2013). Multiple molecular and cellular mechanisms of action of lycopene in cancer inhibition. *Evid. Based Compl. Altern. Med.* 1–17.
- Trouvelot A., Kough J., Gianinazzi-Pearson V.** (1986). Evaluation of VA infection levels in root systems. Research for estimation methods having a functional significance. *Physiol. Genet. Asp. Mycorrhizae.* Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S. (eds), 217–221.
- Tsuda T.** (2012). Dietary anthocyanin-rich plants: biochemical basis and recent progress in health benefits studies. *Mol. Nutr. Food Res.* 56:159–70.
- Turan M., Kıtır N., Alkaya Ü., Günes A., Tüfenkçi Ş., Yıldırım E., Nikerel E.** (2016). Making soil more accessible to plants: the case of plant growth promoting rhizobacteria. *Plant growth. Rijeka: InTech.* 58-72.
- Van Andel T., Vos R.A., Michels E., Stefanaki A.** (2022). Sixteenth-century tomatoes in Europe: who saw them, what they looked like, and where they came from. *PeerJ.* Jan 17;10:e12790.
- Van Der Heijden M.G.A.** (1998). Different arbuscular mycorrhizal fungal species are potential determinants of plant community structure. *Ecology.* 79(6): 2082-2091.
- Van Der Heijden M.G.A.** (2006). Symbiotic bacteria as a determinant of plant community structure and plant productivity in dune grassland. *FEMS Microbiol. Eco.* 56(2): 178-187.
- Van Der Heijden M.G.A., Bardgett R.D., Van Straalen N.M.** (2008). The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters* 11.3: 296-310.
- Van der Knaap E., Tanksley S.D.** (2001). Identification and characterization of a novel locus controlling early fruit development in tomato. *Theor. Appl. Genet.* 103: 353–358.
- Van Elsas J.D., Chiurazzi M., Mallon C.A., Elhottová D., Křišťůfek V., Salles J.F.** (2012). Microbial diversity determines the invasion of soil by a bacterial pathogen. *PNAS* 109:1159–1164.
- Van Gorkom G.N., Klein Wolterink R.G., Van Elssen C.H., Wieten L., Germeraad W.T., Bos G.M.** (2018). Influence of vitamin C on lymphocytes: an overview. *Antioxidants.* 7:41.

