



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE ALIMENTARI

# IMPATTO DELL'AZIONE DI STRESS ABIOTICI E BIOTICI SULLA RESA DI FRUMENTO DURO E MAIS

IMPACT OF ABIOTIC AND BIOTIC STRESS FACTORS ON DURUM WHEAT  
AND MAIZE YIELDS

TIPO TESI: Compilativa

Studente:  
CARLO CALCABRINI

Relatore:  
PROF. LUIGI LEDDA

Correlatore:  
DOTT. FRANCONI MATTEO

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

A mio nonno,  
e a quella promessa fatta ormai troppi anni fa,  
finalmente mantenuta.

Alla mia famiglia,  
che mi ha sempre supportato,  
anche quando non lo meritavo.



## ELENCO DELLE FIGURE

Figura 3-1: PRISMA workflow .....	19
Figura 4-1: Forest plot del frumento .....	23
Figura 4-2: Funnel plot del frumento .....	23
Figura 4-3: Galbraith plot del frumento .....	24
Figura 4-4: Forest plot mais .....	25
Figura 4-5: Forest plot per il mais. In azzurro gli studi con assenza di patogeno, in rosso con presenza di patogeno .....	25
Figura 4-6: Galbraith Plot per il mais. In azzurro gli studi con assenza di patogeno, in rosso con presenza di patogeno .....	26

## ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

FC	“Field Capacity”: capacità di campo
ET	Evotraspirazione
ID	Codice identificativo
SPSS29	software IBM SPSS Statistics versione 29
$\text{Tau}^2$	Misura la varianza tra gli studi
$H^2$	Indica il rapporto tra la varianza totale e la varianza dovuta al caso
$I^2$	Quantifica la percentuale di variazione totale che è attribuibile all’eterogeneità piuttosto che al caso.
SPSS	software IBM SPSS Statistics
PIL	Prodotto Interno Lordo

# Sommario

ELENCO DELLE FIGURE .....	4
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI .....	5
SOMMARIO .....	6
INTRODUZIONE .....	8
1.1 Rese delle colture a livello globale: stato dell'arte e prospettive future .....	8
1.2 Stress biotici.....	10
1.2.1 Insetti .....	10
1.2.2 Funghi.....	11
1.2.3 Altri patogeni.....	12
1.3 Stress abiotici.....	12
1.3.1 Stress idrico.....	12
1.3.2 Stress termico.....	14
1.3.3 Stress da salinità.....	15
CAPITOLO 2 OBIETTIVI DELLA TESI: .....	16
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI.....	17
3.1 Systematic review .....	17
3.2 Criteri di inclusione ed esclusione di articoli.....	17
3.3 Metanalisi.....	19
3.3.1 Dimensione media dell'effetto dell'irrigazione .....	20
3.3.2 Analisi dell'eterogeneità.....	20
3.3.3 Analisi di bias nelle pubblicazioni.....	21
CAPITOLO 4 RISULTATI.....	22
4.1 Frumento.....	22
4.2 Mais .....	24
CAPITOLO 5 DISCUSSIONE.....	27
5.1 Frumento.....	27
5.2 Mais .....	29

CAPITOLO 6 CONCLUSIONI .....	32
CAPITOLO 7 BIBLIOGRAFIA .....	34

# INTRODUZIONE

## 1.1 Rese delle colture a livello globale: stato dell'arte e prospettive future

Recenti studi mostrano come nonostante negli ultimi decenni le rese delle colture principali siano aumentate, queste non riusciranno a far fronte alla domanda crescente di cibo. Altri studi hanno dimostrato che la produzione agricola globale dovrà raddoppiare entro il 2050 per soddisfare le esigenze previste derivanti dall'aumento della popolazione, dai cambiamenti nelle abitudini alimentari e dal crescente consumo di biocarburanti. Incrementare le rese delle colture per soddisfare le crescenti richieste, piuttosto che convertire ulteriori terre all'agricoltura, è stata evidenziata come la soluzione preferita per raggiungere questo obiettivo. Tuttavia, è fondamentale comprendere prima come le rese agricole a livello globale siano soggette a variazioni significative (Ray et al., 2013). Diversi studi recenti indicano che le rese potrebbero essere già arrivate ad una fase di plateau più in diverse regioni del mondo. Nello specifico, stime indicano che le rese di mais (*Zea mays* L.) e frumento (*Triticum aestivum* L.) sono stabili nel 24–39% delle aree agricole mondiali più importanti. Molte di queste aree si trovano nelle principali nazioni produttrici, le quali mostrano popolazione in aumento, crescente benessere o una combinazione di questi fattori. Questo scenario si tradurrà in un più difficile raggiungimento degli obiettivi di produzione agricola futuri con delle incognite cruciali su come sviluppare e indirizzare le strategie: come stanno cambiando le rese delle colture a livello globale? Dove i guadagni di resa riescono a soddisfare la crescente domanda e dove le rese stanno rimanendo indietro? (Ray et al., 2013). Ad esempio, le rese del mais mostrano generalmente un trend crescente in tutta l'Asia. I tassi di miglioramento delle rese sono attualmente in linea con l'obiettivo di raddoppiare la produzione in alcune parti di Iran, Pakistan, India, Cina, Indonesia, Bangladesh, Laos, Cambogia, Vietnam e Turchia (Figura 2a). In contrasto, in Cina, Laos, Filippine, Australia, India, Pakistan e Turchia, la quantità di mais raccolto pro-capite potrebbe rimanere invariata nel breve termine, ma sono attesi aumenti entro il 2050. In alcuni paesi come Nepal, Kirghizistan, Iraq, Afghanistan, Uzbekistan e Nuova Zelanda, i tassi di miglioramento delle rese di mais, rispettivamente dell'1,3%, 0,3%, 0,9%, 1,1%, 1,6% e 0,5% all'anno, potrebbero comportare una diminuzione dei raccolti pro capite a causa della crescita della popolazione. Inoltre, i raccolti di mais pro-capite potrebbero

aumentare in Indonesia, Vietnam, Thailandia, Iran, Myanmar, Bangladesh, Cambogia, Azerbaigian e Bhutan (Ray et al., 2013). In Europa, l'aumento delle rese del mais sembrano attestarsi intorno all'0,8–3,0% all'anno, ma è atteso un aumento della quantità di mais raccolto pro-capite in molti paesi del continente entro il 2050 (Ray et al., 2013b).

Il mais e il frumento sono i principali cereali coltivati e rappresentano insieme il 78,6% della superficie totale raccolta e l'80,9% della produzione totale di cereali, con una produzione rispettivamente di 6,0 milioni di tonnellate per il mais, 4,2 milioni di tonnellate per il frumento duro e 2,8 milioni di tonnellate per il frumento tenero registrate nel 2017 (ISTAT, 2019). In Italia, il mais e il frumento tenero sono coltivati principalmente in Pianura Padana (rispettivamente l'88,7% e il 69,0% della superficie coltivata nel 2017), mentre il frumento duro è più diffuso nell'Italia meridionale e nelle isole con una superficie coltivata pari al 65,6% nel 2017 (Mereu et al., 2021). Il mais richiede irrigazione adeguata, nutrienti e pratiche di gestione efficaci per una produzione redditizia. Infatti, è noto come una disponibilità insufficiente di acqua può ridurre la resa e la qualità, ma non sono ancora ben noti i gap di produzione dovuti a stress abiotici, irrigazione compresa. Una corretta gestione della risorsa idrica, ottimizzandone quantità ed epoca quando questa è limitata (condizione molto frequente in ambiente mediterraneo), rappresenta la chiave di volta. Tra le strategie più quotate ed interessanti per l'ottimizzazione è ridurre l'irrigazione durante le fasi di crescita meno influenzate dalla carenza di acqua, ad esempio, durante le prime fasi di crescita vegetativa del mais (Nilahyane et al., 2020).

Tuttavia, le limitazioni sui livelli sostenibili di estrazione dell'acqua potrebbero ostacolare l'aumento dell'irrigazione, specialmente nei paesi mediterranei (come Spagna, Portogallo, Grecia, Cipro, Malta, Italia e Turchia), dove si prevede che la scarsità d'acqua si intensificherà a causa del riscaldamento globale (Hristov et al., 2020).

