



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E
AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO WATER-
ENERGY-FOOD NEXUS ALLA SOSTENIBILITÀ
DELL'IRRIGAZIONE IN FRUMENTO DURO

APPLICATION OF THE WATER-ENERGY-FOOD NEXUS APPROACH TO THE
SUSTAINABILITY OF IRRIGATION IN DURUM WHEAT

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
FRANCESCA LUCCI

Relatore:
PROF. LUIGI LEDDA

Correlatore:
DOTT.SSA CHIARA RIVOSECCHI

ANNO ACCADEMICO 2025 - 2026

ELENCO DELLE TABELLE.....	3
ELENCO DELLE FIGURE	5
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	6
CAPITOLO 1 CAMBIAMENTO CLIMATICO: RIPERCUSSIONI SULLA COLTIVAZIONE DI FRUMENTO DURO IN ITALIA	7
1.1 Cambiamento climatico nel bacino del Mediterraneo e impatti sulla coltivazione del frumento duro	7
1.2 Ruolo dell'irrigazione di soccorso nella coltivazione del frumento duro in risposta ai cambiamenti climatici.....	10
CAPITOLO 2 IL NEXUS WEF E LA SOSTENIBILITÀ DELLA CEREALICOLTURA MEDITERRANEA	14
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI	22
3.1 Area di studio e disegno sperimentale	22
3.2 Rilievi fenologici, fisiologici e componenti della resa.....	27
3.3 Monitoraggio agrometeorologico e del contenuto idrico del suolo	28
3.4 Definizione e calcolo degli indicatori del Water Energy Food Nexus.....	28
3.4.1 Indicatori idrici	28
3.4.2 Indicatori energetici	29
3.4.3 Indicatori alimentari.....	31
3.4.4 Indicatore economico.....	31
3.5 Definizione e calcolo dell'indice sintetico WEFNI	32
CAPITOLO 4 RISULTATI E DISCUSSIONI	35
4.1 Indicatori idrici.....	35
4.2 Indicatori energetici	37
4.3 Indicatori alimentari.....	39
4.4 Indicatore economico	42
4.5 Water-Energy-Food Nexus Index	44
CONCLUSIONI	49
BIBLIOGRAFIA	50

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 3-1: operazioni colturali per la coltivazione di grano duro nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).....	24
Tabella 3-2: dettaglio sulla concimazione del grano duro nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).....	26
Tabella 3-3: dettaglio sull'irrigazione del grano duro nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).....	26
Tabella 3-4: dettaglio sui trattamenti fitosanitari su grano duro nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).....	27
Tabella 3-5: equivalenti energetici per la produzione di colture agricole.....	30
Tabella 4-1: Indicatori idrici nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage); CWU= Crop Water Use, WUE=Water Use Efficiency. ...	36
Tabella 4-2: Indicatori energetici nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage); EC= Energy Consumption, EUE= Energy Use Efficiency.....	39
Tabella 4-3: Indicatori alimentari nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).	42
Tabella 4-4: Indicatore economico nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage); YEE= Yield Economic Efficiency.	44
Tabella 4-5: valori normalizzati degli indicatori nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione	

(CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage); WUE= Water Use Efficiency, EUE= Energy Use Efficiency, YEE= Yield Economic Efficiency..... 44

Tabella 4-6: valori delle dimensioni del Nexus nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage). 47

Tabella 4-7: valori dell'indice WEFNI nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage). 48

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 4-1: grafici radar nel trattamento ZST (Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).....	45
Figura 4-2: grafici radar nel trattamento ECV (Enhanced Conventional) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).....	46
Figura 4-3: grafici radar nel trattamento BAU (Business As Usual) nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).....	46

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

L'agricoltura moderna si trova ad affrontare sfide sempre più complesse legate alla necessità di garantire produttività e sicurezza alimentare riducendo al contempo il consumo di risorse naturali e l'impatto ambientale dei sistemi colturali. La crescente pressione esercitata sui settori idrico ed energetico, aggravata dagli effetti dei cambiamenti climatici e dall'aumento della domanda alimentare globale, rende necessario sviluppare strumenti in grado di valutare in maniera integrata la sostenibilità dei sistemi agricoli.

