



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE, ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

LE CONSOCIAZIONI FRUMENTO DURO-  
FAVINO E AVENA NUDA-VECCIA COMUNE:  
CONFRONTO CON LE RISPETTIVE COLTURE  
PURE

*Durum wheat-faba bean and oat-common vetch intercropping:  
comparison with the respective sole cropping*

TIPO TESI: sperimentale

Studente:  
PAOLO ANGELOMÈ

Relatore:  
PROF. STEFANO TAVOLETTI

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Alla mia famiglia  
e a chi mi vuole bene

# SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE .....	8
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI .....	9
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI .....	10
1.1 Che cosa sono le consociazioni.....	10
1.2 La consociazione tra cereali e leguminose.....	15
1.2.1 La consociazione tra il frumento e il favino .....	19
1.2.2 La consociazione tra l'avena e la veccia comune .....	23
1.3 La consociazione tra altri gruppi di specie agrarie.....	26
1.3.1 Consociazioni in cui è presente una graminacea .....	26
1.3.2 Consociazioni in cui è presente una leguminosa .....	31
1.3.3 Consociazioni in cui è presente almeno una specie orticola.....	38
1.4 Vantaggi e svantaggi delle consociazioni .....	40
1.4.1 Miglioramento dell'efficienza d'uso delle risorse ed incremento della resa .....	46
1.4.2 Azoto.....	46
1.4.3 Fosforo e potassio .....	47
1.4.4 Capacità di radicazione .....	48
1.4.5 Copertura del suolo .....	48
1.4.6 Efficienza nell'utilizzo dell'acqua .....	48
1.4.7 Parassiti e malattie .....	49
1.4.8 Popolazione delle erbe spontanee .....	49
1.4.9 Assorbimento aumentato dei metalli pesanti .....	50
1.4.10 La consociazione per la produzione di cibo fresco sulle future colonie marziane .....	52
1.5 La consociazione per un'agricoltura sostenibile .....	54
1.6 Confronto tra coltura pura e la consociazione.....	58
1.7 Scopo della tesi .....	62
CAPITOLO 1 MATERIALI E METODI .....	63

1.1 Descrizione delle cultivar.....	65
1.1.1 Cultivar di frumento duro .....	65
1.1.2 Cultivar di favino .....	67
1.1.3 Cultivar di avena.....	71
1.1.4 Cultivar di veccia comune .....	73
1.2 Disegno sperimentale.....	76
1.3 Analisi statistica dei dati .....	78
1.3.1 ANOVA frumento duro .....	79
1.3.2 ANOVA favino.....	79
1.3.3 Avena-veccia comune.....	80
1.3.4 LER.....	80
CAPITOLO 2 RISULTATI E DISCUSSIONE.....	82
2.1 Frumento duro: produzione di granella.....	82
2.2 Favino: produzione di seme .....	84
2.3 Consociazione frumento duro-favino: LER.....	86
2.4 Frumento duro: analisi subplot .....	87
2.5 Favino: analisi subplot .....	91
2.6 Consociazione avena-veccia comune.....	95
2.7 Avena-veccia comune: analisi subplot.....	97
CONCLUSIONI .....	101
BIBLIOGRAFIA .....	102
SITOGRAFIA .....	123

## ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1-1. Piano di rotazione triennale .....	65
Tabella 1-2. Piano delle rotazioni (18 parcelle per blocco, CHTL = Chiaro di Torre Lama, PR69 = Prothabat69).....	77
Tabella 2-1. Risultati dell'ANOVA relativa alla produzione di granella di frumento duro (gl = gradi di libertà, SS = somma dei quadrati (devianza), MS = varianza, F = test F di Fisher, Sign. = significatività del test F, ns = non significativo, * = P<0,05, ** = P<0,01, *** = P<0,001).....	82
Tabella 2-2. Confronti tra le medie relative alla produzione di granella di frumento duro eseguiti utilizzando il test HSD di Fisher.....	83
Tabella 2-3. Confronti tra le medie relative alla produzione di granella di frumento duro eseguiti utilizzando il test T di Student.....	83
Tabella 2-4. Confronti tra le medie relative alla produzione di granella di frumento duro eseguiti utilizzando il test HSD di Fisher.....	83
Tabella 2-5. Risultati dell'ANOVA relativa alla produzione di seme di favino (gl = gradi di libertà, SS = somma dei quadrati (devianza), MS = varianza, F = test F di Fisher, Sign. = significatività del test F, ns = non significativo, * = P<0,05, ** = P<0,01, *** = P<0,001). 85	85
Tabella 2-6. Confronti tra le medie relative alla produzione di seme di favino eseguiti utilizzando il test HSD di Fisher.....	85
Tabella 2-7. Confronti tra le medie relative alla produzione di seme di favino eseguiti utilizzando il test T di Student.....	85
Tabella 2-8. Confronti tra le medie relative alla produzione di seme di favino eseguiti utilizzando il test HSD di Fisher.....	86
Tabella 2-9. Risultati relativi al LER (CHTL = Chiaro di Torre Lama, Pr69 = Prothabat69, LER <sub>fd</sub> = LER relativo al frumento duro, LER <sub>fb</sub> = LER relativo al favino, LER <sub>tot</sub> = LER totale).....	87
Tabella 2-10. Risultati dell'ANOVA relativa ai dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m <sup>2</sup> , altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa).	

Significatività statistica del test F di Fisher: ns = non significativo, \* =  $P < 0,05$ , \*\* =  $P < 0,01$ , \*\*\* =  $P < 0,001$  ..... 89

Tabella 2-11. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD con  $P < 0,05$ ) relativi alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per  $m^2$ , altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa) ..... 89

Tabella 2-12. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD) relativi alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per  $m^2$ , altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa) ..... 90

Tabella 2-13. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD) relativi alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per  $m^2$ , altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa) ..... 90

Tabella 2-14. Risultati dell'ANOVA relativa ai dati rilevati mediante subplot: numero di piante per  $m^2$ , altezza media, numero di steli per pianta, numero di legumi per pianta, produzione di seme (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso). Significatività statistica del test F di Fisher: ns = non significativo, \* =  $P < 0,05$ , \*\* =  $P < 0,01$ , \*\*\* =  $P < 0,001$  ..... 93

Tabella 2-15. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD con  $P < 0,05$ ) relative alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per  $m^2$ , altezza media, numero di steli per pianta, numero di legumi per pianta, produzione di seme (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso) ..... 93

Tabella 2-16. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD) relativi alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per  $m^2$ , altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa) ..... 94

Tabella 2-17. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD) relativi alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di

piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa) ..... 94

Tabella 2-18. Risultati dell'ANOVA relativa alla produzione (Mg·ha<sup>-1</sup>) di granella (avena) e di seme (veccia comune). Significatività statistica del test F di Fisher: ns = non significativo, \* = P<0,05, \*\* = P<0,01, \*\*\* = P<0,001 ..... 96

Tabella 2-19. Produzione (Mg·ha<sup>-1</sup>) di granella (avena nuda) e di seme (veccia comune): confronti tra le medie e LER ..... 96

Tabella 2-20. Risultati dell'ANOVA relativa ai dati rilevati mediante subplot su avena: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di panicoli per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso). Significatività statistica del test F di Fisher: ns = non significativo, \* = P<0,05, \*\* = P<0,01, \*\*\* = P<0,001 ..... 99

Tabella 2-21. Risultati dell'ANOVA relativa ai dati rilevati mediante subplot su veccia comune: numero di piante per m<sup>2</sup>, lunghezza media degli steli, numero di steli per pianta, numero di legumi per pianta, produzione di seme (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso). Significatività statistica del test F di Fisher: ns = non significativo, \* = P<0,05, \*\* = P<0,01, \*\*\* = P<0,001 ..... 99

Tabella 2-22. Risultati dei confronti tra le medie (test T) relative alle variabili utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero medio di steli per pianta, numero di panicoli per pianta, produzione di seme (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso) ..... 100

Tabella 2-23. Risultati dei confronti tra le medie (test T) relative alle variabili utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, lunghezza media degli steli, lunghezza media degli steli per pianta, numero di legumi per pianta, produzione di seme (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso) ..... 100

## ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1. Fotografie delle consociazioni utilizzate nella prova sperimentale. A: Achille-Chiaro di Torre Lama; B: Achille-Prothabat69; C: Maciste-Chiaro di Torre Lama; D: Maciste-Prothabat69; E: Irina-Idice .....	64
Figura 1-2. Spighe di frumento duro cv. Achille .....	66
Figura 1-3. Spighe di frumento duro cv. Maciste .....	67
Figura 1-4. Piante di favino cv. Chiaro di Torre Lama .....	70
Figura 1-5. Piante di favino cv. Prothabat69 .....	71
Figura 1-6. Piante di avena cv. Irina .....	73
Figura 1-7. Pianta di veccia comune cv. Idice .....	76
Figura 1-8. Panoramica del campo sperimentale .....	78
Figura 1-9. Mietitrebbiatrice parcellare durante la raccolta.....	78
Figura 2-1. Produzione di granella di frumento duro: interazione “Cultivar x Sistema Colturale” .....	84
Figura 2-2. Produzione di seme di favino: interazione “Cultivar x Sistema Colturale” ...	86

## ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

FAO	FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS
LER	LAND EQUIVALENT RATIO
RCC	RELATIVE CROWDING COEFFICIENT
LAI	LEAF AREA INDEX
PAC	POLITICA AGRICOLA COMUNITARIA
ET <sub>c</sub>	EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE
ET <sub>a</sub>	EVAPOTRASPIRAZIONE REALE
PGPR	PLANT GROWTH PROMOTING RHIZOBACTERIA
NDF	NEUTRAL DETERGENT FIBRE
ADF	ACID DETERGENT FIBRE
HI	HARVEST INDEX
SDG	SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS
PRIMA	PROGRAM FOR RESEARCH AND INNOVATION IN THE MEDITERRANEAN AREA
ANOVA	ANALYSIS OF VARIANCE
SC	SISTEMA COLTURALE

# INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

## 1.1 Che cosa sono le consociazioni

L'agricoltura conservativa è un modello ecosistemico di coltivazione che permette di conservare e di migliorare la resilienza dei sistemi agricoli e delle risorse naturali e che risulta essere associato all'aumento di produttività dei sistemi agricoli stessi (Kassam, et al., 2016). Secondo la definizione data dalla FAO, l'agricoltura conservativa è una tecnica di coltivazione caratterizzata dalla diminuzione dell'erosione del suolo, dal mantenimento della fertilità del suolo e dalla riduzione degli input produttivi: con ciò, gli input e i servizi sono resi maggiormente disponibili nei confronti dei piccoli agricoltori. Affinché questo possa verificarsi, l'agricoltura conservativa si deve basare su tre principi chiave:

- (i) rotazione delle colture e copertura permanente del suolo;
- (ii) disturbo minimo del suolo;
- (iii) diversificazione delle colture.

Tali principi implicano l'adozione di diverse pratiche agricole come, ad esempio, la non lavorazione, la difesa integrata delle malattie e la copertura del suolo (Bisht, et al., 2016).

La coltura pura, negli ultimi anni, è stata ampiamente utilizzata per la sua facilità di semina, gestione del campo e meccanizzazione e aumentare le rese ma ha privato il suolo di sostanze nutritive limitandone la capacità di supportare una crescita sana delle piante a lungo termine (Wolinska, et al., 2015). Le colture pure, inoltre, hanno limitato la diversità delle specie microbiche presenti nel suolo (Yusuf, et al., 2009), hanno interrotto la stabilità ecologica della comunità microbica (Misra, et al., 2019) e hanno portato alla diffusione di parassiti e malattie (Brooker, et al., 2014). Per superare tali problemi, la consociazione può essere utilizzata come alternativa alla coltura pura (Liao, et al., 2024).

La consociazione delle colture rappresenta un aspetto particolare della pluricoltura e viene definita come la coltivazione contemporanea di due o più specie o cultivar sullo stesso appezzamento di suolo (Giardini, 2003) al fine di promuovere le interazioni tra le colture (Gardarin, et al., 2022) che, necessariamente, non devono essere di antagonismo fra loro da un punto di vista nutrizionale né devono essere presenti degli intralci per quanto riguarda l'esecuzione delle pratiche colturali per ciascuna delle specie o cultivar consociate (Baisi, et

al., 2004). La consociazione (che, talvolta, viene indicata anche come “coltura mista” oppure “coltura consociata”), quindi, è una tecnica agroecologica finalizzata all’ottimizzazione delle risorse e della resa delle colture (Tang, et al., 2024).

Possono essere distinte diverse tipologie di consociazioni:

- (i) consociazione erbacea: consociazione in cui vengono coltivate solamente le specie erbacee (come, ad esempio, il frumento con il favino);
- (ii) consociazione arborea: consociazione in cui vengono consociate solamente le specie arboree (ne è un esempio la vite maritata);
- (iii) consociazione mista: consociazione in cui vengono coltivate le specie erbacee con quelle arboree (come nel caso dell’olivo con il frumento);
- (iv) consociazione a strati o multipiano: consociazione in cui le piante coltivate sviluppano la propria chioma ad altezze diverse o il proprio apparato radicale a profondità diverse (un esempio di questo tipo di consociazione è dato dalla coltivazione sullo stesso appezzamento di piante di taglia bassa come le specie orticole, di piante di taglia media come il pesco e piante di taglia alta come il diospiro);
- (v) consociazione permanente: consociazione in cui le specie presenti svolgono assieme l’intero ciclo;
- (vi) consociazione temporanea: consociazione in cui le specie presenti svolgono assieme solamente una parte del loro ciclo (ne è un esempio la bulatura delle leguminose da prato traseminate nel frumento) (Giardini, 2004).

La consociazione è una pratica agroecologica che fornisce dei vantaggi considerevoli come, ad esempio, l’incremento della biodiversità (in questo modo possono essere riscontrate delle specie che altrimenti non vengono riscontrate negli ambienti dove insiste la monocoltura) (Mousavi & Eskandari, 2011). Molti autori suggeriscono anche che la consociazione possa aumentare la resa delle colture interessate riferita all’unità di superficie e di tempo mediante l’incremento dell’efficienza d’uso delle risorse disponibili e la capacità del controllo della flora spontanea (Boutagayout, et al., 2024) riducendo il rischio di fallimento della coltura (Seran & Brintha, 2010).

Lo scopo principale della consociazione è quello di promuovere sia le interazioni biologiche sia quelle colturali più importanti. L’adozione della consociazione e della lavorazione minima e l’applicazione degli ammendanti organici da parte degli agricoltori incrementano, infatti, la fertilità del suolo e la sua copertura necessaria per la sua protezione. Rispetto a quando vengono coltivate in coltura pura, le specie che vengono consociate

risultano essere meno suscettibili sia ai parassiti sia agli organismi patogeni (Morugan-Coronado, et al., 2020).

I fattori che determinano maggiormente il successo di una consociazione sono lo sviluppo differenziato delle piante, il diverso modello di crescita, la taglia differenziata delle piante e il comportamento delle radici in modo tale che le piante si integrino a vicenda anziché instaurare dei rapporti di competizione (Zhang, et al., 2011).

Negli ultimi anni si è assistito ad una notevole intensificazione colturale che ha determinato una riduzione del ricorso alla consociazione e alla rotazione colturale per far posto all'omosuccessione portando, in questo modo, ad un incremento notevole del ricorso dei diversi input (inclusi gli agrofarmaci) (Baisi, et al., 2004).

Gli effetti positivi della diversificazione delle specie nello spazio possono essere il risultato di due processi principali, vale a dire la facilitazione e la complementarità (Wahbi, et al., 2016). Le specie consociate, inoltre, possono risultare meno competitive per le risorse naturali (specificatamente per l'acqua, i nutrienti e la luce) e possono non esibire degli effetti allelopatici negativi (Zhang, et al., 2021). Più in dettaglio, la scelta delle specie (o delle cultivar) da consociare è un fattore cruciale e deve essere effettuata in funzione delle caratteristiche del suolo e del clima e del sistema di coltivazione (Maitra, et al., 2021).

L'efficienza biologica della consociazione è generalmente maggiore se confrontata a quella della rispettiva coltura pura perché, nel primo caso, gli apparati radicali esplorano un volume maggiore di suolo (Gao, et al., 2010).

La natura delle interazioni tra le componenti e la produttività di una consociazione dipende dalla morfologia, dalla fisiologia, dalla densità e dalla distribuzione spaziale delle componenti in relazione alle caratteristiche dell'ambiente climatico, edafico e biotico in cui le piante crescono: delle interazioni così complesse, generalmente, stanno ad indicare che le piante presenti nella consociazione presentano sia degli aspetti complementari sia degli aspetti di competizione (Anil, et al., 1998). La resa delle colture è un parametro che, spesso, è di primaria importanza nella valutazione delle potenzialità di una consociazione anche se, in alcuni casi, risulta essere controproducente comparare la resa di una coltura consociata con quella di una coltura pura (Mead & Willey, 1980). Per superare tale problematica, risulta essere vantaggioso utilizzare un indicatore di carattere generale per esprimere la resa di una consociazione che è il LER (Land Equivalent Ratio): tale indice viene definito come la superficie relativa necessaria alle colture pure per produrre la medesima quantità di prodotto delle colture consociate (Mead & Willey, 1980). Per calcolare il LER di una consociazione viene utilizzata la seguente formula:

$$LER = L_A + L_B = \frac{Y_A}{S_A} + \frac{Y_B}{S_B}$$

dove  $L_A$  e  $L_B$  sono i LER delle singole colture presenti nella consociazione,  $Y_A$  e  $Y_B$  sono le rese delle singole colture presenti nella consociazione e  $S_A$  e  $S_B$  sono le rese delle rispettive colture pure.

I vantaggi derivanti dell'utilizzo del LER sono:

- (i) fornisce una base standardizzata con cui può essere calcolata la “resa combinata” delle colture presenti nella consociazione: questo significa che, in teoria, i LER possono essere confrontati tra diverse situazioni e tra diverse combinazioni colturali anche se questo presenta svariate problematiche;
- (ii) la comparazione dei LER delle singole colture (vale a dire  $L_A$  e  $L_B$ ) può indicare la presenza della competizione tra le colture;
- (iii) il LER totale può essere preso come indicatore del vantaggio di rendimento competitivo: ad esempio, un LER pari a 1,2 indica che è necessaria il 20% di superficie di suolo in più nelle colture pure per ottenere la medesima resa delle colture consociate (Mead & Willey, 1980).

La scelta di una determinata consociazione è indotta da diverse motivazioni anche se, alcune di queste, sono state più vantaggiose in passato che non al giorno d'oggi:

- (i) miglioramento del prodotto. Tale motivazione per cui vengono adottate le consociazioni è di rilievo nel caso dei prati costituiti da due o più specie al fine di migliorare la qualità del foraggio prodotto: l'introduzione di più essenze pabulari, infatti, può accrescere l'appetibilità del prodotto e la presenza di qualche leguminosa permette di mantenere elevato il contenuto della sostanza secca prodotta. Anche se l'attuale paradigma in materia di praticoltura è diverso rispetto a quello del passato (attualmente prevalgono, infatti, i prati oligofiti su quelli polifiti), la consociazione tra le graminacee e le leguminose conserva tutta la sua validità nel mondo della praticoltura soprattutto perché non comporta una contrazione della produzione. Negli erbai è stata propagandata per lungo tempo la consociazione tra il mais e le specie del genere *Vigna* per incrementare il tenore in proteine del foraggio: la sperimentazione, però, ha dimostrato la sconvenienza di tale consociazione in quanto il mais è notevolmente più vigoroso della leguminosa per cui, per far sopravvivere quest'ultima, è necessario ridurre di molto l'investimento del cereale. Nonostante ciò, la consociazione tra graminacee e leguminose appare più accettabile negli erbai primaverili-estivi: ne sono una prova il Landsberg e il miscuglio di avena-veccia-pisello;

- (ii) incremento della produzione: nel caso in cui le colture pure delle specie  $A$  e  $B$  diano rispettivamente delle produzioni unitarie pari a  $P_a$  e  $P_b$  e una loro consociazione fornisca  $P_c > \frac{P_a+P_b}{2}$ , si ha un vantaggio produttivo della loro coltivazione in consociazione anziché in coltura pura. Tale risultato si ottiene quando la competizione intraspecifica risulta essere inferiore a quella interspecifica oppure nel caso in cui una delle specie favorisca, in qualche modo, l'accrescimento dell'altra: è il caso, ad esempio, della *Dactylis* che usufruisce dell'azoto fissato dei simbionti dell'erba medica, della veccia che si sostiene alle piante di avena, del fagiolo rampicante che si sostiene alle piante di mais, etc. Alcune di queste consociazioni (come, ad esempio, quella tra dattile ed erba medica e tra veccia ed avena) sono accettabili nel caso in cui vengano eseguite nel modo appropriato (per la consociazione tra le *Dactylis* e l'erba medica, infatti, è necessario scegliere delle cultivar caratterizzate da un ritmo di crescita analogo) mentre altre non si adattano ad ordinamenti colturali meccanizzati che fanno uso di erbicidi;
- (iii) risparmio di tempo. Nel caso in cui la coltura  $B$  venga coltivata quando la coltura  $A$  sia giunta in una fase avanzata del proprio ciclo vegetativo, alla raccolta di  $A$  la  $B$  usufruisce di tutto lo spazio lasciato libero e si troverà in uno stadio di sviluppo tale da consentirne la maturazione prima che il clima o le condizioni di mercato diventino sfavorevoli: queste sono le cosiddette "colture concatenate" alle quali si fa ricorso soprattutto in orticoltura. Lo scopo delle colture concatenate è quello di ottenere il maggior reddito possibile dall'unità di superficie attuando, in questo caso, una consociazione temporanea. Esempi di colture concatenate sono patata-pomodoro (in questo caso le piantine di pomodoro vengono trapiantate tra le file di patata prima della raccolta dei tuberi), carota-mais (in questo caso il mais viene seminato nei vialetti o nei bordi delle aiuole coltivate a carota in modo tale che le piante di quest'ultima specie rimangono in pieno campo quando le piante di cereale sono alte 30-40 cm in modo tale da ottenere un secondo raccolto di discreta entità), bietoline rosse-cetriolo e pomodoro lattuga o cavolo verza. Un altro tipo di consociazione temporanea è quella della bulatura delle leguminose pratensi in mezzo al frumento: quest'ultimo viene seminato in autunno in file leggermente più distanziate del normale e, al termine dell'inverno, le interfile vengono seminate con la foraggiera. La leguminosa, in questo modo, può fornire un secondo raccolto di discreta entità e, nel contempo, si affranca per entrare in piena produzione nel corso dell'anno successivo;

- (iv) protezione o aiuto di una coltura ad un'altra. Le leguminose inserite in un miscuglio per erbaio assieme ad una graminacea, ad esempio, possono avvantaggiarsi dell'azione di sostentamento di quest'ultima: lo stesso accade per la vite quando si ricorre ai sostegni vivi (in questo caso si parla di vite "maritata al gelso, all'acero, all'olmo o a qualche pianta da frutto, etc.). Per le specie provviste di semi con scarso vigore germinativo (come quelli, ad esempio, del pomodoro e della bietola), può risultare utile la consociazione temporanea con l'avena in quanto le piante di tale specie vincono più facilmente la resistenza della crosta superficiale e aprono la via per un'emergenza più agevole della coltura di interesse;
- (v) garanzie di una certa produzione anche nelle annate caratterizzate da un andamento stagionale sfavorevole. In questo caso si ricorre alle consociazioni soprattutto nelle zone marginali per una determinata coltura: lo testimonia la consociazione fra frumento e segale negli ambienti molto freddi, oppure quella fra orzo e avena, quella fra le varie specie di *Triticum*, etc.;
- (vi) favorire la fecondazione incrociata: per tale motivo, tra le colture arboree si ricorre alla consociazione nel caso in cui la cultivar principale è androsterile o autoincompatibile e, per questo motivo, si introduce una cultivar impollinante (Giardini, 2004).

## 1.2 La consociazione tra cereali e leguminose

La tipologia più diffusa di consociazione erbacea prevede la coltivazione di cereali e leguminose: questo tipo di consociazione risulta essere importante per la produzione sostenibile di cibo, in particolare in quegli ambienti caratterizzati da un apporto limitato di input (Dapaah, et al., 2003). La consociazione tra cereali e leguminose, inoltre, apporta diversi benefici agroecologici come, ad esempio, l'aumento dell'efficienza fotosintetica della leguminosa (Abdel-Wahab, et al., 2019) e la riduzione della quantità di concimi minerali azotati da apportare per la coltivazione dei cereali (Namatsheve, et al., 2020) in quanto le specie appartenenti alla famiglia botanica delle leguminose riescono a stabilire una simbiosi a livello radicale con i batteri azotofissatori (Esnarriaga, et al., 2020). Per di più, i cereali beneficiano della loro coltivazione in consociazione con le leguminose in quanto le specie appartenenti a quest'ultima famiglia botanica facilitano l'assorbimento degli elementi nutritivi presenti negli strati più profondi del suolo grazie al loro apparato radicale fittonante (Layek, et al., 2018). I cereali e le leguminose, infine, vengono spesso consociati in quanto hanno dei componenti complementari per quanto riguarda la dieta del bestiame (Esnarriaga, et al., 2020).

Le leguminose sono una parte integrante di diversi sistemi colturali erbacei in quanto le specie di tale famiglia botanica sono adatte a diverse colture miste o consociazioni, catch crop, colture sequenziali, colture di ripiego, etc. (Ofori & Stern, 1987): le specie di tale famiglia botanica, infatti, contribuiscono grandemente all'incremento della sostenibilità dell'agricoltura e vengono utilizzate da tempo immemore nelle consociazioni (Yadav, et al., 2017) (è per tale motivo che le leguminose possono essere inserite sia nelle consociazioni sia nelle colture sequenziali) (Bedoussac, et al., 2015). Le leguminose, in virtù della loro capacità di instaurare una simbiosi con i batteri azotofissatori, incrementano la fertilità del suolo comportando, quindi, una minore competizione per l'azoto disponibile (Layek, et al., 2014): questo, quindi, contribuisce alla complementarità e ad un utilizzo efficiente dell'azoto (Bedoussac & Justes, 2010).

La consociazione in cui è presente almeno una leguminosa mira ad ottenere delle rese più elevate se riferite all'unità di superficie mediante l'ottimizzazione dell'utilizzo delle risorse che, altrimenti, non potrebbero essere utilizzate dalle rispettive colture pure (Ram & Meena, 2014). In una consociazione tra un cereale e una leguminosa, così come in tutte le altre consociazioni, è bene che le singole piante non competano tra loro per lo spazio, la radiazione solare e i nutrienti (Lithourgidis, et al., 2011).

Sebbene la consociazione tra cereali e leguminose sia diventata popolare come forma di assicurazione contro il fallimento delle rispettive colture pure in condizioni irrigue (Seran & Brintha, 2010), lo scopo principale della consociazione tra le specie appartenenti a tali famiglie botaniche è quello di garantire una produzione maggiore e più sostenibile (Ali, et al., 2012): le piante in consociazione, infatti, utilizzano efficacemente le risorse disponibili come l'acqua, i nutrienti presenti nel suolo, la luce, etc. (Ghanbari, et al., 2009). I cereali, generalmente, sono delle colture depauperanti in quanto assorbono i nutrienti dallo stato più superficiale del suolo (Ali, et al., 2012); le leguminose, essendo capaci di instaurare un rapporto simbiotico con i batteri azotofissatori, migliorano la fertilità del suolo e riducono la competizione dovuta alla scarsa presenza di nutrienti nel suolo (Meena, et al., 2015). Le leguminose, inoltre, favoriscono l'assorbimento dei nutrienti dagli strati più profondi del suolo grazie al loro apparato radicale fittonante (Jat, et al., 2012).

La consociazione tra i cereali e le leguminose svolge un ruolo importante nell'agricoltura di sussistenza e provvede alla diversificazione delle colture da reddito nei Paesi sviluppati e, in particolare, nelle aree caratterizzate da una disponibilità idrica limitata (Tsubo, et al., 2005). Le consociazioni tra questi due gruppi di colture, inoltre, preservano il suolo e l'acqua presente in esso contenuto (Anil, et al., 1998), provvedono alla stabilizzazione della resa delle colture

(Lithourgidis, et al., 2006), previene l'allettamento delle piante (Anil, et al., 1998), aiutano nel controllo delle erbe spontanee (Banik, 1996) e migliora la qualità e la conservabilità del foraggio (Zhang & Li, 2003). La consociazione di un cereale con una leguminosa, infine, provvede alla minimizzazione dell'impatto che lo stress idrico esercita sulle piante così come gli effetti dovuti all'eccesso idrico nelle annate più piovose e ad un maggiore sfruttamento delle condizioni edafiche e climatiche grazie alla diversa morfologia se queste vengono comparate alle rispettive colture pure (Singh, et al., 2008).

Per quanto riguarda la produzione di foraggio, i cereali che vengono coltivati per tale scopo stanno incrementando la loro importanza nelle razioni dei ruminanti e hanno il potenziale di produrre del foraggio ricco di energia. Le razioni contenenti cereali, tuttavia, richiedono un certo grado di integrazione proteica: questo può essere effettuato mediante la consociazione del cereale foraggero con una leguminosa (in questo modo, oltre ad ottenere un incremento della quantità di proteine presenti nella razione, si ha una serie di benefici di carattere agronomico) (Anil, et al., 1998).

Le differenti caratteristiche riguardanti la modalità di radicazione e di crescita dei rispettivi apparati radicali, le differenze nella richiesta dei nutrienti, la durata della coltura, etc. tendono ad impartire alle piante una crescita più idonea anche nelle condizioni di stress. La soia, ad esempio, quando viene consociata con un cereale (come, ad esempio, il mais) riduce la competitività delle piante per i fattori di crescita più comuni (Layek, et al., 2014). Poiché le leguminose, generalmente, sono di taglia ridotta se confrontata con quella dei cereali, nelle consociazioni queste colture consentono di captare una maggiore quantità di radiazione luminosa e a ridurre la competizione per i nutrienti e per l'umidità del suolo in condizioni limitanti (Jeybal & Kuppaswamy, 2001). Comunque, in queste condizioni di coltivazione è possibile che la crescita della leguminosa consociata venga ostacolata con una conseguente riduzione della produttività e una riduzione della qualità (Layek, et al., 2018).

Affinché una consociazione tra un cereale e una leguminosa sia di successo, devono essere seguiti quattro principi:

- (i) i periodi di massima richiesta dei nutrienti delle diverse colture in consociazione non devono sovrapporsi. Nel caso, ad esempio, della consociazione tra mais e fagiolo mungo verde, il picco di massima richiesta dei nutrienti da parte della leguminosa avviene all'incirca 35 giorni dopo la semina mentre, per quanto riguarda il cereale, questo avviene circa 50 giorni dopo la semina (Ofori & Stern, 1987);

- (ii) la competizione per la luce tra le colture consociate deve essere ridotta al minimo. Tutte le piante, infatti, utilizzano le medesime risorse (come, ad esempio, la luce, l'acqua e i nutrienti): si instaura, quindi, una competizione per le medesime risorse sia tra le piante della medesima specie sia tra quelle di specie diverse (Meena, et al., 2018);
- (iii) la complementarità tra le colture facenti parte la consociazione per l'utilizzo delle risorse sia nel tempo sia nello spazio. La relazione più importante esistente tra i cereali e le leguminose riguarda la complementarità nell'utilizzo dell'azoto (Jensen, 1996): nelle consociazioni tra cereali e leguminose, infatti, queste ultime hanno la capacità di utilizzare l'azoto atmosferico mentre i primi utilizzano l'azoto presente nel suolo. Una parte dell'azoto che viene fissato biologicamente dai batteri che instaurano una simbiosi con le leguminose viene condiviso con il cereale consociato: si ha, quindi, una complementarità e una minore competizione per l'assorbimento dell'azoto da parte delle colture consociate (Herridge, et al., 1995). Quando un cereale viene consociato con un'altra coltura che risulta essere relativamente più competitiva per l'utilizzo dell'azoto inorganico, la leguminosa utilizza per sé principalmente l'azoto che viene fissato biologicamente: questo risulta essere maggiormente adatto nel caso in cui il cereale (che, spesso, è di taglia maggiore) abbia una richiesta maggiore in termini di radiazione luminosa incidente e la leguminosa (che, spesso, è di taglia minore) abbia delle richieste minori in tal senso (Meena, et al., 2018).

Nel caso di una consociazione tra un cereale e una leguminosa, si ha la massimizzazione delle risorse disponibili nei confronti delle singole colture solamente nel caso in cui la competizione esistente tra le piante sia minima. Affinché una consociazione tra un cereale e una leguminosa sia di successo, è necessario definire la disposizione spaziale, la densità di impianto e l'epoca di maturazione delle singole colture (Layek, et al., 2018).

La consociazione dei cereali con le leguminose a granella risulta essere molto comune nei Paesi del bacino del Mar Mediterraneo: ad esempio, la veccia comune, una leguminosa annuale a portamento rampicante i cui semi risultano avere un elevato tenore in proteine, viene consociata frequentemente con cereali (Anil, et al., 1998) come il frumento, l'avena e l'orzo (Lithourgidis, et al., 2006). In Europa, il pisello viene spesso consociato alle cultivar alternative di orzo per esaminare l'impatto di tale consociazione sulla redditività, sull'utilizzo delle fonti di azoto delle colture seminate e sulla capacità competitiva nei confronti della flora spontanea (Haugaard-Nielsen, et al., 2001). In particolare, la consociazione in oggetto è

risultata promettente per quanto riguarda l'incremento del contenuto in proteine delle colture consociate su suoli gravemente infestati da erbe spontanee e con una scarsa disponibilità di azoto.