## 1.2 Stress biotici

### 1.2.1 Insetti

È noto che la gestione del controllo degli insetti dannosi sia fondamentale per prevenire effetti negativi sulla salute e sullo sviluppo delle piante. Ad esempio, Il trivellatore del fusto rosa (*Sesamia inferens*) è un parassita polifago che si nutre di importanti colture cerealicole, tra cui il mais e il frumento (Scholar, 2017). In riferimento al mais, specie nell'area mediterranea, il trivellatore del fusto rosa causa danni significativi, infatti le larve scavano gallerie nei fusti del mais che, indebolendo la pianta, riducono di conseguenza anche la resa. I danni sono ben visibili, infatti la pianta infetta produce il fenomeno del “cuore morto” nella fase vegetativa e le “spighe bianche” nella fase di formazione delle spighe (Butrón et al., 2004). Sono frequenti casi riportati in letteratura di danni causati da termiti. In generale, il danno causato dalle termiti è maggiore nelle colture in asciutta rispetto a quelle irrigate (Scholar, 2017). Ad esempio, è stato osservato che *Odontotermes obesus* e *Microtermes obesi* causano danni ingenti in ben cinque delle principali zone di coltivazione del frumento in India, con danni particolarmente elevati nei terreni sabbiosi limosi e severi nei terreni rossi. Allo stesso modo, i campi coltivati in asciutta presentano livelli di infestazione più elevati rispetto ai campi irrigati. L'infestazione delle termiti è stata osservata fino al 20-25% nei campi coltivati in asciutta e fino al 10 % nei campi irrigati. Le termiti attaccano la coltura in varie fasi di fenologiche, dall'emergenza alla maturità. Le piante gravemente danneggiate mostrano appassimento, essiccazione e possono essere facilmente sradicate. *O. obesus* danneggia le radici tenere delle giovani piante di frumento, provocandone lo sradicamento. Anche le piante in pieno sviluppo possono essere infestate attraverso il fusto, con l'infestazione che si estende fino alla parte apicale della pianta; *M. obesi* può provocare danni sia nella fase di semenzale che in quella di maturazione sovente impedendo alle cariossidi di svilupparsi del tutto (Scholar, 2017). Tra gli insetti che meritano particolare attenzione vi è la Piralide (*Ostrinia nubilalis* Hübner), specialmente nel del mais. È stato riportato che un singolo esemplare di piralide del mais europeo può ridurre le rese di frumento anche del 5,9%. Nel 1991 si è verificata un'infestazione di questo insetto negli Stati Uniti, più precisamente nello stato del Minnesota, che ha causato perdite di resa significative tanto da spingere le associazioni di categoria a raccogliere questionari compilati da agricoltori e professionisti del settore agricolo. Lo scopo del questionario era di valutare come gli agricoltori e i professionisti del settore agricolo percepissero i rischi di produzione associati alla piralide del mais europeo e ad esplorare come queste percezioni si riflettono nelle opzioni di gestione che utilizzano o raccomandano. I risultati hanno evidenziato che molti agricoltori non gestiscono la piralide del mais europeo a causa di inattività storica, perdite di resa nascoste,

riluttanza a effettuare sopralluoghi, preoccupazioni per gli insetticidi e mancato riconoscimento del problema. I risultati hanno indicato inoltre una forte necessità di educare gli agricoltori e i professionisti del settore agricolo sulla biologia, i danni alle colture e le opzioni di gestione per la piralide del mais europeo, al fine di ridurre al minimo lo sviluppo e i successivi danni (Rice & Ostlie, 1997).

### 1.2.2 Funghi

È noto come la gestione dello sviluppo dei funghi sia fondamentale per evitare ripercussioni sulle rese di frumento e mais; infatti, uno dei danni più comuni si manifesta con la produzione delle aflatossine. Le aflatossine sono prodotte dal metabolismo secondario dei funghi *Aspergillus flavus* ed *Aspergillus parasiticus*, sono in grado di svilupparsi su numerosi substrati vegetali come, ad esempio, frumento e soprattutto mais in zone tropicali e subtropicali, dove le muffe trovano le condizioni ottimali per il loro sviluppo. L'infezione da *A. flavus* ed *A. parasiticus* e la successiva contaminazione da aflatossine, può avvenire in qualsiasi punto della filiera agro-alimentare, quindi sia nella fase di pre-raccolta e raccolta sia in post-raccolta. L'ingestione di questi metaboliti secondari provoca effetti dannosi sulla salute sia dell'uomo che degli animali. In particolare, è stato provato come le aflatossine abbiano attività cancerogena, mutagena, teratogena e come possono causare tossicità cronica ed acuta (Toderi, n.d.). Grandi perdite nella resa del frumento sono attribuite all'invasione di varie malattie, tra cui le ruggini, in particolare la ruggine gialla, che ha causato enormi perdite di resa negli ultimi anni. È noto, infatti, che la ruggine gialla del frumento causata da *Puccinia striiformis* riduce la resa e la qualità del frumento e del foraggio. La ruggine gialla può causare perdite di resa anche del 100% se l'infezione si verifica molto presto e la malattia continua a svilupparsi durante la stagione di crescita (a condizione che le cultivar siano suscettibili). Nella maggior parte delle aree di produzione del frumento, le perdite di resa causate dalla ruggine gialla variano dal 10% al 70% a seconda della suscettibilità della cultivar, della precocità dell'infezione iniziale, della velocità di sviluppo della malattia e della durata della malattia (Nadeem Afzal et al., 2007).

In riferimento al mais, un patogeno che influenza negativamente le rese della coltura è l'*Ustilago maydis*, un fungo patogeno e parassitario che infetta tutti gli organi aerei del mais, ovvero le foglie, le pannocchie e le spighe. In tutti gli organi, si formano tumori inducendo ipertrofia e iperplasia nelle cellule in attiva divisione; tuttavia, le enormi differenze nei tipi di cellule e nelle fasi di sviluppo delle diverse parti della pianta richiedono che *U. maydis* abbia

sia strategie generali che specifiche per l'organo nell'infezione del mais (Ferris & Walbot, 2021).

### 1.2.3 Altri patogeni

Anche i batteri possono causare danni che intaccano negativamente sulle rese delle colture, un esempio è la malattia dello stunt del mais, che è stata il fattore limitante più importante per la produzione di mais nei Caraibi e nelle Americhe, compresi gli Stati Uniti, il Messico, e l'America Centrale e Meridionale durante il XIX e XX secolo. Recentemente, la malattia dello stunt del mais è riemersa, poiché sono stati osservati sintomi in varietà di mais autoctone coltivate nel sud-est di Puebla, in Messico. La malattia dello stunt del mais provoca piante gravemente nanizzate che spesso producono più pannocchie piccole con chicchi spesso mancanti. Questa malattia è causata da *Spiroplasma kunkelii*, comunemente noto come 'spiroplasma dello stunt' del mais (Jones & Medina, 2020). Studi hanno mostrato come dal punto di vista produttivo i rendimenti delle piante malate possano essere inferiori anche del 50% rispetto a piante sane. Inoltre, il numero di pannocchie per pianta è stato ridotto più del peso delle cariossidi nelle piante malate (Scott et al., 1977).

## 1.3 Stress abiotici

### 1.3.1 Stress idrico

La possibilità di irrigare le colture è un fattore cruciale che influenza il potenziale di resa delle stesse (Nilahyane et al., 2020). Gli studi effettuati dai meteorologici suggeriscono che le stagioni delle piogge saranno sempre più soggette ad imprevedibilità, con ripercussioni non solo sulla quantità totale di precipitazioni in una determinata stagione, ma anche sulla frequenza, durata e gravità dello stress idrico nelle piante in diverse fasi di crescita (Kijne et al., 2003). Pertanto, sebbene le siccità possano perdurare per diversi anni, anche una siccità breve ma intensa può arrecare gravi danni e compromettere significativamente l'economia delle aziende (Aziz Khakwani et al., 2012).

Il deficit idrico influisce su ogni aspetto della crescita delle piante e della resa, modificando l'anatomia, la morfologia, la fisiologia, la biochimica e infine la produttività delle colture. Lo sviluppo di cultivar con alta resa è l'obiettivo principale in ambienti con limitate risorse idriche, ma il successo riportato in letteratura è modesto a causa della natura variabile della siccità e della complessità del controllo genetico delle risposte delle piante (Mirbahar et al., 2009). La scarsa disponibilità di risorse idriche è uno dei principali stress abiotici che

influisce su almeno il 60% della produzione di frumento nei paesi ad alto reddito e su circa il 32% dei 99 milioni di ettari nei paesi a basso reddito meno sviluppati. Diversi studi dimostrano infatti che il deficit idrico può ridurre la resa dal 17 al 70%. In termini di resa, il periodo più sensibile al deficit idrico durante il ciclo colturale del frumento va dalla fase di doppio nodo fino alla fase di antesi. In questo intervallo, la carenza d'acqua influisce negativamente sul numero di spighe e, di conseguenza, sul numero di cariossidi per spiga, compromettendo la produzione complessiva (Ahmad et al., 2018).

La siccità è una condizione climatica caratterizzata da una prolungata scarsità di precipitazioni rispetto alla norma storica di una regione o area. Questa mancanza di pioggia porta a una riduzione della disponibilità di acqua, influenzando negativamente gli ecosistemi. Le condizioni di stress idrico non sono semplicemente dei fenomeni fisici definiti dalle condizioni meteorologiche, ma sono determinate dal delicato equilibrio tra offerta e domanda di acqua. Ogni volta che le richieste umane di acqua superano la disponibilità naturale, si verifica la siccità. Tuttavia, questa può essere causata da una quantità insufficiente di precipitazioni (pioggia e neve) per un periodo prolungato. È noto che la popolazione mondiale sta aumentando molto rapidamente, in particolare nei paesi in via di sviluppo. In questi, gran parte delle produzioni alimentari future dovranno necessariamente provenire da zone dove il sistema colturale sarà in asciutta, poiché le possibilità di espandere le aree irrigate sono limitate (Aziz Khakwani et al., 2012).