In questo contesto, il Water-Energy-Food Nexus (WEF Nexus) rappresenta un approccio innovativo che consente di analizzare le interconnessioni tra risorse idriche, risorse energetiche e produzione alimentare. A differenza delle valutazioni tradizionali, che considerano tali componenti separatamente, l'approccio Nexus permette di evidenziare le sinergie e i compromessi esistenti tra i diversi elementi del sistema, fornendo una visione più completa delle prestazioni agronomiche e ambientali delle pratiche di gestione adottate.

La presente tesi si inserisce all'interno di una prova sperimentale condotta presso l'Azienda Agraria Sperimentale "Pasquale Rosati" dell'Università Politecnica delle Marche, nella quale sono state confrontate differenti strategie di gestione agronomica su differenti colture, tipiche dell'ordinamento produttivo marchigiano, con l'obiettivo di ridurre le perdite alimentari nel settore primario, ovvero le perdite di produzione che si verificano in campo.

L'obiettivo del lavoro è applicare l'approccio Water-Energy-Food Nexus alla coltura del frumento duro al fine di valutare l'efficienza e la sostenibilità nell'utilizzo dell'irrigazione. A tale scopo sono stati calcolati specifici indicatori appartenenti alle tre dimensioni water, energy e food del Nexus e successivamente integrati in un indice sintetico (WEF Nexus Index), utili per confrontare le diverse strategie gestionali e individuare quelle maggiormente sostenibili dal punto di vista idrico, energetico e produttivo.

I risultati ottenuti hanno contribuito ad evidenziare l'importanza dell'irrigazione del grano duro e a fornire indicazioni utili per lo sviluppo di sistemi agricoli più efficienti e resilienti, in grado di conciliare produttività, sostenibilità ambientale ed efficientamento dell'uso delle risorse.

Capitolo 1

CAMBIAMENTO CLIMATICO: RIPERCUSSIONI SULLA COLTIVAZIONE DI FRUMENTO DURO IN ITALIA

1.1 Cambiamento climatico nel bacino del Mediterraneo e impatti sulla coltivazione del frumento duro

Il frumento duro (*Triticum durum* Desf.) rappresenta una delle principali specie cerealicole coltivate a livello mondiale. I cereali costituiscono la base dell'alimentazione umana grazie alla loro ubiquitarietà, alla facilità di conservazione delle cariossidi, all'elevato contenuto energetico ed all'ampia versatilità di impiego nell'industria alimentare (pasta, couscous, bulgur, pane e altri prodotti derivati dalla trasformazione della semola) (Ceglar et al., 2021).

Dal punto di vista agronomico, il frumento duro è una specie annuale a ciclo autunno-vernino particolarmente adatta agli ambienti caratterizzati da limitata disponibilità idrica e da elevate temperature durante la fase finale del ciclo colturale. La sua diffusione è strettamente legata alle condizioni climatiche tipiche delle aree mediterranee caratterizzate da inverni generalmente miti e piovosi ed estati calde e aride. Le precipitazioni sono concentrate prevalentemente nei mesi autunnali e invernali (consentendo alla coltura di completare gran parte del proprio sviluppo vegetativo prima dell'inizio della siccità estiva) mentre il periodo estivo è generalmente contraddistinto da elevate temperature e da una marcata riduzione della disponibilità idrica.

Per questi motivi, la sua distribuzione geografica è concentrata prevalentemente nei paesi del Mediterraneo, come l'Algeria, la Turchia, l'Italia, il Marocco, la Siria, la Tunisia, la Francia, la Spagna e la Grecia, che nel complesso ospitano circa il 50% della superficie coltivata e della produzione mondiale (Martínez-Moreno et al., 2022).

La diffusione del frumento duro è inoltre presente in altre aree caratterizzate da condizioni climatiche semi-aride o sub-aride, tra cui alcune regioni del Nord America e dell'Asia centrale. In tali contesti ambientali, la coltura assume un ruolo rilevante sia per il valore economico della produzione sia per il contributo alla sicurezza alimentare delle popolazioni locali.

Nel contesto mediterraneo, l'Italia occupa una posizione di particolare rilevanza all'interno della filiera del frumento duro che rappresenta la materia prima fondamentale per l'industria molitoria e pastaia italiana, uno dei comparti più rappresentativi dell'agroalimentare nazionale

(Dalla Marta et al., 2015). La coltivazione è concentrata prevalentemente nelle regioni centro-meridionali e insulari dove si concentra una parte significativa della produzione nazionale e le condizioni climatiche risultano favorevoli alla coltura.