Negli ultimi anni sono state studiate diverse consociazioni tra un cereale e una leguminosa (Gardarin, et al., 2022). Le consociazioni maggiormente studiate sono quelle tra il favino e diversi cereali: tra questi possono essere citati il frumento tenero (Monti, et al., 2019), l'avena (Dhima, et al., 2014), l'orzo (Mourandi, et al., 2018), il triticale (Dordas & Lithourgidis, 2011) e il mais (Shtaya, et al., 2021). Nella letteratura scientifica, inoltre, sono presenti ulteriori esempi di consociazione tra un cereale e una leguminosa:

- (i) il frumento duro consociato con il cece (Attallah, et al., 2024) o con la lenticchia (Montejano-Ramírez & Velencia-Cantero, 2024);
- (ii) il frumento tenero consociato con il pisello (Pankou, et al., 2021) o con l'erba medica (Su, et al., 2024);
- (iii) l'avena consociata con la veccia comune (Jiao, et al., 2024) o con il pisello (Kontturi, et al., 2011);
- (iv) il triticale consociato con il fagiolo comune (Esnarriaga, et al., 2020);
- (v) l'orzo consociato con il pisello (Mbanyele, et al., 2024) o con la veccia (Neyestan, et al., 2024);
- (vi) il mais consociato con il fagiolo dall'occhio (Arif, et al., 2024), la soia (Deng, et al., 2024), il lablab (Atumo, 2022), l'arachide (Feng, et al., 2021), il favino (Liao, et al., 2022), l'erba medica (Ma, et al., 2022), il caiano (Njira, et al., 2021), il fagiolo comune (Oohlmann, et al., 2024) o con il fagiolo mungo verde (Ro, et al., 2023);
- (vii) il sorgo consociato con il fagiolo dall'occhio (Abroulaye, et al., 2023), il trifoglio (Ashoori, et al., 2021), il caiano (Deressa, 2021), con il cece (Parwada & Chinyama, 2021), la soia (Sadafzadeh, et al., 2023) o con il fagiolo mungo verde (Temeche, et al., 2022);
- (viii) il riso consociato con la cicerchia (Assefa & Bitew, 2023);
- (ix) il grano saraceno consociato con l'erba medica (Gardarin, et al., 2022);
- (x) il miglio consociato con il fagiolo mungo verde (Gong, et al., 2020);
- (xi) il teff consociato con il lupino bianco (Hunegnaw, et al., 2022).

#### 1.2.1 *La consociazione tra il frumento e il favino*

In uno studio in cui una cultivar di frumento tenero è stata consociata a tre diverse cultivar di favino (e, per la precisione, Gloria, Alexia e Julia) (Bargaz, et al., 2021), l'effetto esercitato

dalla diversità varietale del favino ha indotto degli effetti significativi su diverse caratteristiche della pianta che sono risultate importanti per le prestazioni colturali sia in condizioni irrigue sia in condizioni limitanti di apporto idrico. Questo tipo di consociazione, inoltre, ha indotto degli effetti positivi o neutri su diverse variabili analizzate (come, ad esempio, la crescita delle piante, la capacità di nodulazione e la concentrazione di azoto nei germogli delle piante di favino).

La consociazione tra i cereali e il favino ha degli effetti positivi sul controllo delle erbe spontanee: più in dettaglio, il numero delle specie di erbe spontanee rimane alterato ma diminuisce il numero degli individui di ciascuna specie infestante. Oltre al contenimento del numero degli individui della flora spontanea, nelle consociazioni tra i cereali e il favino si ha un incremento del LER della consociazione e un incremento della produttività complessiva del favino (quest'ultimo parametro è significativamente maggiore nel caso in cui il favino viene consociato all'avena con un rapporto 1:2). La consociazione tra i cereali e il favino in condizioni di input ridotti, pertanto, può risultare idonea alla gestione delle erbe spontanee ma sono necessarie, comunque, ulteriori ricerche per individuare un programma idoneo che combini altri mezzi ecocompatibili per la gestione delle erbe spontanee nell'ambito della consociazione tra i cereali e il favino (Boutagayout, et al., 2024). Più in dettaglio, la consociazione di un cereale con il favino fa registrare un controllo molto efficiente delle erbe spontanee: infatti, la consociazione dell'orzo con il favino fa registrare una riduzione del 92,7% della copertura delle erbe spontanee mentre tale dato è pari al 46,1% quando il favino viene consociato con il frumento. Inoltre, non sono state riscontrate delle differenze significative nella biodiversità delle erbe spontanee tra le consociazioni testate in quanto la comunità delle stesse si è rivelata relativamente stabile indipendentemente dalla coltura presente (Villegas-Fernandez, et al., 2024).

La fertilizzazione azotata di una consociazione tra frumento e favino riduce gli effetti autotossici nella leguminosa durante la germinazione dei suoi semi nel caso dell'omosuccessione: tali effetti autotossici possono essere indotti da diversi acidi organici tra cui l'acido 4-benzoico, l'acido vanillico, l'acido salicilico, l'acido ferulico e l'acido cinnamico (Cen, et al., 2023). Per quanto riguarda la consociazione tra il frumento tenero e il favino, la sua produttività risulta essere maggiore nel caso in cui vengono applicati dei concimi a base di azoto, fosforo e zolfo per il 50% del fabbisogno complessivo e per il restante 50% mediante l'apporto del vermicompost: questo piano di concimazione ha incrementato quasi tutti i parametri di crescita e di resa, l'assorbimento dei nutrienti e la loro efficienza di uso (Habtamu, et al., 2024). Un apporto abbondante di azoto al favino, quando presente sia in coltura pura sia

in consociazione con il frumento, è associato ad un aumento dell'incidenza della botrite, ad una diminuzione della resa del frumento e ad una ridotta efficacia del controllo delle malattie: un adeguato apporto di azoto, quindi, può ridurre al minimo la perdita di resa sia del favino sia del frumento massimizzando, al contempo, l'effetto degli agrofarmaci nel caso della consociazione. Un apporto di 45-90 kg N·ha<sup>-1</sup>, nel caso della consociazione tra il frumento e il favino, risulta essere una strategia finalizzata alla riduzione dell'incidenza delle malattie del favino e per ottenere una produzione agricola adeguata (Luo, et al., 2023).

La consociazione tra il frumento e il favino è associata all'incremento della resa del cereale e del numero dei baccelli per m<sup>2</sup> nella leguminosa (Lopez-Bellido, et al., 2024). Nel frumento, tuttavia, si è assistito solamente all'incremento del peso di 1.000 cariossidi mediante la sua consociazione con il favino. Confrontando, inoltre, l'efficienza di utilizzo dell'unità di superficie del suolo da parte delle colture pure e della consociazione, quest'ultima è risultata essere più efficiente rispetto alle colture pure.

Sono stati studiati anche gli effetti dovuti alla combinazione di genotipi diversi nell'ambito della consociazione tra il frumento e il favino: la combinazione tra genotipi diversi che ha fatto registrare i risultati migliori è quella tra Flamenko e Polycarpi (sono stati registrati, infatti, una resa e dei valori di LER più elevati dovuti alla complementarità dello sfruttamento delle risorse ambientali). Un'ulteriore combinazione di genotipi di frumento e di favino che può essere utilizzata in una consociazione è quella tra Elissavet e Organdi: tale combinazione di genotipi ha fatto registrare un'elevata resa da parte del frumento. La consociazione tra il frumento e il favino, pertanto, può essere adottata dagli agricoltori in quanto induce una resa maggiore e incrementa l'efficienza di utilizzo delle risorse ambientali (Michalitsis, et al., 2024). L'incremento della resa del frumento e del favino quando consociati è dovuto ad un indice di competitività inferiore all'unità e ad un indice di aggressività inferiore a 0 durante la fase iniziale di crescita della leguminosa indicando che questa, durante tale periodo, risulta essere meno competitiva per i nutrienti a cui si associa una crescita lenta mentre, durante la fase intermedia e quella tardiva di crescita, il favino risulta essere più competitivo del frumento (infatti, l'indice di competitività era superiore all'unità mentre l'indice di aggressività era superiore allo 0). La consociazione tra il frumento e il favino, inoltre, ha incrementato in modo significativo la produttività parziale dei fertilizzanti azotati sia nel cereale sia nella leguminosa: l'applicazione di 45 kg N·ha<sup>-1</sup> ad una consociazione tra queste due colture, quindi, risulta essere ottimale per incrementare la resa e per promuovere uno sviluppo sostenibile dell'attività agricola (Zhang, et al., 2024).

Relativamente al favino, quando viene consociato con il frumento e nel caso in cui venga infettato da *Fusarium oxysporum* f.sp. *fabae*, la biosintesi dell'etilene e dell'acido jasmonico risulta aumentata: questo si traduce in un incremento della resistenza da parte della leguminosa con un conseguente alleviamento dello stress indotto dall'acido jasmonico. Tutto questo, inoltre, inibisce l'avvizzimento dei legumi da parte di *Fusarium oxysporum* f.sp. *fabae* regolando positivamente la biosintesi dei metaboliti secondari e la fissazione del carbonio durante la fotosintesi (Hu, et al., 2023).

Il trattamento dei legumi di favino con l'acido fusarico (che risulta essere il principale fattore di patogenicità di *Fusarium oxysporum* f.sp. *fabae* e che svolge un ruolo di primaria importanza nel processo di infezione) ha determinato una riduzione del contenuto di acqua presente al loro interno: il contenuto di acqua nei legumi, tuttavia, è risultato maggiore nei legumi prodotti dal favino consociato con il frumento rispetto a quelli prodotti dal favino in coltura pura (questo suggerisce che la consociazione ha ridotto gli effetti negativi indotti dall'acido fusarico). Le radici del favino, inoltre, sono state gravemente danneggiate a seguito della somministrazione di acido fusarico alle piante con una conseguente riduzione della capacità di assorbimento selettivo dei nutrienti. Oltre alla riduzione di acqua nei legumi di favino, è stato registrato un maggior contenuto di lignina e di callosio all'interno delle cellule: questo ha limitato la diffusione dell'acido fusarico riducendo anche l'incidenza e la gravità della malattia (Li, et al., 2020).

La consociazione tra il frumento e il favino incrementa, inoltre, l'attività enzimatica della rizosfera, la ricchezza e la biodiversità microbica del suolo e modula la struttura della comunità microbica. L'apporto di fertilizzanti azotati alla consociazione tra il frumento e il favino è risultato essere un fattore chiave che influenza la struttura della comunità microbica della rizosfera del favino. L'impiego di una dose adeguata di azoto (che è stato visto essere pari a  $90 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), infatti, aumenta notevolmente il controllo delle malattie da parte delle piante di favino quando presenti in consociazione. L'aumento della diversità microbica del suolo e il cambiamento della struttura microbica del suolo che ospita la consociazione, generalmente, ha avuto un ruolo fondamentale nel controllo delle malattie e nel mantenimento della stabilità dell'agroecosistema (Hu, et al., 2024).

Un apporto di  $90 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  ad una consociazione tra il frumento e il favino induce un aumento del contenuto di serina, acido glutammico, tirosina e lisina negli essudati radicali prodotti dalla leguminosa: questo è associato all'inibizione della crescita, della riproduzione e della produzione dei fattori di patogenicità di *Fusarium oxysporum* f.sp. *fabae*. Al contempo, è stata registrata una riduzione del contenuto in acido aspartico, valina e prolina negli essudati

radicali del favino (tali amminoacidi sono associati alla crescita, alla riproduzione e alla patogenicità di *Fusarium oxysporum* f.sp. *fabae*) riducendo, in questo modo, l'incidenza dell'avvizzimento causato dalla fusariosi (Yang, et al., 2023).

La riduzione del contenuto in serina, acido glutammico, tirosina e lisina negli essudati radicali del favino è stata confermata da un ulteriore studio (Zhang, et al., 2023): tale diminuzione nel contenuto di questi amminoacidi negli essudati radicali del favino è stata associata, oltre che ad una minore patogenicità di *Fusarium oxysporum* f.sp. *fabae*, ad un aumento della biodiversità microbica del suolo, ad una modifica della struttura e della composizione della comunità fungina e batterica, un aumento nell'abbondanza relativa dei microrganismi benefici (come, ad esempio, *Sphingomonas* e *Bradyrhizobium*) e una diminuzione nell'abbondanza delle spore di *Fusarium oxysporum* f.sp. *fabae* nella rizosfera del favino.

Per tutti i motivi sopra elencati, è bene non apportare delle dosi di fertilizzanti azotati superiori a 90 kg N·ha<sup>-1</sup> alla consociazione tra favino e frumento (Yang, et al., 2023).

La siccità, quando è associata ad una ridotta concentrazione di fosforo nel suolo, influisce negativamente sulle prestazioni agrofisiologiche delle colture: questo si traduce in una riduzione della biomassa prodotta dalle piante, dell'efficienza fotosintetica, della superficie fogliare e del contenuto di nutrienti all'interno dei tessuti vegetali. È stato verificato che, consociando il frumento al favino, tali parametri hanno fatto registrare un incremento significativo nel caso in cui la leguminosa sia stata inoculata con i batteri del genere *Rhizobium*. La consociazione tra il frumento e il favino non ha influenzato in modo significativo, invece, la diversità microbica del suolo ma ha influenzato in modo significativo la composizione della comunità microbica favorendo la proliferazione dei *Proteobacteria* (e, in modo particolare, delle specie appartenenti ai generi *Alphaproteobacteria* e *Gammaproteobacteria*): sebbene alcuni di questi microrganismi promuovano la crescita delle piante, il destino finale e la capacità di indurre un effetto residuo alle colture successive rimangono scarsi (Benmrid, et al., 2024).

### 1.2.2 La consociazione tra l'avena e la veccia comune

Un fattore che influenza positivamente sia la qualità sia la biomassa prodotta dalla consociazione tra l'avena e la veccia comune è la densità di semina: il rapporto di semina tra queste due specie, infatti, influisce sulla quantità di proteine grezze e sulla qualità della sostanza secca prodotta dalla consociazione. Il rapporto di semina che ha fatto registrare le migliori performance sia in termini produttivi sia in termini di sostanza secca è quello che prevede il 50% di avena e il 50% di veccia comune (Barsilia, et al., 2024). L'ipotesi che il

rapporto di semina influisca sulla produzione di biomassa è stata confermata anche da un ulteriore studio (Qu, et al., 2023): in questo caso, però, l'aumento della produzione di biomassa è stata confermata sia con un rapporto di semina 2:1 tra avena e veccia comune sia con un rapporto 3:1.

La produzione di biomassa foraggera da parte dell'avena consociata risulta essere maggiore di quella in coltura pura: in una prova sperimentale è stato visto, infatti, che l'avena consociata con la veccia comune ha prodotto una biomassa foraggera pari a 50,1 Mg·ha<sup>-1</sup> a fronte di una resa di 44,34 Mg·ha<sup>-1</sup> dell'avena in coltura pura. Probabilmente, l'incremento della produzione di foraggio è dovuto al contributo di azoto da parte della veccia comune attraverso l'azotofissazione. Accanto alla maggiore produzione di biomassa foraggera da parte dell'avena si ha una minore produzione da parte della veccia comune: questo, probabilmente, è dovuto sia all'ombreggiamento causato dalle piante di avena (che si è tradotto in una maggiore senescenza dei rami basali della leguminosa) sia ad una maggiore competitività della graminacea per le risorse ambientali (con particolare riferimento alla luce e allo spazio). Per quanto riguarda il contenuto di proteine grezze del foraggio di avena, tale parametro è risultato maggiore nell'avena consociata alla veccia comune rispetto a quella in coltura pura: tale incremento del contenuto di proteine grezze del foraggio prodotto dall'avena consociata alla veccia comune, infatti, è stato pari al 25% rispetto a quella del foraggio prodotto dall'avena in coltura pura (questo incremento del contenuto di proteine grezze si è tradotto in un maggiore valore nutritivo del foraggio). Per quanto riguarda la fibra, è stata registrata una diminuzione significativa sia dell'NDF sia dell'ADF del foraggio prodotto dall'avena in consociazione con la veccia comune rispetto a quella in coltura pura. La consociazione tra l'avena e la veccia comune, quindi, ha fatto registrare un incremento della qualità del foraggio prodotto dalla graminacea a cui è stato associato un peggioramento della stessa del foraggio prodotto dalla leguminosa: si consiglia, quindi, di adottare la consociazione tra l'avena e la veccia comune per incrementare sia la produzione sia la qualità del foraggio da parte dell'avena e si consiglia, inoltre, di coltivare la veccia comune in coltura pura (Ullah, et al., 2015).

La consociazione tra l'avena e la veccia comune, oltre ad incrementare la produzione della biomassa di foraggio, fa registrare un aumento in termini di reddito netto: per quanto riguarda tale parametro, l'avena consociata con la veccia comune ad un rapporto di semina pari al 50% ha fatto registrare dei redditi netti maggiori (Wang, et al., 2021). L'avena e la veccia comune presentano, comunque, una certa adattabilità a diverse densità di semina: con un aumento del 20% della densità di semina dell'avena, infatti, è stato registrato un incremento significativo della resa sia dell'avena sia della veccia comune. Un moderato aumento della densità di

semina, infine, ha ridotto moderatamente la competizione interspecifica tra l'avena e la veccia comune incrementando, in questo modo, la produzione complessiva di foraggio (Wang, et al., 2024).

Per quanto riguarda l'incremento della produzione di sostanza secca da parte dell'avena consociata alla veccia comune, tale parametro si è rivelato essere pari al 3,4% nell'avena consociata rispetto a quella in coltura pura non concimata (nell'avena in coltura pura a cui erano stati apportati dei fertilizzanti azotati si è verificata, invece, una diminuzione della produzione di sostanza secca pari a 5,0%). Per quanto riguarda, invece, le diverse frazioni della fibra (vale a dire NDF, ADF ed emicellulosa), queste hanno seguito un andamento opposto a quello del contenuto in proteine grezze: i valori più elevati di quest'ultimo parametro, infatti, sono stati registrati nell'avena in coltura pura mentre i valori più bassi sono stati registrati nella veccia comune in coltura pura (Baxevanos, et al., 2020). Inoltre, è stato visto che il foraggio prodotto dalla consociazione tra l'avena e la veccia comune con un rapporto di semina pari a 3:1 raccolto 105 giorni dopo la semina ha fatto registrare dei valori più elevati di biomassa prodotta e, inoltre, la qualità delle proteine grezze del foraggio prodotto da questa consociazione è risultata maggiore se confrontata con quella dell'avena in coltura pura. Per contro, la consociazione tra l'avena e la veccia comune con un rapporto di semina pari a 3:1 ha fatto registrare dei valori inferiori sia di NDF sia di ADF (Qu, et al., 2022).

È stato visto che il pascolamento dell'avena consociata con la veccia comune non è sufficiente per soddisfare i fabbisogni degli animali durante il periodo invernale (l'utilizzo di queste specie con uno sviluppo più tardivo all'interno di una consociazione con l'avena, quindi, risulta essere vantaggioso). Nel caso della veccia comune, invece, la resa di tale specie era minima quando la resa dell'avena era elevata raggiungendo, al termine del ciclo produttivo, una produzione di circa 1.500 kg s.s. · ha<sup>-1</sup> per la veccia comune e di circa 1.580 kg s.s. · ha<sup>-1</sup> per l'avena (Paris, et al., 2012).

Le leguminose (come, ad esempio, la veccia comune) sono un'importante fonte di proteine nell'alimentazione animale e una valida preceSSIONE colturale nell'ambito dell'agricoltura biologica. I diversi habitus di crescita della veccia comune portano ad un diverso controllo delle erbe spontanee e una resa e un contenuto proteico più elevati nei cereali ad essa consociati. Le cultivar a taglia più elevata di avena, quindi, competono maggiormente con la veccia comune a taglia ridotta rispetto a quella a taglia più elevata. Sebbene le miscele di semi contenenti una quota di veccia comune pari al 60% facciano raggiungere un quantitativo più elevato di proteine grezze, è bene inserire la veccia comune per il 50% all'interno delle miscele

di semi per garantire una maggiore stabilità del raccolto e rese elevate di granella (Rinke, et al., 2022).

La tecnica colturale tradizionale di diverse consociazioni tra cereali e leguminose ha indotto dei risultati migliori (espressi in termini di numero di rami, rapporto foglia-stelo e resa del foraggio verde) rispetto ad una tecnica colturale più conservativa: queste due tecniche colturali, tuttavia, non hanno fatto registrare delle differenze significative in termini di qualità del foraggio. Tra le consociazioni analizzate, quella che ha performato meglio è quella tra l'avena e la veccia comune: questa consociazione, associata alla tecnica colturale tradizionale, risulta essere l'opzione migliore per quegli agricoltori che non hanno a disposizione delle risorse idriche sufficienti per incrementare la produzione e/o per migliorare la qualità del foraggio (Sohaili, et al., 2021).

### **1.3 La consociazione tra altri gruppi di specie agrarie**

La consociazione non interessa solamente i cereali e le leguminose ma interessa anche altri gruppi di specie agrarie. Di seguito sono riportati alcuni esempi di consociazioni.

#### *1.3.1 Consociazioni in cui è presente una graminacea*

Per quanto riguarda la dinamica dell'azoto nel suolo, in Cina è stata condotta una prova sperimentale consociando il pomodoro con il mais (Chen, et al., 2022): in questa prova sperimentale sono stati coltivati sia il pomodoro sia il mais in coltura pura e, in aggiunta, tali colture sono state consociate tra loro inserendo il pomodoro in due o quattro file alternate a due file di mais. Per quanto riguarda l'azoto ammoniacale, sono state registrate delle differenze significative nella concentrazione di tale forma di azoto nei primi 40 cm di suolo (con particolare riferimento nei primi 20 cm di suolo superficiale) mentre, per quanto riguarda l'azoto nitrico, questo era presente nello strato di suolo compreso tra 40 e 60 cm. Per quanto riguarda la competizione interspecifica per l'acqua, tale parametro ha avuto il suo massimo nella parte centrale del ciclo colturale delle due specie oggetto della prova sia nella consociazione con due file di mais ed altrettante di pomodoro sia nella consociazione tra quattro file di pomodoro e due file di mais. Nell'ambito della prova sperimentale in oggetto, la competizione per l'acqua della specie presente in maggiore misura è diminuita mentre è aumentata nell'altra specie come risposta dell'aumento della densità di impianto di quest'ultima specie. In un ulteriore studio condotto sulla consociazione tra mais e pomodoro per la valutazione dell'evapotraspirazione (Chen, et al., 2023) si è potuto verificare che la

consociazione con quattro file di mais e due di pomodoro può essere raccomandata come consociazione migliorata in quanto presenta una minore evapotraspirazione.

Nell'ambito della riduzione dell'evapotraspirazione da parte delle consociazioni in cui è presente il mais, si è visto che si ottengono dei risultati positivi nelle rese di questa specie se, nelle aree semiaride, viene coltivata in consociazione con *Crotalaria juncea*: più in dettaglio, per ottenere questi risultati, *Crotalaria juncea* deve essere seminata durante la fase fenologica V15 del mais (l'incremento della produzione del mais è dovuto all'utilizzo di *Crotalaria juncea* come pacciamante vivo che ha ridotto significativamente l'evapotraspirazione). Da un punto di vista economico, i risultati migliori sono stati ottenuti nel caso della semina simultanea del mais con *Crotalaria juncea* alle densità rispettivamente di 32,1 piante·m<sup>-2</sup> e 48,1 piante·m<sup>-2</sup> (Dvzene, et al., 2022).

In uno studio in cui è stato consociato il mais con la patata (Fan, et al., 2016), si è visto che i tuberi hanno svolto un importante ruolo nel deflusso dell'acqua: la diminuzione del deflusso idrico è risultata più evidente durante il mese di agosto, quando il deflusso registrato nella coltura pura della patata era significativamente minore di quello registrato nella coltura pura di mais. Durante il mese di agosto, infatti, le dimensioni delle foglie e delle radici della patata erano inferiori a quelle del mais poiché la prima coltura era più vicina al momento della raccolta e, di conseguenza, i tuberi hanno avuto un ruolo importante nella diminuzione del deflusso dell'acqua nella rispettiva coltura pura. Il meccanismo con cui i tuberi hanno ridotto il deflusso dell'acqua può essere collegato al fatto che la crescita del tubero modifica notevolmente la struttura del suolo (i tuberi della patata, infatti, possono crescere verso l'alto generando, in questo modo, delle fessure nel suolo che possono rompere la crosta superficiale). Poiché il deflusso idrico modifica il contenuto di umidità del suolo, l'evapotraspirazione registrata nei suoli declivi risulta essere minore a quella registrata nei suoli pianeggianti. Si è visto, quindi, che la consociazione tra il mais e la patata ha ridotto significativamente il deflusso idrico superficiale e l'evapotraspirazione dell'acqua dal suolo e che tale consociazione, rispetto alla coltura pura di patata, non ha modificato significativamente il deflusso superficiale dell'acqua ma ha modificato significativamente l'evapotraspirazione dal suolo: questo risultato indica che la consociazione tra il mais e la patata mostra un vantaggio nel controllo della perdita dell'acqua sui suoli declivi.

In uno studio sono stati analizzati gli effetti della consociazione del mais con *Chrysanthemum x morifolium* (Liao, et al., 2024): i risultati ottenuti da questo studio hanno indicato che la consociazione ha incrementato la resa e i principi attivi di *Chrysanthemum x morifolium*. La consociazione tra mais e *Chrysanthemum x morifolium* potrebbe anche

promuovere le proprietà fisico-chimiche e le attività enzimatiche del suolo e potrebbe modificare le comunità microbiche della rizosfera delle piante. Nel complesso, lo studio citato ha rilevato che la consociazione in oggetto potrebbe produrre un numero maggiore di effetti benefici rispetto alla coltura pura e, per tale motivo, risulta essere vantaggiosa la diffusione di questo modello di produzione di *Chrysanthemum x morifolium*.

È stato visto che nella consociazione tra il mais dolce e la santoreggia la resa della prima specie non era significativamente diversa dalla coltura pura mentre lo stesso parametro della santoreggia si attestava su valori più elevati quando coltivata in coltura pura. Si è potuto verificare, inoltre, che l'aumento della densità di impianto del mais dolce causa una significativa diminuzione della resa della santoreggia ma, poiché il LER di tale consociazione è superiore all'unità, si ha un utilizzo più efficiente del suolo se confrontato alle rispettive colture pure. Per quanto riguarda il contenuto di oli essenziali nella santoreggia, non sono state registrate delle differenze significative tra la coltura pura, la consociazione con il 50% di mais e il 50% di santoreggia e nella consociazione con il 25% di mais e il 25% di santoreggia; è stato visto, inoltre, che, dalla consociazione con il 75% di mais e il 25% di santoreggia si ottiene un quantitativo inferiore di olio essenziale (Naderi, et al., 2023).

Sulla base di un ulteriore studio (Nourbakhsh, et al., 2019), in cui sono stati valutati i servizi ecosistemici apportati dalla consociazione di mais, soia e *Althea officinalis*, tale consociazione ha ridotto la densità delle erbe spontanee e ha aumentato l'efficienza dell'assorbimento dell'azoto e del fosforo se confrontato con le rispettive colture pure: tale consociazione, quindi, potrebbe fornire una maggiore produzione.

Per quanto riguarda la consociazione tra il mais foraggero e *Lablab purpureus*, si è notato che tale consociazione ha aumentato significativamente la produzione totale di biomassa e di sostanza secca, la resa di proteine grezze e ha alterato le dinamiche di utilizzo dell'acqua rispetto al mais da foraggio in coltura pura. Tale consociazione ha raggiunto un'efficienza idrica più elevata e ha migliorato tale parametro. Rispetto alla piena irrigazione, l'induzione precoce di un moderato deficit idrico ha determinato una maggiore produzione di foraggio e di proteine grezze. L'adozione della consociazione tra mais foraggero e *Lablab purpureus* con un'irrigazione ridotta durante le prime fasi del ciclo colturale è adatta per incrementare la produzione di foraggio nelle regioni semiaride (Wang, et al., 2024).

È stato studiato un numero elevato di consociazioni in cui è presente la canna da zucchero. In uno studio (Raza, et al., 2024) è stato sottolineato che è importante trasformare la coltura pura della canna da zucchero in una consociazione tra questa specie e la soia al fine di utilizzare le risorse che finora risultano essere inutilizzate (pari a circa il 50% del suolo coltivabile e il

20-60% dell'azoto e del fosforo nel corso della crescita della parte aerea della canna da zucchero) e per ottenere una produzione aggiuntiva di soia e un profitto netto con input e impatti ambientali ridotti. I risultati ottenuti dallo studio in oggetto, inoltre, hanno mostrato anche che la sincronizzazione tempo-fenologica delle due colture consociate ha ridotto notevolmente sia la competizione intraspecifica sia quella interspecifica. Tutto questo, quindi, indica che la consociazione tra la canna da zucchero e la soia fornisce dei notevoli vantaggi nelle regioni in cui è coltivata la graminacea:

- (i) una riduzione dei rifiuti di origine antropica provenienti dai terreni coltivati a canna da zucchero;
- (ii) un'alternativa alla produzione di soia in quanto vengono investite ingenti risorse per la coltivazione di tale specie;
- (iii) investimento delle risorse economiche dedicate alla coltivazione della soia nei confronti di altre specie di interesse alimentare.

Per quanto riguarda gli effetti che la canna da zucchero ha sulla riduzione della copertura del suolo da parte delle erbe spontanee, è stata registrata sia una diminuzione del 51% di tale parametro rispetto al controllo sia una diminuzione del 37% della frequenza dei trattamenti con gli erbicidi rispetto al controllo. La gestione delle colture, nel caso delle consociazioni, influenza notevolmente la copertura del suolo da parte delle erbe spontanee negli anni in cui la canna da zucchero era consociata con un'altra specie: questo evidenzia la necessità di valutare l'impatto a lungo termine della consociazione sulle comunità delle erbe spontanee per valutare la sostenibilità ambientale di tale pratica (Soulé, et al., 2024).

La coltura della canna da zucchero produce circa 10-12 Mg·ha<sup>-1</sup> di residui all'anno: la pacciamatura con tali residui aumenta la capacità di conservazione dell'umidità del suolo, controlla la crescita delle erbe spontanee e incrementa il quantitativo di carbonio organico presente nel suolo. La gestione integrata dei nutrienti che coinvolge sia le fonti organiche sia quelle inorganiche, i biofertilizzanti, il sovescio, etc. risulta essere promettente nell'incremento della fertilità del suolo e della produttività dei sistemi colturali in cui è presente la canna da zucchero. In questo ambito, anche la consociazione della canna da zucchero con la senape si è rivelata essere un'opzione economicamente valida rispetto alla rotazione di queste due colture. La consociazione della canna da zucchero con un'altra coltura erbacea, infine, riesce a controllare la crescita delle erbe spontanee e riduce al minimo il ricorso agli input chimici (Shukla, et al., 2022).

In uno studio (Abbasi & Spaskhah, 2022) è stata valutata la resa dello zafferano in consociazione con il frumento tenero nelle regioni semiaride dell'Iran in funzione della tipologia di ammendante e di diversi livelli di irrigazione:

- (i) facendo riferimento alla resa, si è potuto verificare la resa dello zafferano non è influenzata significativamente dai livelli di irrigazione ma è correlata positivamente con la forma di azoto che viene apportata mediante l'ammendante: la resa dello zafferano, infatti, aumenta con l'apporto del letame (questo è dovuto ad un miglioramento delle proprietà fisico-chimiche del suolo, ad un maggiore quantitativo di humus e ad una maggiore attività biologica degli organismi presenti nel suolo) mentre, nel frumento tenero, l'apporto di urea non ha fatto registrare una resa significativamente più elevata rispetto a quella riscontrata con l'apporto del letame;
- (ii) per quanto riguarda i composti di qualità dello zafferano (vale a dire safranale, crocina e picrocrocina), i risultati non hanno mostrato un effetto significativo né con i diversi livelli di irrigazione né con il sistema colturale. L'applicazione di urea, tuttavia, ha aumentato significativamente la concentrazione di safranale, crocina e picrocrocina rispetto a quanto riscontrato nella prova in cui è stato apportato il letame: questo può essere dovuto al fatto che l'urea fornisce allo zafferano un quantitativo maggiore di quanto non faccia il letame;
- (iii) per quanto riguarda l'evapotraspirazione effettiva delle piante, il trattamento con un' $ET_c$  pari al 60% ha mostrato un' $ET_a$  maggiore rispetto a quella riscontrata negli altri livelli di irrigazione a causa della maggiore crescita delle piante. Sebbene la media di  $ET_a$  per la coltura pura e quella consociata non hanno fatto registrare delle differenze significative nel corso delle quattro stagioni dello studio (rispettivamente 579 mm e 582 mm), la coltura consociata ha mostrato una traspirazione maggiore del 67% rispetto a quella riscontrata nella coltura pura (460 mm contro 276 mm) in tutte le stagioni oggetto di analisi: questo è dovuto alla presenza di due colture sullo stesso appezzamento e, quindi, ad un utilizzo più efficiente dell'acqua.

In uno studio in cui erano valutati gli incrementi della resa e l'impronta carbonica della consociazione temporanea a strisce tra avena e girasole (Qian, et al., 2022) è stato ottenuto un LER compreso tra 1,03 e 1,37: tale parametro, però, diminuisce con la quantità di azoto apportato con i concimi. La resa dell'avena consociata è risultata superiore del 28-32% rispetto a quella registrata nella coltura pura senza alcun apporto di azoto. Nel caso delle cultivar a

maturazione precoce di avena, tale coltura, quando presente in consociazione, presentava un effetto significativo nelle file di bordo senza l'apporto di fertilizzanti azotati ma tale effetto diminuiva e rimaneva stabile con l'aumentato apporto di tali concimi; tale effetto, tuttavia, non è stato osservato nel girasole consociato in cui sono stati apportati i fertilizzanti azotati: questo sta ad indicare la complementarità dei nutrienti e la riduzione degli investimenti economici apportati dalla consociazione. Sulla base dei risultati ottenuti dallo studio in oggetto, è stato osservato che l'apporto teorico di fertilizzanti azotati per ottenere una resa più elevata nella consociazione temporanea a strisce tra avena e girasole era rispettivamente di 82-95 e 170-225 kg N·ha<sup>-1</sup>. Nel complesso, tale studio ha fornito delle prove sperimentali che hanno dimostrato che la consociazione temporanea a strisce tra avena e girasole potenzialmente può ridurre l'impronta carbonica e la necessità di apportare azoto mediante i fertilizzanti, può incrementare e massimizzare i redditi (tutto questo risulta essere importante per un'agricoltura sostenibile).

In uno studio in cui è stata consociata la loiessa con la sulla in condizioni di ombreggiamento artificiale (Tramacere, et al., 2024) è stata registrata una produzione aumentata di foraggio se confrontata alle rispettive colture pure, prescindendo dalla presenza o meno di un'ombreggiatura artificiale. Questo studio ha evidenziato, inoltre, che la consociazione tra loiessa e sulla è adatta ai sistemi di agroforestazione, soprattutto in condizioni di una moderata ombreggiatura.

### 1.3.2 *Consociazioni in cui è presente una leguminosa*

Per quanto riguarda la veccia comune, in uno studio (Che, et al., 2024) questa è stata consociata con la patata in condizioni di irrigazione subottimale: in tale condizione, è stato visto che si ha un incremento sia della produzione sia della qualità dei tuberi di patata (questo aspetto, quindi, rientra nell'ambito dell'incremento della sostenibilità dell'attività agricola). Rispetto alla coltura pura di patata, la consociazione di questa specie con la veccia comune ha fatto aumentare la quantità di nutrienti presenti nel suolo, ha aumentato la crescita dei microrganismi, ha modificato le comunità microbiche e, infine, ha ridotto la presenza dei patogeni della patata all'interno del suolo.