Tutti i parametri vegetativi e di resa delle colture sono stati significativamente influenzati dalla carenza d'acqua nel profilo del suolo, causata dall'irrigazione omessa o non fattibile durante le fasi fenologiche critiche di fioritura e formazione della spiga (Çakir, 2004). Per quanto riguarda il mais, nonostante la sua elevata efficienza nell'uso dell'acqua, è considerata una coltura suscettibile allo stress idrico. Questa vulnerabilità è dovuta alla sua particolare struttura floreale, che presenta organi maschili e femminili separati, e allo sviluppo quasi sincrono dei fiori su una singola spiga in ogni stelo (Ghazian Tafrihi et al., n.d.). Il deficit idrico durante la fase produttiva può portare a gravi perdite nella resa e nei componenti della resa delle cultivar di mais. Ad esempio, numerosi studi hanno dimostrato come la cultivar KSC720 sia una cultivar ad alta resa sia in condizioni di irrigazione adeguata che limitata. Nonostante ciò, alcuni di questi dimostrano come con l'aumento dello stress idrico, il numero di file per spiga, il numero di semi per fila e il peso di cento semi siano diminuiti, portando anche a una diminuzione della resa. I risultati di tali studi mostrano che un livello di evaporazione di 50 mm è sufficiente per le esigenze della pianta e per produrre la massima resa (Marouf & Naghavi, 2014).

### 1.3.2 *Stress termico*

L'aumento delle temperature e i conseguenti cambiamenti climatici influenzeranno negativamente la crescita e lo sviluppo delle colture. Ad esempio, per il frumento è attesa una significativa riduzione della produttività, stimata intorno al 6% per ogni grado di aumento della temperatura. Un'analisi dettagliata delle risposte morfo-fisiologiche del frumento allo stress termico può aiutare a formulare strategie adeguate per migliorare la resa in condizioni di stress termico. Inoltre, individuare possibili strategie di gestione può incrementare la produttività e la sostenibilità della coltivazione del frumento. È noto che lo stress termico riduce significativamente la germinazione dei semi, la crescita delle piantine, la turgidità cellulare e l'efficienza nell'uso dell'acqua. Inoltre, tra le principali risposte del frumento allo stress termico si annoverano l'aumento della senescenza fogliare, la riduzione della fotosintesi, l'inattivazione degli enzimi fotosintetici e i danni ossidativi ai cloroplasti. Lo stress termico riduce anche il numero e la dimensione delle cariossidi, influenzandone anche l'allegagione, la traslocazione degli assimilati e la durata e il tasso di crescita delle cariossidi stesse.

Il cambiamento climatico avrà effetti negativi anche sulla produttività globale del mais e la qualità delle cariossidi. Le temperature estreme, sia alte che basse durante il ciclo colturale, minacciano la sostenibilità della resa del mais. Le piante di mais sono sensibili allo stress termico quando la temperatura supera i 30 °C, con una forte diminuzione della resa in caso di condizioni negative prolungate. La crescita ottimale del mais richiede temperature diverse durante il giorno e la notte e per tutto il ciclo colturale. Durante il giorno, la temperatura ottimale varia tra 25 e 33 °C, mentre durante la notte varia tra 17 e 23 °C. La temperatura media ottimale per l'intera stagione di crescita è compresa tra 20 e 22 °C. Le piante di mais germinano meglio a temperature comprese tra 25 e 28 °C. La fase riproduttiva è la più sensibile alle temperature sub-ottimali e supra-ottimali. Le deviazioni significative dalle temperature ottimali inducono stress termico che può provocare una drastica riduzione del tasso di crescita e delle rese del mais, attraverso l'effetto negativo sull'allegagione e la perturbazione di numerosi processi fisiologici. Si prevede che entro il 2050, il 45% dell'area globale destinata alla produzione di mais affronterà in media cinque giorni di temperature massime superiori ai 35 °C durante la fase riproduttiva ogni anno. Questo è un dato estremamente importante, poiché un aumento di solo 1 °C nella temperatura media stagionale può ridurre la resa economica del mais dal 3 al 13%.

### 1.3.3 *Stress da salinità*

Tra gli stress di tipo abiotico maggiormente impattanti trova spazio lo stress da salinità. Infatti, in diverse regioni del globo, l'acqua salina è ampiamente utilizzata come risorsa idrica alternativa per l'agricoltura ai fini di superare la carenza di acqua dolce nelle regioni aride e semiaride. È noto che l'uso a lungo termine dell'irrigazione con acqua salmastra possa deteriorare le proprietà del suolo accumulando ioni salini che ne modificano le proprietà fisico-chimiche arrecando danni all'ambiente e minacciando la produzione delle colture. Ciò nonostante, studi sull'impatto dell'irrigazione con acqua salata sulle rese di frumento e mais hanno mostrato che l'irrigazione superficiale a rotazione (con acqua dolce durante la semina del mais estivo e con acqua salata durante la fase di giunzione del frumento invernale) può non avere effetti negativi significativi sulle rese annuali rispetto all'irrigazione con sola acqua dolce (Wang et al., 2023).

## Capitolo 2

### OBIETTIVI DELLA TESI:

Il gap tra le rese reali e potenziali delle colture è determinato dall'azione e dall'interazione di stress biotici (e.g., patogeni) e abiotici (e.g., stress idrico). L'obiettivo principale della tesi è analizzare la letteratura disponibile e valutare e quantificare l'effetto dello stress idrico sulle rese di mais e frumento a livello globale. Obiettivo secondario della tesi è quantificare l'effetto interattivo tra stress idrico e l'azione di funghi ed insetti.

Questo elaborato è parte di un progetto più ampio denominato FOLOU (*Bringing Knowledge and Consensus to Prevent and Reduce Food Loss at Primary Production Stage: Understanding, Measuring, Training and Adopting*), uno studio finanziato dall'Unione Europea che coinvolge diverse università europee, tra cui Ancona e Bologna in Italia. Il progetto mira a prevenire e ridurre le perdite alimentari nella produzione primaria, poiché queste hanno impatti negativi sulla società contribuendo all'insicurezza alimentare, impoverendo l'ambiente, generando gas serra evitabili e aumentando la pressione sulle risorse di terra e acqua. La tesi ha ricevuto supporto dal progetto EU FOLOU (<https://www.folou.eu>), nell'ambito dell'accordo di sovvenzione numero: 101084106.

# Capitolo 3

## MATERIALI E METODI

### 3.1 Systematic review

I dati degli articoli pubblicati su riviste scientifiche sono stati raccolti attraverso la revisione bibliografica utilizzando i seguenti database: Web of Science (<https://webofknowledge.com>) e SCOPUS (<https://www.scopus.com>). Come strategia di ricerca, sono state utilizzate le seguenti combinazioni di parole chiave: “*pathogen OR insect OR disease OR fungi AND water deficit OR water stress OR drought stress AND yield*”.

La metanalisi presentata ha l’obiettivo di includere studi che indagano la risposta delle principali colture in termini di resa, considerata come variabile principale, a diversi regimi di irrigazione e, quando possibile, all’interazione con la presenza o l’assenza di patogeni, come funghi e insetti dannosi. Gli articoli selezionati per la metanalisi sono stati pubblicati tra gennaio 1997 e il 30 ottobre 2023. Per il presente lavoro di tesi, l’analisi si è focalizzata esclusivamente su mais e frumento.

### 3.2 Criteri di inclusione ed esclusione di articoli

È stato sviluppato un protocollo di revisione dettagliato con alcuni criteri di inclusione ed esclusione, che sono stati applicati per selezionare gli studi trovati nei database:

a) l’articolo deve chiaramente riportare la resa di mais e frumento (massa su superficie, poi eventualmente rapportata in  $t\ ha^{-1}$  con opportune conversioni). Per gli studi in vaso, questa è stata determinata rapportando la resa ottenuta dalla superficie in vaso dichiarata ed il numero di piantine/rese.

b) l’articolo deve riportare la quantità di acqua restituita in base alla Capacità di Campo (Field Capacity, FC) o all’evapotraspirazione (ET).

c) Deve essere presente almeno un controllo (irrigazione  $>75\%$  FC o ET) ed un trattamento (irrigazione  $< 75\%$  o in asciutta) Se è presente un patogeno (fungo/insetto) deve essere segnalato per l’analisi dei sottogruppi.

d) Per ogni trattamento devono essere presenti la media, un indice di dispersione (deviazione standard o in alternativa la varianza) insieme al numero di repliche. Negli articoli in cui gli indici di dispersione non sono presenti, questi sono stati stimati tramite lo strumento Ex-Tract basato su Microsoft Excel (Acutis et al., 2022).

e) Le metanalisi, le review e gli articoli che calibrano o validano modelli sono stati esclusi.

La codifica degli studi è stata eseguita secondo la metodologia PRISMA (Figura 3.1). Ad ogni articolo è stato assegnato un codice identificativo numerico progressivo (ID-number). Alcuni articoli eleggibili riportano più di un fattore in analisi (e.g., annate differenti e/o confronto tra cultivar) e pertanto sono stati considerati come entrate singole. Per questo motivo l'ID-number di un singolo articolo può ripetersi più volte all'interno dei risultati e grafici.