Secondo i dati EUROSTAT, nel 2025 la produzione italiana di frumento duro ha raggiunto circa 4.4 milioni di tonnellate, collocandosi tra i primi venti produttori di frumento a livello mondiale, nonostante la quantità relativamente limitata di terreno arabile rispetto ad altri paesi. Tuttavia, la capacità di trasformazione dell'industria pastaia nazionale genera una domanda superiore alla disponibilità interna di materia prima, rendendo necessario il ricorso alle importazioni per soddisfare le esigenze della filiera sia sotto il profilo quantitativo sia qualitativo.

Il cambiamento climatico sta determinando profonde modifiche dei regimi termici e pluviometrici a scala globale, con effetti particolarmente marcati nel bacino del Mediterraneo. Le proiezioni climatiche indicano un progressivo incremento delle temperature medie e una riduzione delle precipitazioni, accompagnati da una maggiore frequenza e intensità di eventi estremi quali ondate di calore, periodi siccitosi prolungati e precipitazioni intense concentrate in brevi intervalli temporali (Lazoglou et al., 2024).

Numerosi studi evidenziano come il Mediterraneo rappresenti uno dei principali hotspot climatici a livello mondiale, ovvero una delle aree maggiormente esposte agli effetti del riscaldamento globale, dove gli impatti previsti supereranno la media globale (Cramer et al., 2018). In particolare, le precipitazioni annuali sono previste in diminuzione, con riduzioni che potrebbero raggiungere circa il 4% per ogni grado Celsius di aumento della temperatura media globale (Lazoglou et al., 2024). Contestualmente, l'aumento delle temperature e quindi della domanda evaporativa dell'atmosfera, determinano una crescente pressione sulle risorse idriche disponibili e un incremento della frequenza e della gravità degli episodi di siccità (Vicente-Serrano et al., 2014). Le proiezioni future indicano una progressiva riduzione dell'idoneità climatica di alcune delle attuali aree di coltivazione del frumento duro. Modelli previsionali stimano una contrazione delle superfici potenzialmente idonee alla coltura, del 19% entro il 2050 e del 48% entro il 2100 (Ceglar et al., 2021). Parallelamente, nuove opportunità produttive potrebbero emergere in aree dell'Europa centro-settentrionale caratterizzate da condizioni climatiche progressivamente più favorevoli allo sviluppo della coltura, prima caratterizzate da stagioni di crescita brevi o condizioni termiche insufficienti a completare il ciclo colturale (Ceglar et al., 2019). Tra queste l'Inghilterra, il nord della Francia, il nord della Germania, il nord della Polonia e l'Asia centrale.

Anche il territorio italiano mostra segnali evidenti di tali cambiamenti. Analisi climatiche condotte su lunghe serie storiche hanno evidenziato un progressivo aumento delle temperature, particolarmente marcato nelle regioni centro-meridionali durante il periodo primaverile (Toreti et al., 2010).

Le criticità risultano particolarmente rilevanti nelle regioni centro-meridionali italiane, dove i sistemi colturali sono prevalentemente condotti in condizioni di asciutta (Dalla Marta et al., 2015). In queste aree, la prevista diminuzione delle precipitazioni e l'aumento delle temperature estive potrebbero amplificare il rischio di stress idrico durante le fasi più sensibili del ciclo colturale, con ripercussioni significative sulla sostenibilità economica delle produzioni.

La crescita e lo sviluppo del frumento duro sono regolati dall'interazione tra fattori biotici e abiotici, tra cui le pratiche colturali, la temperatura e la disponibilità idrica (Grosse-Heilmann et al., 2024). La temperatura rappresenta uno dei principali fattori che influenzano lo sviluppo fenologico della coltura, la durata del ciclo e la formazione degli organi riproduttivi attraverso l'accumulo dei gradi giorno (Trudgill et al., 2005). Nello specifico, un aumento delle temperature accelera l'accumulo termico provocando un accorciamento delle fasi fenologiche; tale fenomeno contrae il periodo disponibile per l'intercettazione della radiazione solare, determinando una minore produzione di sostanza secca e riducendo il potenziale produttivo della coltura (Djanaguiraman et al., 2020).

Parallelamente al fattore termico, la disponibilità idrica costituisce uno dei principali elementi di criticità negli ambienti mediterranei, dove la contrazione delle precipitazioni e l'incremento dell'evapotraspirazione potenziale aumentano sensibilmente il rischio di siccità durante il ciclo colturale. L'acqua svolge infatti un ruolo essenziale nei processi di fotosintesi, assorbimento dei nutrienti e traslocazione degli assimilati, con un fabbisogno stimato di circa 500 litri per chilogrammo di sostanza secca prodotta.