- Van Loon L., Bakker P., Pieterse C.** (1998). Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria. *Annu. Rev. Phytopathol.* 36:453–483.
- Van Loon L.C.** (2007). Plant responses to plant growth-promoting rhizobacteria. *Eur. J. Plant Pathol.* 119:243-254.
- Vats S., Bansal R., Rana N., Kumawat S., Bhatt V., Jadhav P., Kale V., Sathe A., Sonah H., Jugdaohsingh R., Sharma T.R., Deshmukh R.** (2022). Unexplored nutritive potential of tomato to combat global malnutrition. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 62(4):1003-1034.
- Vazquez D.V., Pereira da Costa J.H., Godoy F.N.I., Cambiaso V., Rodríguez G.R.** (2022). Genetic basis of the lobedness degree in tomato fruit morphology. *Plant Sci.* 319:111258.
- Vessey J.K.** (2003). Plant growth promotes rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil* 255: 571–586.
- Vorholt J.A.** (2012). Microbial life in the phyllosphere. *Nat. Rev. Microbiol.* 10(12): 828-840.
- Wang D., Seymour G.** (2017). Tomato flavor: lost and found? *Mol. Plant.* 10:782–784
- Wang G., Ren Y., Bai X., Su Y., Han J.** (2022). Contributions of Beneficial Microorganisms in Soil Remediation and Quality Improvement of Medicinal Plants. *Plants (Basel).* 11(23):3200.
- Wang G.L., Que F., Xu Z.S., Wang F., Xiong A.S.** (2015). Exogenous gibberellin altered morphology, anatomic and transcriptional regulatory networks of hormones in carrot root and shoot. *BMC Plant Biol.* 15:290.
- Wang N., Duhita N.,** (2016). Ariizumi T, Ezura H. Involvement of vacuolar processing enzyme SIVPE5 in post-transcriptional process of invertase in sucrose accumulation in tomato. *Plant Physiol. Biochem.* 108:71-78.
- Wang T., Wang Z., Shuna L.I., Guo X., Zhu B.** (2010). Colonization of antagonistic strain DS45-2 against *Verticillium dahliae* in soil and cotton roots. *Cotton. Sci.* 22: 169-174.
- Weaver C.M., Dwyer J., Fulgoni V.L. 3rd, King J.C., Leveille G.A., MacDonald R.S., Ordovas J., Schnakenberg D.** (2014). Processed foods: contributions to nutrition. *Am. J. Clin. Nutr.* 99:1525-1542.
- Weltje L., Simpson P., Gross M., Crane M., Wheeler J.R.** (2013). Comparative acute and chronic sensitivity of fish and amphibians: A critical review of data. *Environ. Toxicol. Chem.* 32:984–994.
- Williams R.J., Spencer J.P., Rice-Evans C.** (2004). Flavonoids: antioxidants or signalling molecules? *Free Radic. Biol. Med.* 36:838–849.
- Wojtkowiak-Gębarowska E.** (2006). Mechanisms of biological control soil-borne plant pathogen by fungus from genus *Trichoderma*. *Adv. Microbiol.* 45:261–273.
- Woo S.L., F. Scala, M. Ruocco, M. Lorito** (2006). The molecular biology of the interactions between *Trichoderma* spp., phytopathogenic fungi, and plants. *Phytopathol.* 96 (2): 181-185.
- Woo S.L., Hermosa R., Lorito M., Monte E.** (2022). *Trichoderma*: a multipurpose, plant beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nat. Rev. Microbiol.* 21: 123-125.
- Wu X., Yu L., Pehrsson P.R.** (2022). Are Processed Tomato Products as Nutritious as Fresh Tomatoes? Scoping Review on the Effects of Industrial Processing on Nutrients and Bioactive Compounds in Tomatoes. *Adv. Nutr.* 13(1):138-151.