Gli articoli risultati eleggibili per la metanalisi sono risultati 18 (10 per il frumento e 8 per il mais) che sono risultati in 17 entrate per frumento e 18 per mais. Gli studi sono stati esaminati con attenzione e successivamente i dati sono stati estratti e organizzati utilizzando Microsoft Excel, in cui sono state registrate tutte le informazioni ritenute rilevanti per l'analisi:

- a) Coltura e resa con relativo indice di dispersione e numero repliche (e.g., spring wheat,  $6.4 \pm 0.71 \text{ t ha}^{-1}$ , 4 repliche)
- b) Informazioni su dove è stato condotto lo studio (paese, tipo di suolo e tessitura, clima secondo Köppen-Geiger)
- c) La scala alla quale l'esperimento è stato condotto (vaso/campo/serra)
- d) Tipologia di patogeno, ove presente (e.g., *Magnaporthe oryzae*)

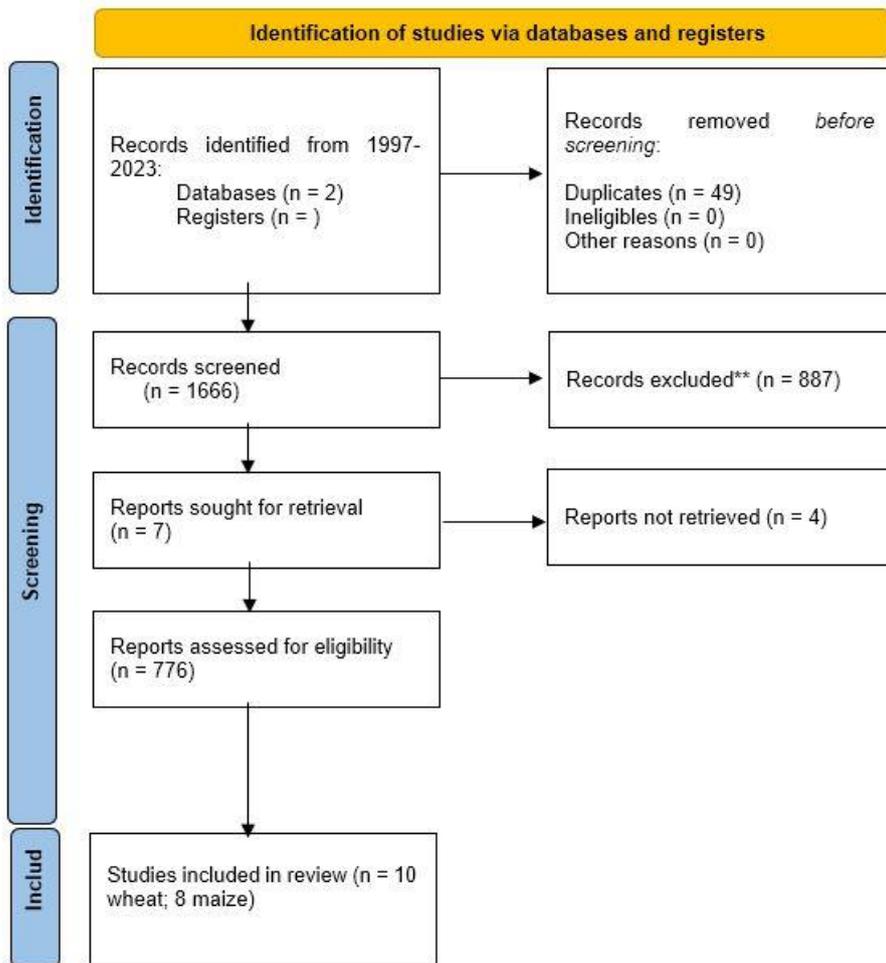


Figura 3-1: PRISMA workflow

### 3.3 Metanalisi

La metanalisi è stata condotta utilizzando il software IBM SPSS Statistics versione 29 (SPSS29). Nel sottomenu “*Meta Analysis*” del software è stato selezionato “*Continuous Outcomes*”, adatto all'analisi della resa delle colture in quanto variabile continua. Essendo stati estrapolati i dati di sintesi (media, SD e numero di repliche), è stato utilizzato il sottomenu “*Raw Data*”. L'analisi dei sottogruppi è stata effettuata solo per gli articoli che hanno analizzato il mais, in quanto in 3 entrate è stato riportato l'effetto causato da patogeni (ad esempio, *Magnaporthe oryzae* e *Helicoverpa zea*). Il bias di pubblicazione è stato valutato tramite la creazione di Forest plot, Funnel plot e Galbraith plot per valutare la simmetria tra errori standard e dimensioni degli effetti.

### 3.3.1 Dimensione media dell'effetto dell'irrigazione

I passaggi per il calcolo della dimensione media dell'effetto in SPSS sono riassunti di seguito:

1. Selezione: *Analyse > Meta Analysis > Continuous Outcomes > Raw Data*
2. Aggiunta di variabili del trattamento (irrigazione <75% FC/ET o in asciutta), dimensione del campione, media e deviazione standard
3. Aggiunta di variabili del controllo (irrigazione >75%), dimensione del campione, media e deviazione standard
4. Aggiunta di variabile identificative (ID-number) nella casella "*ID Studio*"
5. Selezione "*Cohen's d*" nella casella "*Effect Size*"
6. Selezione "*Random-effects*" nella casella "*Model*"

La tabella che viene prodotta ed etichettata come "*Effect Size Estimates*" mostra la dimensione media dell'effetto, il suo errore standard, il valore Z, il P-value a due code e l'intervallo di confidenza al 95%.

### 3.3.2 Analisi dell'eterogeneità

Per quantificare l'eterogeneità tra gli studi, sono stati utilizzati diversi indici statistici, tra cui:

- a)  $\tau^2$ : Misura la varianza tra gli studi
- b)  $I^2$ : Indica il rapporto tra la varianza totale e la varianza dovuta al caso
- c)  $I^2$ : Quantifica la percentuale di variazione totale che è attribuibile all'eterogeneità piuttosto che al caso. Valori più alti di  $I^2$  indicano maggiore eterogeneità.

La distinzione tra studi omogenei ed eterogenei in una metanalisi è cruciale per l'interpretazione dei risultati, con gli studi omogenei che facilitano conclusioni più chiare e generalizzabili, mentre gli studi eterogenei richiedono un'analisi più approfondita delle cause delle variazioni osservate.

I passaggi per l'analisi della eterogeneità in SPSS sono riassunti di seguito:

1. Selezione sulla finestra di dialogo "*Print*"
2. Spunta di caselle di controllo etichettate come "*Test di omogeneità*" e "*Misure di eterogeneità*"
3. Selezione su "*Continua*" (per tornare alla schermata principale)
4. Selezione su "*OK*"

Una volta applicati questi passaggi, le statistiche di eterogeneità in due tabelle (*Test of Residual Homogeneity* e *Residual Heterogeneity*) vengono mostrate.

### 3.3.3 *Analisi di bias nelle pubblicazioni*

L'analisi del bias (o distorsione del dato) è un aspetto cruciale in qualsiasi ricerca scientifica, inclusa la metanalisi, poiché il bias può influenzare significativamente i risultati e le conclusioni. Nelle metanalisi, si analizza principalmente il bias di pubblicazione e altri bias che possono influenzare la qualità degli studi inclusi. In questa tesi, l'analisi di bias nelle pubblicazioni è stato valutato attraverso i Funnel plot. In un Funnel plot, l'effetto stimato degli studi è tracciato sull'asse x, mentre la precisione (inverso dell'errore standard) è tracciata sull'asse y. In assenza di bias di pubblicazione, i punti dovrebbero formare una distribuzione simmetrica a forma di imbuto. Un'asimmetria può suggerire la presenza di bias di pubblicazione. Di seguito vengono riassunti i passaggi in SPSS

1. Selezione sulla finestra di dialogo "*Grafico*"
2. Selezione "*Funnel Plot*"
3. Selezione del box sotto "*Mostra Colonne*"