L'interazione sinergica tra stress termico e deficit idrico risulta particolarmente penalizzante quando si manifesta in concomitanza con le fasi di levata, spigatura e fioritura. In questi passaggi fenologici, nei quali la domanda evapotraspirativa raggiunge i valori massimi, condizioni termo-idriche critiche compromettono la fertilità delle strutture fiorali e lo sviluppo generale della pianta. Le conseguenze dirette si manifestano attraverso una riduzione del numero di culmi fertili, dell'area fogliare e della biomassa accumulata (Kahiluoto et al., 2019). Infine, durante la successiva fase di riempimento della granella, la concomitanza di caldo intenso e carenza idrica accelera i processi di stretta da caldo, limitando l'accumulo

dei carboidrati di riserva e diminuendo drasticamente sia il peso specifico sia la resa finale del raccolto.

Inoltre, il grano duro è una pianta che risente anche di eccessi idrici che causano asfissia radicale (Dalla Marta et al., 2015).

Le aree cerealicole mediterranee sono inoltre caratterizzate da una notevole variabilità interannuale delle precipitazioni, che rappresenta una delle principali fonti di incertezza per la stabilità delle produzioni agricole; infatti, il grano duro è sensibile sia alle condizioni medie sia alla distribuzione stagionale (Ferrise et al., 2011). In tali contesti, la gestione efficiente delle risorse idriche assume un ruolo strategico per il mantenimento della produttività e della qualità delle produzioni.

Gli effetti del cambiamento climatico non riguardano esclusivamente gli aspetti quantitativi della produzione. Le condizioni di stress termico e idrico possono infatti influenzare anche la qualità tecnologica della granella, modificando i processi di sintesi e accumulo delle proteine di riserva, come le glutenine, responsabili delle caratteristiche merceologiche richieste dall'industria di trasformazione. Di conseguenza, la variabilità climatica assume un ruolo determinante non solo per la stabilità delle rese, ma anche per il mantenimento degli standard qualitativi richiesti dalla filiera.

Alla luce di tali prospettive, l'adattamento dei sistemi colturali rappresenta una necessità strategica per garantire la competitività e la sostenibilità della filiera del frumento duro. L'identificazione di pratiche agronomiche capaci di mitigare gli effetti degli stress climatici costituisce pertanto una delle principali sfide per la ricerca e per il settore produttivo nei prossimi decenni sfruttando diversi approcci, tra cui modelli di simulazione colturale, analisi statistiche e strumenti di previsione che consentono di individuare i fattori ambientali maggiormente determinanti e di supportare le decisioni agronomiche.

1.2 Ruolo dell'irrigazione di soccorso nella coltivazione del frumento duro in risposta ai cambiamenti climatici

La coltivazione del frumento duro nelle aree mediterranee è tradizionalmente condotta in asciutta. Tale gestione deriva da fattori di natura ambientale, infrastrutturale, economica e sociale. Gran parte delle superfici investite a frumento duro è localizzata in aree collinari e interne dell'Italia centro-meridionale e insulare, dove la disponibilità di infrastrutture irrigue risulta spesso limitata e le risorse idriche disponibili vengono prioritariamente destinate a colture più remunerative (come colture orticole, alberi da frutto) (Cao et al., 2019). Inoltre, in

queste zone, storicamente grandi latifondi, si è sviluppata una cerealicoltura estensiva in cui si limitano investimenti anche a scapito di basse rese ma puntando su grandi superfici.

Dal punto di vista agronomico, la diffusione della cerealicoltura in asciutta è stata storicamente favorita dalla capacità della coltura di completare gran parte del proprio ciclo sfruttando le precipitazioni autunno-invernali. Tuttavia, l'attuale evoluzione climatica sta modificando profondamente questo equilibrio, determinando una crescente frequenza di deficit idrici durante il ciclo colturale. Le proiezioni climatiche indicano infatti un aumento della domanda irrigua nelle principali aree cerealicole mediterranee come conseguenza della diminuzione delle precipitazioni e dell'incremento dell'evapotraspirazione atmosferica (Konzmann M, 2013). In particolare, entro la fine del secolo, il fabbisogno irriguo nell'area mediterranea potrebbe aumentare in misura compresa tra il 4% e il 18%, in funzione di aumento di intensità di riscaldamento di 2°C e 5°C, rispettivamente (Cramer et al., 2018).