In uno studio (Ahmed & Aziz, 2023) sono stati valutati gli effetti che la consociazione tra la soia e il cotone ha su tali colture:

- (i) la resa della soia, in questo tipo di consociazione, ha superato quella del cotone in tutte le combinazioni di impianto e di distanza di semina proposte in questo studio, ad eccezione del sistema in cui erano previste due file di soia alternate ad altrettante file di cotone con delle distanze di semina rispettivamente di 25 e 15 cm;

- (ii) è stato registrato un aumento dell'RCC sia per la soia sia per il cotone nella maggior parte delle consociazioni e delle distanze di semina proposte, ad eccezione del caso in cui erano previste due file di soia alternate ad una di cotone (i valori dell'RCC della soia, comunque, si sono rivelati maggiori di quelli del cotone in tutte le distanze di semina analizzate);
- (iii) dalla maggior parte dei sistemi di impianto si otteneva un incremento della resa per entrambe le specie consociate rispetto alla coltura pura (in quest'ultimo caso, il LER era più elevato nel caso in cui venivano seminate due file di soia alternate ad altrettante file di cotone ad una distanza di 25 cm tra due file contigue);
- (iv) nel caso in cui il numero delle file di cotone sia basso, le piante di questa specie possono risultare meno competitive con la possibilità che la soia possa prevalere sulle piante di cotone (tale specie, comunque, risultava essere più competitiva della soia);
- (v) per quanto riguarda la competizione interspecifica, questa era più marcata per il cotone nel sistema di impianto in cui si alternavano due file di soia ad altrettante file di cotone a tutte le distanze di impianto proposte.

È stato visto che la consociazione della soia a semina tardiva con il cotone riduce efficacemente la competizione interspecifica con un conseguente incremento della resa della malvacea se viene confrontata con la consociazione con la leguminosa a semina precoce e alla coltura pura. Tra le diverse cultivar di soia e le date di semina prese in considerazione, la consociazione del cotone con Jidou12 a semina tardiva ha incrementato sia la resa della malvacea sia il LER totale di tale consociazione: questo sta ad indicare che la consociazione tra Jidou12 a semina tardiva con il cotone riduce la competizione interspecifica, aumenta la produttività complessiva della consociazione e ottimizza l'utilizzo delle risorse disponibili (questo è dimostrato dalle analisi della fotosintesi, della distribuzione della biomassa e della morfologia degli apparati radicali). La differenziazione spazio-temporale della distribuzione delle radici (che è attribuita alle diverse date di semina delle colture) riduce al minimo la competizione interspecifica e aumenta la produttività di tale consociazione: questo fa sì che possa essere promossa la consociazione tra la soia e il cotone supportando, in questo modo, l'intensificazione sostenibile dell'attività agricola (Lv, et al., 2024).

Nella consociazione tra l'arachide e il cotone si riscontra una leggera riduzione della resa della leguminosa associata ad un sostanziale aumento della resa della malvacea (si ottiene, conseguentemente, un profitto economico maggiore se confrontato con quello delle colture pure di arachide e cotone) (Xie, et al., 2022): questo tipo di consociazione, più in dettaglio,

incrementa del 16,9% la resa del cotone a fronte di una diminuzione pari al 5,6% della resa della soia (Chi, et al., 2019). La consociazione a strisce tra arachide e cotone, inoltre, ha aumentato l'assorbimento di azoto, fosforo e potassio da parte dell'arachide rispettivamente del 6,3%, 11,5% e 7,3% se confrontata con la consociazione tradizionale e, inoltre, sono stati registrati degli aumenti del tasso di fotosintesi netta, del contenuto di clorofilla e del LAI rispettivamente del 7,2%, 8,9% e 4,4% (Chi, et al., 2019). Non di minore importanza, la consociazione a strisce tra arachide e cotone ha portato ad un maggiore accumulo di carbonio nel suolo se confrontato con le rispettive colture pure: questo determina delle rese più elevate sia per la leguminosa sia per la malvacea dovute al maggiore assorbimento di nutrienti che risulta essere facilitato dai batteri presenti nella rizosfera e al maggior accrescimento della parte aerea delle colture presenti in consociazione (Chi, et al., 2023). L'arachide, inoltre, è in grado di instaurare una simbiosi a livello radicale con i batteri azotofissatori: questo porta ad un aumento del contenuto di azoto nel suolo (questo suggerisce che l'inserimento in rotazione dell'arachide come coltura intercalare al cotone possa consentire una riduzione dell'apporto di fertilizzanti azotati necessari per la coltivazione della malvacea nel corso della stagione seguente) (Chi, et al., 2019).

Per quanto riguarda la consociazione tra la soia e il kenaf su suoli contaminati da cadmio e piombo, è stata registrata una crescita aumentata delle piante espressa in termini di biomassa di germogli e radici, di altezza delle piante, di numero di foglie e di lunghezza delle radici (tutto questo è associato ad un ridotto danno ossidativo e ad un'attività aumentata degli enzimi antiossidanti). Tuttavia, l'influenza della consociazione tra la soia e il kenaf sulla concentrazione di cadmio e piombo all'interno dei tessuti vegetali e sulla loro traslocazione è risultata diversa: questo potrebbe essere il risultato della coesistenza dello stress indotto da tali metalli pesanti e dalla distribuzione della biomassa vegetale (Rehman, et al., 2023).

Tra le possibili consociazioni che possono essere adottate per gli scopi più diversi, quella tra le leguminose e le brassicacee come cover crop sta riscuotendo particolare interesse per la capacità delle seconde nella riduzione dell'incidenza degli agenti patogeni e delle erbe spontanee indotta dall'idrolisi dei glucosinolati naturalmente presenti all'interno dei tessuti in isotiocianati (van Dam, et al., 2009). La soppressione di parassiti, agenti patogeni e delle erbe spontanee da parte degli isotiocianati è denominata "biofumigazione" e ha riscosso notevole interesse sia da un punto di vista agronomico sia da un punto di vista ecologico nella regolazione delle comunità biologiche del suolo (Bressan, et al., 2013) inclusi funghi (Motisi, et al., 2009), batteri (Arthy, et al., 2002), nematodi (Fourie, et al., 2016) ed erbe spontanee (Bangarwa & Norsworthy, 2016). Al termine del 20° secolo, la biofumigazione era considerata

una valida opzione per la sostituzione dei fumiganti chimici, incluso il bromuro di metile: all'epoca, infatti, si pensava che la biofumigazione fosse stata una delle opportunità di controllo non chimico dei parassiti più promettenti (Porter, et al., 1999). I livelli di riduzione delle popolazioni di patogeni ottenuti in condizioni di campo utilizzando solamente le cover crop di leguminose e crucifere, tuttavia, sono risultati spesso inferiori a quelli ottenuti mediante l'utilizzo dei prodotti chimici (Gimsing & Kirkegaard, 2009). In uno studio in cui venivano consociate le leguminose con le crucifere (Couedel, et al., 2018) sono stati riscontrati un aumento della produzione totale di glucosinolati da parte delle crucifere e una produzione più elevata di biomassa vegetale senza alcun tipo di cambiamento nella tipologia e nella concentrazione dei glucosinolati. Nel medesimo studio, nonostante la metà delle piante presenti in campo era ascrivibile alla famiglia botanica delle crucifere, le cover crop analizzate hanno prodotto il 20% di glucosinolati in meno se confrontate con le rispettive colture pure di crucifere. Tali risultati sono stati validati per un'ampia gamma di specie di crucifere e supportano l'utilizzo delle cover crop basate sulle leguminose e sulle crucifere per ottenere molteplici servizi ecosistemici. In una review in cui veniva analizzata la stessa tipologia di coltura (Couedel, et al., 2023) si afferma che, per le cover crop in cui vengono consociate le leguminose con le crucifere, i biofumiganti prodotti dalle specie appartenenti a quest'ultima famiglia botanica possono essere mantenuti all'interno dei diversi sistemi colturali; sono state registrate, inoltre, delle interazioni negative sugli organismi benefici che possono essere ridotte mediante le normali pratiche agronomiche. Bisogna, quindi, prestare particolare attenzione alla selezione delle specie che faranno parte delle cover crop per evitare la proliferazione degli organismi patogeni e la riduzione dell'efficacia di questa tipologia di coltura. Tuttavia, le cover crop a base di leguminose e crucifere non possono essere considerate come una soluzione autonoma per la gestione dei parassiti e dei patogeni: adottando, infatti, un approccio sistemico più ampio, che vada oltre al semplice controllo dei parassiti, è possibile il miglioramento della fertilità biologica, fisica e chimica del suolo attraverso un paradigma multiservizio delle cover crop.

Può essere ottenuta un'elevata efficienza agro-economica dalla consociazione tra il fagiolo dall'occhio e la barbabietola da zucchero nel caso in cui vengano gestiti in modo adeguato i fattori produttivi, le densità di impianto e la disposizione spaziale delle piante: più dettagliatamente, sono stati ottenuti degli indicatori economici più elevati e delle prestazioni produttive migliori nel caso in cui sono alternate due file di fagiolo dall'occhio ad altrettante file di barbabietola da zucchero (Peixoto Chaves, et al., 2022). In un ulteriore studio (Ouda & El-Hafeez, 2023) si è potuto verificare che la produzione della barbabietola da zucchero,

quando è consociata con una leguminosa (come, ad esempio, il cece o la fava), può raggiungere valori più elevati se confrontata con quelli della coltura pura: questo porta alla riduzione della superficie del suolo dedicata all'attività agricola e ad un aumento del contenuto di azoto nel suolo in cui viene praticata questa consociazione. Nel caso in cui venga imposto uno stress idrico, la consociazione tra il cece e la barbabietola da zucchero risulta essere caratterizzata da una resilienza maggiore rispetto alle altre consociazioni proposte nello studio in oggetto e ha fatto registrare una resa più elevata della barbabietola da zucchero.

Dalla consociazione tra il fagiolo dall'occhio e il melone si ottiene un aumento della produzione di anidride carbonica da parte del suolo che, probabilmente, è causata dalle comunità microbiche del suolo attraverso l'interazione tra queste e le radici delle colture. La crescita del fagiolo dall'occhio consociato al melone, tuttavia, ha aumentato la produttività dell'unità di superficie del suolo senza alcun effetto negativo sullo stesso parametro del melone. Al melone consociato con il fagiolo dall'occhio, inoltre, è associata una minore produzione di anidride carbonica equivalente per unità di frutti raccolti: questo può portare ad un'alternativa economica e sostenibile dell'attività agricola con emissioni inferiori di gas ad effetto serra. La mancanza di correlazione tra l'emissione di gas ad effetto serra e le proprietà del suolo e delle piante può essere attribuita a diversi fattori tra cui le elevate temperature caratteristiche del periodo estivo, l'elevata umidità del suolo indotta dall'irrigazione, la disponibilità di nutrienti per la crescita microbica e vegetale e la densità e lo sviluppo delle piante (Marcos-Perez, et al., 2023). In uno studio in cui è stata valutata la consociazione tra il fagiolo dall'occhio e il melone combinata con una lavorazione ridotta del suolo e l'aggiunta dei residui colturali come strategia agroecologica alternativa finalizzata all'incremento della resa delle colture (Marcos-Perez, et al., 2023) si è potuto verificare che questa consociazione è una pratica agroecologica alternativa praticabile per un'agricoltura sostenibile in cui si riduce del 30% il quantitativo di fertilizzanti apportati alla coltura: questo rafforza l'idea che la consociazione tra il melone e una leguminosa (come, ad esempio, il fagiolo dall'occhio) sia un approccio efficiente per il miglioramento della qualità del suolo, l'aumento della produttività complessiva e la riduzione dell'impiego degli input esterni (come, ad esempio, l'acqua irrigua e i fertilizzanti).

Nell'ambito della coltivazione delle piante medicinali e aromatiche, l'applicazione abbondante di concimi minerali riduce la concentrazione dei composti bioattivi presenti all'interno dei tessuti vegetali: questo porta ad una diminuzione della quantità e della qualità degli oli essenziali contenuti all'interno dei tessuti vegetali. Si è potuto verificare che la consociazione tra le piante aromatiche e medicinali con le leguminose (e, in particolare, la

consociazione tra la maggiorana alla normale densità di impianto con il fagiolo mungo verde alla densità di impianto del 45% rispetto a quella normalmente prevista) unita all'applicazione di fertilizzanti organici ha fatto registrare un incremento della quantità e della qualità dell'olio essenziale delle piante aromatiche e medicinali. I LER di tutte le consociazioni analizzate sono risultati superiori all'unità indicando, quindi, la convenienza dell'adozione della consociazione a discapito della coltura pura (Mohammadzadeh, et al., 2022).

Consociando il cece con lo zafferano in diverse condizioni di irrigazione si è potuto verificare che la resa dello zafferano non è stata influenzata dall'irrigazione una tantum: questo ha indicato che tale specie può essere una coltura idonea per le regioni aride e semiaride. Tra le diverse consociazioni proposte, quella con una densità di semina dello zafferano pari a quella della coltura pura e una densità di semina del cece pari al 50% di quella della coltura pura ha fatto registrare la stessa produzione della coltura pura di zafferano: questo tipo di consociazione, quindi, può essere sostituita alla coltura pura di zafferano (Mohammadkhani, et al., 2023).

Per quanto riguarda la consociazione del sesamo con le leguminose, non è stata registrata una differenza statisticamente significativa nel numero di rami e di capsule per piante e nella resa in semi del sesamo e delle leguminose ad esso consociate. La consociazione tra il sesamo e il fagiolo mungo verde alla metà della densità di semina normalmente utilizzata nella coltura pura è risultata essere la casistica che ha presentato il LER totale maggiore (pari a 1,34). Il sesamo consociato, inoltre, è risultato più aggressivo in tutte le consociazioni analizzate, eccetto in quella in cui era stato consociato al fagiolo mungo verde alla metà della densità di semina: questa consociazione, quindi, è quella che presenta la probabilità maggiore di essere adottata in pieno campo (Baraki, et al., 2023).

Nel caso in cui la fragola viene consociata con le leguminose, si può ottenere un aumento della quantità di azoto che viene organicata dai batteri azotofissatori in virtù della simbiosi che questi instaurano con le leguminose. Poiché una parte consistente della superficie del suolo dedicato alla coltivazione della fragola rimane inutilizzata, la consociazione tra questa specie e le leguminose risulta essere un'importante opzione per aumentare la produttività dell'unità di superficie del suolo. Inoltre, ci è potuto verificare che la consociazione tra la fragola e le leguminose riduce l'incidenza delle malattie e dei parassiti e, quindi, è possibile ridurre il quantitativo di agrofarmaci impiegati nella coltivazione della fragola. Per quanto riguarda l'incidenza delle erbe spontanee nella coltivazione della fragola consociata con le leguminose, si ha una minore presenza di tali erbe spontanee da cui deriva un minor ricorso alla pacciamatura e agli erbicidi (Dane, et al., 2016).

In uno studio (Jaya, et al., 2024) è stato visto che la consociazione tra il peperoncino e il fagiolo mungo verde o l'arachide su suoli sabbiosi e asciutti possa aumentare la resa della solanacea. Il LER di tutte le consociazioni prese in considerazione dallo studio in oggetto era superiore all'unità, con il valore più elevato pari a 2,25 nel caso della consociazione tra il peperoncino e l'arachide seminati nello stesso giorno. Per quanto riguarda l'incremento della fertilità del suolo (e, quindi, la sostenibilità), la consociazione tra il peperoncino e il fagiolo mungo verde risulta essere una valida opzione.

Nel caso della camelina, l'incremento maggiore della resa di tale oleaginosa è stato registrato nel caso della consociazione con il pisello (la consociazione della camelina con le leguminose, comunque, ha fatto registrare costantemente LER superiori all'unità) (Pagani, et al., 2024).

Uno studio (Fotuhi-Chiyaneh, et al., 2023) ha dimostrato che le consociazioni in cui sono somministrati sia i fertilizzanti chimici sia i biofertilizzanti hanno presentato un assorbimento aumentato dei nutrienti da parte dell'ajowan, del fieno greco e del pisello (questo si traduce, quindi, in una maggiore produttività di tali specie). Il fieno ottenuto dalla consociazione a cui sono somministrati sia i fertilizzanti chimici sia i biofertilizzanti ha presentato delle caratteristiche qualitative migliori (tra cui i nutrienti totali digeribili e l'apporto di energia netta per la lattazione). L'applicazione sia dei fertilizzanti chimici sia dei biofertilizzanti alla consociazione tra ajowan, fieno greco e pisello può essere un metodo alternativo e sostenibile per ridurre l'eccessivo utilizzo di fertilizzanti chimici e per migliorare la produttività e la qualità del foraggio in condizioni di input ridotti. Un ulteriore studio (Rezaei-Chiyaneh, et al., 2021) ha dimostrato che una combinazione tra i rizobatteri che promuovono la crescita delle piante (PGPR) e la consociazione tra il cumino nero al 66% e il fieno greco al 34% risulta essere il trattamento migliore per incrementare il LER di tale consociazione e l'assorbimento dei nutrienti: questo è dovuto al fatto che sia la produzione dei semi sia la qualità dell'olio degli stessi di cumino nero e fieno greco consociati tra loro risultano essere migliorate dall'inoculazione con i PGPR e le endomicorrize vescicolo-arbuscolari. Tale aumento della produttività non fornisce soltanto dei benefici di tipo economico agli agricoltori ma incrementa anche la sostenibilità della produzione grazie all'aumento del LER.

Uno studio (Qoreishi, et al., 2023) ha dimostrato che la consociazione tra il fagiolo comune e la melissa con l'inoculo delle endomicorrize vescicolo-arbuscolari hanno migliorato la colonizzazione del suolo da parte delle radici e la concentrazione dei nutrienti e hanno incrementato la resa delle piante, il contenuto e la qualità dell'olio essenziale di melissa. Nel caso della consociazione tra la melissa alla stessa densità di impianto della coltura pura e il

fagiolo comune al 15% della densità di impianto della coltura pura con l'inoculo delle endomicorrize vescicolo-arbuscolari ha mostrato, mediamente, una produttività dell'unità di superficie del suolo superiore del 43% rispetto alla coltura pura. La consociazione tra la melissa alla stessa densità di impianto della coltura pura e il fagiolo comune ad una densità di impianto pari al 45% della coltura pura ha mostrato una produzione più elevata di essenza (sia nel primo sia nel secondo raccolto). L'inoculo con le endomicorrize vescicolo arbuscolari nelle consociazioni a bassi input, generalmente, risulta essere una strategia alternativa alla coltura pura per incrementare il contenuto e la composizione dell'olio essenziale di melissa.

Uno studio (Duan, et al., 2023) ha dimostrato che la consociazione del tè con le leguminose destinate al sovescio incrementa la concentrazione di teanina e di epigallocatechingallato nelle foglie del tè: questo effetto è particolarmente significativo quando il tè entra in rotazione con la soia e la vecchia cinese. La consociazione del tè con le leguminose destinate al sovescio, inoltre, ha determinato un impatto positivo sui nutrienti presenti nel suolo in quanto si è verificato un incremento di azoto amminoacidico nel suolo e delle attività enzimatiche extracellulari coinvolte nel ciclo del carbonio e dell'azoto migliorando, quindi, la multifunzionalità ecologica del suolo. La consociazione in oggetto, inoltre, ha promosso la proliferazione dei microrganismi potenzialmente benefici e, in particolare, quelli coinvolti nel ciclo dell'azoto e nella solubilizzazione del fosforo. La consociazione del tè con la soia o la vecchia cinese, nel complesso, ha la potenzialità di migliorare il suolo e di promuovere la sostenibilità della produzione del tè: questo approccio non incrementa solamente la qualità del suolo ma contribuisce anche alla crescita e alla coltivazione del tè e offre una strategia promettente per l'aumento dell'accumulo di teanina nelle foglie di tè.

La consociazione della camelina con *Medicago polymorpha* o *Medicago sativa* sembra essere promettente per incrementare l'efficienza dell'utilizzo del suolo, della produttività del suolo e il profitto economico e, inoltre, mostra il potenziale per incrementare la sicurezza alimentare e la sostenibilità dello sviluppo agricolo. In particolare, la consociazione tra la camelina e l'erba medica (quest'ultima con un investimento di seme pari a 15 o 30 kg·ha<sup>-1</sup>) ha mostrato il maggior incremento di resa espressa sia in termini di biomassa di erba medica sia in termini di semi di camelina (Gao, et al., 2024).

### 1.3.3 Consociazioni in cui è presente almeno una specie orticola

In uno studio (Fathi, 2023) è stata ottenuta una riduzione della popolazione di *Tetranychus urticae* mediante la consociazione della melanzana con l'aglio (sia nella tesi in cui venivano alternate quattro file di melanzana ad altrettante di aglio, quattro file di melanzana a otto file di aglio e quattro file di melanzana a dodici di aglio) rispetto alla coltura pura: questo,

probabilmente, è dovuto alla produzione di composti organici volatili da parte dell'aglio. Inoltre, è stata riscontrata la possibilità di ridurre la popolazione di *Tetranychus urticae* aumentando il numero di file di aglio presenti all'interno della consociazione. La consociazione tra melanzana e aglio, quindi, è una pratica efficace per ridurre la popolazione di *Tetranychus urticae*; questo tipo di consociazione, inoltre, ha promosso l'aumento sia del numero di predatori sia della resa della melanzana e dell'aglio rispetto alle relative colture pure. La consociazione della melanzana con il cavolfiore, invece, ha mostrato un LER, una redditività e un rapporto costi-benefici elevati (Rahman, et al., 2024).

In un lavoro in cui sono stati analizzati gli effetti della consociazione del cavolo cappuccio bianco con le piante aromatiche (Morkeliune, et al., 2024) è stato visto che la composizione minerale della brassicacea è rimasta inalterata o ha subito delle alterazioni minime dovute alla consociazione con le piante aromatiche. È stato visto, invece, che la consociazione tra il cavolo cappuccio bianco e le piante aromatiche ha portato a notevoli variazioni nel contenuto di sostanza secca ed acido ascorbico della brassicacea rispetto alla coltura pura (tuttavia, i risultati non erano dissimili da quelli riscontrati nella coltura pura). I risultati dello studio in oggetto hanno suggerito che il timo e il garofano d'India potrebbero essere consociati con il cavolo cappuccio bianco per migliorare le condizioni fitosanitarie della brassicacea senza influenzare la sua composizione biochimica.

In uno studio condotto su una coltivazione di tè (Gong, et al., 2024) si è potuto verificare che gli icneumonidi, le coccinelle predatrici e gli acari predatori hanno mantenuto un'elevata abbondanza nelle piantagioni di tè consociate con le piante aromatiche (questo era associato ad una minore abbondanza di parassiti in quanto erano presenti le comunità di nemici naturali): è per tale motivo che la consociazione tra il tè e le piante aromatiche potrebbe aumentare la produttività delle colture e la sostenibilità a lungo termine delle pratiche agricole. L'impiego delle piante aromatiche nelle consociazioni, quindi, possono fornire un servizio ecosistemico essenziale nelle piantagioni di tè.

Per quanto riguarda la consociazione di *Salvia miltiorrhiza* con il tabacco, questa ha incrementato notevolmente la quantità di nutrienti presenti nel suolo e ha migliorato l'ambiente micro-ecologico del suolo. La consociazione del tabacco con *Salvia miltiorrhiza* incrementa la qualità del tabacco flue-cured e l'efficienza della semina. È stato visto che si ha un incremento del contenuto di potassio, di zuccheri totali e di zuccheri riducenti nelle foglie del tabacco flue-cured alternando una fila di tabacco con una di *Salvia miltiorrhiza* mentre, nel caso in cui venivano alternate due file di tabacco ad altrettante di *Salvia miltiorrhiza*, si ottenevano delle produzioni maggiori. Indipendentemente dal numero di file di tabacco che

vengono alternate a quelle di *Salvia miltiorrhiza* si ha una riduzione degli ostacoli alla coltivazione del tabacco in omosuccessione (Su, et al., 2024).

È stato visto che l'applicazione di biochar sia alla consociazione tra patata e cipolla sia alle rispettive colture pure può migliorare le proprietà fisiche e chimiche del suolo, può promuovere l'assorbimento dei nutrienti da parte delle piante e può migliorare la produttività delle colture. La consociazione tra patata e cipolla, unita alla somministrazione di biochar, può aumentare la presenza di microrganismi presenti nel suolo: il biochar, in questo contesto, ha mostrato un piccolo effetto sulla diversità delle comunità microbiche ma ha ridotto la diversità della comunità fungina del suolo. Si è potuto verificare, inoltre, che si ha l'aumento della presenza di alcuni microrganismi potenzialmente benefici (come, ad esempio, *Pseudeurotium* spp. e *Solirubrobacter* spp.) e una riduzione della presenza di alcuni microrganismi dannosi (come, ad esempio, *Kribbella* spp. e *Ilyonectria* spp.) nel suolo interessato dalla consociazione tra patata e cipolla a cui è stato applicato il biochar. Questi risultati hanno indicato che la somministrazione di un'adeguata quantità di biochar alla consociazione tra cipolla e patata risulta essere efficace per incrementare la salute del suolo e la produttività delle colture (He, et al., 2021).

Uno studio (Lozano Menez, et al., 2024), infine, ha verificato che la consociazione tra la lattuga e il ravanella mostra un consumo inferiore di acqua rispetto alla coltura pura di lattuga.

#### 1.4 Vantaggi e svantaggi delle consociazioni

La consociazione risulta essere la soluzione migliore di coltura mista finalizzata a garantire la posizione più idonea per le piante, un profitto netto maggiore agli agricoltori e a ridurre il numero delle operazioni colturali, di trattamenti fitosanitari e del tempo necessario alla raccolta (Zhang, et al., 2011).

Uno studio (Alcon, et al., 2020) ha dimostrato che la società è consapevole delle esternalità colturali ed ambientali causate dagli agroecosistemi delle aree semiaride del bacino del Mar Mediterraneo. Le persone, inoltre, riconoscono la diversità dei benefici forniti dall'adozione delle consociazioni nelle aree semiaride del bacino del Mar Mediterraneo: i servizi ecosistemici culturali e di regolazione nell'ambito della consociazione, infatti, sono rilevanti e sono altamente richiesti dalla società. Nello stesso studio precedentemente citato si afferma che la diversificazione delle colture è la scelta più apprezzata in quanto vengono massimizzati sia i benefici ambientali sia quelli sociali: il valore economico totale (che è stato stimato in 1.361,22 €·ha<sup>-1</sup>·anno<sup>-1</sup>) è superiore ai benefici economici ottenuti dalle colture negli appezzamenti a bassa redditività. È per tale motivo, quindi, che l'adozione delle pratiche di

diversificazione culturale a livello aziendale induce un beneficio sociale su scala regionale promuovendo la sicurezza alimentare, la salute ambientale, etc. Infine, nello studio in oggetto è stato rilevato che l'adozione delle consociazioni è limitata alle aziende agricole di piccole dimensioni a conduzione familiare o a quelle che seguono i principi dell'agricoltura biologica, sebbene la diversificazione delle colture sia incoraggiata dalla PAC.

Le consociazioni sono particolarmente diffuse in numerose zone dell'Africa, dell'Asia e dell'America Latina (Allen & Obura, 1983) e presentano diversi vantaggi rispetto alle colture pure: le consociazioni, infatti, utilizzano in modo più efficace le risorse, riducono i costi di produzione e i rischi legati alle avversità atmosferiche ed incrementano la stabilità economica degli agricoltori in quanto rendono il sistema particolarmente adatto alle aziende agricole di piccole dimensioni e caratterizzate da un'elevata incidenza della manodopera (Francis, et al., 1976).

I sistemi culturali intensivi (anche quelli basati sulle consociazioni) hanno raggiunto delle rese elevate mediante l'utilizzo degli agrofarmaci, di cultivar migliorate e di altre tecnologie ad elevati input (Francis, 1989). Le consociazioni sono particolarmente adatte alle aziende agricole di piccole dimensioni dei Paesi in via di sviluppo in quanto i sistemi culturali basati sulle colture consociate sono caratterizzati da un controllo più efficiente delle malattie e dei parassiti delle piante, da maggiori vantaggi nelle condizioni di umidità e/o di nutrienti limitanti e da una notevole stabilità delle rese (tali caratteri, infatti, sono particolarmente utili in quelle zone caratterizzate da bassi input e da rischi elevati) (Willey, et al., 1983). La compensazione tra le diverse componenti del sistema può portare, complessivamente, ad una maggiore stabilità delle rese e dei redditi a seguito dell'adozione delle consociazioni (Francis, 1986).

La combinazione di colture differenti è condizionata primariamente dalla lunghezza del ciclo culturale e dalla capacità di adattamento delle colture ad ambienti particolari (Ofori & Stern, 1987). Il mais, ad esempio, è una delle specie che viene inserita più frequentemente nelle consociazioni e, spesso, viene consociato con una leguminosa: la consociazione tra un cereale e una leguminosa, infatti, offre particolari possibilità per lo sviluppo sostenibile ed efficiente dal punto di vista energetico grazie alla capacità della leguminosa di instaurare una simbiosi a livello radicale con i batteri azotofissatori e di aumentare il quantitativo di proteine nei cereali e nel foraggio (IAEA, 1980).

Con lo sviluppo di un Paese, i suoi sistemi agricoli tendono a divenire altamente tecnici e fortemente dipendenti dalla meccanizzazione: questo, ad esempio, è evidente in America settentrionale, nei Paesi dell'ex-URSS e in gran parte dell'Europa. Gli elevati livelli di meccanizzazione e i cambiamenti nei luoghi di lavoro hanno fatto sì che i sistemi agricoli

altamente dipendenti dalla manodopera siano scomparsi da molti dei Paesi delle fasce temperate. Quando l'apporto di nutrienti potenzialmente limitanti diventa adeguato nell'ambito di un'agricoltura ad elevati input, inoltre, è probabile che scompaiano anche i vantaggi derivanti dalla consociazione associati ad un utilizzo più efficiente dei nutrienti. All'inizio del 20° secolo, ad esempio, nel Regno Unito venivano comunemente coltivate delle consociazioni di avena, orzo e veccia comune per la produzione del foraggio: tale pratica è tutt'ora in gran parte caduta in disuso ma, tuttavia, l'interesse per le consociazioni tra i cereali e le leguminose in qualità di cover crop per la produzione di foraggio rimane una tecnica interessante in alcune aree (Gilliland & Johnston, 1992).

Le consociazioni, nelle regioni tropicali, sono strettamente associate alla produzione dei cereali mentre, nelle regioni temperate, stanno ricevendo delle attenzioni crescenti come tecnica efficiente per la produzione di foraggio. In alcune regioni temperate sta crescendo l'interesse nei confronti delle consociazioni tra i cereali e le leguminose (Anil, et al., 1998).

Nonostante nella letteratura scientifica possano essere ritrovati diversi esempi, le consociazioni non hanno trovato spazio in molti Paesi con l'eccezione dei prati stabili di graminacee e leguminose in quanto la produzione di questi non è il fattore principale (Mason & Pritchard, 1987). Secondo uno studio (Willey, et al., 1983), è necessario rispondere a due domande fondamentali circa le consociazioni nei Paesi sviluppati:

- (i) in primo luogo è necessario chiedersi se l'adozione delle consociazioni risulti funzionale all'attività agricola nel caso in cui sia presente un numero elevato di specie all'interno della consociazione, elevati input, genotipi migliorati e una buona gestione;
- (ii) inoltre è necessario chiedersi se le consociazioni presentano eccessivi problemi gestionali nelle zone in cui l'attività agricola risulta essere sviluppata.

Per quanto riguarda il primo punto, i vantaggi potrebbero essere inferiori con input maggiori, ma anche un vantaggio pari al 10-20% che risulta essere modesto se viene comparato alle consociazioni adottate nelle regioni tropicali ma, al contrario, può risultare un aumento utile nei sistemi ad alto rendimento.

La portata dei problemi sollevati nel secondo punto dipende in gran parte dal grado di meccanizzazione. Tuttavia, un problema importante consiste nel fatto che la consociazione non è una miscela casuale di colture diverse ma si tratta di una disposizione ordinata di colture diverse disposte in file separate: in questa situazione, la semina meccanica e l'applicazione dei concimi e degli agrofarmaci non risulta essere difficoltosa sulle file appropriate. La raccolta, al contrario, può rappresentare ancora un problema ma che può essere superato facilmente

laddove le colture consociate vengano raccolte per la produzione di foraggio oppure nel caso in cui vengano pascolate. Le consociazioni, quindi, saranno un sistema utile nei Paesi sviluppati solamente nel caso in cui i benefici apportati siano sufficienti a compensare gli eventuali costi aggiuntivi e le difficoltà presentati dalle consociazioni.

Gli aspetti associati alla consociazione (come, ad esempio, la modalità di semina e di raccolta e le modalità di applicazione dei concimi e degli agrofarmaci) rendono tale sistema meno attraente dal punto di vista pratico nei Paesi delle regioni temperate caratterizzate da sistemi agricoli altamente meccanizzati. Un interesse crescente per l'agricoltura più sostenibile, tuttavia, ha portato a focalizzare l'attenzione (almeno a livello di ricerca) sui sistemi agricoli più complessi sebbene molti degli aspetti pratici dell'introduzione delle leguminose all'interno dei sistemi agricoli esistenti e nelle rotazioni richiedano ancora degli approfondimenti. Le ragioni di questo rinnovato interesse includono:

- (i) possibili vantaggi a livello economico e di marketing legati all'utilizzo dei foraggi autoprodotti;
- (ii) complementarità della crescita e riduzione degli input esterni come, ad esempio, i concimi e gli agrofarmaci;
- (iii) avvento delle tecnologie in grado di raccogliere le colture consociate in modo efficace (Anil, et al., 1998).

La consociazione di colture adatte presenta diversi vantaggi socio-economici (Gosh, 2004), biologici (Bedoussac, et al., 2015) ed ecologici (Brooker, et al., 2014) rispetto alle colture pure. La consociazione, inoltre, incrementa la biodiversità dell'agroecosistema (Rscharntks, et al., 2005) in quanto le colture che la compongono forniscono un habitat idoneo ad un numero elevato di insetti e di organismi del suolo che, altrimenti, non sarebbero presenti nel caso di una coltura pura (Cai, et al., 2010). I parassiti e i parassitoidi (come, ad esempio, ragni, vespe parassite, etc.) aiutano l'agricoltore nel controllo degli insetti che danneggiano le colture mediante il controllo delle loro popolazioni (Altieri, 1995). Le consociazioni dei cereali con le leguminose, inoltre, intervengono nella difesa del suolo, riducono la biomassa delle erbe spontanee, le piante si sostengono le une alle altre e incrementano le rese delle colture, la quantità delle proteine e la durata del periodo ottimale di raccolta (Banik, et al., 2004).