- Wu X.** (2014). Antioxidant activities of anthocyanins. In: Wallace TC, Giusti MM, editors. *Anthocyanins in Health and Disease*. Boca Raton, FL: CRC Press; Taylor & Francis Group. 141–64.
- Xianli W., L. Yu, P.R. Pehrsson** (2022). Are Processed Tomato Products as Nutritious as Fresh Tomatoes? Scoping Review on the Effects of Industrial Processing on Nutrients and Bioactive Compounds in Tomatoes. *Adv. Nutr.* 13(1):138-151.
- Yang J., Lan L., Jin Y., Yu N., Wang D., Wang E.** (2022). Mechanisms underlying legume-rhizobium symbioses. *J. Integr. Plant Biol.* 64(2):244-267.
- Yang L., Wen K.S., Ruan X., Zhao Y.X., Wei F., Wang Q.** (2018). Response of Plant Secondary Metabolites to Environmental Factors. *Molecules.* 23(4):762.
- Yang X.B., Fu R.B., Yang Y.F., Hou N., Jing D.W.** (2018). Effects of different fertilization measures on micro-environment characteristics in rhizosphere soil of *Populus 'lulin-1'* seedlings. *Biol. Disaster Sci.* 41: 32e36.
- Yim W., Seshadri S., Kim K., Lee G., Sa T.** (2013). Ethylene emission and PR protein synthesis in ACC deaminase producing *Methylobacterium* spp. inoculated tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) challenged with *Ralstonia solanacearum* under greenhouse conditions. *Plant Physiol. Biochem.* 67:95–104.
- Yin K., Gao C., Qiu J.L.** (2017). Progress and prospects in plant genome editing. *Nat. Plants.* 31(3):17107.
- Yin Y.G., Tominaga T., Iijima Y., Aoki K., Shibata D., Ashihara H., Nishimura S., Ezura H., Matsukura C.** (2010). Metabolic alterations in organic acids and gamma-aminobutyric acid in developing tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruits. *Plant Cell. Physiol.* 51(8):1300-14..
- You Y.H.** (2012). Fungal diversity and plant growth promotion of endophytic fungi from six halophytes in Suncheon Bay. *J. Microbiol. Biotechnol.* 22:1549–1556.
- Yu J.G., Lim J.A., Song Y.R., Heu S., Kim G.H., Koh Y.J., Oh C.S.** (2016). Isolation and characterization of bacteriophages against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* causing bacterial canker disease in kiwifruit. *J. Microbiol. Biotechnol.* 26:385–393.
- Yuling B., Lindhout P.** (2007). Domestication and tomato farming: what have we gained and what can we gain in the future? *Ann. Bot.* 100 (5): 1085–1094.
- Zabel S., Brandt W., Porzel A., Athmer B., Bennewitz S., Schäfer P.** (2021). A single cytochrome P450 oxidase from *Solanum habrochaites* sequentially oxidizes 7-epi-zingiberene to derivatives toxic to whiteflies and various microorganisms. *Plant J.* 105 (5), 1309–1325.
- Zahir Z.A., Ghani U., Naveed M., Nadeem S.M., Asghar H.N.** (2009). Comparative effectiveness of *Pseudomonas* and *Serratia* sp. containing ACC-deaminase for improving growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt-stressed conditions. *Arch. Microbiol.* 191:415–424.
- Zaidi A., Ahmad E., Khan M.S., Saif S., Rizvi A.** (2015). Role of plant growth promoting rhizobacteria in sustainable production of vegetables: current perspective. *Sci. Hortic.* 193:231–239.
- Zhang F., Xu X., Wang G., Wu B., Xiao Y.** (2020). *Medicago sativa* and soil microbiome responses to Trichoderma as a biofertilizer in alkaline-saline soils. *Appl. Soil Ecol.* 153:103573.

- Zhang H., Si X., Ji X., Fan R., Liu J., Chen K., Wang D., Gao C.** (2018). Genome editing of upstream open reading frames enables translational control in plants. *Nat. Biotechnol.* 36(9):894-898.
- Zhang S., Gao P., Tong Y., Norse D., Lu Y., Powlson D.** (2015). Overcoming nitrogen fertilizer over-use through technical and advisory approaches: a case study from Shaanxi Province, Northwest China. *Agric Ecosyst Environ.* 209:89–99.
- Zhang Y., Song H., Wang X., Zhou X., Zhang K., Chen X., Liu J., Han J., Wang A.** (2020). The roles of different types of trichomes in tomato resistance to cold, drought, whiteflies, and botrytis. *Agronomy.* 10: 411.
- Zhao L., Yang P., Li W., Zhao Z., Xia Y.** (2022). First report of *Trichoderma crassum* causing leaf spot on tomato (*Solanum lycopersicum* cv. M82) in Ohio. *Plant Dis.* 34: 167-169.
- Zhao X., Yuan X., Chen S., Meng L., Fu D.** (2018). Role of the tomato TAGL1 gene in regulating fruit metabolites elucidated using RNA sequence and metabolomics analyses. *PLoS One* 89 (13): 145-150.
- Zhao Y., Cartabia A., Lalaymia I., Declerck S.** (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi and production of secondary metabolites in medicinal plants. *Mycorrhiza.* 32(3-4):221-256.
- Zheng J. Hu M.J., Guo Y.P.** (2008). Regulation of photosynthesis by light quality and its mechanism in plants. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao.* 19(7):1619-24.
- Zhu R., Chen B., Bai Y., Miao T., Rui L., Zhang H., Xia B., Li Y., Gao S., Wang X.D.** (2020). Lycopene in protection against obesity and diabetes: A mechanistic review. *Pharmacol. Res.* 159:104966.
- Zilli J.É., Ribeiro K.G., Campo R.J., Hungria M.** (2009). Influence of fungicide seed treatment on soybean nodulation and grain yield. *Rev. Bras. Cienc. Solo.* 33:917–923.
- Zsögön A., Cermak T., Dan V., Peres L.E.P.** (2017). Genome editing as a tool for obtaining crop ideotype and de novo domestication of wild relatives: case study in tomato. *Plant Sci. Int. J. Exp. Plant Biol.* 256:120–130.
- Zugravu C.A., Parvu M., Patrascu D., Stoian A.** (2009). Correlations between lead and cadmium pollution of honey and environmental heavy metal presence in two Romanian counties. *Bull. UASVM Agric.* 66:230–233.