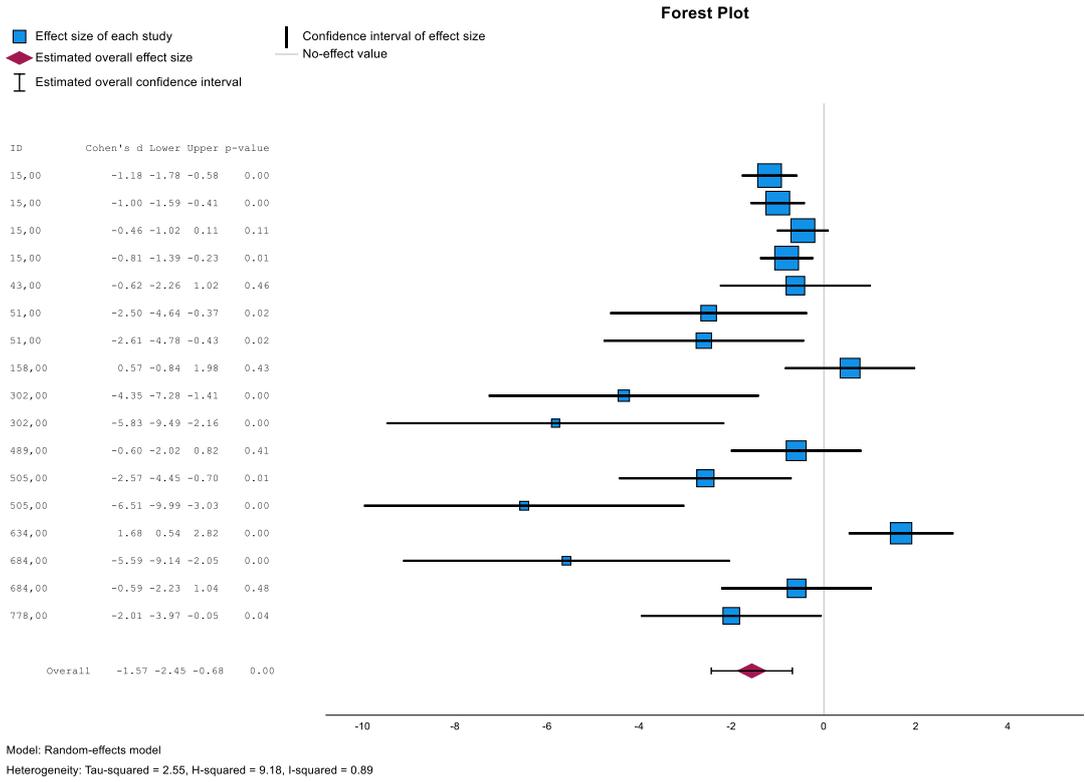
## Capitolo 4

### RISULTATI

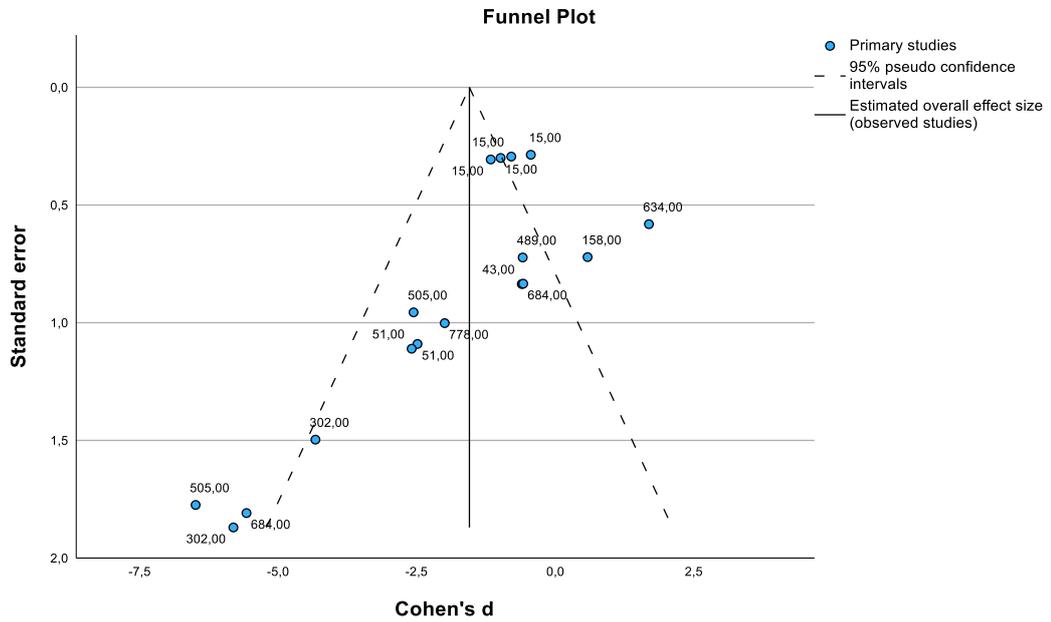
#### 4.1 Frumento

La dimensione media dell'effetto, risultata essere pari a -1.57 (SE = 0.45; Z = -3.481;  $p < 0.001$ ) indica che lo stress idrico ha un effetto significativo sulle rese del frumento. In media il frumento non soggetto a stress idrico si è attestato su una resa media di 2.72 t ha<sup>-1</sup> mentre il frumento soggetto a stress idrico si è attestato su 1.85 t ha<sup>-1</sup> (-32%). L'indice Cohen's  $d$  è risultato essere pari a -1.57 che corrisponde ad un effetto molto grande nella direzione opposta rispetto al gruppo di controllo (no stress idrico). L'indice Tau<sup>2</sup> (che misura la varianza tra gli studi inclusi in una metanalisi) è risultato essere pari a 2.55 ed è indice di una varianza tra studi moderata. Il rapporto tra la varianza totale (che include la varianza vera tra gli studi e la varianza dovuta al caso) e la varianza dovuta al caso, determinato con indice H<sup>2</sup> è risultato essere pari a 9.8% che, in accordo con l'indice I<sup>2</sup> denota che gran parte della variabilità osservata non è attribuibile al caso, ma a differenze reali tra gli studi (Figura 4.1). L'eterogeneità degli studi in esame è confermata anche dai Funnel e dai Galbraith plot (Figure 4.2 e 4.3).

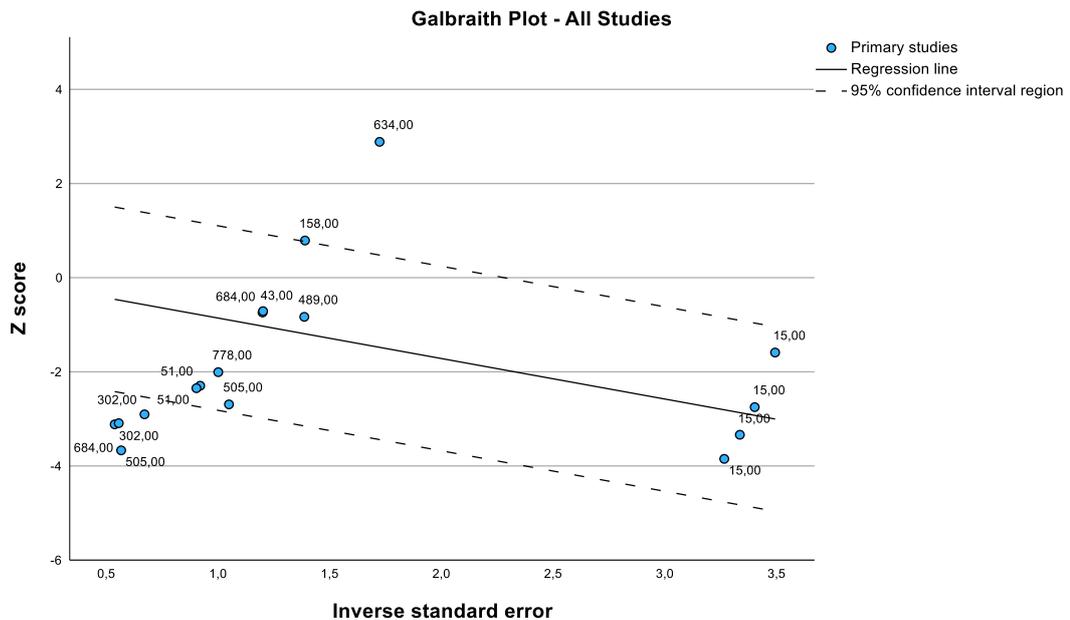
L'eterogeneità riscontrata suggerisce di proseguire con una “*moderator analysis*” per il frumento, la quale richiederà un ulteriore approfondimento degli articoli selezionati per individuare variabili categoriche che potrebbero spiegare l'eterogeneità emersa. Tuttavia, questo aspetto è oltre gli obiettivi della tesi.



**Figura 4-1: Forest plot del frumento**



**Figura 4-2: Funnel plot del frumento**



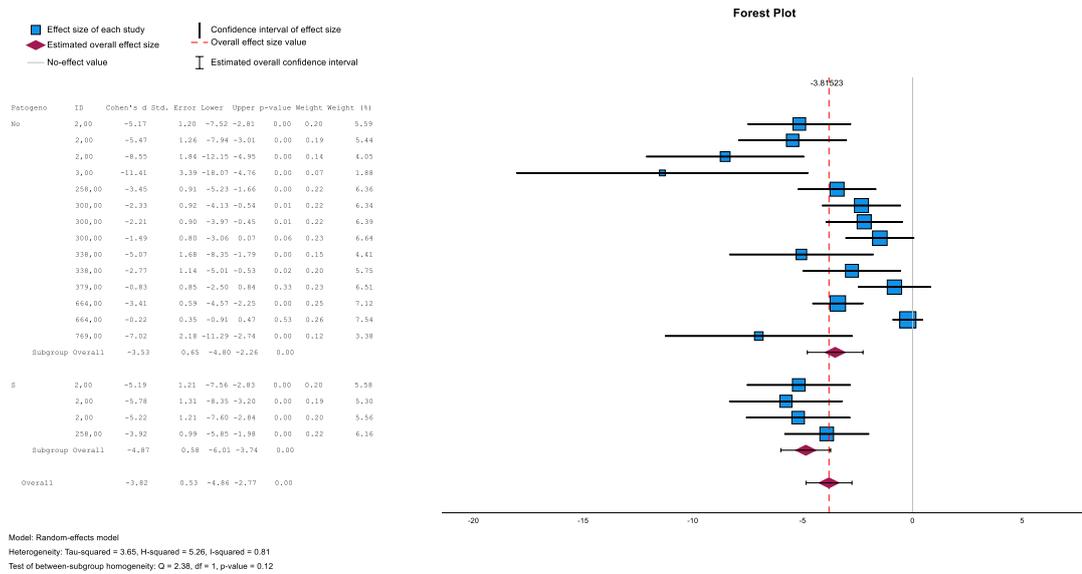
**Figura 4-3: Galbraith plot del frumento**