Sebbene uno degli obiettivi principali dell'SDG sia quello di migliorare la qualità del cibo mediante l'adozione di sistemi agroecologici, la ricerca relativa ai profili nutrizionali degli alimenti prodotti dalle colture consociate atti al miglioramento della salute umana deve essere ulteriormente sviluppata. Per quanto riguarda l'azione di specifici composti bioattivi sulla salute umana, la coltivazione in colture pure di diverse specie risulta essere la soluzione

migliore per ottenere dei benefici nutraceutici nei confronti degli esseri umani (Sanchez-Velazquez, et al., 2023). Ulteriori ricerche possono essere utili per confrontare e per migliorare la quantità dei composti bioattivi e dei macronutrienti prodotti dalle colture consociate nelle condizioni ambientali più diverse (Arenas-Salazar, et al., 2024).

Le ricerche condotte in diverse località geografiche presentano diversi vantaggi derivanti dalle consociazioni:

- (i) maggiore stabilità della resa nelle diverse stagioni (Amador & Gliessman, 1990);
- (ii) incremento dell'utilizzo delle risorse (Natarajan & Willey, 1980);
- (iii) miglior rapporto con l'azoto nelle leguminose consociate (Ta, et al., 1989);
- (iv) incremento dell'assorbimento di fosforo e potassio (Ae, et al., 1990);
- (v) capacità aumentata di radicazione (Hayners, 1990);
- (vi) maggiore copertura del suolo (Siddoway & Barnett, 1976);
- (vii) efficienza maggiorata dell'utilizzo dell'acqua (Hulugalle & Lal, 1986);
- (viii) incidenza ridotta di malattie e fitofagi (Litsinger & Moody, 1976);
- (ix) miglior controllo delle erbe spontanee (Amador & Gliessman, 1990);
- (x) aumento dell'assorbimento dei metalli pesanti (Ali, et al., 2024).

Il contributo della vegetazione all'arricchimento del suolo in enzimi (come, ad esempio, le saccarasi e le fosfatasi) è un fenomeno generalmente accettato anche se esistono delle interpretazioni controverse a livello scientifico: alcune fonti, infatti, parlano di arricchimento legato solamente ai fenomeni evolutivi della sostanza organica del suolo mentre altre indicano come possibile l'emissione di enzimi da parte delle radici. In ogni caso, tale fenomeno interessa la consociazione in quanto la carica enzimatica del suolo influenza la sua capacità e la messa in circolo degli elementi nutritivi (Giardini, 2004).

I rischi derivanti dalla coltivazione delle colture in purezza possono essere minimizzati avendo più di un raccolto alla volta sullo stesso appezzamento (Woolley & Davis, 1991). Le fonti di riduzione dei rischi derivanti dall'adozione delle consociazioni rispetto alle colture pure vengono attribuite, solitamente, sia ad una ridotta oscillazione della produzione e/o del reddito netto sia ad una minore probabilità di fallimento della coltura e, nelle zone in cui l'acqua risulta essere un fattore limitante, la consociazione dovrebbe essere ampiamente praticata come strategia più efficiente per la riduzione della probabilità di fallimento della coltura (Lynam, et al., 1986). Si può dedurre che la diversificazione delle colture presenti nella consociazione sia un mezzo utile per incrementare la resa complessiva e per ridurre l'incertezza dei prezzi in quanto le condizioni meteorologiche e quelle economiche possono avere un effetto differenziato sulle colture presenti in consociazione (Anil, et al., 1998).

Il comportamento delle piante presenti in una consociazione è influenzato grandemente da alcuni fenomeni biologici come la competizione, la migrazione negativa degli elementi minerali dalle piante al suolo, l'emissione di composti ad azione allelopatica, l'emissione di enzimi e l'utilizzazione dell'azoto fissato dai rizobi simbiotici da parte dei cereali (Giardini, 2004). La competizione tra le piante consociate si instaura quando la disponibilità complessiva di uno o più fattori vitali (come, ad esempio, l'acqua, la luce, gli elementi nutritivi, etc.) risulta essere inferiore, in un determinato ambiente, alla richiesta di due o più piante: il fenomeno consiste, quindi, nella sottrazione reciproca, da parte delle piante, di uno o più di tali fattori che vengono utilizzati da ogni individuo in quantità subottimali. Anche con una disponibilità illimitata dei fattori vitali, inoltre, si possono verificare degli eventi di competizione nel caso in cui gli individui manifestino una diversa attitudine alla loro utilizzazione: per questo motivo, si può affermare che i vari individui presenti nella consociazione presentano una competitività differenziata, una differente aggressività e un'efficienza fisiologica differenziata nei riguardi dei fattori ambientali (Giardini, 2003).

La competitività non è solo una caratteristica specifica ma, nell'ambito della medesima specie, esistono delle cultivar variamente competitive. Questo risulta essere un carattere molto importante per il miglioramento genetico: da una specie poco competitiva, infatti, può essere selezionata una cultivar più competitiva di un'altra appartenente ad una specie molto aggressiva. Tutto questo può incrementare il risultato agronomico della consociazione perché, in genere, si ha una consociazione ben riuscita quando la competitività delle cultivar conviventi non sia troppo dissimile. È necessario sottolineare che la competitività agronomica comprende anche la capacità di adattamento alle condizioni colturali e agli obiettivi aziendali (Giardini, 2004).

Se dal punto di vista della singola pianta la competizione risulta essere sempre un fenomeno negativo, altrettanto non succede quando essa viene esaminata dal punto di vista della coltura nel suo complesso: quasi sempre, infatti, non è alla produttività del singolo individuo che sono rivolte le attenzioni dell'agricoltore ma alla produttività riferita all'unità della superficie. In ogni coltivazione, quindi, si tende ad adottare un investimento (n. di piante  $\cdot$  m<sup>2</sup>) che è ben lungi dall'escludere i fenomeni competitivi tra le singole piante anche se, gran parte degli interventi agronomici (come, ad esempio, la concimazione e l'irrigazione) vengono eseguiti allo scopo di minimizzare la manifestazione degli effetti della competizione. Nelle colture pure esiste, quindi, una competizione intraspecifica (quindi tra gli individui appartenenti alla medesima specie) mentre nella consociazione, in cui è prevista la coesistenza di due o più specie, si ha anche la competizione interspecifica (Giardini, 2003).

All'emissione delle tossine da parte degli apparati radicali si riconosce, oltre alla capacità di influenzare gli "effetti di avvicendamento", anche la proprietà di condizionare la compatibilità di convivenza fra le specie coltivate (Giardini, 2004).

#### 1.4.1 *Miglioramento dell'efficienza d'uso delle risorse ed incremento della resa*

È stato segnalato che le colture consociate siano più produttive delle colture pure a parità di superficie di suolo: questo è dovuto al fatto che due colture che vengono coltivate insieme presentano differenti modalità di utilizzo delle risorse (Willey, et al., 1983). Alcuni studi hanno dimostrato che, da parte delle colture consociate, esiste un miglior utilizzo delle risorse nel tempo (Natarajan & Willey, 1980) e nello spazio (Reddy & Willey, 1981) e, come è riportato in uno studio (Willey, 1979), l'ottimizzazione dei vantaggi derivanti dalle consociazioni si ottiene mediante la massimizzazione della complementarità tra le componenti e la riduzione ai minimi termini della competizione tra le colture. In un'ulteriore pubblicazione (Willey, 1979) si afferma che la "complementarità temporale" probabilmente induce dei benefici maggiori rispetto alla "complementarità spaziale" in quanto viene raggiunto un maggior utilizzo della luce nel tempo: questo è vero soprattutto nell'ambito della produzione del foraggio in cui si ha la possibilità di modificare la composizione delle specie per garantire la copertura del suolo nell'ultima parte del ciclo colturale (in questo modo si ha l'ottimizzazione dell'utilizzo delle risorse). In questo modo, i cambiamenti nella disposizione spaziale delle colture presenti nella consociazione possono consentire una migliore intercettazione della luce e un miglior utilizzo dei nutrienti. La modificazione spaziale delle piante finalizzata all'ottimizzazione dell'intercettazione della luce e della sua conversione in sostanza secca, tuttavia, risulta essere complessa poiché le piante che risultano essere favorite in una consociazione non sono necessariamente quelle con la posizione migliore per l'intercettazione della radiazione luminosa (Francis, 1989).

#### 1.4.2 *Azoto*

La nutrizione azotata occupa una posizione di rilievo nell'ambito della consociazione in cui è contemplata la presenza di almeno una leguminosa in quanto l'aggiunta netta di azoto può essere ottenuta mediante l'azotofissazione operata dai rizobi (Anil, et al., 1998). Il processo di fissazione biologica dell'azoto richiede un numero sufficiente di rizobi (Keatinge, et al., 1995), delle caratteristiche favorevoli del suolo (pH, salinità e qualità dei nutrienti, in particolare del fosforo) e delle condizioni adeguate di temperatura e di umidità del suolo. Però la quantità di azoto che viene fissata biologicamente, in genere, diminuisce con l'aumentare della disponibilità dello stesso elemento nel suolo (Anil, et al., 1998).

Il trasferimento dell'azoto dalle leguminose alle specie delle altre famiglie botaniche può avvenire direttamente in piccole quantità tra colture consociate oppure indirettamente alle colture seguenti, in quantità molto maggiori, attraverso il suolo (Searle, et al., 1981). I fattori che possono influenzare il potenziale delle leguminose nel fornire l'azoto ad un cereale ad essa consociato includono la densità di impianto, la radiazione luminosa che viene intercettata, la specie e i nutrienti limitanti (con particolare riferimento al fosforo) (Francis, 1989).

Quando l'economia dell'azoto risulta essere una variabile gestionale importante, i criteri utilizzati per decidere se coltivare una determinata specie in coltura pura oppure in consociazione con un'altra specie, si deve includere la produzione di sostanza secca, l'apporto di concimi e l'effetto residuale delle colture precedenti (Papastylianou, 1990). In uno studio (Hiebsch & McCollum, 1987) si è notato che la consociazione tra una leguminosa e una specie appartenente ad un'altra famiglia botanica è una delle poche soluzioni capaci di aumentare la produzione delle colture consociate non indotta dall'effetto complementare del tempo.

#### 1.4.3 Fosforo e potassio

L'assorbimento di fosforo e di potassio è regolato in gran parte dalla diffusione di questi elementi verso le radici mediante la soluzione circolante. Nel caso in cui ci siano più radici disperse nel suolo (come accade nelle consociazioni), l'assorbimento di fosforo e di potassio risulta essere aumentato (Barber, 1995).

L'assorbimento totale di fosforo e di potassio da parte delle consociazioni supera quello di ciascuna coltura presa singolarmente e, laddove tali nutrienti non risultino limitanti, l'assorbimento di tali elementi è in funzione della crescita della coltura: la maggior parte dei lavori sperimentali, infatti, sono stati condotti su suoli in cui la concentrazione sia del fosforo sia del potassio risultava essere limitante e le restrizioni nella crescita imposte da altri fattori sembrano determinare se la consociazione aumentasse o diminuisse l'efficienza nell'utilizzo di fosforo e potassio (Morris & Garrity, 1993).

Occasionalmente si può verificare una facilitazione interspecifica in cui una coltura aumenta l'assorbimento dei nutrienti dell'altra (Vandermeer, 1989). L'assorbimento di fosforo può essere incrementato mediante la produzione di essudati radicali da parte delle specie consociate facendo rilasciare, in questo modo, il fosforo legato a diversi siti (Ae, et al., 1990). Anche le endomicorrize vescicolo-arbuscolari possono svolgere un ruolo nel trasferimento degli elementi nutritivi da una specie all'altra (Chiariello, et al., 1982).

#### 1.4.4 *Capacità di radicazione*

Le consociazioni risultano essere più efficienti nell'esplorazione di un volume maggiore di suolo nel caso in cui le colture che la compongono presentano degli habitus radicali diversi, soprattutto per quanto riguarda la profondità degli apparati radicali (Willey, 1979). Ad esempio, una specie che appartiene ad una consociazione può essere costretta a sviluppare le radici più in profondità nel caso in cui essa venisse coltivata insieme ad un'altra specie caratterizzata da un apparato radicale superficiale (Fisher, 1976).

I modelli di radicazione differiscono notevolmente tra i cereali e le leguminose: questo è uno dei motivi della diffusione delle consociazioni tra questi due gruppi di piante (Anil, et al., 1998).

#### 1.4.5 *Copertura del suolo*

Due o più colture, quando vengono consociate, possono fornire una copertura del suolo più rapida e più estesa. Periodi di copertura del suolo più lunghi possono aiutare a migliorare la conservazione del suolo nelle regioni soggette ad erosione (Woolley & Davis, 1991). Le consociazioni, inoltre, possono incrementare la protezione del suolo mediante una maggiore copertura vegetale (Siddoway & Barnett, 1976).

#### 1.4.6 *Efficienza nell'utilizzo dell'acqua*

Poiché l'acqua è spesso una risorsa limitante, qualsiasi azione di miglioramento nell'efficienza dell'utilizzo delle risorse idriche come risultato della consociazione può portare anche ad un maggiore utilizzo di altre risorse (Hook & Gascho, 1988). Laddove l'acqua sia la risorsa limitante, le consociazioni possono fornire dei vantaggi sia temporali sia spaziali (Baker & Norman, 1975). La capacità di una consociazione di utilizzare più efficacemente i nutrienti solubili e quelli non solubili, se confrontati con le rispettive colture pure, dipende dall'entità della crescita delle radici delle specie che compongono la consociazione, dalla quantità di energia presente nel suolo e da quanto le piante riescano ad esplorare il suolo attraverso le radici (Anil, et al., 1998).

In un articolo (Francis, 1989) si suggerisce che è probabile che si verifichi un incremento dell'efficienza biologica quando la consociazione esplori un volume maggiore di suolo in modo più completo rispetto alla coltura pura. Esiste anche la possibilità che vi siano delle differenze nel momento di massima richiesta di nutrienti sulla base delle specie che sono state consociate (Willey, 1979).

#### 1.4.7 *Parassiti e malattie*

Un aspetto importante delle consociazioni è il loro potenziale nel ridurre l'incidenza dei parassiti e delle malattie: questo, tuttavia, risulta essere complesso e sono stati osservati sia degli effetti benefici sia degli effetti dannosi. In uno studio (Chowing & Ingram, 1991) sono stati suggeriti tre meccanismi mediante i quali la presenza di colture consociate possa ridurre l'incidenza dei parassiti e delle malattie e che implicano tutti la riduzione del tasso di crescita dell'organismo attaccante:

- (i) le consociazioni fanno sì che le piante della componente attaccata siano degli ospiti più poveri (la specie suscettibile, ad esempio, risulta essere meno vigorosa e più piccola rispetto all'altra che compone la consociazione se viene confrontata a quando viene coltivata in coltura pura);
- (ii) la consociazione interferisce direttamente con l'organismo attaccante tramite, ad esempio, con l'interferenza visiva, olfattiva, fisica o chimica riducendo il numero di piante ospiti per unità di superficie ritardando, in questo modo, l'organismo attaccante e/o riducendo la sopravvivenza e la fecondità;
- (iii) le consociazioni modificano l'ambiente dell'ospite in modo tale da favorire i nemici naturali dell'organismo attaccante.

In un articolo (Francis, 1989) si è visto che, nelle consociazioni, la presenza dei parassiti si era ridotta nel 53% delle prove sperimentali mentre era aumentata nel 18% dei casi: le ragioni di tale aumento di parassiti indicano la riduzione della coltivazione e l'aumento dell'ombreggiamento il quale favorisce alcuni patogeni, le specie che fungono da ospiti alternativi e la presenza di residui vegetali che svolgono la funzione di fonti di inoculo degli agenti patogeni.

La diversità delle specie presenti negli agroecosistemi più complessi (e, quindi, la dispersione delle singole specie ospiti) possono limitare la diffusione dei patogeni delle piante. In una combinazione di colture consociate si ha una mescolanza di piante sensibili e resistenti e, quindi, si ha una maggiore distanza tra una pianta ospite e l'altra (Altieri & Liebman, 1986): in effetti, quanto più una consociazione assomiglia ad un ecosistema naturale, tanto maggiore sarà il successo nell'evitare le epidemie di malattie delle piante (Anil, et al., 1998).

#### 1.4.8 *Popolazione delle erbe spontanee*

In un articolo (Mugabe & Sinje, 1982) è stato visto che nelle consociazioni è presente una biomassa minore di erbe spontanee rispetto a quella riscontrata nelle colture pure: questo significa che le consociazioni, se confrontate con le colture pure, risultano essere più efficaci

nel controllo delle erbe spontanee. La maggiore capacità competitiva delle colture consociate viene attribuita principalmente all'elevata pressione demografica fornita dall'insieme delle specie che fanno parte della consociazione (Altieri & Liebman, 1986). L'ombreggiamento del suolo e la competizione per l'acqua e i nutrienti riducono la germinazione e la crescita delle erbe spontanee: tale competizione da parte delle colture può essere il metodo più economico per controllare le erbe spontanee (Anil, et al., 1998).

Come riportato in un ulteriore articolo (Woolley & Davis, 1991), le pratiche che favoriscono una crescita più vigorosa delle colture aumentano la competizione tra le piante coltivate e quelle spontanee e riducono la necessità di interventi diretti frequenti: questo risulta essere un aspetto importante legato all'adozione delle consociazioni sui suoli ricchi di nutrienti dove la crescita delle erbe spontanee può risultare particolarmente aggressiva. Il controllo chimico delle erbe spontanee può risultare difficoltoso dopo l'emergenza delle colture: questo risulta essere particolarmente vero quando una dicotiledone viene consociata con una monocotiledone (Woolley & Davis, 1991). In tali consociazioni, tuttavia, le colture occupano più di una nicchia ecologica e, quindi, competono efficacemente con un numero maggiore di erbe spontanee.

#### 1.4.9 *Assorbimento aumentato dei metalli pesanti*

I metalli entrano nel suolo attraverso diverse modalità come, ad esempio, le eruzioni vulcaniche, gli incendi boschivi, la concentrazione a seguito dell'evaporazione dell'acqua degli oceani e l'incremento delle attività di urbanizzazione e di industrializzazione civile (Khan, et al., 2021). L'inquinamento del suolo dovuto ai metalli pesanti può assumere diverse forme in quanto i metalli possono cambiare il loro stato di ossidazione formando composti che possono oppure che non possono essere degradati biologicamente (Just & Gnida, 2015). La produzione di carburante e di energia, l'estrazione e la fusione dei metalli, la produzione di fertilizzanti e l'applicazione degli agrofarmaci hanno incrementato la contaminazione del suolo (Cong, et al., 2015). I metalli pesanti rappresentano un pericolo per l'intero ecosistema attraverso la rete alimentare, l'ingestione diretta e il contatto con il suolo contaminato (Huang, et al., 2023).

I metalli pesanti possono essere suddivisi in due grandi gruppi:

- (i) microelementi essenziali per la crescita delle piante (fanno parte di questo gruppo, ad esempio, il ferro, il manganese, lo zinco e il rame);
- (ii) metalli pesanti non essenziali con funzioni fisiologiche e biologiche sconosciute (Bano, et al., 2018).

A quest'ultimo gruppo fanno parte i metalli pesanti come cadmio, cromo e piombo:

- (i) livelli elevati di cromo risultano essere tossici, provocano dermatiti allergiche nell'uomo e sono associati ad effetti cancerogeni (Qi, et al., 2022);
- (ii) il cadmio è altrettanto tossico nei confronti dell'uomo e degli animali e l'accumulo di tale elemento nel suolo è correlato con la disfunzione renale, degli organi riproduttivi e del fegato, danni ai reni e all'enfisema polmonare (Haider, et al., 2021);
- (iii) la contaminazione da piombo diminuisce la fertilità del suolo e influenza negativamente sia la crescita sia la produzione delle piante (Ali, et al., 2024). Concentrazioni elevate di piombo negli alimenti, inoltre, contribuiscono all'aumento dei danni a livello cerebrale, delle cefalee, dei disturbi a livello del sistema nervoso centrale, coliche e anemia (Bano, et al., 2018).

Esistono diverse metodologie per il risanamento del suolo e per ripristinarlo: il fitorisanamento, ad esempio, è una tecnica rispettosa dell'ambiente ed ecologicamente vantaggiosa e permette di ridurre drasticamente la concentrazione dei metalli pesanti nel suolo (Jing, et al., 2020). Alcune specie vegetali sono in grado di assorbire i metalli pesanti dai suoli contaminati accumulandoli all'interno delle radici (Salem, et al., 2018). L'accumulo dei metalli pesanti all'interno dei tessuti vegetali che poi verranno raccolti coinvolge le specie metallo-tolleranti al fine di risanare il suolo contaminato. L'efficienza del fitorisanamento, tuttavia, dipende dalla tossicità di ciascun metallo pesante e dalla riduzione della crescita delle piante e della produzione di biomassa (Ma, et al., 2022).

In uno studio (Ali, et al., 2024) si è visto che la consociazione tra l'aglio e il loietto è capace di ridurre la concentrazione di cadmio, cromo e piombo nei suoli contaminati: nello studio citato, infatti, si è visto che la consociazione tra queste due specie è risultata più efficiente nell'assorbimento dei metalli pesanti e del loro accumulo all'interno dei tessuti vegetali rispetto alle colture pure. Generalmente, cadmio, cromo e piombo non sono dei nutrienti delle piante e risultano essere altamente tossici per molti organismi dell'ecosistema (inclusi i microrganismi e le piante) (Sangsuwan & Prapagdee, 2021). È stato verificato che la concentrazione di cadmio, cromo e piombo nelle piante era rispettivamente di 0,1-2,4, 0,006-16 e 2-3 mg·kg<sup>-1</sup>: la concentrazione di cadmio nei tessuti vegetali si attestava su livelli normali ma, per quanto riguarda la concentrazione di cromo e piombo, è risultata dannosa e tossica per le piante, con una conseguente diminuzione della produzione della biomassa prodotta (questo è riferibile alla forte fitotossicità di tali elementi e alla riduzione dell'attività fotosintetica) (Bian, et al., 2017). Per quanto riguarda il loietto, la letteratura scientifica riporta una riduzione

della crescita delle radici indotta dalla presenza di metalli pesanti nel suolo nel seguente ordine: piombo > cadmio > cromo (Wong & Bradshaw, 1982).

Gli studi morfologici condotti sul loietto hanno rivelato un sistema linfatico capace di immobilizzare efficacemente i metalli pesanti all'interno dei vasi (Jing, et al., 2020).

Le maggiori quantità di cadmio, cromo e piombo rilevate sia nei germogli delle piante in consociazione rispetto a quelle delle rispettive colture pure suggeriscono un assorbimento, una traslocazione e una mobilitazione dal suolo maggiori nella consociazione tra aglio e loietto. L'apparato radicale dell'aglio seguiva un percorso a zig-zag nel suolo e raggiungeva una profondità compresa tra 6,5 e 12,5 cm nella fase iniziale della crescita e raggiungeva una profondità massima di 28 cm mentre l'apparato radicale del loietto raggiungeva una profondità di 25,3-63,5 cm. Questi risultati dimostrano che la biomassa vegetale era superiore a quella delle rispettive colture pure: questo è dovuto alla diversa profondità degli apparati radicali dell'aglio e del loietto. Le piante, nel caso della consociazione, sono risultate di taglia maggiore rispetto a quelle delle rispettive colture pure ottenendo, quindi, dei vantaggi in termini di incidenza di radiazione luminosa e, quindi, delle rese più elevate (Ali, et al., 2024). L'aglio, inoltre, produce e secerne un ampio spettro di composti organici che possono influenzare l'attività dei microrganismi del suolo supportando, in questo modo, delle simbiosi benefiche, alterando le proprietà chimiche e fisiche del suolo e inibendo la crescita di specie vegetali spontanee mediante l'allelopatia (Bertin, et al., 2003). La consociazione, tuttavia, non ha influenzato in modo significativo l'accumulo e la rimozione dei metalli pesanti nel suolo contaminato rispetto alla coltura pura (Bian, et al., 2023).

Per concludere, è stato dimostrato che la coltivazione dell'aglio in consociazione con altre specie (come, ad esempio, il loietto) può avere un impatto positivo sia sul biorisanamento dei suoli contaminati dai metalli pesanti sia sulle interazioni sotterranee interspecifiche che inducono un aumento della resa. La consociazione dell'aglio con il loietto ha fatto registrare un aumento del peso, del numero delle foglie, dell'altezza delle piante e della lunghezza delle radici e tale consociazione può aiutare le piante a superare lo stress indotto dai metalli pesanti (Ali, et al., 2024).

È stato visto che, oltre alla consociazione tra aglio e loietto, anche quella tra pomodoro e mais riesce a controllare efficacemente l'inquinamento del suolo da metalli pesanti (Upadhyay, et al., 2010).

#### 1.4.10 *La consociazione per la produzione di cibo fresco sulle future colonie marziane*

I coloni umani di Marte del futuro dovranno produrre in loco del cibo fresco per acquisire i nutrienti che vengono persi con la disidratazione del cibo (questa tecnica di conservazione,

infatti, è la tecnica principale per inviare il cibo nello spazio). Per fare in modo che questo avvenga nel modo più opportuno, sono state analizzate la fattibilità e le prospettive applicative delle consociazioni come metodo per la produzione di cibo fresco sulle colonie marziane (Goncavales, et al., 2024): più in dettaglio, è stata studiata la coltivazione di pisello, carota e pomodoro su tre tipi diversi di substrati (vale a dire un substrato che simula la regolite presente su Marte, il terriccio e la sabbia) sia in coltura pura sia in consociazione. Per quanto riguarda i rizobi, questi sono stati aggiunti come inoculo per la coltura del pisello per la fissazione biologica dell'azoto.

I risultati dello studio in oggetto hanno indicato una produzione maggiore del pomodoro coltivato sul substrato che simula la regolite marziana in consociazione rispetto alla coltura pura; la carota, contrariamente al pomodoro, ha mostrato delle produzioni minori in consociazione rispetto alla coltura pura; il pisello, infine, non ha mostrato delle differenze nella produzione tra la coltura pura e la consociazione. Per quanto riguarda l'HI, non è stata registrata nessuna differenza significativa tra la coltura pura e la consociazione per nessuna delle tre colture prese in considerazione. Per quanto riguarda il substrato di coltivazione, il terriccio e la sabbia hanno fatto registrare delle produzioni simili a quelle registrate sul substrato che simula la regolite marziana sia per quanto riguarda la coltura pura sia per quanto riguarda la consociazione: la sabbia, però, è stato l'unico substrato che ha fatto registrare una produzione superiore nella consociazione rispetto alla coltura pura sia per quanto riguarda il pomodoro sia per quanto riguarda il pisello (la carota, invece, ha fatto registrare una diminuzione della produzione). L'analisi visiva delle radici di pisello sia in coltura pura sia in consociazione ha rilevato la presenza di noduli radicali nella sabbia e nel terriccio ma non nel substrato che simula la regolite marziana (ad eccezione di una replica di una coltura pura di pisello che presentava tre noduli radicali infettati dai rizobi).

Nello studio in oggetto si è cercato di simulare un sistema colturale che, probabilmente, potrà essere adottato dai primi coloni umani di Marte in cui vengono utilizzati dei vasi di piccole dimensioni, delle serre in cui viene controllato l'ambiente interno e un substrato che simula la regolite marziana che presenta uno scarso contenuto di nutrienti: in queste condizioni, si è potuto verificare che la consociazione tra pisello, carota e pomodoro può ottimizzare l'efficienza nell'utilizzo delle risorse nel caso in cui le condizioni del substrato risulti essere favorevole alla crescita delle piante e all'infezione delle radici delle leguminose da parte dei batteri azotofissatori. Sul substrato che simula la regolite marziana, la consociazione tra pisello, carota e pomodoro ha mostrato una riduzione della resa rispetto alla coltura pura dovuta, molto probabilmente, alla mancata nodulazione del pisello (questo, infatti,

non fa ottenere i vantaggi derivanti dall'inserimento del pisello nella consociazione come specie fornitrice di azoto organico). La mancata nodulazione delle radici del pisello potrebbe essere dovuta ad alcune proprietà fisiche e chimiche del substrato che simula la regolite marziana come, ad esempio, l'elevata compattezza del substrato e l'elevato pH: queste proprietà fisico-chimiche potrebbero aver creato un ambiente ostile per la sopravvivenza dei rizobi e la loro nodulazione sulle radici del pisello.

### **1.5 La consociazione per un'agricoltura sostenibile**

Si prevede che, entro il 2050, la popolazione mondiale supererà i 9 miliardi (FAO, 2010): è necessario, quindi, garantire la sicurezza alimentare alla popolazione mondiale mitigando, al contempo, gli impatti che l'agricoltura ha sull'ambiente. Deve essere perseguita, quindi, una maggiore produttività dell'attività agricola mediante la sostenibilità del processo produttivo tenendo conto del cambiamento climatico, della riduzione delle risorse naturali (come, ad esempio, l'acqua e il fosforo necessario per le concimazioni) e la riduzione del suolo utilizzabile per l'attività agricola: uno dei mezzi per attuare uno sviluppo agroecologico sostenibile è quello di incrementare la diversità delle colture attraverso, ad esempio, l'adozione delle consociazioni (Bedoussac, et al., 2015).

Gli attuali sistemi colturali sono al centro di tre minacce che l'umanità deve affrontare: l'insicurezza alimentare, la perdita di biodiversità e il cambiamento climatico. Le preoccupazioni circa la capacità dell'agricoltura di produrre una quantità sufficiente di cibo sono guidate da numerosi fattori fra cui l'aumento della popolazioni mondiale dipendente da un numero limitato di filiere alimentari fortemente industrializzate e centralizzate a livello globale e da un numero limitato di colture (Khoury, et al., 2014), il cambiamento delle diete, l'utilizzo insostenibile delle risorse naturali e la degradazione della qualità e della produttività dei suoli agricoli (Brooker, et al., 2023). Gli shock alimentari causati dagli effetti della pandemia da COVID-19 (FAO, 2020) e dal conflitto in Ucraina (Ben Hassen & El Bilali, 2022) riguardanti l'accessibilità al cibo, la disponibilità di manodopera, le esportazioni di alimenti, i prezzi dei concimi e il comportamento dei consumatori (come, ad esempio, gli acquisti dettati dal panico) hanno evidenziato ulteriormente questi problemi di insicurezza alimentare (Brooker, et al., 2023).

I sistemi colturali ad input ridotti ed efficienti sotto il punto di vista energetico sono al centro dell'attenzione sia dei ricercatori sia dei decisori politici per sostenere la produttività agricola (Altieri, 1999). La maggior parte delle moderne pratiche agronomiche (come, ad esempio, la meccanizzazione e la monocoltura), tuttavia, si basano solo su poche cultivar di

specie migliorate geneticamente e ibridi e l'utilizzo massiccio dei composti chimici per la gestione sia dei nutrienti sia dei parassiti: questo ha portato ad una semplificazione dei componenti dei sistemi agricoli e all'erosione genetica. Il ripristino della biodiversità mediante la diversificazione e l'adozione di sistemi agricoli che utilizzano efficacemente le risorse naturali è considerato un elemento chiave per sostenere la produzione agricola in modo sostenibile (Scherr & McNeely, 2008). La biodiversità negli agroecosistemi può essere incrementata nel tempo, tra l'altro, mediante l'adozione delle consociazioni (Altieri, 1999): l'agricoltura moderna, infatti, ha portato ad un enorme incremento della produttività a scapito della sostenibilità (Lichtfouse, et al., 2009).

L'aumento della popolazione e le questioni ambientali verificatisi negli ultimi anni sono associati ad una semplificazione delle tecniche agronomiche: è per queste motivazioni che i futuri sistemi agricoli dovranno presentare un certo grado di resilienza, di adattabilità ai cambiamenti climatici, di multifunzionalità del paesaggio agricolo e di apporto di servizi ecosistemici e di biodiversità (Hufnagel, et al., 2020). Poiché la principale preoccupazione attuale è quella di produrre una quantità sufficiente di cibo con risorse limitate di suolo, la fertilità e la biodiversità dello stesso diminuiscono di giorno in giorno (questo induce ad una produzione ridotta di cibo nel futuro) (Angon, et al., 2023).

Il sistema colturale definisce il modo in cui un'azienda agricola interagisce con le risorse naturali e copre ogni aspetto della supervisione e del coordinamento agricolo in termini di spazio e di tempo. In funzione della rotazione adottata, dell'assorbimento dei nutrienti e delle tecniche di lavorazione adottate, i sistemi colturali hanno un impatto differenziato su diversi parametri qualitativi del suolo: si può avere, infatti, un miglioramento delle condizioni ambientali o un loro peggioramento, il miglioramento o nessuna influenza sulla qualità del suolo nel tempo. La combinazione dei diversi indici di alterazione della salute del suolo (come, ad esempio, le proprietà fisico-chimiche del suolo, l'importanza dei microrganismi e le pratiche colturali) con gli indici della salute degli agroecosistemi (come, ad esempio, le implementazioni di nuovi standard di valutazione della qualità e della salute del suolo) può essere un approccio valido per la valutazione e l'orientamento della gestione sia del suolo sia delle colture. Il punto chiave per la creazione di nuovi strumenti e di metodologie innovative per la valutazione del suolo è il rafforzamento delle basi scientifiche necessarie per un'adeguata valutazione del suolo: tali strumenti e metodologie devono includere i processi genomici (come, ad esempio, il sequenziamento del genoma dei microrganismi del suolo, la bioinformatica e la mappatura). L'impatto che la filogenesi ha sia sulla qualità sia sulla resistenza del suolo è un argomento importante per l'implementazione di nuove strategie di

indagine: questi possono essere degli approcci innovativi per gli investimenti commerciali (anche se la biologia del suolo è stata stimata come una parte cruciale della pedologia) (Lahlali, et al., 2021).

Tutti i sistemi colturali adottati in agricoltura (come la diversificazione delle colture, la rotazione e la consociazione) hanno un impatto sia sulla qualità sia sulla salute del suolo sotto diverse prospettive temporali e spaziali (Vukicevich, et al., 2016). Nonostante lo scopo iniziale dell'agricoltura sia stato quello di incrementare la produttività degli agroecosistemi, l'agricoltura moderna è sempre più interessata alla sostenibilità ambientale dei sistemi colturali (Fargione, et al., 2018).