## RINGRAZIAMENTI

Un sincero ringraziamento va alla mia tutor, la professoressa Valeria Todeschini, per i preziosi consigli e le competenze condivise lungo questo percorso. Desidero inoltre esprimere la mia gratitudine al dottor Flavio Anastasia per la sua costante disponibilità e avermi aiutato durante il mio periodo di tirocinio.

Un enorme grazie va a tutte le mie compagne di corso che sono entrate nel mio cuore e spero che non ne usciranno mai nonostante la distanza, Chiara, Ilaria, La Grigo ma soprattutto Virgi, a lei devo dei ringraziamenti speciali. Vorrei ringraziarla per essere entrata nella mia vita e per essere diventata importante per me in così poco tempo, grazie per esserci stata nei periodi di crisi più totale per gli esami, di avermi aiutata, spronata a dare sempre il massimo e reso le giornate in università molto più leggere e divertenti. Senza di te non sarebbe stato lo stesso questo percorso.

Ovviamente devo ringraziare Letizia, mia sorella, anche se non di sangue, entrambe sappiamo che è solo quello a non definirci tale. Grazie per essere una persona meravigliosa, piena di vita e di trasmetterla anche a me, grazie per essermi stata sempre a fianco in tutti questi anni, per avermi consolato e detto sempre una parola giusta quando ne avevo più bisogno.

Poi c'è lui, Davide, il mio polpetto, insieme siamo una squadra stupenda, anche se non perfetta. Vorrei ringraziarlo per le innumerevoli volte in cui ho pensato di non farcela e lui mi ha convinta del contrario, per tutte le volte che con pazienza mi ha sopportato, supportato e rincuorato dalle mie mille ansie. Grazie per essere stato il fidanzato che ogni ragazza vorrebbe avere al proprio fianco, non vedo l'ora di iniziare questo nuovo capitolo della mia vita e avere te vicino. Infine, grazie per avere un cuore immenso e avermi dato l'onore di farne parte.

Adesso è il turno del mio fratellone, Riccardo, detto anche minghi, grazie per essere uno dei miei punti di riferimento, essere cresciuta con te mi ha insegnato tanto e mi ha resa la persona che sono oggi. Grazie per la possibilità di poter contare sempre su di te, per essere come sei, un tenerone che fa finta di essere un duro ma anche un rompi scatole incredibile. Ti voglio un bene infinito.

In conclusione, ma non perché meno importanti, anzi, i miei genitori, Mommi e Papo. Vorrei ringraziarli per tutto il loro amore incondizionato, per avermi dato la forza di affrontare tutto. Grazie per avermi sostenuto in ogni momento, per aver creduto in me e spinto a dare sempre il meglio. Grazie per avermi insegnato l'importanza della perseveranza e della determinazione, grazie per tutti i sacrifici che avete fatto negli anni per la nostra famiglia.

Grazie per essere stati i miei angeli custodi e avermi permesso di realizzare i miei sogni.

Ringrazio anche me stessa questa volta, per aver tenuto testa a ogni situazione, per non aver mollato e avercela fatta.

Con infinita riconoscenza e affetto,

Giulia.