In questo contesto, l'irrigazione rappresenta una delle principali strategie di adattamento disponibili per il settore agricolo al fine di mitigare gli effetti della crescente variabilità climatica e della riduzione della disponibilità idrica (Mueller, 2012). Lo stress idrico costituisce uno dei principali fattori responsabili del divario tra resa potenziale e resa reale effettivamente ottenuta in campo. Tale differenza è intesa come la differenza tra la produzione massima ottenibile da una coltura non sottoposta a stress abiotici e biotici, e la produzione effettiva raccolta dall'agricoltore (Lobell et al., 2009; Neumann et al., 2010).

L'adozione di un regime irriguo completo (full irrigation) su grano duro nel Mediterraneo risulta difficilmente proponibile per ragioni sia biologiche sia economiche. In primo luogo, trattandosi di una coltura a ciclo autunno-vernino, il grano duro è intrinsecamente strutturato per sfuggire ai periodi di massimo stress idrico estivo; inoltre, sebbene i fenomeni siccitosi siano aumentati a causa del cambiamento climatico, essi non si manifestano in modo costante durante il ciclo colturale. Sotto il profilo puramente economico ed energetico, una gestione interamente irrigua comporterebbe costi fissi e variabili talmente elevati da non essere compensati dagli incrementi produttivi ottenibili.

Al contrario, il frumento duro possiede una spiccata capacità fisiologica di valorizzare ridotti apporti idrici se somministrati in precisi momenti critici, traducendoli in significativi incrementi di resa. Per tali motivi, l'irrigazione di soccorso (supplementary irrigation) si configura come la scelta più strategica ed efficiente per l'adattamento della coltura ai nuovi scenari macroclimatici. Questo approccio prevede l'applicazione di volumi irrigui limitati esclusivamente durante specifiche fasi fenologiche caratterizzate da un'elevata sensibilità al deficit idrico. L'obiettivo fondamentale, pertanto, non risiede nel convertire il frumento duro

in una coltura irrigua, bensì nell'intervenire strategicamente in quei determinati momenti in cui lo stress determinerebbe le maggiori perdite in termini quantitativi e qualitativi (Rivosecchi et al., 2024; Schils et al., 2018)

I modelli previsionali indicano che la quota di produzione irrigua di frumento duro è verosimilmente destinata ad espandersi nell'intero bacino del Mediterraneo nei prossimi decenni, ponendo il settore di fronte alla sfida impellente di garantire pratiche agronomiche sostenibili in scenari climatici sempre più severi (Peters Haugrud et al., 2025). In questo contesto, una gestione irrigua ottimizzata ed efficiente diventa essenziale non solo per garantire la resilienza del sistema colturale, ma anche per minimizzare l'impronta energetica e l'impatto ambientale legato al prelievo e alla distribuzione delle risorse idriche (Mohammadi, 2024).

Questo approccio consente di mantenere la coltura in condizioni di deficit idrico controllato durante le fasi meno sensibili del ciclo colturale, riservando l'intervento irriguo ai periodi in cui la disponibilità idrica rappresenta il fattore realmente limitante per la formazione della resa. In tal modo è possibile ottimizzare l'impiego delle risorse idriche disponibili, incrementando l'efficienza d'uso dell'acqua (Water Use Efficiency, WUE) e migliorando la stabilità produttiva della coltura. L'efficacia dell'irrigazione di soccorso non deve essere valutata esclusivamente in termini di incremento assoluto della resa unitaria, ma anche in relazione all'efficienza dell'acqua impiegata. In contesti caratterizzati da una cronica scarsità della risorsa, l'obiettivo agronomico consiste nel massimizzare la produzione ottenuta per unità di acqua utilizzata. In questa prospettiva, modesti apporti irrigui effettuati nei momenti critici del ciclo possono determinare incrementi produttivi proporzionalmente superiori al volume d'acqua distribuito, contribuendo a migliorare l'efficienza complessiva dell'intero sistema colturale (Rivosecchi et al., 2024; Rosa et al., 2018).