A causa della presenza di terreni che vengono utilizzati per scopi non agricoli, la quantità di suolo utilizzabile per l'attività agricola sta diminuendo: per tale motivo, l'adozione della consociazione da parte degli agricoltori è una delle tecniche chiave finalizzate all'incremento della produzione agricola. Gli agricoltori traggono diversi vantaggi dall'adozione della consociazione tra cui una maggiore produttività dell'unità di superficie di suolo, un utilizzo più efficiente delle risorse naturali e un maggiore reddito netto (Maitra, et al., 2019).

La consociazione di diverse cultivar agronomicamente idonee può essere un modo per incrementare la diversità genetica senza che si verifichi nessuna ripercussione negativa sulla gestione delle colture: questo porta ad una maggiore influenza delle interazioni ecologiche da parte della diversità genetica intraspecifica (Angon, et al., 2023). L'incremento della biodiversità mediante la consociazione di cultivar diverse della medesima specie risulta avere un impatto simile sulla produttività primaria delle piante rispetto a quella della consociazione di specie diverse (la biodiversità degli artropodi, contrariamente a quanto detto, è aumentata in misura più ridotta) (Cook-Patton, et al., 2011). La consociazione di cultivar diverse appartenenti alla stessa specie aiuta anche incrementare la stabilità della resa e l'aumento della resa nelle cultivar che altrimenti produrrebbero meno (Mengistu, et al., 2010): un controllo più efficiente da parte delle cultivar geneticamente diverse, infatti, è il fattore cruciale nel mantenimento della resa e della qualità del frumento su livelli elevati all'interno delle consociazioni di cultivar diverse (Reiss & Drinkwater, 2018). Risulta importante, comunque, scegliere delle cultivar idonee per questo tipo di consociazione che possano ridurre l'incidenza delle malattie: nel caso in cui le cultivar consociate presentassero un'elevata tolleranza nei confronti dei patogeni, infatti, la riduzione dell'incidenza delle malattie potrebbe essere quasi completa (Angon, et al., 2023).

Alcune tecniche colturali sostenibili (come, ad esempio, la consociazione) possono incrementare la fertilità del suolo riducendo l'inquinamento chimico di origine antropica dello

stesso (Lemaire, et al., 2014). Un sistema colturale strutturato in modo sostenibile non deve massimizzare le rese ma deve bilanciare anche l'agroecosistema nel suo complesso: gli apparati radicali delle colture, per esempio, trattengono lo strato più superficiale del suolo riducendo in modo significativo gli effetti negativi che la pioggia ha sul suolo (Giardini, 2004).

Alcuni ricercatori ritengono che la consociazione sia adatta solamente alle piccole aziende agricole situate in zone marginali così come a chi è coinvolto nell'agricoltura di sussistenza. È stato osservato, tuttavia, che gli agricoltori tradizionali di diverse parti del mondo hanno sviluppato un sistema policulturale che risulta essere maggiormente adatto alle condizioni locali per il raggiungimento della sostenibilità della produzione (Denevan, 1995). La consociazione, inoltre, è stata un'importante pratica di produzione di alimenti in molti Paesi in via di sviluppo (Clawson, 1985). Nella maggior parte dei sistemi policulturali, la produzione agricola può essere massimizzata per unità di superficie di suolo mediante l'adozione della consociazione grazie alla riduzione dell'incidenza dei parassiti e ad un uso più efficiente dei nutrienti, del suolo, dell'acqua e della radiazione solare (Maitra, et al., 2021).

Per quanto riguarda la consociazione di specie foraggere diverse, queste possiedono una notevole importanza nel bacino del Mar Mediterraneo in quanto sono in grado di soddisfare la crescente domanda di prodotti animali (con particolare riferimento all'Africa settentrionale e all'Asia occidentale) (Delgado, et al., 1999), di sostenere la produzione dei prodotti animali tipici ad alto valore aggiunto (con particolare riferimento all'Europa meridionale) e di incrementare la stabilità economica dei piccoli proprietari terrieri. I sistemi di allevamento estensivi (che sono largamente basati sul pascolo e sul maggese) risultano essere minacciati dall'eccessivo sfruttamento e dal rischio di desertificazione dei pascoli, dall'apporto insufficiente di proteine alimentari e di mangimi di alta qualità e dalla diminuzione e dall'irregolarità delle precipitazioni indotte dal cambiamento climatico (IPCC, 2007). La coltivazione delle colture foraggere annuali può risultare fondamentale per i sistemi colturali mediterranei per intensificare la produzione sostenibile di foraggio e per ridurre la pressione da loro esercitata sulle risorse naturali. I cereali atti alla produzione di foraggio (come, ad esempio, l'avena) sono caratterizzati da un'elevata produzione di sostanza secca di qualità nutrizionale modesta (in particolare in termini di contenuto proteico). La coltivazione delle leguminose foraggere annuali (come, ad esempio, la veccia comune) può garantire un elevato contenuto proteico del foraggio a cui si uniscono diversi benefici ambientali (come una maggiore efficienza energetica e delle risorse utilizzate, minori emissioni di gas ad effetto serra e una maggiore fertilità del suolo rispetto alla coltivazione dei cereali) (Nemecek, et al., 2008). La coltivazione delle leguminose foraggere annuali nelle regioni a clima mediterraneo

è ostacolata da informazioni insufficienti rispetto alle specie maggiormente adatte alla coltivazione in coltura pura o in consociazione con i cereali e da confronti limitati con i pascoli (Annichiarico, et al., 2017). Quando viene assicurata una proporzione equilibrata nei componenti, le consociazioni tra i cereali e le leguminose sono in grado di produrre un foraggio nutrizionalmente bilanciato (Jedel & Helm, 1992).

### 1.6 Confronto tra coltura pura e la consociazione

La consociazione tra i cereali e le leguminose avvantaggia i piccoli agricoltori mediante una maggiore produttività dell'unità di superficie di suolo, la riduzione della variabilità interannuale della produttività delle colture e la diversificazione della dieta (Snapp, et al., 2018). Gli incrementi della produttività dell'unità di superficie di suolo da parte delle consociazioni tra i cereali e le leguminose nelle piccole aziende agricole sono riportati in numerosi articoli scientifici. Ad esempio, in uno studio (Muoangwa, et al., 2021) si è visto che la produzione del mais varia in funzione del sistema colturale e delle condizioni agroecologiche:

- (i) nelle zone montane, il mais consociato alle leguminose ha presentato una produzione superiore a quello in coltura pura in regime di coltivazione tradizionale o di agricoltura conservativa (in entrambi i casi in omosuccessione) e della coltura pura in regime di agricoltura conservativa in rotazione con le leguminose (rispettivamente  $3.709 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ,  $3.456 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ,  $3.596 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  e  $3.545 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ );
- (ii) nelle zone di pianura, il mais consociato alle leguminose in regime di agricoltura conservativa ha presentato una produttività superiore (pari a  $2.802 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) a quella riscontrata negli altri sistemi colturali presi in considerazione (che si è rivelata compresa tra  $2.485$  e  $2.658 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

L'interazione tra le pratiche agroecologiche, il sistema colturale e la leguminosa non ha avuto nessuna influenza significativa sulla produzione del mais mentre l'interazione tra le pratiche agroecologiche, il sistema colturale e la durata del trattamento non ha influenzato in modo significativo la produttività del cereale. Per quanto riguarda l'influenza esercitata dalla leguminosa, dalla durata della prova, dalle precipitazioni e dalle pratiche agroecologiche sulla produttività del mais, la resa più elevata del cereale (pari a  $3.469 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) si è verificata nelle consociazioni e nelle rotazioni in cui era inserito il fagiolo comune o l'arachide: tale incremento di resa era significativamente maggiore di quella registrata nelle consociazioni in cui erano presenti delle specie diverse di leguminose nelle rotazioni o nelle consociazioni in regime di agricoltura conservativa. La produttività del mais, quindi, varia in funzione del

sistema colturale e delle condizioni agroecologiche ma i sistemi colturali basati sull'agricoltura conservativa hanno superato in termini produttivi quelli caratterizzati da pratiche tradizionali nella maggior parte dei casi (inclusa la coltura pura in omosuccessione).

Negli ambienti caratterizzati da una scarsità delle risorse idriche dovuta alla competizione tra le piante consociate può essere molto forte. La compattazione del suolo conseguente al passaggio di macchine operative pesanti, inoltre, può intensificare la competizione per le risorse idriche (con particolare riferimento allo strato più superficiale di suolo). Per poter valutare la capacità di competizione per le risorse idriche sono state condotte due prove di campo in cui il miglio perlato è stato consociato con il fagiolo dall'occhio sottoponendo, poi, tale consociazione a stress idrici e alla compattazione del suolo (Zegada-Lizarazu, et al., 2006). A tale scopo, l'acqua utilizzata per l'irrigazione conteneva, al posto dell'idrogeno, il deuterio (che è un isotopo stabile dell'idrogeno): in base ai valori di concentrazione del deuterio nella linfa xilematica, l'utilizzo dell'acqua da parte del miglio perlato è risultato modificato per effetto della competizione esercitata dal fagiolo dall'occhio. In base ai valori di concentrazione di deuterio nella linfa dello xilema, il miglio perlato ha modificato le fonti idriche utilizzate: durante la siccità, infatti, la presenza del fagiolo dall'occhio in consociazione con il miglio perlato ha indotto il cereale a fare più affidamento all'acqua apportata, ad esempio, con la pioggia e con l'irrigazione. Con la compattazione del suolo, i valori del potenziale idrico (rilevati prima dell'alba) e i tassi di traspirazione (rilevati al mattino presto) del miglio perlato consociato sono risultati simili a quelli riscontrati nella coltura pura: questo indica che lo stato idrico del miglio perlato in coltura pura è aumentato durante la notte mentre, nel caso della consociazione, la traspirazione è aumentata durante il giorno (la competizione per l'acqua è aumentata nella stessa ragione della traspirazione). Tutto questo porta ad un fabbisogno incrementato di acqua da parte della consociazione tra il miglio perlato e il fagiolo dall'occhio rispetto alla coltura pura. Per quanto riguarda la biomassa prodotta dal miglio perlato, questa è risultata significativamente inferiore nella consociazione rispetto alla coltura pura: la riduzione della produzione della sostanza secca nel caso del miglio perlato, quindi, può essere attribuita alla competizione per l'acqua e/o alla crescita vigorosa del fagiolo dall'occhio.

La siccità, inoltre, altera la diversità, la composizione e la stabilità delle comunità microbiche del suolo. Le risorse naturali traggono beneficio dalla consociazione (in particolar modo dalle consociazioni tra i cereali e le leguminose) dove i microrganismi del suolo rivestono un importante ruolo per i cicli biogeochimici e per la crescita delle piante; si sa poco, tuttavia, su come le comunità microbiche del suolo di diversi ambienti di coltivazione rispondano alla siccità (Lesk, et al., 2016). La crescita delle piante è strettamente correlata agli

effetti che la siccità ha sul carbonio disponibile e sui nutrienti presenti nel suolo (van der Molen, et al., 2011). I microrganismi del suolo hanno un ruolo chiave nelle funzioni dell'agroecosistema come, ad esempio, nel ciclo del carbonio e dell'azoto (tali cicli biogeochimici, infatti, sono coinvolti nella messa a disposizione dei nutrienti, nella decomposizione della sostanza organica, nello stoccaggio del carbonio e nell'emissione dei gas ad effetto serra) (van der Heijden, et al., 2008). Al fine di bilanciare la domanda e la disponibilità delle fonti di carbonio in condizioni di siccità, i microrganismi del suolo (e, in particolare, quelli presenti nella rizosfera) degradano, ad esempio, i carboidrati complessi e creano un microambiente tampone affinché la pianta possa far fronte allo stress idrico (Martiny, et al., 2017). I microrganismi, inoltre, sono capaci di resistere agli stress idrici per brevi periodi attraverso, ad esempio, la sporulazione, la dormienza, la produzione di polimeri extracellulari, di biofilm o di osmoliti e i cambiamenti nell'architettura della parete cellulare (i batteri Gram-positivi, ad esempio, aumentano lo spessore dello strato di peptidoglicano della loro parete cellulare) (de Vries, et al., 2020).

In uno studio (Peng, et al., 2024) sono state valutate, sia per quanto riguarda le colture in purezza sia le consociazioni, le proprietà del suolo e della rizosfera e le attività enzimatiche sia durante lo stress idrico imposto sia durante le normali condizioni di irrigazione. Per quanto riguarda le proprietà chimiche del suolo, la siccità è risultata essere il principale fattore che ha indotto delle differenze nel contenuto labile sia del carbonio sia dell'azoto (tuttavia non è stata riscontrata nessuna differenza significativa nelle proprietà chimiche del suolo tra le colture in purezza e le consociazioni). L'analisi sia dell' $\alpha$ - sia della  $\beta$ - biodiversità microbica del suolo ha mostrato che la siccità riduce notevolmente entrambi gli indici sia per i batteri sia per i funghi. L' $\alpha$ -biodiversità fungina della rizosfera, inoltre, è risultata inferiore a quella del suolo preso nella sua interezza mentre il sistema colturale non ha esercitato nessun impatto significativo sull' $\alpha$ -biodiversità microbica. L' $\alpha$ - e la  $\beta$ - biodiversità microbica rilevate durante il periodo di siccità imposta, quindi, differiscono da quelle del controllo; la siccità, inoltre, influenza notevolmente le proprietà del suolo e le attività enzimatiche rispetto al controllo.

Il fosforo è il secondo elemento principale che più frequentemente risulta essere limitante per le piante: tale elemento, infatti, risulta essere essenziale in virtù del ruolo che esso ricopre sia nel metabolismo energetico sia nella biosintesi degli acidi nucleici e delle membrane cellulari (Raghothama, 1999). La concentrazione del fosforo, nella maggior parte dei suoli, è compresa tra 0,1 e 10  $\mu\text{mol}$ : tali valori risultano essere molto inferiori alla concentrazione di fosforo necessaria per ottenere una crescita ottimale di molte specie coltivate (Hinsinger, 2001).

Le piante assorbono il fosforo dalla soluzione circolante del suolo ma è stato dimostrato che le frazioni labili di origine sia organica sia inorganica di tale elemento contribuiscono all'aumento del suo assorbimento da parte dei vegetali (Boschetti, et al., 2009). Sia l'acidificazione sia l'alcalinizzazione della rizosfera riescono ad influenzare la disponibilità di fosforo nel suolo (Hinsinger, 2001). Gli acidi carbossilici escreti dalle radici riescono a mobilizzare il fosforo mediante lo scambio di ligandi, la dissoluzione promossa dai ligandi e la complessazione dei cationi legati al fosforo (come il calcio, il ferro e l'alluminio) (Neumann & Romheld, 1999). Le forme organiche di fosforo, inoltre, possono essere mineralizzate dalle fosfatasi escrete dalle radici (Richardson, et al., 2000). Alcuni studi, inoltre, hanno dimostrato che le leguminose riescono ad incrementare l'assorbimento di fosforo da parte dei cereali ad esse consociati mediante diversi meccanismi d'azione (Suong, et al., 2005).

Attualmente sono disponibili delle informazioni limitate circa l'assorbimento del fosforo e i processi di assorbimento di tale elemento dalla rizosfera dei cereali e delle leguminose coltivati sia in coltura pura sia in consociazione tra loro. In uno studio condotto su mais, favino e lupino bianco su suoli acidi (Li, et al., 2010) è stato visto che la biomassa prodotta dal mais aumenta significativamente mediante l'apporto sia di  $\text{FePO}_4$  sia di  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ : risultati simili sono stati ottenuti per il favino e per il lupino bianco. Per quanto riguarda gli effetti della consociazione confrontati a quelli della coltura pura, nello studio in oggetto non sono state riscontrate delle differenze significative. La composizione degli acidi carbossilici escreti dal mais differiva in modo significativo tra la coltura pura e la consociazione mentre la resa e l'assorbimento del fosforo sono risultate simili tra i due sistemi colturali. Nella rizosfera del favino in coltura pura, inoltre, è stata riscontrata una consociazione più elevata di fosfolipidi rispetto a quando è presente in consociazione: la consociazione del favino, quindi, ha indotto un cambiamento nella struttura della comunità microbica. L'apporto di fosforo e la forma con cui esso viene apportato, così come la sua concentrazione, influiscono sia sulla concentrazione dei carbossilati sia sulla composizione della comunità microbica della rizosfera ma tale effetto è in funzione della specie vegetale. La variazione della crescita delle piante in funzione della disponibilità aumentata di fosforo è stata diversa: nonostante ciò, la concentrazione dei carbossilati nella rizosfera è stata influenzata dall'aggiunta di fosforo in tutte le specie prese in esame dallo studio in oggetto. La concentrazione dei carbossilati nella rizosfera, quindi, è stata modulata dalla disponibilità di fosforo ma i cambiamenti nella produzione dei carbossilati risultava essere specie-dipendente.

## 1.7 Scopo della tesi

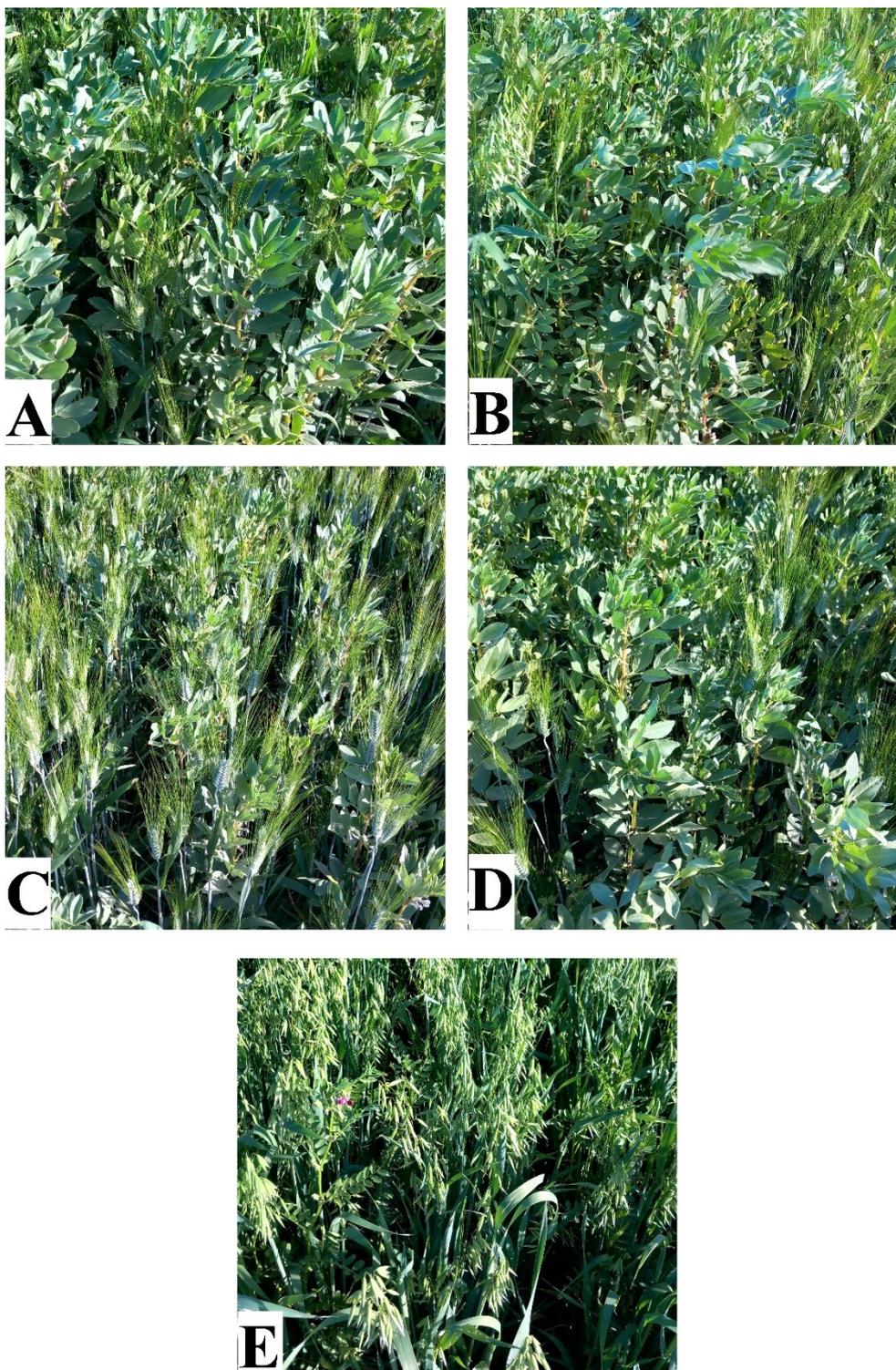
La presente tesi di laurea magistrale si inserisce nell'ambito della Work Package n. 2 del progetto europeo di ricerca PRIMA DiVicia: tale progetto di ricerca ha lo scopo di sfruttare le proprietà particolari delle leguminose come la loro capacità di instaurare una simbiosi con i batteri azotofissatori per mettere a punto dei sistemi di coltivazione dei cereali che siano sostenibili e resilienti e a valore aggiunto basati sulla biodiversità e che siano adatti ai vincoli attuali e futuri del bacino del Mar Mediterraneo. Tale progetto, inoltre, promuove l'intensificazione ecologica dei sistemi colturali mediante lo sfruttamento delle colture e delle funzioni ecologiche del suolo e della biodiversità funzionale. Utilizzando due leguminose quali il favino come specie da consociare ai cereali più esigenti in termini di nutrizione azotata e la veccia comune come specie foraggera, il progetto DiVicia mira a ripristinare l'agrobiodiversità mediante l'identificazione di una varietà di cultivar locali promettenti e di genotipi tolleranti lo stress per l'implementazione delle migliori pratiche di diversificazione delle colture nei sistemi cerealicoli mediterranei (come la rotazione, la consociazione e la coltura mista). Il progetto DiVicia, infine, mira a mitigare la spirale discendente del declino della fertilità del suolo e dell'insicurezza alimentare mediante un processo partecipativo con un impatto importante sul miglioramento dei mezzi di sussistenza delle popolazioni rurali.

# Capitolo 1

## MATERIALI E METODI

La prova sperimentale oggetto della presente tesi di laurea magistrale è stata eseguita, nel corso del 2024, presso l'Azienda Agraria Didattico-Sperimentale "Pasquale Rosati" dell'Università Politecnica delle Marche e fa parte di una prova sperimentale di durata triennale avviata nel 2022 nell'ambito della Work Package n. 2 del progetto europeo PRIMA DiVicia. Più in dettaglio, la Work Package n. 2 di tale progetto europeo di ricerca ha lo scopo di valutare i benefici agronomici ed ambientali delle interazioni indotte dalla coltivazione di *Vicia faba*, *Vicia sativa* e/o *Vicia narbonensis* nei sistemi di cattura e di sequestro del carbonio negli agroecosistemi contrastanti di riferimento che sono stati selezionati.

Nella sperimentazione sono state inserite due cultivar di frumento duro (Achille e Maciste), due cultivar di favino (Chiaro di Torre Lama e Prothabat69), una cultivar di avena nuda (Irina) e una cultivar di veccia comune (Idice). Nel corso di tale prova, queste cultivar sono state inserite sia come colture pure sia in consociazione: relativamente alle consociazioni, il frumento duro è stato consociato con il favino (con un totale di quattro combinazioni complessive) mentre l'avena è stata consociata con la veccia comune (una sola combinazione). Con riferimento alle consociazioni, la combinazione tra il cereale e la leguminosa è stata effettuata inserendo il cereale e la leguminosa ad una densità di semina (espressa come percentuale di seme impiegato nelle rispettive colture pure) rispettivamente del 50% e del 65%. Le fotografie delle consociazioni sono riportate in Figura 1-1.



**Figura 1-1. Fotografie delle consociazioni utilizzate nella prova sperimentale. A: Achille-Chiaro di Torre Lama; B: Achille-Prothabat69; C: Maciste-Chiaro di Torre Lama; D: Maciste-Prothabat69; E: Irina-Idice**

La presente tesi di laurea magistrale ha preso in considerazione i risultati del terzo anno (2024) incentrata sul confronto tra rotazioni basate su colture pure e rotazioni basate su colture consociate, come indicato in Tabella 1-1.

**Tabella 1-1. Piano di rotazione triennale**

		Anno		
		2022	2023	2024
<i>Rotazioni con colture pure</i>		Frumento duro	Favino	Frumento duro
		Favino	Frumento duro	Favino
		Avena	Veccia	Avena
		Veccia	Avena	Veccia
<i>Rotazione di colture consociate</i>		Frumento duro – favino	Avena – veccia	Frumento duro – favino
		Avena – veccia	Frumento duro – favino	Avena – veccia

## 1.1 Descrizione delle cultivar

### 1.1.1 *Cultivar di frumento duro*

Il frumento duro (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) presenta delle spighe con 2-5 fiori nelle cultivar più fertili. Le glume sono di lunghezza inferiore a quella delle glumette e, come i lemmi, sono carenate in tutta la loro lunghezza. Le glumette inferiori sono aristate tranne che in rare eccezioni. Le reste sono lunghe fino a 20 cm, di colore paglierino, rossiccio o nero a maturità della pianta. Il culmo è pieno di tessuto spugnoso nella parte superiore dell'ultimo internodo e, generalmente, è alto 80-110 cm. In alcune cultivar, il culmo del frumento duro è caratterizzato da una resistenza scarsa o molto scarsa all'allettamento ma, tra quelle di più recente introduzione, ve ne sono alcune caratterizzate da una sufficiente resistenza. La cariosside del frumento duro presenta un colore bianco, rossiccio o ambrato con frattura vitrea che può, però, presentare il fenomeno della bianconatura. La pianta di frumento duro, durante l'accestimento, ha un portamento eretto ma vi sono anche alcune cultivar con piante a portamento semieretto o prostrato. La resistenza al freddo del frumento duro, generalmente, è inferiore a quella del frumento tenero ma, mediante un lavoro di incrocio e selezione, sono state ottenute delle cultivar caratterizzate da una buona resistenza (Baldoni & Giardini, 2001).

Nell'ambito del progetto europeo di ricerca in cui si inserisce la presente tesi di laurea magistrale sono state utilizzate due cultivar distinte di frumento duro: Achille e Maciste.

Achille è una cultivar di frumento duro caratterizzata da un potenziale produttivo di assoluto rilievo in tutti gli areali di coltivazione. Tale cultivar, durante la sperimentazione, si è particolarmente distinta per la sua produttività in ambienti fertili e, più in generale, ha prodotto della granella con un peso ettolitrico superiore di 3 punti alla media dei testimoni.

Achille è in grado di coniugare un medio indice di giallo della semola, un buon contenuto proteico e un elevato indice di giallo. Le caratteristiche morfologiche di Achille sono:

- (i) spiga: media, bordi paralleli tendenti alla piramidale;
- (ii) ariste: nere;
- (iii) taglia: 80-85 cm.

Achille, inoltre, presenta le seguenti caratteristiche fisiologiche:

- (i) accestimento ottimo;
- (ii) buona resistenza al freddo;
- (iii) resistenza media agli stress idrici;
- (iv) spigatura in epoca media;
- (v) ottima resistenza all'allettamento;
- (vi) buona resistenza all'oidio e alla ruggine bruna;
- (vii) media resistenza alla fusariosi e alla septoria.



*Figura 1-2. Spighe di frumento duro cv. Achille*

Maciste è una cultivar di frumento duro caratterizzata da una lunghezza media del ciclo colturale e da un'elevata produttività. I caratteri morfo-fisiologici di questa cultivar sono:

- (i) taglia alta;

- (ii) bassa resistenza all'allettamento;
- (iii) ariste di colore chiaro.

Per quanto riguarda gli stress biotici e abiotici, Maciste presenta una media tolleranza nei confronti dell'oidio e una media suscettibilità nei confronti della ruggine bruna, della septoria e della fusariosi. Infine, per quanto riguarda i caratteri qualitativi, Maciste presenta un peso di 1.000 cariossidi e un peso ettolitrico ottimi, una media vitrosità della granella, un contenuto proteico della granella buono (superiore al 13%) e un indice di glutine e un'intensità del colore della semola medi.



*Figura 1-3. Spighe di frumento duro cv. Maciste*

#### 1.1.2 *Cultivar di favino*

*Vicia faba* è una tipica coltura miglioratrice che assolve in modo eccellente al ruolo di rinnovo nei suoli argillosi e pesanti in sostituzione del maggese nudo e, comunque, in tutte quelle condizioni in cui non sia facile inserire nella rotazione delle colture di equivalente significato agronomico. Il ruolo più comune di questa specie nella rotazione è in precessione ai cereali (frumento e orzo in particolare).

*Vicia faba*, normalmente, non viene consociata: suole esserlo, solitamente, con l'orzo, l'avena, la veccia comune e il trifoglio alessandrino. Nell'ambito del progetto europeo di ricerca in cui si inserisce la presente tesi di laurea magistrale, *Vicia faba minor* è stata consociata con due cultivar distinte di frumento duro.

Un intervallo più o meno ampio tra colture successive di *Vicia faba* può essere imposto dalla diffusione di parassiti specifici come, ad esempio, nematodi (*Ditylenchus dipsaci*), malattie fungine (*Sclerotinia trifolium*, *Rhizoctonia* spp., *Fusarium* spp.) o di fanerogame parassite (come, ad esempio, *Orobanche crenata*). Nel progetto europeo di ricerca in cui si inserisce la presente tesi di laurea magistrale, *Vicia faba minor* è ritornata sulle stesse parcelle nell'arco di due anni in virtù delle esigenze operative.

La pianta della specie *Vicia faba* è annuale eretta, rigida e glabra. L'apparato radicale è fittonante di buono sviluppo che presenta delle robuste ramificazioni laterali, le più piccole delle quali sono ricche di noduli lobati. Gli steli sono robusti, quadrangolari con spigoli rilevati, vuoti e con uno o più rami basali. Le stipole sono grandi, variabili nella forma, dentate in modo irregolare e, in alcuni casi, possono presentare un nettario extrafioreale di colore marrone. Le foglie sono alterne, paripennate con 2-6 foglioline subopposte o alternate, subsessili obovate, intere, di colore grigio verde; la fogliolina terminale è lesiniforme che, qualche volta, diviene un mucrone parzialmente fogliaceo; i piccioli e il rachide sono scanalati superiormente. Le infiorescenze presentano un ramo ascellare corto, subsessile con 1-6 fiori; il calice è campanulato, glabro o quasi, con tubo lungo circa 7 mm, a 5 lobi strettamente triangolari lunghi 5-8 mm. La corolla presenta un vessillo ben sviluppato, ovato di circa 2,5 x 1,5 cm con deboli rigature longitudinali di colore marrone scuro o nero; la carena è a forma di cucchiaino di 1,5 x 6,5 cm circa; stami diadelfi 9+1, antere ellissoidali basifesse di colore marrone. L'ovario è sessile o quasi, molto esile, compresso, pubescente con 2-5 ovuli; lo stilo è rivolto in alto, glabro, mentre lo stimma è ghiandolare e papillato. Il baccello risulta essere allungato, cilindrico o appiattito, rigonfio in corrispondenza dei semi, cuneato alla base, rostrato all'apice, pubescente o glabro, di lunghezza variabile con 2-5 semi. I semi risultano avere una dimensione variabile e una forma da oblunghi a obovati, globosi o compressi, di colore marrone scuro, marrone, rossastro, verde, violetto intenso, nero; l'ilo risulta essere strettamente allungato, disposto sul lato coro, i cotiledoni sono di colore giallo pallido (Baldoni & Giardini, 2001).

All'interno della specie *Vicia faba* sono state riscontrate quattro diverse varietà botaniche: *paucijuga*, *minor*, *equina* e *major*. Secondo tale classificazione, il maggior numero delle popolazioni di *Vicia faba equina* ed alcune di *Vicia faba major* formano i gruppi più ricchi di

potenzialità genetica mentre *Vicia faba paucijuga* e *Vicia faba minor* sono considerate come serie terminali o forme marginali (Cubero, 1974).

La natura delle valve è una caratteristica sulla quale può essere basata un'ulteriore suddivisione in sottospecie di *Vicia faba*: vi possono essere, quindi, tipi con valve tenere e non deiscenti e tipi con valve fibrose e deiscenti.

La divisione nelle tre sottospecie fondata sul peso dei semi, a causa della variazione continua di questo carattere, ha richiesto una definizione arbitraria dei limiti tra esse; questi limiti, convenzionalmente, vengono indicati come segue: fino a 700 g/1.000 semi per *Vicia faba minor*, 700-1.000 g/1.000 semi per *Vicia faba equina* e oltre 1.000 g/1.000 semi per *Vicia faba major*.

Le correlazioni più significative hanno dimostrato che, con l'aumentare del peso di 1.000 semi aumenta la precocità della fioritura, diminuisce il numero di nodi totali e fertili dello stelo principale, aumenta la lunghezza degli internodi, diminuisce il numero dei baccelli e di semi per pianta e, fino ad un certo limite, aumenta la produzione per pianta.

La classificazione in sottospecie di *Vicia faba* fondata sul peso di 1.000 semi presenta il suo punto debole nelle variazioni continue di questo carattere: questo non consente di individuare un preciso termine di passaggio da un gruppo all'altro. Per evitare la conseguente definizione arbitraria dei gruppi è stato proposto uno schema di classificazione fondato su diversi caratteri qualitativi (Baldoni & Giardini, 2001).

Nell'ambito del progetto europeo di ricerca in cui si inserisce la presente tesi di laurea magistrale sono state utilizzate due cultivar distinte di favino: Chiaro di Torre Lama e Prothabat69.

Chiaro di Torre Lama è una cultivar di favino a seme chiaro, di elevata produttività, resistente al freddo e a semina tardiva. Questa cultivar presenta i seguenti caratteri morfologici:

- (i) taglia: 100-115 cm;
- (ii) seme di dimensioni medie, di forma ovale e di colore marrone chiaro;
- (iii) fiore di colore chiaro con una chiazza melaninica;
- (iv) portamento eretto;
- (v) habitus alternativo;
- (vi) ciclo colturale di media lunghezza.

Chiaro di Torre Lama, inoltre, presenta un'ottima resistenza sia al freddo sia all'allettamento, una buona resistenza agli stress idrici e una buona tolleranza nei confronti

della ruggine. Il peso di 1.000 semi è compreso tra 350 e 450 g con un contenuto in proteine pari al 24-26% s.s.