## 4.2 Mais

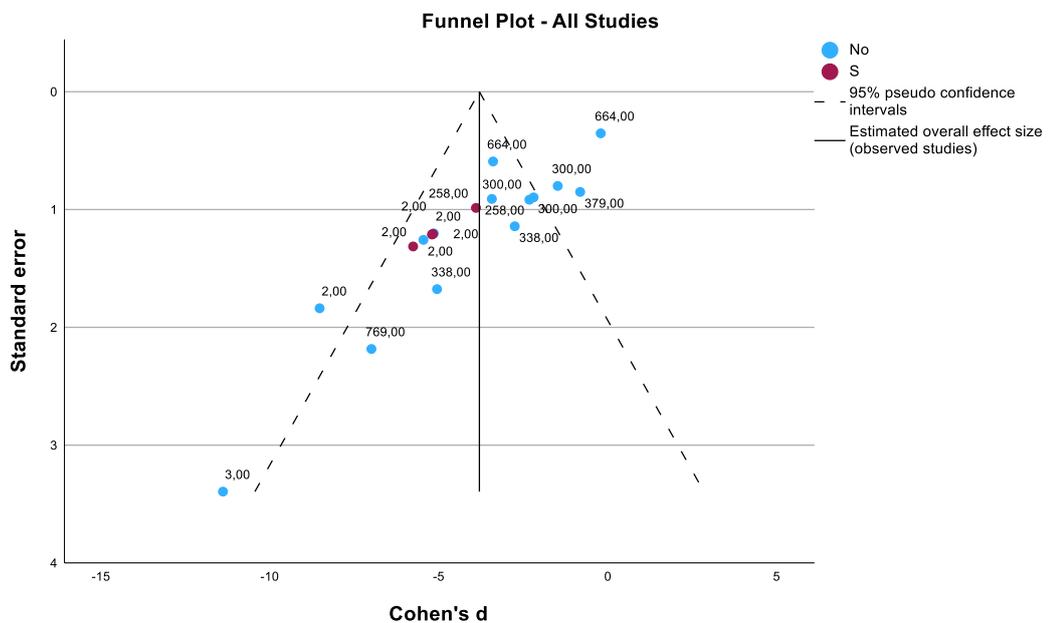
La dimensione media dell'effetto, risultata essere pari a  $-3.82$  ( $SE = 0.53$ ;  $Z = -7.15$ ;  $p < 0.001$ ) indica che lo stress idrico ha un effetto significativo sulle rese del mais. In media il mais non soggetto a stress idrico si è attestato su una resa media di  $6.8 \text{ t ha}^{-1}$  mentre il mais soggetto a stress idrico si è attestato su  $4.1 \text{ t ha}^{-1}$  ( $-40\%$ ). L'indice Cohen's  $d$  è risultato essere pari a  $-3.82$  che corrisponde ad un effetto molto grande nella direzione opposta rispetto al gruppo di controllo (no stress idrico). Inoltre, gli indici  $\tau^2$ ,  $H^2$  e  $I^2$  hanno mostrato valori rispettivamente di  $2.38$ ,  $5.26\%$  e  $0.12$ , suggerendo che la varianza sia significativa tra gli studi inclusi nella metanalisi e che circa l'89% della varianza osservata è dovuta a vera eterogeneità tra gli studi, piuttosto che a casualità (Figura 4.1). Inoltre, gli indici  $\tau^2$ ,  $H^2$  e  $I^2$  hanno mostrato valori rispettivamente di  $2.55$ ,  $9.8$  e  $0.89$  che indicano un livello di eterogeneità piuttosto basso tra gli studi. Infatti, la maggior parte della variabilità può essere attribuita al caso piuttosto che a differenze effettive tra gli studi stessi (Figura 4.4).

Per il mais è stata effettuata anche una *sub-group analysis* inserendo la variabile categoria "presenza/assenza" di patogeni. Come si evince dalla figura 4.4, l'assenza del patogeno nel mais in condizioni di stress idrico ha generato un *overall size effect* pari a  $-3.53$  ( $SE = 0.65$ ;  $Z = -5.454$ ,  $p < 0.001$ ) mentre il mais in condizioni di stress idrico e presenza di patogeno ha generato un *overall size effect* pari a  $-4.9$  ( $SE = 0.58$ ;  $Z = -8.4$ ,  $p < 0.001$ ). Il testo di omogeneità

tra sub-gruppi ha restituito un indice *Cochran's Q* pari a 2.38 ( $p = 0.12$ ), suggerendo che l'eterogeneità osservata è dovuta al caso piuttosto che a differenze reali tra i sub-gruppi. Il rischio di bias nella ricerca sembra essere presente esclusivamente nel sottogruppo con mais in assenza di patogeno.



**Figura 4-4: Forest plot mais**



**Figura 4-5: Forest plot per il mais. In azzurro gli studi con assenza di patogeno, in rosso con presenza di patogeno**



## Capitolo 5

### DISCUSSIONE

#### 5.1 Frumento

Il cambiamento climatico, insieme all'incremento dell'incidenza degli stress biotici e abiotici, porterà a una riduzione significativa delle rese del frumento a livello globale che richiederanno adattamenti. Ad esempio, secondo gli studi di Duan et al. (2024), condotti nella zona dell'altopiano del Loess, che è la più grande area di agricoltura asciutta in Cina, la resa del frumento è già gravemente influenzata dalla disponibilità di acqua. Gli autori per far fronte a questa problematica hanno proposto l'adozione di modelli di coltivazione diversi. Tra gli esempi vi è il modello di coltivazione intensiva che è stato ampiamente utilizzato per aumentare la resa delle colture migliorando l'efficienza dell'uso delle risorse e la densità di semina. Generalmente, diverse densità di semina portano a diverse intensità di competizione intraspecifica, influenzando così le interazioni rizosferiche tra le piante. Duan et al. (2024) evidenziano che un incremento nella densità di semina può intensificare la competizione intraspecifica, comportando un maggiore sfruttamento delle risorse ambientali e, conseguentemente, una riduzione della resa del frumento. Come si evince dallo studio di Nahuelcura et al. (2022) effettuato in Cile, la produzione di frumento è concentrata nelle aree centrali e meridionali. Nel paese si producono circa 1,34 milioni di tonnellate all'anno su una superficie di 266.000 ettari. La coltivazione del frumento è attualmente fortemente influenzata dai cambiamenti climatici, che negli ultimi anni hanno portato a una significativa riduzione delle precipitazioni, causando grandi perdite nella produzione agricola. Nell'articolo di Nahuelcura et al. (2022) si prendono in considerazione le piante di frumento che sono state sottoposte a trattamenti di stress termico, idrico e interazione tra i due stress. La componente della resa più colpita è stata la resa in granella, con riduzioni del 45% quando le piante erano sottoposte a stress da deficit idrico. Questa riduzione può essere causata dagli effetti che lo stress idrico ha sullo sviluppo delle cariossidi, inducendo la sterilità delle spiglette e lo sviluppo di granuli di polline sterili e disfunzionali, che alla fine si traduce in una diminuzione della dimensione o una riduzione della quantità di cariossidi. In base agli studi effettuati da Metwally et al. (2019), le piante coltivate in condizioni di stress idrico hanno una conduttanza

stomatica inferiore per conservare l'acqua. Studi precedenti hanno indicato che lo stress da siccità influisce gravemente sulla crescita delle piante attraverso vari meccanismi, come il ridotto potenziale idrico delle foglie, il ridotto tasso di divisione cellulare e l'alterata relazione tra acqua e nutrienti delle piante. Secondo gli studi di Goicoechea et al. (2016), la disponibilità di acqua può influenzare l'accumulo di proteine di stoccaggio e le concentrazioni di minerali nei chicchi di frumento, influenzando così il valore nutrizionale e la qualità della farina e dei prodotti finali. I danni sulle rese e sulla componente proteica possono variare in base al livello di stress idrico sottoposti alla pianta, oltre al tempo di esposizione a tali deficit idrici. Come si evince dagli studi di Al-Karaki et al. (2004), lo stress idrico diminuisce generalmente la concentrazione di diversi nutrienti negli steli, mediamente nei periodi di accostimento, spigatura e riempimento del frumento. Tuttavia, gli effetti dello stress idrico sono stati significativi solo per il fosforo e lo zinco durante la fase di riempimento del frumento, e per il ferro durante la fase di spigatura. Come riportato nello studio condotto da Rehman et al. (2022), la domanda annuale di frumento sta crescendo a un ritmo rapido (intorno allo +1,6%) mentre la sua resa è diminuita in modo significativo a causa della scarsità d'acqua; che rappresenta uno stress critico per la ridotta produttività delle colture nelle aree aride e semi-aride. Inoltre, lo studio evidenzia come lo stress idrico, stimola la produzione di etilene che riduce l'allungamento delle radici, innesca una fotosintesi insufficiente, un minore apporto di nutrienti e riduce l'approvvigionamento idrico con conseguente crescita stentata e basse rese dei raccolti. In generale la crescita delle piante e la resa delle colture dipendono in modo particolare dalla disponibilità di acqua. Come dimostrato dallo studio di Zhang et al. (2016), lo stress idrico può avere effetti negativi sulla crescita e sulla resa del frumento, andando a ridurre prevalentemente la produzione di biomassa e la resa in granella. In particolare, lo studio sopra citato è stato condotto su frumento coltivato nelle praterie del Canada occidentale, più nello specifico in Alberta. Tale provincia canadese è caratterizzata da stagioni di crescita brevi e frequenti fenomeni di siccità e stress da caldo. Qui il frumento viene coltivato principalmente in condizioni di asciutta, dove stress idrici possono verificarsi in qualsiasi momento durante il ciclo colturale. Come riportato da Imran et al. (2014) in Pakistan, il settore agricolo svolge un ruolo centrale nell'economia. La sua quota nel PIL è del 21% e il 45% della forza lavoro totale del paese è impegnata in questo settore. Attualmente, questo settore sta affrontando alcune sfide emergenti, tra cui la scarsità d'acqua dovuta a cambiamenti climatici. In questo paese, il frumento è la coltura cerealicola più importante e più largamente coltivata ed è anche l'alimento base del paese che contribuisce al 2,7% del PIL. Tra i numerosi fattori responsabili della bassa resa del frumento in Pakistan, la scarsa umidità del suolo è il più importante. Si

prevede che entro il 2025 il Pakistan avrà circa il 32% in meno di acqua rispetto alla situazione attuale, il che porterà a una carenza alimentare significativa per il paese. Come riportato da Abdi et al. (2023) la resa del frumento fortemente influenzate dalla siccità nelle diverse fasi del ciclo colturale. Nel loro studio hanno indicato che lo stress idrico ha ridotto la resa del frumento fino al 60% oltre a numerose alterazioni fisiologiche e biochimiche. È noto che le piante abbiano molte strategie di adattamento come meccanismi di sopravvivenza difensivi contro tale stress. Alcune strategie che il frumento adotta per reagire agli stress idrici sono la regolazione dell'assorbimento e il flusso di acqua nei tessuti vegetali, la produzione di osmoliti e attività antiossidanti e regolazione di meccanismi fotosintetici. Ci sono evidenze che gli aumenti potenziale di resa del frumento sono associati ad un aumento della fotosintesi. Secondo Garmendia et al. (2017) esistono prove sempre più evidenti che per ottenere un aumento significativo del potenziale di rendimento delle colture di cereali, sarà necessario un notevole miglioramento della capacità e/o dell'efficienza fotosintetica.