A supporto di questa strategia, numerosi studi hanno evidenziato come le tesi irrigue di soccorso possano contribuire significativamente alla riduzione del divario produttivo nelle aree soggette a siccità temporanee. Ad esempio, Li et al., 2021 ha riportato come in diverse contee della provincia di Gansu, in Cina, caratterizzata da una precipitazione media annua estremamente ridotta (pari a circa 289 mm), l'irrigazione supplementare di frumento e mais – attuata raccogliendo e conservando l'acqua piovana in serbatoi sotterranei – abbia aumentato le rese del 28–88% a fronte di un incremento dell'input idrico di appena il 12–25%. Tali risultati sul campo evidenziano in modo inequivocabile come l'efficacia dell'irrigazione non dipenda strettamente dai grandi volumi erogati, quanto piuttosto dalla corretta individuazione delle fasi fenologiche e delle condizioni ambientali nelle quali effettuare l'intervento.

L'irrigazione di soccorso può inoltre contribuire al mantenimento della qualità della produzione, favorendo un più regolare riempimento della granella e una migliore efficienza nell'assorbimento e nella traslocazione dei nutrienti verso gli organi di accumulo (Zhao et al., 2024). In un contesto caratterizzato da crescente pressione sulle risorse naturali, l'adozione di strategie irrigue mirate rappresenta pertanto uno strumento potenzialmente efficace per migliorare la resilienza della coltura e sostenere la competitività della filiera del frumento duro nelle aree mediterranee (Rivosecchi et al., 2024; Tack et al., 2017).

Capitolo 2

IL NEXUS WEF E LA SOSTENIBILITÀ DELLA CEREALICOLTURA MEDITERRANEA

La definizione più nota di sviluppo sostenibile è quella proposta dal Rapporto Brundtland, secondo cui esso consiste in un “modello di sviluppo in grado di soddisfare i bisogni delle generazioni presenti senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri”(Report of the World Commission on Environment and Development). In termini generali, la sostenibilità può essere intesa come la capacità di un sistema produttivo di mantenere nel tempo equilibrio ambientale, solidità economica ed equità sociale, garantendo un utilizzo efficiente delle risorse naturali e preservandone la disponibilità nel lungo periodo.

Nel settore agricolo, il concetto di sostenibilità viene frequentemente associato alla sola dimensione ambientale, con particolare attenzione alla riduzione delle emissioni, dell'inquinamento, del consumo idrico e dell'utilizzo di input chimici. Tuttavia, un sistema agricolo può essere considerato sostenibile solo quando le sue performance ambientali risultano compatibili anche con la redditività economica e con il benessere sociale delle comunità coinvolte. La gestione sostenibile richiede pertanto una valutazione congiunta di queste tre componenti, legando la disponibilità delle risorse alle loro modalità di utilizzo attraverso l'adozione di strumenti innovativi e modelli gestionali capaci di migliorare l'efficienza nell'impiego di acqua, energia e nutrienti, mantenendo al contempo adeguati livelli di produttività aziendale (Fabiani et al., 2020).

L'aumento della produttività agricola appare necessario in relazione alla crescita della popolazione mondiale e alla necessità di garantire la sicurezza alimentare, definita dalla FAO come una condizione in cui tutte le persone dispongono stabilmente di accesso fisico, sociale ed economico a un'alimentazione adeguata, sicura e nutriente (FAO, 2002).

In quest'ottica, il principio guida dello sviluppo sostenibile può essere sintetizzato nella necessità di incrementare la produzione riducendo contestualmente il consumo di risorse. Per raggiungere tale obiettivo, le strategie di sviluppo devono essere pianificate a diverse scale territoriali e basarsi sulla comprensione delle relazioni esistenti tra disponibilità idrica, domanda energetica, uso del suolo e produzione alimentare (Flammini, 2014).

Questo approccio sistemico costituisce il fondamento teorico del Nexus Water–Energy–Food (WEF), uno strumento concettuale che analizza le relazioni tra risorse idriche, energetiche e alimentari al fine di individuare modelli produttivi più efficienti, resilienti e sostenibili.

Acqua, energia e cibo rappresentano risorse fondamentali per il benessere umano. La loro crescente scarsità e la forte interdipendenza che le caratterizza rendono necessaria una gestione integrata, fondata sul riconoscimento delle profonde connessioni che le legano reciprocamente.

Sotto il profilo storico, il termine Nexus è stato introdotto negli anni Ottanta nell’ambito di un progetto delle Nazioni Unite volto a descrivere le connessioni tra produzione energetica e alimentare, per poi essere formalizzato durante la Conferenza di Bonn del 2011 come approccio cardine per lo sviluppo sostenibile (Hoff, 2011). Successivamente, la FAO ha definito il Nexus WEF come uno strumento concettuale utile per comprendere la complessità delle relazioni tra i principali sistemi di risorse naturali, dai quali dipendono gli obiettivi economici, sociali e ambientali dell’umanità, garantendo al contempo la tutela degli ecosistemi (FAO, 2014).