***Figura 1-4. Piante di favino cv. Chiaro di Torre Lama***

Prothabat69 è una cultivar di favino a ciclo culturale precoce ed habitus alternativo. Questa cultivar è caratterizzata da una buona tolleranza nei confronti del freddo e da semi di colore bruno chiaro, di dimensioni medio-grandi (450-550 g/1.000 semi) e con un contenuto proteico elevato (35% s.s. circa).



***Figura 1-5. Piante di favino cv. Prothabat69***

### 1.1.3 *Cultivar di avena*

Le piante di avena (*Avena sativa*) possono raggiungere un'altezza di 60-150 cm con 3-5 culmi vuoti. Alcune cultivar presentano dei peli ai nodi del culmo: questo risulta essere un carattere tassonomico determinante, specie se viene osservato sul nodo apicale (vale a dire quello della foglia a bandiera). Le radici sono piccole, numerose, fibrose e possono penetrare

nel suolo fino a 1,5 m di profondità. Le lamine fogliari, di norma, sono lunghe circa 20 cm e larghe circa 1,5 cm. L'infiorescenza dell'avena è una pannocchia terminale determinata, grande e rada: questa può essere unilaterale oppure piramidale. L'infiorescenza consiste in un asse principale (denominato rachide) sul quale si inseriscono gli assi secondati laterali raggruppati ai nodi. L'asse principale e le ramificazioni secondarie (che, a loro volta, possono essere semplici o ramificate) portano delle spighe poliflore che risultano essere pendule su di un sottile peduncolo che termina la branca della pannocchia. Ogni spigetta contiene 2-3 fiori dei quali i primi due sono perfetti mentre il terzo (se presente) spesso è staminato. Nelle forme nude di avena si possono avere da 4 a 8 fiori per spigetta. Normalmente sono presenti da 30 a 120 spigette per pannocchia. I fiori sono ermafroditi con tre stami e due stimmi sessili e piumosi. Le cariossidi di avena sono strettamente racchiuse all'interno della lemma e della palea e vi rimangono anche alla raccolta. La lemma è bidentata apicalmente e varia in colore dal bianco, al giallastro, al rosso, al nero, al marrone, al grigio. Dalla nervatura centrale della lemma, leggermente sopra della metà della superficie dorsale, si forma la resta che può essere quasi dritta o contorna nell'avena coltivata. La cariosside dell'avena risulta essere oblunga, piuttosto affusolata e con un profondo solco longitudinale mentre la sua superficie è spesso ricoperta da una fine peluria (soprattutto nella sua parte apicale) (Baldoni & Giardini, 2001).

Nell'ambito del progetto europeo di ricerca in cui si inserisce la presente tesi di laurea magistrale è stata utilizzata una cultivar di avena a cariosside nuda: Irina.

Irina è una cultivar di avena a cariosside nuda, alternativa, destinata all'alimentazione umana e ricca in  $\beta$ -glucani. La granella prodotta da questa cultivar è interessante per la produzione di alimenti destinati all'alimentazione di persone intolleranti al glutine e per la produzione di baby-food. Irina presenta una lunghezza media del ciclo colturale; tale cultivar, inoltre, presenta i seguenti caratteri morfo-fisiologici:

- (i) taglia: 80-85 cm;
- (ii) spiga media;
- (iii) granella bianca e nuda;
- (iv) accostamento elevato;
- (v) habitus semi-invernale;
- (vi) spigatura tardiva.

Infine, per quanto riguarda le resistenze agli stress biotici e abiotici, Irina presenta le seguenti resistenze:

- (i) tollerante nei confronti del freddo, degli stress idrici e dell'allettamento;
- (ii) tolleranza media nei confronti della ruggine e della septoria;

(iii) suscettibilità media nei confronti dell'oidio.



**Figura 1-6. Piante di avena cv. Irina**

#### 1.1.4 *Cultivar di veccia comune*

La veccia è riconosciuta, sin dai tempi più remoti, per la sua validità nell'alimentazione degli erbivori ma, la prima testimonianza della sua coltivazione per la produzione sia di seme sia di foraggio, viene riportata da Catone con riferimento al territorio italiano.

La veccia viene coltivata in ciclo autunno-primaverile nelle regioni ad inverno mite ed in ciclo primaverile-estivo nelle regioni con inverni lunghi e freddi.

Il gruppo delle vecce comprende numerose specie: tra quelle di maggiore interesse foraggero e più diffuse in coltura in Italia sono la veccia comune (*Vicia sativa*) e la veccia vellutata (*Vicia villosa*).

La veccia comune è una specie annuale a portamento prostrato-assurgente con un apparato radicale fittonante, debolmente ramificato e che può raggiungere oltre 1 m di profondità. Gli

steli sono più o meno pubescenti, esili, lunghi 80-120 cm, vuoti internamente con internodi lunghi e con 3-4 rami fioriferi agli ultimi nodi. Le foglie della pianta adulta sono composte da 8-16 foglioline e terminano in cirri più o meno ramosi. Le foglioline sono più o meno pubescenti, ovali o obovate, tronche o mucronate; le stipole sono generalmente dentate e provviste alla base di una macchia bruna (nettario). I fiori, brevemente pedicellati, sono portati all'ascella delle foglie e possono essere solitari o, più frequentemente, a coppie; il calice è di colore verde o verde con una venatura porpora, il vessillo e le ali sono di colore porpora e porpora scuro rispettivamente mentre la carena è biancastra. Il baccello, più o meno pubescente, vario per forma, colore e dimensioni, contiene 4-12 semi di forma sferica e, alla maturazione, di colore che può essere bianco, rosato, verdastro, bruno, grigiastro o nero con diverse sfumature intermedie ed eventuali screziature o mazzature. Il peso di 1.000 semi è di 40-120 g ma, nei tipi coltivati, è perlopiù compreso tra 50 e 70 g. L'emissione dei germogli risulta essere scalare e il ritmo di crescita dei primi germogli è, generalmente, molto lento mentre la fase più intensa di accumulo di sostanza secca avviene nel periodo compreso tra l'inizio della fioritura e la formazione dei baccelli.

La veccia comune viene coltivata quasi esclusivamente in regime asciutto e, frequentemente, in avvicendamento con i principali cereali assumendo il ruolo di miglioratrice per i notevoli quantitativi di azoto nei residui colturali.

La consociazione, nel caso della veccia comune, assume una particolare importanza in quanto i cirri agli apici delle foglie le consentono l'arrampicamento sulle piante consociate risolvendo, almeno in parte, i problemi connessi con il tipico portamento della specie in coltura pura.

Le specie consociate alla veccia comune appartengono quasi esclusivamente alle famiglie botaniche delle graminacee o delle leguminose. Un aspetto estremamente importante nella realizzazione del miscuglio riguarda i rapporti tra le dosi di seme della veccia comune e delle altre specie: infatti, se la densità della o delle specie consociate è bassa si riduce l'effetto tutore e, al contrario, se si utilizzano dosi elevate, la veccia viene sopraffatta. Va ricordato, inoltre, che la composizione floristica del foraggio della consociazione non sempre riflette i rapporti di semina utilizzati in quanto, nelle annate particolarmente fredde, lo sviluppo della veccia viene limitato.

L'erbaio di veccia comune e avena, probabilmente, risulta essere il miscuglio maggiormente utilizzato nelle regioni del Mar Mediterraneo poiché, tra l'altro, offre il vantaggio del sincronismo delle fasi più idonee alla produzione di fieno delle due specie

(rispettivamente la formazione dei primi baccelli e la spigatura). Nelle Regioni settentrionali, la veccia comune viene generalmente sostituita dalla veccia vellutata.

Come per la coltura pura, anche le consociazioni si prestano al pascolo invernale se le specie consociate sono dotate di capacità di ricaccio.

Per quanto riguarda la qualità del foraggio, la veccia comune viene considerata un'ottima essenza per la ricchezza di proteine, l'elevata appetibilità e la buona digeribilità.

La consociazione della veccia comporta, generalmente, una riduzione della produzione potenziale della coltura pura: questa problematica è ampiamente compensata dalle minori perdite in campo, dai minori costi di raccolta nonché dal valore della granello della specie consociata. Quest'ultima deve essere caratterizzata, oltre che da un'elevata resistenza all'allettamento, da una ridotta competitività e da un sincronismo nella maturazione dei semi che devono avere forma e/o dimensioni tali da rendere agevole la raccolta e la successiva separazione. Le specie più comunemente utilizzate a tale scopo sono l'avena e il favino (Baldoni & Giardini, 2002).

Nell'ambito del progetto europeo di ricerca in cui si inserisce la presente tesi di laurea magistrale è stata utilizzata una cultivar di veccia comune: Idice.

Idice è una cultivar di veccia comune costituita dalla Società Italiana Sementi per selezione da piante spontanee che presenta un'ampia adattabilità soprattutto in funzione alla tolleranza al freddo (tale caratteristica rende questa cultivar più idonea rispetto alle altre in semina autunnale nelle Regioni italiane centro-settentrionali).



*Figura 1-7. Pianta di veccia comune cv. Idice*

## 1.2 Disegno sperimentale

La prova è stata effettuata utilizzando uno schema sperimentale a blocchi randomizzati completi con parcella della lunghezza di 10 m e della larghezza effettiva di 1,2 m (con un'area delle singole parcella pari a 12 m<sup>2</sup>). Come indicato in Tabella 1-2, in ogni blocco ciascuna coltura pura è stata inclusa in due parcella mentre la consociazione avena-veccia comune è stata inclusa in quattro parcella per garantire l'esecuzione di tutte le quattro combinazioni di rotazione con la consociazione frumento duro-favino. Ognuna delle quattro combinazioni

delle consociazioni frumento duro-favino è presente in una singola parcella per blocco. Tale schema sperimentale ha permesso, nell'arco dei tre anni del progetto di ricerca, di inserire tutte le combinazioni di colture consociate ogni anno.

La randomizzazione dei trattamenti è stata imposta nel primo anno di prova (2022) e la distribuzione dei vari trattamenti nel 2023 e nel 2024 ha seguito il piano di randomizzazione definito nel corso del primo anno.

Complessivamente sono state inserite in prova 18 rotazioni: 10 tra colture pure e 8 tra colture consociate. Per questo motivo si deve notare che, sulla base dello schema sperimentale utilizzato (alcuni trattamenti, infatti, sono stati ripetuti in due o in quattro parcelle all'interno di ciascun blocco), l'errore sperimentale dell'Analisi della Varianza (ANOVA) ha incluso due componenti:

- (i) l'interazione Blocchi x Trattamento;
- (ii) l'errore puro (varianza entro blocchi tra unità sperimentali che hanno ricevuto lo stesso trattamento).

L'analisi dei dati mediante l'ANOVA, quindi, è stata eseguita testando inizialmente la significatività della varianza Blocchi x Trattamenti rispetto alla varianza errore puro. La non significatività di questo test preliminare ha consentito di eseguire il pooling delle due varianze errore ottenendo la varianza errore nell'ambito dell'ANOVA.

**Tabella 1-2. Piano delle rotazioni (18 parcelle per blocco, CHTL = Chiaro di Torre Lama, PR69 = Prothabat69)**

	2022	2023	2024
<i>Colture pure</i>	Avena	Veccia	Avena
	Veccia	Avena	Veccia
	Maciste	CHTL	Maciste
	Maciste	PR69	Maciste
	Achille	CHTL	Achille
	Achille	PR69	Achille
	CHTL	Maciste	CHTL
	CHTL	Achille	CHTL
	PR69	Maciste	PR69
	PR69	Achille	PR69
Consociazioni	Maciste – CHTL	Avena – veccia	Maciste – CHTL
	Maciste – Pr69	Avena – veccia	Maciste – PR69
	Achille – CHTL	Avena – veccia	Achille – CHTL
	Achille – PR69	Avena – veccia	Achille – PR69
	Avena – veccia	Maciste – CHTL	Avena – veccia
	Avena – veccia	Maciste – PR69	Avena – veccia
	Avena - veccia	Achille – CHTL	Avena – veccia
	Avena – veccia	Achille – PR69	Avena – veccia



*Figura 1-8. Panoramica del campo sperimentale*

### 1.3 Analisi statistica dei dati

Relativamente alla prova oggetto della presente tesi di laurea magistrale, la semina è stata eseguita in data 8 febbraio 2024 utilizzando una seminatrice parcellare Vignoli mentre la raccolta, eseguita mediante mietitrebbia parcellare Wintersteiger Delta, è stata eseguita in data 1° luglio 2024.



*Figura 1-9. Mietitrebbiatrice parcellare durante la raccolta*

Il raccolto relativo alle colture pure è stato sottoposto ad una vagliatura meccanica e, successivamente, è stato pesato per determinare la produzione per ettaro ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

Relativamente alle colture consociate, il raccolto del cereale (frumento duro o avena nuda) è stato separato dal seme della leguminosa (favino o veccia comune) mediante vagliatura meccanica e, successivamente, sono state determinate le rispettive produzioni ad ettaro del cereale e della leguminosa in consociazione. Per ciascuna specie e cultivar, quindi, è stato possibile ottenere la risposta produttiva sia in coltura pura sia in coltura consociata.

Relativamente ai dati produttivi, l'ANOVA è stata eseguita separatamente per ciascuna specie. La normalità degli errori è stata valutata mediante il test W (Shapiro-Wilk) mentre l'omogeneità delle varianze è stata valutata mediante il test di Bartlett. I confronti tra le medie sono stati effettuati utilizzando il test T per i trattamenti con due livelli e il test HSD di Tukey per i trattamenti con più di due livelli (confronti multipli). Tutte le analisi statistiche sono state eseguite utilizzando il software JMP 11.2.0.

### 1.3.1 ANOVA frumento duro

Il modello ANOVA, oltre all'effetto Blocco (B), ha incluso due fattori principali: Cultivar di frumento duro (Cfd), con due livelli (Achille e Maciste), e Sistema Colturale (SC), con tre livelli (coltura pura, consociazione con Chiaro di Torre Lama e consociazione con Prothabat69). Nel modello ANOVA è stata inserita anche l'interazione Cfd x SC.

Il modello ANOVA per il frumento duro, quindi, è il seguente:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + Cfd_j + SC_k + (Cfd \times SC)_{jk} + e_{ijk} + e_{ijkl}$$

Come indicato precedentemente, in assenza di significatività tra le componenti della varianza errore totale, è stato eseguito il pooling delle due varianze errore per ottenere la varianza errore utilizzata nell'ANOVA.

### 1.3.2 ANOVA favino

Il modello ANOVA, oltre all'effetto Blocco (B), ha incluso due fattori principali: Cultivar favino (Cfb), con due livelli (Chiaro di Torre Lama e Prothabat69), e Sistema Colturale (SC), con tre livelli (coltura pura, consociazione con Achille e consociazione con Maciste). Nel modello ANOVA è stata inserita anche l'interazione Cfb x SC.

Il modello ANOVA per il favino, quindi, è il seguente:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + Cfb_j + SC_k + (Cfb \times SC)_{jk} + e_{ijk} + e_{ijkl}$$

La varianza errore è stata ottenuta come indicato per l'analisi dei dati relativi al frumento duro.

### 1.3.3 *Avena-veccia comune*

Relativamente alla consociazione avena-veccia comune, l'ANOVA è stata applicata per analizzare separatamente la produzione di avena e veccia comune. Il modello ANOVA per entrambe le specie ha incluso sia l'effetto Blocco (B) sia l'effetto Sistema Colturale (SC) con due livelli (coltura pura e coltura consociata). Poiché in ogni blocco erano presenti quattro parcelle relative alla consociazione avena-veccia comune, come precedentemente indicato, la varianza errore è stata ottenuta come precedentemente illustrato per il frumento e per il favino.

Avendo una sola combinazione di specie, è stato applicato il seguente modello per l'analisi dei dati sia dell'avena sia della veccia comune:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + C_j + e_{ijk} + e_{ijkl}$$

### 1.3.4 *LER*

I dati relativi alla produzione hanno permesso di calcolare il LER: tale indice riflette l'effettiva risposta di ciascuna consociazione rispetto alla performance delle singole colture pure. Il LER viene dapprima calcolato per ogni singola coltura:

$$LER_{cereale} = \frac{\text{produzione in consociazione}}{\text{produzione in coltura pura}}$$
$$LER_{leguminosa} = \frac{\text{produzione in consociazione}}{\text{produzione in coltura pura}}$$

Il LER delle singole colture, calcolato a partire dai dati delle produzioni a ettaro, quantifica la quota di superficie di ciascuna coltura pura che corrisponde a 1 ha di ciascuna coltura consociata. Ad esempio, se la produzione in coltura consociata è stata di  $3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$  mentre la produzione in coltura pura è stata di  $5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , il LER della consociazione è pari a:

$$LER_{consociazione} = \frac{3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}}{5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}} = 0,60$$

Quindi, per la singola coltura, in termini di produzione di granella, 1 ha di coltura consociata è risultato equivalente a 0,60 ha di coltura pura.

I LER così ottenuti forniscono il LER totale:

$$LER_{consociazione} = LER_{cereale} + LER_{leguminosa}$$

Ad esempio, se il  $LER_{cereale}$  fosse pari a 0,60 e il  $LER_{leguminosa}$  fosse pari a 0,50, il  $LER_{totale}$  sarà pari a:

$$LER_{totale} = 0,60 + 0,50 = 1,10$$

Quindi, relativamente al presente esempio, 1 ha di coltura consociata è risultato equivalente a 1,10 ha di colture pure, in particolare a 0,60 ha di cereale in coltura pura e a 0,50 ha di leguminosa in coltura pura.

Quindi, se il  $LER_{totale}$  abbia un valore superiore all'unità, la coltura consociata mostra un utilizzo più efficiente del suolo consociato rispetto alle corrispondenti colture pure.

## Capitolo 2

### RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 2.1 Frumento duro: produzione di granella

I risultati dell'ANOVA relativi alla produzione di granella di frumento duro sono riportati in Tabella 2-1.

**Tabella 2-1. Risultati dell'ANOVA relativa alla produzione di granella di frumento duro** (*gl* = gradi di libertà, *SS* = somma dei quadrati (devianza), *MS* = varianza, *F* = test *F* di Fisher, *Sign.* = significatività del test *F*, *ns* = non significativo, \* =  $P < 0,05$ , \*\* =  $P < 0,01$ , \*\*\* =  $P < 0,001$ )

Fonti di Variazione	gl	SS	MS	F	Sign.
Blocchi (B)	3	4,25	1,42	7,13	**
Trattamenti (T)					
Cultivar f. duro (Cfd)	1	1,29	1,29	6,49	*
Sistema colturale (SC)	2	49,90	24,95	125,68	***
Cfd x SC	2	0,53	0,26	1,32	ns
Errore totale	23	4,57	0,20		
Errore (BxT)	15	3,40	0,23	1,56	ns
Errore puro	8	1,16	0,15		

La varianza (BxT) non è risultata significativa rispetto alla varianza dell'errore puro: le due varianze, quindi, sono state riunite (pooling) per ottenere una varianza errore totale con 23 gradi di libertà. Le varianze Blocchi (B), Cultivar di frumento duro (Cfd) e Sistema Colturale (SC) sono risultate significative mentre l'interazione Cultivar x Sistema Colturale non è risultata significativa.

I confronti tra le medie dei blocchi (Tabella 2-2) hanno evidenziato che la produzione media complessiva del frumento duro ha mostrato una significativa riduzione passando dal blocco 3 (situato a monte) al blocco 6 (situato a valle): questo aspetto risulta essere interessante poiché il campo dove è stata eseguita la prova è caratterizzato da una lieve pendenza (circa del 3-4%) che, evidentemente, ha influito significativamente sulla performance media del frumento duro.

**Tabella 2-2. Confronti tra le medie relative alla produzione di granella di frumento duro eseguiti utilizzando il test HSD di Fisher**

Blocchi	Mg · ha <sup>-1</sup>	Test HSD
<i>Blocco 3</i>	4,25	a
<i>Blocco 4</i>	3,68	ab
<i>Blocco 5</i>	3,41	b
<i>Blocco 6</i>	3,31	b

La produzione media della cultivar Maciste è risultata significativamente più elevata della cultivar Achille (Tabella 2-3) sebbene tali produzioni si riferiscano alla produzione media di ciascuna cultivar includendo, nel valore medio, sia le colture pure sia quelle consociate.

**Tabella 2-3. Confronti tra le medie relative alla produzione di granella di frumento duro eseguiti utilizzando il test T di Student**

Cultivar f. duro	Mg · ha <sup>-1</sup>	Test T
<i>Maciste</i>	3,87	a
<i>Achille</i>	3,45	b

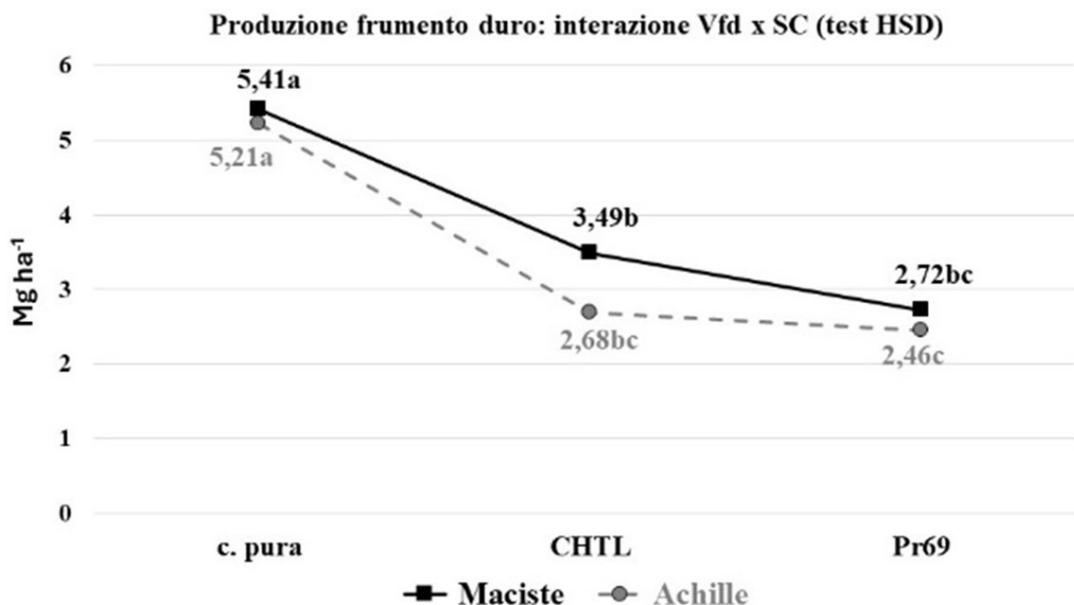
Relativamente alla fonte di variazione “Sistema Colturale”, si deve notare che i valori medi ottenuti sono indicativi del comportamento complessivo del frumento duro (valori mediati tra le due cultivar Achille e Maciste) quando coltivato in coltura pura o in coltura consociata con le due cultivar di favino: questi risultati sono, quindi, indicativi del trend generale della risposta del frumento duro sia in coltura pura sia in coltura consociata. Il confronto tra le medie ha evidenziato, come generalmente atteso, che il frumento duro in coltura pura è stato significativamente più produttivo che in coltura consociata mentre tale specie ha mostrato una produzione simile (e, quindi, con una differenza non significativa) nelle due consociazioni con le cultivar di favino Chiaro di Torre Lama e Prothabat69 (Tabella 2-4).

**Tabella 2-4. Confronti tra le medie relative alla produzione di granella di frumento duro eseguiti utilizzando il test HSD di Fisher**

Sistema colturale	Mg · ha <sup>-1</sup>	Test HSD
<i>Coltura pura</i>	5,31	a
<i>Mix - CHTL</i>	3,09	b
<i>Mix - Pr69</i>	2,59	b

L'ANOVA ha mostrato che la varianza relativa all'interazione “Cultivar x Sistema Colturale” non è risultata significativa: entrambe le cultivar di frumento duro, infatti, hanno mostrato lo stesso andamento della produzione di granella passando dalla coltura pura alle due consociazioni (Figura 2-1). Entrambe le cultivar di frumento duro hanno mostrato una produzione in coltura pura simile tra loro e significativamente più elevata delle rispettive colture consociate. Inoltre, l'unica differenza significativa esistente tra le colture consociate è stata rilevata tra Maciste consociato con Chiaro di Torre Lama (3,49 Mg·ha<sup>-1</sup>) e Achille consociato con Prothabat69 (2,49 Mg·ha<sup>-1</sup>). Complessivamente, l'interazione “Cultivar x

Sistema Colturale” non è risultata significativa in quanto le due cultivar di frumento duro hanno presentato un trend simile relativamente all’andamento della produzione di granella passando dalla coltura pura alle colture consociate.



**Figura 2-1. Produzione di granella di frumento duro: interazione “Cultivar x Sistema Colturale”**

Si deve notare, comunque, che il livello delle produzioni riscontrate per entrambe le cultivar di frumento duro presenti in coltura pura è risultato molto elevato in quanto superiore a 5 Mg·ha<sup>-1</sup> (questo sta ad indicare un’ottima performance del frumento duro nel corso dell’annata 2024). Questo dato rispecchia il trend positivo del frumento duro osservato per la Regione Marche nel 2024, confermando la validità dei risultati sperimentali ottenuti dal confronto tra le performance delle due cultivar di frumento duro in coltura pura e in coltura consociata. Complessivamente, i risultati riportati in Figura 2-1 hanno mostrato che la cultivar Achille in coltura consociata ha sempre mostrato una produzione inferiore alla cultivar Maciste in entrambe le consociazioni sebbene queste differenze non siano state statisticamente significative.

## 2.2 Favino: produzione di seme

I risultati dell’ANOVA relativi alla produzione di seme del favino sono riportati in Tabella 2-5.

**Tabella 2-5. Risultati dell'ANOVA relativa alla produzione di seme di favino (gl = gradi di libertà, SS = somma dei quadrati (devianza), MS = varianza, F = test F di Fisher, Sign. = significatività del test F, ns = non significativo, \* =  $P < 0,05$ , \*\* =  $P < 0,01$ , \*\*\* =  $P < 0,001$ )**

Fonti di Variazione	gl	SS	MS	F	Sign.
Blocchi (B)	3	0,22	0,07	0,51	ns
Trattamenti (T)					
Cultivar favino (Cfb)	1	1,15	1,15	8,16	**
Sistema colturale (SC)	2	10,80	5,40	38,40	***
Cfb x SC	2	0,01	0,01	0,05	ns
Errore totale					
Errore (BxT)	15	1,98	0,13		
Errore puro	8	1,25	0,16	1,18	ns

La fonte di variazione “Blocchi” non è risultata significativa sebbene sia stata riscontrata anche per il favino, come per la produzione del frumento duro, una progressiva riduzione della resa media dal blocco 3 (situato a monte) al blocco 6 (situato a valle), come indicato in Tabella 2-6.

**Tabella 2-6. Confronti tra le medie relative alla produzione di seme di favino eseguiti utilizzando il test HSD di Fisher**

Blocchi	Mg · ha <sup>-1</sup>	Test HSD
Blocco 3	2,39	a
Blocco 4	2,37	a
Blocco 5	2,30	a
Blocco 6	2,18	a

Relativamente alla fonte di variazione “Cultivar di favino” (Tabella 2-7), la produzione media della cultivar Prothabat69 è risultata significativamente più elevata della cultivar Chiaro di Torre Lama. Si deve notare, comunque, che questi valori medi sono stati calcolati includendo la produzione sia in coltura pura sia in coltura consociata.

**Tabella 2-7. Confronti tra le medie relative alla produzione di seme di favino eseguiti utilizzando il test T di Student**

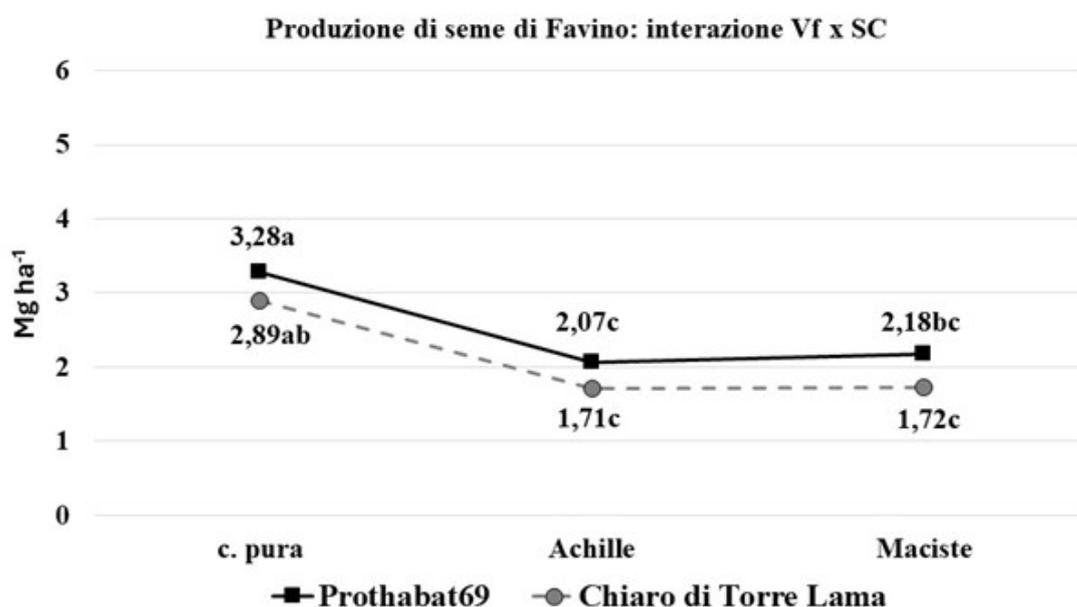
Cultivar favino	Mg · ha <sup>-1</sup>	Test T
Prothabat69	2,51	a
Chiaro di Torre Lama	2,11	b

Anche per il favino, la produzione media in coltura pura è risultata significativamente più elevata della produzione media registrata per le due combinazioni di colture consociate (Tabella 2-8), risultato generalmente atteso vista la minore densità di semina della leguminosa in consociazione rispetto alla densità di semina in coltura pura.

**Tabella 2-8. Confronti tra le medie relative alla produzione di seme di favino eseguiti utilizzando il test HSD di Fisher**

Sistema colturale	Mg · ha <sup>-1</sup>	Test HSD
Coltura pura	3,08	a
Mix – Maciste	1,95	b
Mix – Achille	1,89	b

La Figura 2-2 mostra come l’andamento della produzione di seme, passando dalla coltura pura alle colture consociate, sia stato sostanzialmente simile per le due cultivar di favino, rispecchiando il test non significativo della varianza dell’interazione “Cultivar x Sistema Colturale”. Come riscontrato per il frumento duro, anche per il favino le elevate produzioni mostrate da entrambe le colture pure suggeriscono un ottimo andamento generale anche per il favino nell’annata 2024. Dalla Figura 2-2 si può comunque notare come la cultivar Chiaro di Torre Lama abbia sempre mostrato delle produzioni inferiori, anche se non statisticamente differenti rispetto a quelle di Prothabat69. Prothabat69 in consociazione con Maciste, inoltre, ha mostrato una produzione di seme statisticamente non differente dalla produzione di Chiaro di Torre Lama in coltura pura. Complessivamente, questi risultati suggeriscono una migliore performance della cultivar Prothabat69 rispetto a Chiaro di Torre Lama. Questi risultati sono in linea con l’ampia diffusione della cultivar Prothabat69 nella Regione Marche.



**Figura 2-2. Produzione di seme di favino: interazione “Cultivar x Sistema Colturale”**

### 2.3 Consociazione frumento duro-favino: LER

Sia il frumento duro sia il favino hanno mostrato delle produzioni relativamente elevate in linea con le produzioni registrate nell’area oggetto di studio nelle annate favorevoli per queste

due colture. Per valutare l'efficacia della consociazione rispetto alla coltivazione delle due specie in coltura pura è stato utilizzato il LER (tale indice è stato calcolato sia separatamente per singola coltura sia complessivamente come  $LER_{totale}$ ). I risultati sono stati riassunti in Tabella 2-9.

**Tabella 2-9. Risultati relativi al LER (CHTL = Chiaro di Torre Lama, Pr69 = Prothabat69,  $LER_{fd}$  = LER relativo al frumento duro,  $LER_{fb}$  = LER relativo al favino,  $LER_{tot}$  = LER totale)**

Consociazione		LER		
F. duro	Favino	$LER_{fd}$	$LER_{fb}$	$LER_{tot}$
Maciste	CHTL	0,65	0,60	1,24
Maciste	Pr69	0,50	0,67	1,17
Achille	CHTL	0,51	0,59	1,11
Achille	Pr69	0,47	0,63	1,10

#### 2.4 Frumento duro: analisi subplot

I risultati dell'ANOVA relativi alle 6 variabili valutate analizzando le subplot sono riportati in Tabella 2-10.

I risultati relativi al confronto tra le medie generali delle due cultivar di frumento duro (Tabella 2-11) hanno fornito un'informazione media del comportamento complessivo delle due cultivar nella prova. Si deve comunque notare che tali medie sono calcolate includendo tutti i tre Sistemi Colturali (coltura pura, consociazione con Chiaro di Torre Lama e consociazione con Prothabat69) e, quindi, non hanno fornito delle indicazioni interessanti sul confronto tra le colture pure e le consociazioni, come già visto per la produzione di granella (per quanto riguarda il frumento duro) e di seme (per quanto riguarda il favino).

In Tabella 2-12 si può notare che, come atteso, il numero medio di piante per  $m^2$  è stato significativamente più elevato per la coltura pura rispetto ad entrambe le consociazioni: questo risultato medio ha rispecchiato la densità di semina applicata nella coltura consociata (pari al 50% della coltura pura).

Relativamente all'altezza delle piante, è stato interessante notare che il frumento duro ha presentato un'altezza media in coltura consociata significativamente più elevata rispetto alla media della coltura pura: questo risultato rispecchia l'effetto congiunto della minore densità di semina e della consociazione con la leguminosa nella competizione intra- e inter- specifica.

Per le rimanenti variabili non sono state riscontrate delle differenze significative tra la coltura pura e le consociazioni (numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella per pianta e produzione di sostanza secca per pianta). Quindi, nonostante la densità di semina e una maggiore altezza media delle piante, complessivamente

sia lo sviluppo vegetativo (accestimento, numero di spighe e sostanza secca) sia la produzione di granella per pianta in consociazione è risultato simile a quanto riscontrato in coltura pura.