## 5.2 Mais

Il mais rappresenta circa il 19.5% dell'apporto calorico globale ed è diventato una commodity industriale di grande importanza. Tuttavia, le temperature estreme durante il periodo di crescita minacciano le potenzialità e la stabilità della sua resa. Infatti, le piante di mais sono particolarmente sensibili allo stress termico quando le temperature superano i 30 °C, con una conseguente forte diminuzione della resa in granella se esposte a tali condizioni per periodi prolungati. Diversi studi evidenziano come gli stress termici nelle fasi critiche di crescita del mais riducono la resa in granella, il valore nutrizionale e il reddito netto degli agricoltori. Ad esempio, lo studio di Rezazadeh et al. (2021) ha esaminato le colture trapiantate in vaso sottoposte a diversi livelli di irrigazione: buona irrigazione, stress idrico moderato e severe condizioni di stress idrico. I risultati hanno mostrato che, indipendentemente dal regime di irrigazione, la resa biologica del trapianto era superiore rispetto a quella della semina diretta. Inoltre, lo stress idrico ne ha ridotto sia la resa biologica che la resa in granella. Secondo lo studio condotto da Machado et al. (2000), dove l'effetto dello stress idrico acqua sulla resa del mais è stato valutato imponendo due regimi di irrigazione basati sulla restituzione del 50% di evapotraspirazione (ET) o dell'80% ET, il trapianto è da annoverare tra i metodi in grado di migliorare la resa delle colture sottoposte a stress. Resta comunque aperta la questione della sostenibilità economica del trapianto rispetto alla semina. I risultati degli studi di Ghorchiani

et al. (2018) hanno dimostrato che lo stress da deficit idrico ha inibito la crescita e la biomassa delle parti vegetative e riproduttive e la resa in granella del mais in regioni aride e semi aride. Più nello specifico la resa in granella, in condizione di stress idrico, è diminuita fino al 20,9% rispetto a quella delle piante in condizioni di assenza di stress idrico. Sajedi et al. (2010) ha sottoposto il mais a tre livelli di irrigazione (al 100%, 75% e 50% del fabbisogno idrico della coltura) ed ha ottenuto differenti quantitativi di resa in granella. I risultati degli esperimenti fatti in un arco temporale di due anni, più nello specifico nel 2006 e nel 2007 hanno dimostrato che l'irrigazione ha influenzato significativamente la resa del mais, soprattutto al 50% del fabbisogno idrico della coltura. Come riportato negli studi di Sylvia et al. (1991), a causa delle dimensioni ridotte delle piante sottoposte a stress idrico, ma di una risposta di crescita costante all'inoculazione tramite trattamenti idrici, la risposta proporzionale della resa in granella e della biomassa del mais all'inoculazione con *Glomus etunicatum* è aumentata con l'intensificarsi dello stress idrico.

Gli stress biotici sono fattori biologici che influenzano negativamente la crescita e la produttività delle piante. Nel caso del mais, questi stress includono l'attacco di patogeni, insetti nocivi e infestazioni di erbe infestanti. Malattie come la ruggine comune (*Puccinia sorghi*), la cercosporiosi (*Cercospora zea-maydis*) e il marciume del colletto (*Fusarium* spp.) possono causare gravi danni al mais, riducendo la fotosintesi e danneggiando i tessuti vegetali. Virus come il virus del mosaico nanismo (*Maize dwarf mosaic virus*, MDMV) e il virus del mosaico del mais (*Maize streak virus*, MSV) compromettono lo sviluppo delle piante e la produzione di granella. Malattie batteriche, come la maculatura batterica (*Pseudomonas syringae* pv. *syringae*), possono portare a necrosi fogliare e riduzione della fotosintesi. Tra gli insetti dannosi vanno necessariamente menzionati la Piralide del Mais (*Ostrinia nubilalis*) che arreca danni ingenti causando la perforazione degli steli e delle spighe e gli elateridi (*Agriotes* spp.), noti anche come "ferretti" che attaccano le radici delle giovani piante di mais, provocando danni significativi al sistema radicale e compromettendo l'assorbimento di acqua e nutrienti. Come riportato da Brewer et al. (2014) il calo di rese nel mais è stato ascrivibile al verme del mais e al verme del baco del mais, in uno studio che prende in considerazione due anni, il 2011 e il 2012. Sia il verme del mais, che il verme del baco del mais sono stati rilevati in entrambi gli anni. Il verme del mais è stato il principale parassita delle foglie, rappresentando circa il 90% delle larve rilevate. Lesioni si sono verificate su circa metà delle foglie degli ibridi non-Bt nel 2011, ma le lesioni fogliari sono state limitate, in media, a piccoli fori su poche foglie nel 2012. Nello studio il verme del baco del mais è stato il principale parassita delle spighe, rappresentando il 95% delle larve rilevate. Nello studio di Ortiz-Bustos et al. (2019) è stato

osservato che l'infezione del sistema radicale del mais da parte di *M. maydis* all'inizio della stagione non ha provocato sintomi di avvizzimento tardivo e riduzione della resa, ma gli autori riportano anche un'alterazione del funzionamento delle radici durante l'intera stagione colturale. L'effetto della disponibilità d'acqua sull'incidenza e la gravità della malattia sono difficili da determinare ed è altamente dipendente dalla natura del patogeno. La biomassa secca epigea variava tra 367,4 g per pianta (mais completamente irrigato). La resa variava da 118,2 a 30,8 g per pianta (per mais completamente irrigato). Le piante di mais non inoculate e stressate dall'acqua, hanno mostrato valori intermedi di biomassa epigea e resa. Tuttavia, lo stress idrico ha avuto poco effetto sulla colonizzazione delle radici.

## Capitolo 6

# CONCLUSIONI

Il cambiamento climatico costituisce una seria minaccia per la sicurezza alimentare a livello mondiale. Entro il 2050, sarà necessario aumentare la resa delle colture del 25-70% senza compromettere il funzionamento degli ecosistemi. Dalla fine degli anni '60, il tasso di miglioramento delle rese delle principali colture alimentari come riso, frumento e mais ha subito un rallentamento, e le tendenze attuali non sono sufficienti per soddisfare le esigenze future. Inoltre, i miglioramenti della produttività delle colture devono essere realizzati in un contesto climatico altamente variabile, con un incremento e una maggiore intensità degli eventi climatici estremi come siccità, ondate di calore, gelate, forti piogge e tempeste, previsti per il futuro. Questi eventi climatici estremi influenzeranno negativamente la crescita e lo sviluppo delle piante, i servizi ecosistemici e il benessere umano.

I risultati della metanalisi mostrano come lo stress idrico abbia influenzato significativamente le rese di frumento e mais, due delle colture più importanti a livello mondiale. Gli studi elegibili che hanno analizzato il frumento riportano una resa media di 2,72 t ha<sup>-1</sup> in condizioni di assenza di stress idrico, rese che scendono in media a 1,85 t ha<sup>-1</sup> in presenza di stress idrico, evidenziando un gap di resa del 32%. Come previsto, le perdite di resa per il mais sono state maggiori, essendo una coltura macroterma con elevata esigenza idriche e nutrizionali. In condizioni di assenza di stress, gli articoli elegibili che hanno analizzato il mais riportano una resa media di 6,8 t ha<sup>-1</sup> che scende a 4,1 t ha<sup>-1</sup> in condizioni di stress idrico, evidenziando un calo percentuale intorno al 40% che sale a 49% considerando l'interazione tra stress idrico e presenza patogeni.

In conclusione, gli studi elegibili, seppur non numerosi, evidenziano come le rese potenziali di frumento e mais siano negativamente influenzate dall'azione ed interazione di stress abiotici e biotici. La sfida di colmare il gap tra rese potenziali e reali rappresenta una questione complessa che richiede strategie integrate e soluzioni rapide. Particolare attenzione va riservata alla gestione delle risorse idriche, che incide significativamente sulle colture, specialmente in un contesto di cambiamento climatico. Questo rende indispensabile l'adozione di pratiche agricole sostenibili e l'uso efficiente dell'acqua. La selezione di varietà resistenti,

sebbene potenzialmente efficace, richiede tempi lunghi per essere attuata. Al contrario, una combinazione di pratiche agronomiche avanzate, come l'irrigazione di precisione, può rappresentare una soluzione rapida e in linea con le esigenze attuali di sicurezza alimentare. Tali pratiche possono contribuire a stabilizzare le rese delle colture e ridurre il divario tra rese potenziali e reali.