Dal punto di vista analitico, il Nexus viene interpretato come un approccio multidisciplinare e sistemico che rifiuta la scomposizione della realtà in compartimenti stagni, considerando i sistemi idrici, energetici e alimentari come componenti strettamente interconnessi e anche interdipendenti (Bazilian et al., 2011). Come evidenziato da Endo et al., 2017, esso non rappresenta solo un modello teorico, ma si configura come un vero e proprio processo di integrazione tra soggetti, competenze e settori differenti, finalizzato a favorire decisioni coordinate e coerenti (Endo et al., 2017).

Le relazioni che caratterizzano il triangolo del Nexus WEF sono molteplici, assimilabili ai tre vertici di un sistema in cui ogni intervento realizzato su una componente produce inevitabilmente effetti sulle altre (El-Gafy, 2017). L’acqua, ad esempio, rappresenta un fattore indispensabile per la produzione agricola, l’allevamento e l’intera filiera alimentare, dalla produzione alla distribuzione. Al contempo, il settore idrico mostra una forte dipendenza energetica poiché l’estrazione, pompaggio, il trasporto, la desalinizzazione e la distribuzione dell’acqua a scopi irrigui o ai centri urbani richiedono un crescente quantitativo di energia (Li et al., 2021).

Parallelamente, i sistemi di generazione energetica dipendono strettamente dalla risorsa idrica, utilizzata sia nei processi di raffreddamento delle centrali termoelettriche – che rappresentano una delle principali fonti di prelievo di acqua dolce nei paesi industrializzati –

sia nella produzione termoelettrica (Kenny et al., 2009). Il sistema alimentare a sua volta richiede energia per le lavorazioni meccanizzate in campo, la produzione di fertilizzanti e la logistica, ma contribuisce attivamente al bilancio energetico attraverso la produzione di biomassa destinata alla generazione di bioenergia, come etanolo, biodiesel e biogas, rafforzando ulteriormente le interconnessioni tra le tre risorse (El-Gafy, 2017).

Al triangolo WEF si aggancia un'ulteriore risorsa strategica e limitata: il suolo. Sebbene spesso trascurata nei modelli tradizionali del Nexus, la disponibilità di terra influenza direttamente sia la produzione alimentare sia quella energetica, creando competizioni spaziali tra le colture destinate al consumo umano e quelle dedicate ai biocarburanti, oltre che a sottrarre spazio per la realizzazione di infrastrutture di stoccaggio idrico (Von Grebmer, 2012).

Infine, anche il legame diretto tra cibo ed energia assume particolare rilevanza, specialmente nella logistica post-raccolta; una quota significativa dei consumi energetici del sistema alimentare è infatti legata ai trasporti e alla distribuzione su larga scala, motivo per cui la valorizzazione delle filiere corte e delle produzioni locali viene oggi considerata una strategia chiave per abbattere l'impronta energetica, preservando la freschezza del prodotto (Y. Zhang et al., 2022).

Nonostante l'evidenza di queste interconnessioni, le politiche pubbliche e i processi decisionali continuano spesso a essere sviluppati secondo logiche settoriali, gestiti all'interno dei rispettivi ministeri e apparati amministrativi, con limitata integrazione tra i diversi ambiti di gestione delle risorse (Ringler et al., 2013). È in questo divario che il Nexus WEF si configura come uno strumento operativo indispensabile per supportare la definizione di politiche intersettoriali e strategie win-win-win; l'obiettivo è individuare soluzioni integrate capaci di massimizzare l'efficienza d'uso complessiva delle risorse, riducendo al minimo gli impatti economici, sociali e ambientali delle decisioni adottate (Kurian M, 2017; Ringler et al., 2013).