I risultati relativi all'interazione "Cultivar x Sistema Colturale" (Tabella 2-13) hanno rispecchiato complessivamente quanto ottenuto a livello di comportamento medio generale considerando il Sistema Colturale nel suo complesso. Infatti, sia Achille sia Maciste hanno mostrato una densità di piante significativamente più elevata in coltura pura rispetto ad entrambe le combinazioni di coltura consociata. Inoltre, sia in coltura pura sia in coltura consociata entrambe le cultivar di frumento duro non hanno mostrato delle differenze significative tra loro.

Relativamente all'altezza delle piante, solo per Achille entrambe le combinazioni di coltura consociata hanno mostrato un'altezza significativamente più elevata rispetto ad Achille in coltura pura. Per la cultivar Maciste, solo per la consociazione con Chiaro di Torre Lama l'altezza della pianta è risultata significativamente più elevata della coltura pura.

Per le rimanenti variabili (numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella per pianta e produzione di sostanza secca per pianta) i confronti tra le medie hanno confermato i risultati ottenuti considerando la performance complessiva del frumento duro osservata considerando il Sistema Colturale.

**Tabella 2-10. Risultati dell'ANOVA relativa ai dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa). Significatività statistica del test F di Fisher: ns = non significativo, \* = P<0,05, \*\* = P<0,01, \*\*\* = P<0,001**

Fonti di variazione	gl	N. piante · m <sup>-2</sup>			Altezza (cm)		N steli/pt.		N. spighe/pt.		Prod. (g)/pt.		S.S. (g)/pt.						
		MS	F	*	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F					
Blocchi (B)	3	3540	3,13	*	22,92	3,82	*	0,022	1,05	ns	0,016	0,59	ns	0,008	0,15	ns	0,068	0,56	ns
Frum. duro (Fd)	1	8467	7,49	*	13,61	2,27	ns	0,021	0,99	ns	0,058	2,17	ns	0,025	0,46	ns	0,109	0,89	ns
Sist. Colt (SC)	2	73484	65,05	***	105,84	17,66	***	0,057	2,69	ns	0,048	1,78	ns	0,026	0,48	ns	0,053	0,44	ns
FdxSC	2	1911	1,69	ns	16,03	2,67	ns	0,037	1,78	ns	0,010	0,36	ns	0,046	0,86	ns	0,027	0,22	ns
Errore totale	23	1130			5,99			0,021			0,027			0,054			0,123		
Errore (BxSC)	15	1322	1,72	ns	8,03	3,67	*	0,022	1,17	ns	0,029	1,36	ns	0,069	2,77	ns	0,148	1,94	ns
Errore puro	8	769			2,19			0,019			0,022			0,025			0,076		

**Tabella 2-11. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD con P<0,05) relativi alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa)**

Cultivar di frumento duro (Fd)	N. piante · m <sup>-2</sup>		Altezza (cm)		N. steli/pt.		N. spighe/pt.		Prod. (g)/pt.		S.S./pt.	
Achille	199,3	b	86,04	a	1,69	a	1,63	a	1,73	a	2,77	a
Maciste	233,6	a	87,42	a	1,64	a	1,54	a	1,67	a	2,89	a

**Tabella 2-12. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD) relativi alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa)**

<b>Sistema Colturale (SC)</b>	<b>N. piante·m<sup>-2</sup></b>	<b>Altezza (cm)</b>	<b>N. steli/pt.</b>	<b>N. spighe/pt.</b>	<b>Prod. (g)/pt.</b>	<b>S.S./pt.</b>
<i>Coltura pura</i>	305,4 a	83,31 b	1,60 a	1,55 a	1,75 a	2,90 a
<i>Fd – CHTL</i>	188,5 b	88,75 a	1,66 a	1,53 a	1,66 a	2,78 a
<i>Fd – Pr69</i>	155,4 b	88,13 a	1,75 a	1,67 a	1,70 a	2,80 a

**Tabella 2-13. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD) relativi alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa)**

<b>Fd x SC</b>	<b>N. piante·m<sup>-2</sup></b>	<b>Altezza (cm)</b>	<b>N. steli/pt.</b>	<b>N. spighe/pt.</b>	<b>Prod. (g)/pt.</b>	<b>S.S./pt.</b>
<i>Achille, c. pura</i>	287,6 a	82,13 a	1,57 a	1,57 a	1,82 a	2,87 a
<i>Achille – CHTL</i>	156,3 b	87,00 ab	1,73 a	1,60 a	1,73 a	2,76 a
<i>Achille – Pr69</i>	154,0 b	89,00 ab	1,79 a	1,72 a	1,65 a	2,67 a
<i>Maciste, c. pura</i>	323,3 a	84,50 bc	1,64 a	1,54 a	1,68 a	2,94 a
<i>Maciste – CHTL</i>	220,8 b	90,50 a	1,58 a	1,46 a	1,59 a	2,81 a
<i>Maciste – Pr69</i>	156,8 b	87,25 ab	1,71 a	1,62 a	1,75 a	2,92 a

## 2.5 Favino: analisi subplot

I risultati dell'ANOVA relativi alle 6 variabili valutate sul favino analizzando le subplot sono riportati in Tabella 2-14.

Il confronto tra le medie generali del favino (Tabella 2-15), medie che includono sia la coltura pura sia le due consociazioni, non hanno evidenziato delle differenze significative per quanto riguarda il numero di piante per m<sup>2</sup> e l'altezza delle piante. Si può notare che la cultivar Prothabat69 ha sempre mostrato dei valori medi significativamente più elevati della cultivar Chiaro di Torre Lama sia per le variabili legate allo sviluppo vegetativo (numero di steli e produzione di sostanza secca) sia relativamente alla produzione di seme (numero di legumi e produzione di seme per pianta).

In Tabella 2-16 si può notare che, come atteso, anche per il favino, il numero medio di piante per m<sup>2</sup> è stato significativamente più elevato per la coltura pura rispetto ad entrambe le consociazioni. In particolare, è interessante osservare che in media la densità di piante di favino in consociazione ha rispecchiato la densità di semina iniziale (pari al 70% della coltura pura). Infatti, la densità di piante per m<sup>2</sup> è risultata pari al 70% e al 76% della coltura pura, rispettivamente per Chiaro di Torre Lama e Prothabat69.

Relativamente all'altezza media delle piante, il favino in consociazione con Maciste ha mostrato un'altezza significativamente inferiore rispetto sia alla coltura pura sia al favino consociato con Achille: infatti, Prothabat69 è caratterizzato generalmente, rispetto a Chiaro di Torre Lama, da un accostamento più elevato e da steli di lunghezza minore ma di spessore maggiore. Nella presente prova, comunque, il numero medio di steli per pianta non ha mostrato delle differenze significative legate al sistema culturale.

In consociazione con Maciste, il favino ha presentato un numero di legumi per pianta significativamente inferiore alla coltura pura mentre il valore medio della consociazione con Achille è risultato intermedio e non significativamente diverso dagli altri due sistemi di coltivazione: questo risultato potrebbe suggerire che Maciste ha mostrato una competitività superiore ad Achille per un carattere, come il numero di legumi per pianta, strettamente legato alla produzione della coltura.

Infine, sia la produzione di seme sia la produzione di sostanza secca per pianta hanno mostrato valori medi significativamente più elevati rispetto ad entrambe le consociazioni. Inoltre, queste variabili non hanno mostrato delle differenze significative tra le consociazioni con Achille e Maciste, sebbene il favino in consociazione con Maciste abbia sempre presentato valori medi inferiori rispetto alla consociazione con Achille. Questo risultato sembrerebbe

essere in linea con quanto riscontrato per la produzione di legumi per pianta, suggerendo nuovamente che Maciste potrebbe essere caratterizzato da una capacità competitiva superiore ad Achille nei confronti del favino.

Nella Tabella 2-17 sono riportati i risultati dei confronti multipli tra le medie delle produzioni delle due cultivar di favino in coltura pura e in consociazione con le due cultivar di frumento duro. Entrambe le cultivar di favino hanno mostrato una densità di piante per m<sup>2</sup> significativamente più elevata in coltura pura e in consociazione: in particolare, non sono state riscontrate delle differenze significative tra le due cultivar sia in coltura pura sia in consociazione.

Non è stata riscontrata nessuna differenza significativa per l'altezza delle piante, sebbene sia Chiaro di Torre Lama sia Prothabat69 abbiano presentato un'altezza media più bassa in consociazione con Maciste rispetto sia alle rispettive colture pure sia alla consociazione con Chiaro di Torre Lama.

I confronti multipli relativi al numero di steli per pianta hanno evidenziato solo una differenza significativa tra Prothabat69 in coltura pura e Chiaro di Torre Lama in coltura pura o in consociazione con Achille.

Considerando anche il numero di legumi per pianta, la produzione di seme e la produzione di sostanza secca, sebbene il trend dei valori medi rispecchi i risultati ottenuti valutando i sistemi colturali nel suo complesso (Tabella 2-16), sono state riscontrate poche differenze statisticamente significative.

Tranne che per la densità di piante per m<sup>2</sup>, considerando i confronti relativi alle singole cultivar di favino in coltura pura e in consociazione con Achille e Maciste, non sono state riscontrate delle differenze evidenti sia relativamente alla cultivar Chiaro di Torre Lama sia alla cultivar Prothabat69.

**Tabella 2-14. Risultati dell'ANOVA relativa ai dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di legumi per pianta, produzione di seme (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso). Significatività statistica del test F di Fisher: ns = non significativo, \* = P<0,05, \*\* = P<0,01, \*\*\* = P<0,001**

Fonti di variazione	gl	N. piante·m <sup>-2</sup>			Altezza (cm)			N. steli/pt.			N. legumi/pt.			Prod. (g)/pt.			S.S. (g)/pt.		
		MS	F	ns	MS	F	ns	MS	F	ns	MS	F	ns	MS	F	ns	MS	F	ns
<i>Blocchi (B)</i>	3	9,76	0,80	ns	16,61	1,50	ns	0,01	0,09	ns	2,20	0,99	ns	0,74	0,70	ns	1,11	0,77	ns
<i>Sist. Colt. (SC)</i>	2	412,39	33,88	***	55,52	5,01	*	0,08	0,97	ns	8,65	3,90	*	7,10	6,69	**	8,72	6,07	**
<i>Favino (FB)</i>	1	17,81	1,46	ns	17,11	1,54	ns	0,54	6,71	*	10,45	4,71	*	7,30	6,87	*	8,33	5,80	*
<i>FBxSC</i>	2	0,96	0,08	ns	23,27	2,10	ns	0,39	4,82	*	1,05	0,48	ns	0,35	0,33	ns	0,02	0,01	ns
<i>Errore</i>	23	12,17			11,09			0,08			2,22			1,06			1,44		
<i>Errore (BxSC)</i>	15	16,72	4,58	*	12,64	1,54	ns	0,11	3,60	*	3,14	6,43	**	1,25	1,78	ns	1,62	1,49	ns
<i>Errore puro</i>	8	3,65			8,19			0,03			0,49			0,70			1,09		

**Tabella 2-15. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD con P<0,05) relative alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di legumi per pianta, produzione di seme (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso)**

Cultivar di favino	N. piante·m <sup>-2</sup>		Altezza (cm)		N. steli/pt.		N. legumi/pt.		Prod. (g)/pt.		S.S. (g)/pt.	
<i>Chiaro di Torre Lama</i>	30,1	a	89,1	a	1,43	b	7,23	b	6,87	b	8,01	b
<i>Prothabat69</i>	31,7	a	90,7	a	1,70	a	8,43	a	7,87	a	9,09	a

**Tabella 2-16. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD) relativi alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa)**

<b>Sistema Colturale (SC)</b>	<b>N. piante·m<sup>-2</sup></b>	<b>Altezza (cm)</b>	<b>N. steli/pt.</b>	<b>N. legumi/pt.</b>	<b>Prod. (g)/pt.</b>	<b>S.S. (g)/pt.</b>
<i>Coltura pura</i>	37,6 a	91,2 a	1,61 a	8,77 a	8,24 a	9,53 a
<i>Fb – Achille</i>	26,5 b	91,5 a	1,46 a	7,65 ab	7,12 b	8,19 b
<i>Fb – Maciste</i>	28,6 b	87,0 b	1,63 a	7,07 b	6,75 b	7,94 b

**Tabella 2-17. Risultati dei confronti tra le medie (test T o confronti multipli mediante test HSD) relativi alle variabili rilevate utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di spighe per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (granella non inclusa)**

<b>Fb x SC</b>	<b>N. piante·m<sup>-2</sup></b>	<b>Altezza (cm)</b>	<b>N. steli/pt.</b>	<b>N. legumi/pt.</b>	<b>Prod. (g)/pt.</b>	<b>S.S. (g)/pt.</b>
<i>Chiaro di Torre Lama (CHTL), c. pura</i>	87,0 a	91,6 a	1,32 b	7,83 ab	7,77 ab	8,95 ab
<i>CHTL – Achille</i>	25,4 b	89,0 a	1,24 b	7,23 ab	6,80 ab	7,65 b
<i>CHTL – Maciste</i>	28,0 b	86,8 a	1,72 ab	6,62 b	6,02 b	7,44 b
<i>Prothabat69 (Pr69), c. pura</i>	38,2 a	90,8 a	1,90 a	9,72 a	8,71 a	10,11 a
<i>Pr69 – Achille</i>	27,7 b	94,0 a	1,67 ab	8,07 ab	7,44 ab	8,72 ab
<i>Pr69 – Maciste</i>	29,2 b	87,3 a	1,54 ab	7,52 ab	7,48 ab	8,44 ab

## 2.6 Consociazione avena-veccia comune

L'ANOVA ha evidenziato, sia per l'avena sia per la veccia comune, una variazione altamente significativa per la fonte di variazione "Sistema Colturale" (Tabella 2-18). Le produzioni dell'avena e della veccia comune, infatti, sono risultate entrambe significativamente più elevate in coltura pura che in consociazione (Tabella 2-19): in particolare, è da sottolineare la resa molto elevata dell'avena nuda sia in coltura pura sia in consociazione con la veccia comune. Parallelamente, anche la veccia comune ha mostrato una buona produzione di seme in entrambi i sistemi colturali. Questi risultati confermano che l'annata 2024 è stata estremamente favorevole anche per le colture come l'avena e la veccia comune sia in coltura pura sia in consociazione. Estremamente interessante, inoltre, è l'ottima performance della coltura consociata (Tabella 2-19) come indicato dall'elevato valore del  $LER_{totale}$  (pari a 1,34): considerando la produzione di granella e di seme, 1 ha di coltura consociata è risultato equivalente a 1,34 ha di colture pure (più in dettaglio, 0,78 ha di avena e 0,57 ha di veccia comune).

**Tabella 2-18. Risultati dell'ANOVA relativa alla produzione ( $Mg \cdot ha^{-1}$ ) di granella (avena) e di seme (veccia comune). Significatività statistica del test *F* di Fisher: ns = non significativo, \* =  $P < 0,05$ , \*\* =  $P < 0,01$ , \*\*\* =  $P < 0,001$**

Fonte di variazione	gl	Avena			Veccia		
		MS	F		MS	F	
Blocchi (B)	3	0,05	0,43	ns	0,13	5,21	*
Trattamenti (SC)	1	2,26	17,77	***	1,07	43,72	***
Errore totale	15	0,13			0,02		
Errore (BxSC)	3	0,11	0,86		0,05	2,77	ns
Errore puro	12	0,13	1,17		0,02		

**Tabella 2-19. Produzione ( $Mg \cdot ha^{-1}$ ) di granella (avena nuda) e di seme (veccia comune): confronti tra le medie e LER**

Sistema Colturale	Produzione ( $Mg \cdot ha^{-1}$ )		LER		Totale
	Avena	Veccia comune	Avena	Veccia comune	
Avena, c. pura	3,80 a				
Veccia comune, c. pura		1,34 a			
Avena-veccia comune	2,96 b	0,76 b	0,78	0,57	1,34

## 2.7 Avena-veccia comune: analisi subplot

I dati relativi all'ANOVA per le variabili misurate utilizzando le subplot sono riportati in Tabella 2-20 per l'avena e in Tabella 2-21 per la veccia comune. La varianza della fonte di variazione "Sistema Colturale" è risultata statisticamente significativa per tutte le variabili relative all'avena e per tutte le variabili (tranne che per il numero di steli per pianta) relative alla veccia comune.

I confronti tra le medie (Tabella 2-22 e Tabella 2-23) hanno evidenziato che sia per l'avena sia per la veccia comune la coltura pura ha presentato un numero di piante per m<sup>2</sup> significativamente più elevato rispetto a quanto riscontrato in coltura consociata: questo risultato era comunque atteso in quanto alla semina sono state applicate, per entrambe le specie, delle densità di semina differenti tra la coltura pura e quella consociata.

Relativamente alle altre variabili (altezza della pianta, numero di steli per pianta, numero di panicoli per pianta, produzione per pianta e sostanza secca per pianta), l'avena in consociazione con la veccia comune ha presentato dei valori medi sempre significativamente più elevati rispetto all'avena in coltura pura (Tabella 2-22). In particolare, l'altezza, il numero di steli e la sostanza secca per pianta hanno indicato un maggior sviluppo vegetativo delle singole piante di avena conseguente probabilmente alla minore densità di semina in coltura consociata rispetto alla coltura pura. Inoltre, anche il numero di panicoli e la produzione per pianta hanno evidenziato che la riduzione della densità di semina ha determinato anche una risposta migliore da parte delle piante di avena anche per gli aspetti legati alla produzione di granella. Complessivamente, la valutazione delle subplot ha confermato come la risposta delle piante di avena in coltura consociata giustifichi l'elevato valore del LER ottenuto (pari a 0,76), superiore rispetto all'atteso in base alla densità di semina dell'avena in coltura consociata (pari al 50% della coltura pura).

I risultati delle analisi delle subplot relative alla veccia comune (Tabella 2-23) hanno evidenziato una lunghezza media degli steli significativamente maggiore in consociazione rispetto alla coltura pura, sebbene per la veccia comune non siano state riscontrate delle differenze significative per il numero di steli per m<sup>2</sup> tra i due sistemi colturali. La coltura pura ha mostrato dei valori medi significativamente più elevati della coltura consociata per quanto riguarda il numero di legumi, la produzione di seme e la sostanza secca per pianta: questi risultati, complessivamente, hanno indicato che la veccia comune in consociazione ha reagito alla competizione con l'avena con una lunghezza maggiore degli steli riducendo contemporaneamente sia lo sviluppo vegetativo (sostanza secca per pianta) sia la capacità

riproduttiva (numero di semi per pianta), con una conseguente riduzione della produzione di seme per pianta rispetto alla coltura pura.

Complessivamente, quindi, l'analisi delle variabili rilevate sulle subplot ha evidenziato un'ottima risposta dell'avena alla riduzione della densità delle piante in coltura consociata. Allo stesso tempo, si deve comunque notare che la veccia comune ha risentito complessivamente della competizione con l'avena riducendo la risposta per i parametri legati sia allo sviluppo vegetativo sia alla produzione di seme per pianta.

**Tabella 2-20. Risultati dell'ANOVA relativa ai dati rilevati mediante subplot su avena: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero di steli per pianta, numero di panicoli per pianta, produzione di granella (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso). Significatività statistica del test F di Fisher: ns = non significativo, \* = P<0,05, \*\* = P<0,01, \*\*\* = P<0,001**

Fonti di variazione	gl	N. piante·m <sup>-2</sup>			Altezza (cm)			N. steli/pt.			N. panicoli/pt.			Prod. (g)/pt.		S.S. (g)/pt.			
		MS	F		MS	F		MS	F		MS	F		MS	F	MS	F		
Blocchi (B)	3	512	0,26	ns	4,05	0,39	ns	0,021	0,58	ns	0,021	0,73	ns	0,018	0,39	ns	0,869	4,38	*
Sist. Colt. (SC)	1	51506	25,67	***	510,05	40,93	***	0,381	10,62	**	0,377	13,43	**	0,262	5,54	*	2,712	13,68	**
Errore	15	2006			10,42			0,036			0,028			0,047			0,198		
Errore (BxSC)	3	5267	4,42	ns	10,62	1,02	ns	0,024			0,036	1,38	ns	0,047			0,080		
Errore puro	12	1191			10,38			0,039	1,61	ns	0,026			0,048	1,02	ns	0,228	2,84	ns

**Tabella 2-21. Risultati dell'ANOVA relativa ai dati rilevati mediante subplot su veccia comune: numero di piante per m<sup>2</sup>, lunghezza media degli steli, numero di steli per pianta, numero di legumi per pianta, produzione di seme (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso). Significatività statistica del test F di Fisher: ns = non significativo, \* = P<0,05, \*\* = P<0,01, \*\*\* = P<0,001**

Fonti di variazione	gl	N. piante·m <sup>-2</sup>			Lunghezza steli (cm)			N. steli/pt.			N. legumi/pt.			Prod. (g)/pt.		S.S. (g)/pt.			
		MS	F		MS	F		MS	F		MS	F		MS	F	MS	F		
Blocchi (B)	3	1440	30,84	***	9,65	0,29	ns	0,114	3,40	*	1,15	3,40	*	0,057	1,28	ns	0,233	4,11	*
Sist. Colt. (SC)	1	2177	46,63	***	273,80	8,15	*	0,007	19,47	***	6,57	19,47	***	0,335	7,49	*	0,352	6,22	*
Errore	15	47			33,59			0,040											
Errore (BxSC)	3	57	1,28	ns	40,93	1,29	ns	0,103			0,33			0,045	1,01	ns	0,081	1,59	ns
Errore puro	12	44			31,75			0,025	1,01	ns	0,34	1,01	ns	0,045			0,051		

**Tabella 2-22. Risultati dei confronti tra le medie (test T) relative alle variabili utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, altezza media, numero medio di steli per pianta, numero di panicoli per pianta, produzione di seme (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso)**

Cultivar di avena	N. piante·m <sup>-2</sup>	Altezza (cm)	N. steli/pt.	N. panicoli/pt.	Prod. (g)/pt.	S.S. (g)/pt.
<i>Irina, c. pura</i>	320,7 a	104,3 b	1,41 b	1,32 b	1,27 b	2,75 b
<i>Irina - veccia c.</i>	193,8 b	116,9 a	1,76 a	1,66 a	1,56 a	3,67 a

**Tabella 2-23. Risultati dei confronti tra le medie (test T) relative alle variabili utilizzando i dati rilevati mediante subplot: numero di piante per m<sup>2</sup>, lunghezza media degli steli, lunghezza media degli steli per pianta, numero di legumi per pianta, produzione di seme (g) per pianta, sostanza secca (S.S.) per pianta (seme non incluso)**

Cultivar di veccia comune	N. piante·m <sup>-2</sup>	Lunghezza steli (cm)	N. steli/pt.	N. legumi/pt.	Prod. (g)/pt.	S.S. (g)/pt.
<i>Idice, c. pura</i>	83,5 a	79,8 b	1,52 a	6,60 a	1,66 a	2,37 a
<i>Idice - avena</i>	57,4 b	89,0 a	1,48 a	5,17 b	1,33 b	2,04 b

## CONCLUSIONI

I risultati della presente tesi di laurea magistrale hanno messo in evidenza che la consociazione cereali-leguminose presenta degli aspetti positivi che potrebbero portare all'implementazione di sistemi colturali che valorizzano la diversificazione delle colture riducendo contemporaneamente l'impiego di prodotti fitosanitari. Entrambe le combinazioni di colture in consociazione proposte (vale a dire frumento duro-favino e avena nuda-veccia comune) hanno risposto molto positivamente alla consociazione, come indicato dai valori molto elevati del  $LER_{totale}$ .

Complessivamente, quindi, la consociazione tra cereali e leguminose potrebbe essere utile allo sviluppo di sistemi colturali in grado di migliorare l'efficienza d'uso del suolo.

Questi risultati assumono una particolare importanza in quanto la valutazione delle performance delle colture pure (sia dei cereali sia delle leguminose) ha indicato che l'andamento meteorologico riscontrato nel corso del 2024 è risultato estremamente favorevole alle colture pure: questo aspetto porta ulteriormente a valutare in modo positivo i risultati ottenuti dalle colture consociate soprattutto in termini di performance legata alla produzione di granella (per quanto riguarda i cereali) e di seme (per quanto riguarda le leguminose).

Relativamente alle singole combinazioni in coltura consociata, i risultati ottenuti complessivamente hanno messo in evidenza che tutte le combinazioni di cultivar di frumento duro e di favino hanno mostrato un'ottima attitudine ad essere inserite all'interno delle consociazioni. La consociazione avena nuda-veccia comune, differentemente, ha evidenziato una maggiore competitività del cereale in consociazione rispetto alla leguminosa. Si ritiene utile, quindi, ottimizzare le densità relative di semina delle due specie mediante delle prove sperimentali successive per ottenere una migliore performance della veccia comune.

In conclusione, i risultati della presente tesi di laurea magistrale devono essere inseriti all'interno di una valutazione globale del triennio 2022-2024 di prove sperimentali per eseguire un confronto complessivo tra rotazioni basate su colture pure e rotazioni basate su colture consociate.

## BIBLIOGRAFIA

- Abbasi, M. R. & Spaskhah, A. R., 2022. Evaluation of saffron yield affected by intercropping with winter wheat, soil fertilizer and irrigation regimes in a semi-arid region. *International journal of plant production*.
- Abdel-Wahab, T. I., Abdel-Wahab, S. I. & Abdel-Wahab, E. I., 2019. Benefits on intercropping legumes with cereals. *Crimson publishers*.
- Abroulaye, S. et al., 2023. Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] and cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walpers] intercropping improves gran yield, fodder biomass, and nutritive value. *Frontiers in animal science*.
- Ae, N. et al., 1990. Phosphorus uptake by pigeonpea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent. *Science*.
- Ahmed, K. & Aziz, M., 2023. Effect of cotton and soybean intercropping on the production indicators of the two crops. *Fifth international conference for agricultural and environment sciences*.
- Alcon, F. et al., 2020. Valuing diversification benefits through intercropping in mediterranean agroecosystems: a choice experiment approach. *Ecological economics*.
- Ali, I. et al., 2024. The effect of monoculture and intercropping on photosynthesis performance correlated with growth of garlic and perennial ryegrass response to different heavy metals. *BMC Plant biology*.
- Ali, R. I. et al., 2012. Diversification of rice-based cropping systems to improve soil fertility, sustainable productivity and economics. *The journal of animal & plant sciences*.
- Allen, J. R. & Obura, R. K., 1983. Yield of corn, and soybean under different intercropping systems. *Agronomy journal*.
- Altieri, M. A., 1995. Biodiversity and biocontrol: lessons from insect pest management. *Advances in plant pathology*.

- Altieri, M. A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, ecosystems and environment*.
- Altieri, M. A. & Liebman, M., 1986. Insect, weed and plant disease. Management in multiple cropping systems. In: C. A. Francis, a cura di *Multiple cropping systems*. New York: s.n.
- Amador, M. F. & Gliessman, S. R., 1990. An ecological approach to reducing external inputs through the use of intercropping. *Agroecology - researching the ecological basis for sustainable agriculture*.
- Angon, P. et al., 2023. An overview of the impact of tillage and cropping systems on soil health in agricultural practices. *Advances in agriculture*.
- Anil, L., Park, J., Phipps, R. H. & Miller, F. A., 1998. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass and forage science*.
- Annichiarico, P. et al., 2017. Performance of legume-based annual forage crops in three semi-arid mediterranean environments. *BioOne research evolved*.
- Arenas-Salazar, A. P. et al., 2024. Intercropping systems to modify bioactive compounds and nutrient profiles in plants: do we have enough information to take this as a strategy to improve food quality? A review. *Plants*.
- Arif, M., Kumar, A. & Pourouchottamane, R., 2024. Intercropping of maize and cowpea for enhancing productivity, profitability and land use efficiency. *Bangladesh journals online*.
- Arthy, J. R., Akiew, S. E., Kirkegaard, J. A. & Trevoeow, P. R., 2002. Using Brassica spp. ad biofumifants to reduce the population of Ralstonia solanacearum. *3rd international bacteria wilt symposium*.
- Ashoori, N. et al., 2021. Forage potential of sorghum-clover intercropping systems in semi-arid conditions. *Crop production and management*.
- Assefa, E. & Bitew, Y., 2023. Enhancing the land use efficiency of low-land rice (*Oryza sativa* L.)-grass pea (*Lathyrus sativus* L.) additive series relay intercropping in North-Western Ethiopia: a farmer's indigenous knowledge. *Plos one*.
- Attallah, A. et al., 2024. Impact of cereal-legume intercropping on changes in soil nutrients contents under semi-arid conditions. *Sustainability*.
- Atumo, T. T., 2022. Maize-lablab intercropping date improves yield and suppress pathenium weed. *Cogent food & agriculture*.

- Baisi, F., Galligani, P. L. & Pergola, V., 2004. *Corso di agronomia ed elementi di meccanizzazione agraria*. s.l.:Edagricole scolastico.
- Baker, E. F. I. & Norman, D. W., 1975. In: *Cropping systems in Northern Nigeria*. Los Banos: International rice reasearch institute.
- Baldoni, R. & Giardini, L. a cura di, 2001. *Coltivazioni erbacee: cereali e proteaginose*. Bologna: Pàtron editore.
- Baldoni, R. & Giardini, L. a cura di, 2002. *Coltivazioni erbacee: foraggiere e tappeti erbosi*. Bologna: Pàtron editore.
- Bangarwa, S. K. & Norsworthy, J. K., 2016. Glucosinolate and isothiocyanate production for weed control in plasticulture production system. *Glucosinolates, reference series in phytochemistry*.
- Banik, P., 1996. Evaluation of wheat (*Triticum aestivum*) and legume intercropping under 1:1 and 2:1 row-replacement series system. *Journal of agronomy and crop science*.
- Banik, P., Midya, A., Sarkar, B. K. & Ghose, S. S., 2004. wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: advantages and weed smothering. *European journal of agronomy*.
- Bano, A. et al., 2018. Biosorption of heavy metals by obligate halophilic fungi. *Chemosphere*.
- Baraki, F., Gabregergis, Z., Teame, G. & Belay, Y., 2023. Augmenting productivity and profitability through sesame-legume intercropping. *Heliyon*.
- Barber, S. A., 1995. In: *Soil nutrient bioavability - a mechanistic approach*. s.l.:John Wiley & sons, Inc..
- Bargaz, A. et al., 2021. Faba bean variety mixture can modulate faba bean-wheat intercrop performance under water limitation. *Frontiers in agronomy*.
- Barsilia, S. R., Acharya, S. & Acharya, P., 2024. Herbage mass productivity, composition, and biological compatibility of oat and vetch mixture at different seed rate proportions in abandoned lands. *International journal of agronomy*.
- Baxevanos, D. et al., 2020. Oat genotypic requirement for intercropping with vetch under mediterranean conditios. *The journal of agricultural science*.

- Bedoussac, L. et al., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for sustainable development*.
- Bedoussac, L. & Justes, E., 2010. Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat - winter pea intercrop. *Plant soil*.
- Ben Hassen, T. & El Bilali, H., 2022. Impacts of the Russia-Ukraine war on global food security: towards more sustainable and resilient food systems?. *Foods*.
- Benmrid, B. et al., 2024. Species interactions and bacterial inoculation enhance plant growth and shape rhizosphere bacterial community structure in faba bean-wheat intercropping in under water and P limitations. *Environmental and experimental botany*.
- Bertin, C., Xiaohan, Y. & Weston, L. A., 2003. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. *Plant and soil*.
- Bian, F. et al., 2023. Enhancement of phytoremediation of heavy metal pollution using an intercropping system in Moso bamboo forests: characteristics of soil organic matter and bacterial communities. *Forests*.
- Bian, F. et al., 2017. Comparison of heavy metal phytoremediation in monoculture and intercropping systems of *Phyllostachys praecox* and *Sedum plumbizincicola* in pollute soil. *International journal of phytoremediation*.
- Bisht, J. K., Meena, V. S., Mishra, P. K. & Pattanayak, A., 2016. Conservation agriculture: an approach to combat climate change in Indian Himalaya. *Springer science*.
- Boschetti, N. G., Quintero, C. E. & Giuffrè, L., 2009. Phosphorus fractions of soil under *Lotus corniculatus* as affected by different phosphorus fertilizers. *Biology and fertility of soils*.
- Boutagayout, A. et al., 2024. Weed competition, land equivalent ratio and yield potential of faba bean (*Vicia faba* L.)-cereals (*Triticum aestivum* L. and/or *Avena sativa* L.) intercropping under low-input conditions in Meknes region, Morocco. *Vegetos*.
- Bressan, M., Achouak, W. & Berge, O., 2013. Exogenous glucosinolate produced by transgenic *Arabidopsis thaliana* has an impact on microbes in the rhizosphere and plant roots. *Molecular microbial ecology of the rhizosphere*.
- Brooker, R. W. et al., 2014. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*.

- Brooker, R. W. et al., 2023. Plant diversity and ecological intensification in crop production systems. *Journal of plant ecology*.
- Cai, H., You, M. & Lin, C., 2010. Effects of intercropping systems on community composition and diversity of predatory arthropods in vegetable fields. *Acta ecologica sinica*.
- Cen, Z. et al., 2023. Nitrogen fertilization in a faba bean-wheat intercropping system can alleviate the autotoxic effects in faba bean. *Plants*.
- Chen, N. et al., 2023. Quantifying interspecies competition for water in tomato-corn intercropping system using an improving evapotranspiration model considering radiation interception by neighboring plants in two-dimensional profile. *Scientia horticulturae*.
- Chen, N. et al., 2022. Quantifying inter-species nitrogen competition in the tomato-corn intercropping system with different spatial arrangements. *Agricultural systems*.
- Che, T. et al., 2024. Common vetch intercropping with reduced irrigation ensures potato production by optimizing microbial interaction. *Field crops research*.
- Chiariello, N., Hickman, J. C. & Mooney, H. A., 1982. Endomycorrhizal role for interspecific transfer of phosphorus in a community of annual plants. *Science*.
- Chi, B. et al., 2023. Alternate intercropping of cotton and peanut increases productivity by increasing canopy photosynthesis and nutrient uptake under the influence of rhizobacteria. *Field crops research*.
- Chi, B. et al., 2019. Wide-strip intercropping of cotton and peanut combined with strip rotation increases crop productivity and economic returns. *Field crops research*.
- Chowing, J. W. & Ingram, J., 1991. In: *Herbage legume intercropping for organic vegetable growing*. Cambridge: National institute of agriculture botany.
- Clawson, D. L., 1985. Harvest security and intraspecific diversity in traditional tropical agriculture. *Economic botany*.
- Cong, J. et al., 2015. Analyses of soil microbial community compositions and functional genes reveal potential consequences of natural forest succession. *Scientific reports*.
- Cook-Patton, S. C. et al., 2011. A direct comparison of the consequences of plant genotypic and species diversity on communities and ecosystem function. *Ecology*.