## Capitolo 7

### BIBLIOGRAFIA

- Abdi, N., Van Biljon, A., Steyn, C., & Labuschagne, M. (2023). Zn Fertilizer and Mycorrhizal Inoculation Effect on Bread Wheat Cultivar Grown under Water Deficit. *Life*, *13*(5). <https://doi.org/10.3390/life13051078>
- Al-Karaki, G., McMichael, B., & Zak, J. (2004). Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza*, *14*(4), 263–269. <https://doi.org/10.1007/s00572-003-0265-2>
- Aziz Khakwani, A., Munir, M., & Abid, M. (2012). GROWTH AND YIELD RESPONSE OF WHEAT VARIETIES TO WATER STRESS AT BOOTING AND ANTHESIS STAGES OF DEVELOPMENT. *Pak. J. Bot*, *44*(3), 879–886.
- Brewer, M. J., Odvody, G. N., Anderson, D. J., & Remmers, J. C. (2014). A comparison of bt transgene, hybrid background, water stress, and insect stress effects on corn leaf and ear injury and subsequent yield. *Environmental Entomology*, *43*(3), 828–839. <https://doi.org/10.1603/EN13309>
- Duan, H.-X., Luo, C.-L., Zhou, R., Zhao, L., Zhu, S.-G., Chen, Y., Zhu, Y., & Xiong, Y.-C. (2024). AM fungus promotes wheat grain filling via improving rhizospheric water & nutrient availability under drought and low density. *Applied Soil Ecology*, *193*, 105159. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105159>
- Ferris, A. C., & Walbot, V. (2021). Understanding ustilago maydis infection of multiple maize organs. In *Journal of Fungi* (Vol. 7, Issue 1, pp. 1–9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jof7010008>
- Garmendia, I., Gogorcena, Y., Aranjuelo, I., & Goicoechea, N. (2017). Responsiveness of Durum Wheat to Mycorrhizal Inoculation Under Different Environmental Scenarios. *Journal of Plant Growth Regulation*, *36*(4), 855–867. <https://doi.org/10.1007/s00344-017-9690-x>
- Ghazian Tafriahi, S., Ayenehband, A., Tavakoli, H., Khorasani, S. K., & Joleini, M. (n.d.). Impacts of Drought Stress and Planting Methods on Sweet Corn Yield and Water Use Efficiency. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, *2013*(2), 23–31.

- Ghorchiani, M., Etesami, H., & Alikhani, H. A. (2018). Improvement of growth and yield of maize under water stress by co-inoculating an arbuscular mycorrhizal fungus and a plant growth promoting rhizobacterium together with phosphate fertilizers. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 258, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.016>
- Goicoechea, N., Bettoni, M. M., Fuertes-Mendizábal, T., González-Murua, C., & Aranjuelo, I. (2016). Durum wheat quality traits affected by mycorrhizal inoculation, water availability and atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Crop and Pasture Science*, 67(2), 147–155. <https://doi.org/10.1071/CP15212>
- Hristov, Jordan., Toreti, Andrea., Pérez Domínguez, Ignacio., Dentener, Franciscus., Fellmann, Thomas., Elleby, Christian., Ceglar, Andrej., Fumagalli, Davide., Niemeyer, Stefan., Cerrani, Iacopo., Panarello, Lorenzo., Bratu, Marian., & European Commission. Joint Research Centre. (2020). *Analysis of climate change impacts on EU agriculture by 2050: JRC PESETA IV project: Task 3*. <https://doi.org/10.2760/121115>
- Imran, M., Ul-Hassan, A., Iqbal, M., & Ullah, E. (2014). Assessing Yield, Water Use Efficiency and Evapotranspiration with Ameliorating Effect of Potassium in Wheat Crop Exposed to Regulated Deficit Irrigation. *Pakistan Journal of Nutrition*, 13(3), 168–175.
- Machado, S., Bynum, E. D., Archer, T. L., Lascano, R. J., Wilson, L. T., Bordovsky, J., Segarra, E., Bronson, K., Nesmith, D. M., & Xu, A. W. (2000). *Spatial and Temporal Variability of Corn Grain Yield: Site-Specific Relationships of Biotic and Abiotic Factors* (Vol. 2).
- Marouf, K., & Naghavi, M. R. (2014). *Effects of Drought Stress on Yield and Yield Components in Maize cultivars (Zea mays L.) Alireza Pour-Aboughadareh Seed and Plant Improvement Institute*. <https://www.researchgate.net/publication/257651520>
- Mereu, V., Gallo, A., Trabucco, A., Carboni, G., & Spano, D. (2021). Modeling high-resolution climate change impacts on wheat and maize in Italy. *Climate Risk Management*, 33, 100339. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100339>
- Metwally, A., \* -Azooz, -Nafady, N., & -El-Enany, A. (2019). *ARBUSCULAR MYCORRHIZAL SYMBIOSIS ALLEVIATES DROUGHT STRESS IMPOSED ON WHEAT PLANTS (TRITICUM AESTIVUM L.)*. [https://doi.org/10.15666/aeer/1706\\_1371313727](https://doi.org/10.15666/aeer/1706_1371313727)
- Nadeem Afzal, S., Haque, M., Ahmedani, M., Bashir, S., & Rahman Rattu, A. U. (2007). ASSESSMENT OF YIELD LOSSES CAUSED BY PUCCINIA STRIIFORMIS TRIGGERING STRIPE RUST IN THE MOST COMMON WHEAT VARIETIES. In *Pak. J. Bot* (Vol. 39, Issue 6).

- Nahuelcura, J., Ruiz, A., Gomez, F., & Cornejo, P. (2022). The effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the phenolic compounds profile, antioxidant activity and grain yields in wheat cultivars growing under hydric stress. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *102*(1), 407–416. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11370>
- Nilahyane, A., Islam, M. A., Mesbah, A. O., Herbert, S. K., & Garcia y Garcia, A. (2020). Growth, water productivity, nutritive value, and physiology responses of silage corn to water stress. *Agronomy Journal*, *112*(3), 1625–1635. <https://doi.org/10.1002/AGJ2.20015>
- Ortiz-Bustos, C. M., López-Bernal, A., Testi, L., & Molinero-Ruiz, L. (2019). Environmental and irrigation conditions can mask the effect of *Magnaportheopsis maydis* on growth and productivity of maize. *Plant Pathology*, *68*(8), 1555–1564. <https://doi.org/10.1111/ppa.13070>
- Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2013). Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. *PLoS ONE*, *8*(6), e66428. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>
- Rehman, M. M. U., Zhu, Y., Abrar, M., Khan, W., Wang, W., Iqbal, A., Khan, A., Chen, Y., Rafiq, M., Tufail, M. A., Ye, J. S., & Xiong, Y. C. (2022). Moisture- and period-dependent interactive effects of plant growth-promoting rhizobacteria and AM fungus on water use and yield formation in dryland wheat. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05641-9>
- Rezazadeh, S., Ilkaee, M., Aghayari, F., Paknejad, F., & Rezaee, M. (2021). Growth, yield, nutrients uptake and anatomical properties of direct seeding and transplanting maize (sL.) plants under arbuscular mycorrhizal fungi and water stress. *Journal of Biological Research (Italy)*, *94*(1), 1–12. <https://doi.org/10.4081/jbr.2021.8883>
- Rice, M. E., & Ostlie, K. (1997). European Corn Borer Management in Field Corn: A Survey of Perceptions and Practices in Iowa and Minnesota. *Journal of Production Agriculture*, *10*(4), 628–634. <https://doi.org/10.2134/jpa1997.0628>
- Sajedi, N. A., Ardakani, M. R., Rejali, F., Mohabbati, F., & Miransari, M. (2010). Yield and yield components of hybrid corn (*Zea mays* L.) as affected by mycorrhizal symbiosis and zinc sulfate under drought stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *16*(4), 343–351. <https://doi.org/10.1007/s12298-010-0035-5>
- Scholar, R. (2017). *KALYANI PUBLISHERS LUDHIANA – NEW DELHI – NOIDA (U.P.) – HYDERABAD – CHENNAI KOLKATA – CUTTACK – GUWAHATI – KOCHI –*

BENGALURU Wheat a Premier Food Crop AMARJEET KUMAR.  
www.kalyanipublishers.co.in

- Sylvia, D. M., Hammond, L. C., Bennett, J. M., Haas, J. H., & Linda, S. B. (1991). Field Response of Maize to a VAM Fungus and Water Management (AJ). *Israel. Florida Agric. Exp. Stn. Journal Series*, 85, 193–198.
- Wang, H., Zheng, C., Ning, S., Cao, C., Li, K., Dang, H., Wu, Y., & Zhang, J. (2023). Impacts of long-term saline water irrigation on soil properties and crop yields under maize-wheat crop rotation. *Agricultural Water Management*, 286, 108383. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108383>
- Zhang, B., Chang, S. X., & Anyia, A. O. (2016). Mycorrhizal inoculation and nitrogen fertilization affect the physiology and growth of spring wheat under two contrasting water regimes. *Plant and Soil*, 398(1–2), 47–57. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2635-x>