- Couedel, A., Alletto, L. & Justes, E., 2023. The acquisition of macro- and micronutrients is synergic in species mixtures: example of mixed crucifer-legume cover crops. *Frontiers in agronomy*.
- Couedel, A., Alletto, L., Kirkegaard, J. & Justes, E., 2018. Crucifer glucosinolate production in legume-crucifer cover crop mixtures. *European journal of agronomy*.
- Cubero, J. I., 1974. *On the evolution of Vicia faba L. Teoretical and applied genetics*. s.l.:s.n.
- Dane, S., Laugale, V., Lepse, L. & Sterne, D., 2016. Possibility of strawberry cultivation in intercropping with legume: a review. *Acta horticulturae*.
- Dapaah, H. K., Asafu-Agyei, J. N., Ennin, S. A. & Yamoah, C., 2003. Yield stability of cassava, maize, soybean and cowpea intercrops. *Journal of agricultural science*.
- de Vries, F. et al., 2020. Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production. *Drought*.
- Delgado, C. et al., 1999. Livestock to 2020: the next food revolution. *IFPRI*.
- Denevan, W. M., 1995. Prehistoric agricultural methods as models for sustainability. *Advances in plant pathology*.
- Deng, H. et al., 2024. Rational maize-soybean strip intercropping planting system improves interspecific relationship and increases crop yield and income in the China Hexi oasis irrigation area. *Agronomy*.
- Deressa, D. A., 2021. Comparative study on profitability of sorghum-legumes intercropping systems in Ethiopia. *Research on world agricultural economy*.
- Dhima, K. V. et al., 2014. Forage yield and competition indices of faba bean intercropped with oat. *Grass and forage science*.
- Dordas, C. A. & Lithourgidis, A. S., 2011. Growth, yield and nitrogen performance of faba bean intercrops with oat and triticale at varying seeding ratios. *Grass and forage science*.
- Duan, Y. et al., 2023. The effect of intercropping leguminous green manure on theanine accumulation in the thea plant: a metagenomic analysis. *Plant, cell & environment*.
- Dvzene, A. R., Tesfahuney, W., Walker, S. & Ceronio, G., 2022. Effects of intercropping sunn hemp into maize at different times and densities on productivity under rainwater harvesting technique. *Frontiers in sustainable food systems*.

- Esnarriaga, D. N., Mariotti, M., Cardelli, R. & Arduini, I., 2020. The importance of root interactions in field bean/triticale intercrops. *Plants*.
- Fan, Z. et al., 2016. Effects of intercropping of maize and potato in sloping land on the water balance and surface runoff. *Agricultural water management*.
- FAO, 2010. *The state of food insecurity in the world. Addressing food insecurity in protracted crises*, s.l.: s.n.
- FAO, 2020. *COVID-19 and the role of local food production in building more resilient local food systems*, s.l.: s.n.
- Fargione, J. E. et al., 2018. Natural climate solutions for the United States. *Science advances*.
- Fathi, S. A. A., 2023. Eggplant-garlic intercrops reduce the density of *Tetranychus urticae* on eggplant and improve crop yield. *Experimental and applied acarology*.
- Feng, C. et al., 2021. Maize/peanut intercropping increases land productivity: a meta-analysis. *Field crops research*.
- Fisher, N. M., 1976. *A limited objective approach to the design of agronomic experiments with mixed crop*. Salaam, Ker A. D. R. and Campbell M..
- Fotohi-Chiyaneh, S. et al., 2023. Intercropping medicinal plants is a new idea for forage production: a case study with ajowan and fenugreek. *Food and energy security*.
- Fourie, H., Ahuja, P., Lammes, J. & Daneel, M., 2016. Brassicacea-based management strategies as an alternative to combat nematode pests: a synopsis. *Crop production*.
- Francis, C. A., 1986. *Multiple cropping systems*. New York, Macmillan.
- Francis, C. A., 1989. Biological efficiencies in multiple-cropping systems. *Advances in agronomy*.
- Francis, C. A., Flor, C. A. & Temple, S. R., 1976. Adapting varieties for intercropping systems in the tropics. *Multiple cropping*.
- Gao, Y. et al., 2010. Distribution and use efficiency of photosynthetically active radiation in strip intercropping of maize and bean. *Agronomy journal*.
- Gao, Y. et al., 2024. Medicago polymorpha and M. sativa-camelina intercropping increases land use efficiency and productivity, and economic benefits in Eastern China. *European journal of agronomy*.

- Gardarin, A. et al., 2022. Intercropping with service crops provides multiple services in temperate arable system: a review. *Agronomy for Sustainable Development*.
- Ghanbari, A., Dahmardeh, M., Slahsar, B. & Ramroudi, M., 2009. Intercropping maize (*Zea mays* L.) and cow pea (*Vigna unguiculata* L.) as a whole-crop forage: effects of planting ratio and harvesting time on forage yield and quality. *Journal of food, agriculture & environment*.
- Giardini, L., 2003. In: *A come AGRONOMIA*. Quarto Inferiore (BO): Pàtron Editore, p. 281.
- Giardini, L., 2004. In: *Agronomia generale, ambientale e aziendale*. Quarto Inferiore (BO): Pàtron Editore.
- Gilliland, T. J. & Johnston, J., 1992. Barley/pea mixtures as cover crops for grass re-seeds. *Grass and forage science*.
- Gimsing, A. L. & Kirkegaard, J. A., 2009. Glucosinolate and biofumigation: fate of glucosinolates and their hydrolysis products in soil. *Phytochemistry reviews*.
- Goncavales, R., Wieger Wamelink, G. W., van der Putten, P. & Evers, J. B., 2024. Intercropping on Mars: a promising system to optimise fresh food production in future martian colonies. *Plos One*.
- Gong, B. et al., 2024. Intercropping with aromatic plants enhances natural enemy communities facilitating pest suppression in tea plantations. *Arthropod-plant interaction*.
- Gong, X. et al., 2020. Interspecific root interactions and water-use efficiency of intercropped proso millet and mung bean. *European journal of agronomy*.
- Gosh, P. V., 2004. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in semi-arid tropics of India. *Field crop research*.
- Habtamu, M., Elias, E., Argaw, M. & Feleke, G., 2024. Intercropping wheat (*Triticum aestivum*) with faba bean (*Vicia faba*) combined with vermicompost and NPS fertilizer application increases crop yield and agronomic efficiency in the humid mid-highland of Ethiopia. *Cogent food & agriculture*.
- Haider, F. U. et al., 2021. Cadmium toxicity in plants: impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and environmental safety*.
- Haugaard-Nielsen, H., Ambus, P. & Jensen, E. S., 2001. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field crops research*.

- Hayners, R. J., 1990. Competitive aspects of the grass-legume association. *Advances in agronomy*.
- Herridge, D. F. et al., 1995. Chickpea increases soil-N fertility in cereal systems through nitrate sparing and N<sub>2</sub> fixation. *Soil biology and biochemistry*.
- He, X. et al., 2021. Biochar and intercropping with potato-onion enhanced the growth and yield advantages of tomato by regulating the soil properties, nutrient uptake, and soil microbial community. *Frontiers in microbiology*.
- Hiebsch, C. K. & McCollum, R. E., 1987. Area-X-Time equivalent ratio: a method for evaluating the productivity of intercrops. *Agronomy journal*.
- Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and soil*.
- Hook, J. E. & Gascho, G. J., 1988. Multiple cropping for efficient use of water and nitrogen. *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*.
- Huang, J. et al., 2023. Combined forage grass-microbial for remediation of strontium-contaminated soil. *Journal of hazardous materials*.
- Hu, B. et al., 2023. Proteomic analysis of the faba bean-wheat intercropping system in controlling the occurrence of faba bean fusarium wilt due to stress caused by *Fusarium oxysporum* f.sp. *fabae* and benzoic acid. *BMC plant biology*.
- Hu, B. et al., 2024. Intercropping wheat and appropriate nitrogen supply can alleviate faba bean disease by reshaping soil microbial community structure. *Industrial crops & products*.
- Hufnagel, J., Reckling, M. & Ewert, F., 2020. Diverse approaches to crop diversification in agricultural research. A review. *Agronomy for sustainable development*.
- Hulugalle, N. R. & Lal, R., 1986. Soil water balance of intercropped maize and cowpea grown in a tropical hydromorphic soil in Western Nigeria. *Agronomy journal*.
- Hunegnaw, Y., Alemayehu, G., Ayalew, D. & Kassaye, M., 2022. Plant density and time of white lupine (*Lupinus albus* L.) relay cropping with tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter] in additive design in the highlands of Northwest Ethiopia. *International journal of agronomy*.
- IAEA, 1980. *Proceeding advisory group meeting on nuclear techniques in development of fertilizer and water management for multiple cropping systems*. Ankara, FAO/IAEA.

- IPCC, 2007. *Climate change 2007: impact, adaption and vulnerability. Working group II contribution to the intergovernmental panel on climate change. Fourth assessment report.* s.l., s.n.
- Jat, S. L., Shivay, Y. S., Parihar, C. M. & Meena, H. N., 2012. Evaluation of summer legumes for their economic feasibility, nutrient accumulation and soil fertility. *Journal of food legumes.*
- Jaya, I. K. D., Santoso, B. B. & Jayaputra, 2024. Intercropping red chili with leguminous crops to improve crop diversity and farmer's resilience to climate change effects in dryland. *Earth and environmental science.*
- Jedel, P. E. & Helm, J. H., 1992. Forage potential of pulse-cereal mixtures in central Alberta. *Alberta agriculture crop research.*
- Jensen, E. S., 1996. Grain yield, symbiotic N<sub>2</sub> fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and soil.*
- Jeybal, A. & Kuppaswamy, G., 2001. Recycling of organic wastes for the production of vermicompost and its response in rice-legume cropping system and soil fertility. *European journal of agronomy.*
- Jiao, Y., Zhang, Q. & Miao, F., 2024. Forage yield, competition, and economic indices of oat and common vetch intercrops in a semi-arid region. *Frontiers in sustainable food systems.*
- Jing, L. et al., 2020. Usage of microbial combination degradation technology for the remediation of uranium contaminated ryegrass. *Environment international.*
- Just, A. M. & Gnida, A., 2015. Mechanisms of stress avoidance and tolerance by plants used in phytoremediation of heavy metals. *Archives of environmental protection.*
- Kassam, A. et al., 2016. Conservation agriculture and its contribution to the achievement of agri-environmental and economic challenges in Europe. *Agriculture and food.*
- Keatinge, J. D. et al., 1995. The role of rhizobial biodiversity in legume crop productivity in the West Asian highlands. *Experimental agriculture.*
- Khan, I. et al., 2021. Enhancing antioxidant defense system of mung bean with a salicylic acid exogenous application to mitigate cadmium toxicity. *Notulae botanicae horti agrobotanici.*
- Khoury, C. K. et al., 2014. Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security. *Proceedings of the national academy of sciences.*

- Kontturi, M. et al., 2011. Pea-oat intercrops to sustain lodging resistance and yield formation in Northern Europe conditions. *Soil and plant science*.
- Lahlali, R. et al., 2021. High-throughput molecular technologies for unraveling the mystery of soil microbial community: challenges and future prospects. *Heliyon*.
- Layek, J. et al., 2014. Improving productivity of jhum rice through agronomic management practices. *Book of abstracts. National seminar on shifting cultivation (jhum) in 21st century: fitness and improvement*.
- Layek, J. et al., 2018. Cereal + legume intercropping: an option for improving productivity and sustaining soil health. *Springer nature Singapore Pte Ltd.*
- Lemaire, G., Franzluebbers, A., de Faccio Carvalho, P. C. & Dedieu, B., 2014. Integrated crop livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, ecosystems and environment*.
- Lesk, C., Rowhani, P. & Ramankutty, N., 2016. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*.
- Liao, D., Zhang, C., Lambers, H. & Zhang, F., 2022. Adding intercropped maize and faba bean root residues increases phosphorus bioavailability in a calcareous soil due to organic phosphorus mineralization. *Plant soil*.
- Liao, Z. et al., 2024. Influence of Chrysanthemum morifolium-maize intercropping pattern on yield, quality, soil condition, and rhizosphere soil microbial communities of C. morifolium. *Frontiers in plant science*.
- Lichtfouse, E. et al., 2009. Agronomy for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*.
- Li, H. et al., 2010. Phosphorus uptake and rhizosphere properties of intercropped and monocropped maize, faba bean, and white lupin in acidic soil. *Biology and fertility of soils*.
- Lithourgidis, A. S. et al., 2006. Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field crops research*.
- Lithourgidis, A. S., Vlachostergios, D. N., Dordas, C. A. & Damalas, C. A., 2011. Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems. *European journal of Agronomy*.
- Litsinger, J. A. & Moody, K., 1976. Integrated pest management in multiple cropping systems. *Multiple cropping*.

- Li, Y. et al., 2020. Wheat/faba bean intercropping improves physiological and structural resistance of faba bean to fusaric acid stress. *Plant pathology*.
- Lopez-Bellido, R. J., Munoz-Romero, V., Fernandez-Garcia, P. & Lopez-Bellido, L., 2024. Response of wheat and faba bean to intercropping and tillage system on a mediterranean rainfed vertisol. *Agricultural research*.
- Lozano Menez, C. S. et al., 2024. Determination of water demand and crop coefficient in intercropping system of lattuce and radish. *Horticultural journal*.
- Luo, C., Xiao, J., Guo, Z. & Dong, Y., 2023. The severity and yield effects of the chocolate spot disease in faba bean affected by intercropping and nitrogen input. *Journal of the science of food and agriculture*.
- Lv, Q. et al., 2024. Managing interspecific competition to enhance productivity through selection of soybean varieties and sowing in a cotton-soybean intercropping system. *Field crops research*.
- Lynam, J. K., Sanders, J. H. & Mason, S. C., 1986. Economics and risk in multiple cropping. *Multiple cropping systems*.
- Ma, H. et al., 2022. Miaze/alfalfa intercropping enhances yield and phosphorus acquisition. *Field crops research*.
- Maitra, S., Bharati Palai, J., Manasa, P. & Prasanna Kumar, D., 2019. Potential of intercropping system in sustaining crop productivity. *International journal of agriculture, environment and biotechnology*.
- Maitra, S. et al., 2021. Intercropping - A low input agricultural strategy for food and environmental security. *Agronomy*.
- Ma, J. et al., 2022. Response of cauliflower (*Brassica oleracea* L.) to nitric oxide application under cadmium stress. *Ecotoxicology and environmental safety*.
- Marcos-Perez, M. et al., 2023. Intercropping organic melon and cowpea combined with return of crop residues increases yield and soil fertility. *Agronomy for sustainable development*.
- Marcos-Perez, M., Sanchez-Navarro, V. & Zornoza, R., 2023. Soil greenhouse gas emissions in intercropped systems between melon and cowpea. *Spanish journal of soil science*.
- Martiny, J. B. H. et al., 2017. Microbial legacies alter decomposition in response to simulated global change. *The ISME journal*.

- Mason, W. K. & Pritchard, K. E., 1987. Intercropping in a temperate environment for irrigated fodder production. *Field crops research*.
- Mbanyele, V., Enesi, R. O., Shaw, L. & Gorim, L. Y., 2024. A review of intercropping systems in Western Canada. *Agronomy journal*.
- Mead, R. & Willey, R. W., 1980. The concept of a 'Land Equivalent Ratio' and advantages in yield from intercropping. *Experimental agriculture*.
- Meena, H. et al., 2018. Response of sowing dates and bio regulators on yield of clusterbean under climate in alley cropping system in Eastern V. P., India. *Legume research*.
- Meena, R. S. et al., 2015. Towards the current need to enhance legume productivity and soil sustainability worldwide: a book review. *Journal of cleaner production*.
- Mengistu, M. et al., 2010. Grain yield performance and stability of cultivar blends vs. component cultivars oh hard winter wheat in Nebraska. *Crop science*.
- Michalitsis, A. et al., 2024. Effect of cultivar on faba bean-wheat intercrop productivity under a medirettanean environment. *Agronomy*.
- Misra, P. et al., 2019. Vulnerability of soil microbiome to monocropping of medicinal and aromatic plants and its restoration through intercropping organic amendants. *Frontiers in microbiology*.
- Mohammadkhani, F., Pouryousef, M. & Yousefi, A. R., 2023. Growth and production response in saffron-chickpea intercropping under different irrigation regimes. *Industrial crops & products*.
- Mohammadzadeh, V. et al., 2022. Effect of intercropping and bio-fertilizer application on the nutrient uptake and productivity of mung bean and marjoram. *Land*.
- Montejano-Ramírez, V. & Velencia-Cantero, E., 2024. The importance of lentils: an overview. *Agriculture*.
- Monti, M. et al., 2019. Cereal/grain legume intercropping in rotation with durum wheat in crop/livestock production systems for Mediterranean farming system. *Field crops research*, pp. 23-33.
- Morkeliune, A. et al., 2024. Effect of ehite cabbage intercropping with aromatic plant on yield, mineral and biochemical composition. *Plants*.

- Morris, R. A. & Garrity, D. P., 1993. Resource capture and utilization in intercropping: non-nitrogen nutrients. *Field crops research*.
- Morugan-Coronado, A. et al., 2020. The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: a meta-analysis on field studies. *Agricultural system*.
- Motisi, N. et al., 2009. Duration of control of two soilborne pathogens following incorporation of above- and below-ground residues of *Brassica juncea* into soil. *Plant pathology*.
- Mourandi, M. et al., 2018. Effect of faba bean (*Vicia faba* L.)-rhizobia symbiosis on barley's growth, phosphorus uptake and acid phosphatase activity in the intercropping system. *Annals of agrarian science*.
- Mousavi, S. R. & Eskandari, H., 2011. A general overview on intercropping and its advantages in sustainable agriculture. *Journal of applied environmental and biological sciences*.
- Mugabe, N. R. & Sinje, M. E., 1982. A study of crop weed competition in intercropping. In: C. L. Keswani & B. J. Ndunguru, a cura di *Intercropping in semi-arid areas*. s.l.:National scientific research council and international development research centre.
- Muoangwa, W. et al., 2021. Maize yields from rotation and intercropping systems with different legumes under conservation agriculture in contrasting agro-ecologies. *Agriculture, Ecosystem and environment*.
- Naderi, R. et al., 2023. Effects of summer savory (*Satureja hortensis* L.) and sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata*) intercropping on crop production and essential oil profiles of summer savory. *PeerJ*.
- Namatsheve, T., Cardinael, R., Corbeels, M. & Chikowo, R., 2020. Productivity and biological N<sub>2</sub>-fixation in cereal-cowpea intercropping systems in sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for sustainable development*.
- Natarajan, M. & Willey, R. W., 1980. Sorghum-pigeonpea intercropping and the effects of plant population density. *Journal of agricultural science*.
- Nemecek, T. et al., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European journal of agronomy*.
- Neumann, G. & Romheld, V., 1999. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plant. *Plant and soil*.

- Neyestan, H., Abbasdokht, H. & Ghouлами, A., 2024. Assessing light and quality indicators of fodder at different levels of nitrogen fertilizer based on additive intercropping of barley (*Hordeum vulgare*) and vetch (*Vicia ervilia*) under dryland farming. *Emirates journal of food and agriculture*.
- Njira, K. O. W., Semu, E., Mrema, J. P. & Nalivata, P. C., 2021. Productivity of pigeon pea, cowpea and maize under sole cropping legume-legume and legume-cereal intercrops on Alfisols in Central Malawi. *Agroforest Systems*.
- Nourbakhsh, F., Koocheki, A. & Mahallati, M. N., 2019. Investigation of biodiversity and some of the ecosystem services in the intercropping of corn, soybean and marshmallow. *International journal of plant production*.
- Ofori, F. & Stern, W. R., 1987. Cereal-legume intercropping systems. *Advances in agronomy*.
- Oohlmann, V. et al., 2024. Corn and bean growth and production in agroforestry systems. *Agroforestry systems*.
- Ouda, S. & El-Hafeez, A., 2023. Increasing sustainability by intercropping legume crops with sugar beet under imposed water stress. *Irrigation and drainage*.
- Pagani, E. et al., 2024. Camelina intercropping with pulses a sustainable approach for land competition between food and no-food crops. *Agronomy*.
- Pankou, C., Lithourgidis, A. & Dordas, C., 2021. Effect of irrigation on intercropping systems of wheat (*Triticum aestivum* L.) with pea (*Pisum sativum* L.). *Agronomy*.
- Papastylianou, I., 1990. Response of pure stands and mixtures of cereals and legumes to nitrogen fertilization and residual effect on subsequent barley. *Journal of agricultural science*.
- Paris, L. et al., 2012. Dynamic of yield and nutritional value for winter forage intercropping. *Acta scientiarum*.
- Parwada, C. & Chinyama, T. A., 2021. Land equivalent ratio of cowpea-sorghum relay intercrop as affected by different cattle manure application rates under smallholder farming system. *Frontiers in sustainable food systems*.
- Peixoto Chaves, A. et al., 2022. Bio-agroeconomic returns in beet-cowpea intercropping by optimization of population densities and spatial arrangements. *Acta scientiarum*.

- Peng, Y. et al., 2024. Soil microbial composition, diversity, and network stability in intercropping versus monoculture responded differently to drought. *Agriculture, ecosystem and environment*.
- Porter, I. J., Brett, R. W. & Wiseman, B., 1999. Alternatives to methyl bromide: chemical fumigants or integrates pests management system?. *Australasian plant pathology*.
- Qian, X. et al., 2022. Yield advantage and carbon footprint of oat/sunflower relay strip intercropping depending on nitrogen fertilization. *Plant soil*.
- Qi, X. et al., 2022. Biochar-based microbial agent reduces U and Cd accumulation in vegetables rhizosphere microecology. *Journal of hazardous materials*.
- Qoreishi, E. et al., 2023. Lemon balm and kidney bean intercropping: the potential for incorporating AMF for sustainable agricultural production. *International journal of environmental science and technology*.
- Qu, J. et al., 2022. Influence of different proportion intercropping on oat and common vetch yields and nutritional composition at different growth stages. *Agronomy*.
- Qu, J. et al., 2023. Effects of intercropping oat and common vetch on plant biomass yield and soil nitrogen and phosphorus availability in different soil characteristics. *Journal of soil science and plant nutrition*.
- Raghothama, K. G., 1999. Phosphate acquisition. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*.
- Rahman, M. et al., 2024. The prospects of intercropping of brinjal (*Solanum melongena* L.) with other vegetables on sorjan system in vulnerable southern coastal saline and non-saline areas of Bangladesh. *Journal of agriculture and food research*.
- Ram, K. & Meena, R. S., 2014. Evaluation of pearl millet and mung bean intercropping systems in arid region of Rajasthan (India). *Bangladesh journal of botany*.
- Raza, M. A. et al., 2024. Sugarcane/soybean intercropping enhances crop productivity, nutrient uptake, and net economic return with reduced inputs. *Field crops research*.
- Reddy, M. S. & Willey, R. W., 1981. Growth and resource use studies in an intercrop of pearl millet/groundnut. *Field crops research*.
- Rehman, M. et al., 2023. Intercropping of kenaf and soybean affects plant growth, antioxidant capacity, and uptake of cadmium and lead in contaminated mining soil. *Environmental science and pollution research*.

- Reiss, E. R. & Drinkwater, L. E., 2018. Cultivar mixtures: a meta-analysis of the effect of intraspecific diversity on crop yield. *Ecological applications*.
- Rezaei-Chiyaneh, E. et al., 2021. Optimizing intercropping systems of black cumin (*Nigella sativa* L.) and fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) through inoculation with bacteria and mycorrhizal fungi. *Advances sustainable systems*.
- Richardson, A. E., Hadobas, P. A. & Hayes, J. E., 2000. Acid phosphomonoesterase and phytase activities of wheat (*Triticum aestivum* L.) roots and utilization of organic phosphorus substrates by seedlings grown in sterile culture. *Plant, cell and environment*.
- Rinke, N., Kautz, T., Aulrich, K. & Bohm, H., 2022. The effect of long- and short-stemmed oat in vetch-oat intercropping on weed infestation, agronomic performance, and grain quality in low input systems. *European journal of agronomy*.
- Ro, S., Roern, S., Sroy, C. & Prasad, P. V. V., 2023. Agronomic and yield performance of maize-mungbean intercropping with different mungbean seed rates under loamy sand soils of Cambodia. *Agronomy*.
- Rschartks, T. et al., 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - ecosystem service management. *Ecology Letters*.
- Sadafzadeh, E., Javanmard, A., Amani Machiani, M. & Sofo, A., 2023. Application of bio-fertilizers improves forage quantity and quality of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) intercropped with soybean (*Glycine max* L.). *Plants*.
- Salem, H. M., Abdel-Salam, A., Abdel-Salam, M. & Seleiman, M. F., 2018. Phytoremediation of metal and metalloids from contaminated soil. In: *Plants under metal and metalloid stress: responses, tolerance and remediation*. s.l.:s.n.
- Sanchez-Velazquez, O. A. et al., 2023. Nutritional, bioactive components and health properties of the milpa triad system seeds (corn, common bean and pumpkin). *Frontiers in nutrition*.
- Sangsuwan, P. & Prapagdee, B., 2021. Cadmium phytoremediation performance of two species of Chlorophytum and enhancing their potentials by cadmium-resistant bacteria. *Environmental technology & innovation*.
- Scherr, S. J. & McNeely, J., 2008. Biodiversity conservation and agricultural sustainability: towards a new paradigm of 'ecoagriculture' landscape. *Philosophical transactions of the royal society*.

- Searle, P. G. E., Comodom, Y., Shedden, D. C. & Nance, R. A., 1981. Effect of maize+legume intercropping systems and fertilizer nitrogen on crop yield and residual nitrogen. *Field crops research*.
- Seran, T. & Brintha, I., 2010. Review on maize based intercropping. *Journal of agronomy*.
- Shtaya, M. J. Y. et al., 2021. Effects of crop mixture on rust development on faba bean grown in Mediterranean climates. *Crop protection*.
- Shukla, S. K. et al., 2022. Diversification options in sugarcane-based cropping systems for doubling farmers' income in subtropical India. *Sugar tech*.
- Siddoway, F. H. & Barnett, A. P., 1976. Water and wind erosion control aspects of multiple cropping. *Multiple cropping*.
- Singh, K. P., Prakash, V., Srinivas, K. & Srivastva, A. K., 2008. Effect of tillage management on energy-use efficiency and economics of soybean (*Glycine max*) based cropping systems under the rainfed conditions in North-West Himalayan Regions. *Soil & tillage research*.
- Snapp, S. S. et al., 2018. Maize yield and profitability tradeoffs with social, human and environmental performance: is sustainable intensification feasible?. *Agricultural systems*.
- Sohaili, S. et al., 2021. Influence of tillage systems and cereal-legume mixture on fodder yield, quality and net returns under rainfed conditions. *Sustainability*.
- Soulé, M. et al., 2024. Effect of crop management and climatic factors on weed control in sugarcane intercropping systems. *Field crops research*.
- Su, K. et al., 2024. Intercropped alfalfa and spring wheat reduce soil alkali-salinity in the arid area of Northwestern China. *Plant soil*.
- Suong, T. T., Hutson, J. & Schuller, K. A., 2005. Mixed culture of wheat (*Triticum aestivum* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) improves the growth and phosphorus nutrition of wheat. *Plant and soil*.
- Su, X. et al., 2024. Tobacco/*Salvia miltorrhiza* intercropping improves soil quality and increases total production value. *Agronomy*.
- Tang, Y. et al., 2024. Research on intercropping from 1995 to 2021: a worldwide bibliographic review. *Plant and soil*.
- Ta, T. C., Faris, M. A. & MacDowall, F. D. H., 1989. Evaluation of <sup>15</sup>N methods to measure nitrogen transfer from alfalfa to companion Timothy. *Plant and soil*.

- Temeche, D., Getachew, E., Hailu, G. & Abebe, A., 2022. Effect of Sorghum-mung bean intercropping on Sorghum-based cropping system in the lowland of North Shena, Ethiopia. *Advances in agriculture*.
- Tramacere, L. G. et al., 2024. Effects of intercropping on the herbage production of a binary grass-legume mixture (*Hedysarum coronarium* L. and *Lolium multiflorum* Lam.) under artificial shade in mediterranean rainfed conditions. *Agroforestry systems*.
- Tsubo, M., Walker, S. & Ogindo, M. O., 2005. A simulation model of cereal - legume intercropping systems for semi-arid regions: I. model development. *Field crops research*.
- Ullah, Z. et al., 2015. Winter forage quality of oats (*Avena sativa*), barley (*Hordeum vulgare*) and vetch (*Vicia sativa*) in pure stand and cereal legume mixture. *Pakistan journal of agricultural research*.
- Upadhyay, K. P. et al., 2010. Performance and profitability of baby corn and tomato intercropping. *Pakistan journal of agriculture sciences*.
- van Dam, N., Tytgat, T. O. G. & Kirkegaard, J. A., 2009. Root and shoot glucanin: a comparison of their diversity, function and interactions in natural and managed ecosystems. *Phytochemical analysis*.
- 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*.
- van der Molen, M. K. et al., 2011. Drought and ecosystem carbon cycling. *Agricultural and forest meteorology*.
- Vandermeer, J., 1989. *The ecology of intercropping*. Cambridge: Cambridge university press.
- Villegas-Fernandez, A. M., Amarna, A. A., Moral, J. & Rubiales, D., 2024. Intercropping as a strategy for weed management in faba bean (*Vicia faba* L.). *Agronomy*.
- Vukicevich, E. et al., 2016. Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*.
- Wahbi, S. et al., 2016. Impact of wheat/faba bean mixed cropping or rotation systems on soil microbial functionalities. *Frontiers in plant science*.
- Wang, M. et al., 2024. Effects of intercropping and regulated deficit irrigation on the yield, water and land resource utilization, and economic benefits of forage maize in arid region of Northwest China. *Agricultural water management*.

- Wang, S. et al., 2021. Sowing ratio determines forage yields and economic benefits of oat and common vetch intercropping. *Agronomy journal*.
- Wang, Y. et al., 2024. Grain yield and interspecific competition in an oat-common vetch intercropping system at varying sowing density. *Frontiers in plant science*.
- Willey, R. W., 1979. Intercropping - its importance and research needs. Part I - competition and yield advantages. *Field crops abstracts*.
- Willey, R. W., 1979. Intercropping - its importance and research needs. Part II - agronomy and research approaches. *Field crops abstracts*.
- Willey, R. W. et al., 1983. Intercropping studies with annual crops. *Better crops for food*.
- Wolinska, A. et al., 2015. Bacterial abundance and dehydrogenase activity in selected agricultural soils from Lublin region. *Polish journal of environmental studies*.
- Wong, M. H. & Bradshaw, A. D., 1982. A comparison of the toxicity of heavy metals, using root elongation of ryegrass, *Lolium perenne*. *New phytologist*.
- Woolley, J. & Davis, J. H. C., 1991. The agronomy of intercropping with beans. *Common beans: research for crop improvement*.
- Xie, W. et al., 2022. Peanut and cotton intercropping increases productivity and economic returns through regulating plant nutrient accumulation and soil microbial communities. *BMC plant biology*.
- Yadav, G. S. et al., 2017. Energy budgeting for designing sustainable and environmentally clean/safer cropping systems for rainfed rice fallow lands in India. *Journal of cleaner production*.
- Yang, S. et al., 2023. Faba bean-wheat intercropping and appropriate nitrogen supply control fusarium wilt in faba bean via alternating specific amino acids in the root exudate of faba bean. *Physiological and molecular plant pathology*.
- Yusuf, A. A. et al., 2009. Rotation effects of grain legumes and fallow on maize yield, microbial biomass and chemical properties of an Alfisol in the Nigerian savanna. *Agriculture, ecosystems and environment*.
- Zegada-Lizarazu, W., Isumi, Y. & Iijima, M., 2006. Water competition of intercropped pearl millet with cowpea under drought and soil compaction stresses. *Plant production science*.

- Zhang, F. & Li, L., 2003. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant and soil*.
- Zhang, G., Yang, Z. & Dong, S., 2011. Interspecific competitiveness affects the total biomass yield in an alfalfa and corn intercropping system. *Field crops research*.
- Zhang, J. et al., 2024. Optimal N application improves interspecific relationship, productivity and N utilization in wheat/faba bean intercropping. *Journal of soil science and plant nutrition*.
- Zhang, W.-P. et al., 2021. Shifts from complementary to selection effects maintain high productivity in maize/legume intercropping systems. *Journal of applied ecology*.
- Zhang, Z., Yang, W. & Dong, Y., 2023. Faba bean-wheat intercropping reconstructed the microbial community structure in the rhizosphere soil of faba bean under F. commune and benzoic acid stress to alleviate fusarium wilt in faba bean. *Plant soil*.

## SITOGRAFIA

- <https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>  
Consultato il 22/08/2024
- <https://divicia-project.org/workpackages/>  
Consultato il 11/09/2024
- <https://divicia-project.org/>  
Consultato il 10/10/2024
- [http://www.capancona.it/wp-content/uploads/2020/10/grano\\_duro\\_2020.pdf](http://www.capancona.it/wp-content/uploads/2020/10/grano_duro_2020.pdf)  
Consultato il 10/10/2024
- [https://www.psbsementi.it/media/prodotti\\_multimedia/56/Maciste-seme-commerciale.pdf](https://www.psbsementi.it/media/prodotti_multimedia/56/Maciste-seme-commerciale.pdf)  
Consultato il 11/10/2024
- [https://www.psbsementi.it/media/prodotti\\_multimedia/41/Irina-seme-commerciale.pdf](https://www.psbsementi.it/media/prodotti_multimedia/41/Irina-seme-commerciale.pdf)  
Consultato il 11/10/2024
- [https://www.psbsementi.it/media/prodotti\\_multimedia/12/Chiaro%20Torrelama-seme-commerciale.pdf](https://www.psbsementi.it/media/prodotti_multimedia/12/Chiaro%20Torrelama-seme-commerciale.pdf)  
Consultato il 12/10/2024
- [https://semiasrl.it/wp-content/uploads/2021/08/SEMIA\\_Prothabat69.pdf](https://semiasrl.it/wp-content/uploads/2021/08/SEMIA_Prothabat69.pdf)  
Consultato il 12/10/2024
- <https://www.sisonweb.com/wp-content/uploads/VECCIA-IDICE.pdf>  
Consultato il 12/10/2024