L'urgenza di implementare modelli integrati è strettamente legata all'evoluzione delle dinamiche demografiche e socioeconomiche globali, che proiettano una pressione senza precedenti sulle risorse naturali. Secondo le stime delle Nazioni Unite, la popolazione mondiale potrebbe raggiungere circa 10 miliardi di persone entro il 2050 (United Nations, 2017). Questo incremento demografico, combinato con il progressivo miglioramento delle condizioni economiche di numerose aree del pianeta, guiderà una crescita elevata di beni di prima necessità (Chai et al., 2020). I modelli previsionali indicano che, entro il 2030, la richiesta globale di cibo, acqua ed energia potrebbe aumentare rispettivamente di circa il 50%, oltre il 30% e il 40% rispetto ai livelli attuali (Walsh et al., 2018). Soddisfare tali fabbisogni

alimentari comporterà un crescente utilizzo di acqua ed energia, all'interno di scenari già oggi soggetti da scarsità e limitazioni (El-Gafy, 2017).

Ringler et al., 2013 pone attenzione su come la crescente scarsità delle risorse naturali e la fluttuazione dei mercati – con il conseguente aumento dei costi associati ad acqua, energia, terra e alimenti - rendano sempre più necessaria una visione integrata e intersettoriale dei processi decisionali.

Un esempio emblematico delle interconnessioni tra sistemi alimentari, energetici e ambientali è rappresentato dal fenomeno dello spreco alimentare. Le stime della FAO indicano che circa un terzo degli alimenti prodotti a livello mondiale non viene consumato. Oltre alla perdita diretta di cibo, tale fenomeno comporta infatti uno spreco delle risorse impiegate lungo l'intera filiera produttiva, inclusi acqua, energia, suolo e input agricoli, nonché ulteriori consumi energetici associati alla gestione e allo smaltimento dei rifiuti.

L'analisi del Nexus WEF richiede tuttavia di considerare i cosiddetti trade-off, ovvero i compromessi che possono emergere nel momento in cui si cerca di bilanciare obiettivi economici, sociali e ambientali. Una gestione sostenibile delle risorse richiede infatti la capacità di individuare soluzioni che minimizzino gli impatti negativi sui diversi comparti del sistema, tenendo in considerazione gli effetti sulle fasce di popolazione più vulnerabili; il benessere dei piccoli produttori e delle comunità a basso reddito è strettamente interrelato, ma spesso in conflitto, con il mantenimento dell'integrità ambientale (Ringler et al., 2013). Una mancata pianificazione rischierebbe di innalzare le barriere di accesso ai beni di prima necessità, rallentando lo sviluppo economico e innescando delle tensioni sociali e geopolitiche. Per questi motivi, numerosi Paesi stanno progressivamente orientando le proprie politiche verso modelli di sviluppo fondati sulla conservazione delle risorse naturali e sul miglioramento dell'efficienza dei sistemi produttivi (Farajian et al., 2018).

All'interno di questo mosaico, l'agricoltura occupa una posizione centrale, poiché dipende fortemente dalla disponibilità di terra, acqua ed energia e, allo stesso tempo, è l'unica responsabile della sicurezza alimentare globale. Il settore agricolo utilizza circa il 70% delle risorse globali di acqua dolce e assorbe circa il 30% dei consumi energetici mondiali lungo l'intera filiera produttiva e di approvvigionamento alimentare (Liu et al., 2019).

L'attività agricola comporta infatti un notevole impiego di risorse sia attraverso flussi diretti (carburanti per le lavorazioni di campo, energia elettrica per il pompaggio irriguo) sia indiretti (energia per la sintesi dei fertilizzanti e dei fitofarmaci, per la produzione delle sementi e per la fabbricazione delle macchine agricole) lungo tutte le fasi di lavorazione, raccolta, condizionamento, stoccaggio e logistica post-raccolta (Talukder et al., 2019).

Complessivamente, tali attività contribuiscono in maniera significativa alle emissioni globali di gas serra, con una quota stimata compresa tra il 20 e il 35% dei gas serra mondiali (Tian et al., 2016).

Tra le principali operazioni colturali responsabili del consumo di risorse si distinguono meccanizzazione, irrigazione e fertilizzazione che rappresentano i fattori maggiormente influenti sia dal punto di vista energetico sia da quello ambientale (Canaj & Mehmeti, 2022). In particolare, le lavorazioni del terreno e la meccanizzazione agricola richiedono consistenti quantità di combustibili fossili (soprattutto diesel, energia non rinnovabile) e, in alcuni casi, di energia elettrica, contribuendo in modo rilevante al bilancio economico e al fabbisogno energetico aziendale. Il legame tra agricoltura ed energia assume anche una forte rilevanza economica: le variazioni dei prezzi influenzano direttamente i costi di produzione agricola e, di conseguenza, il prezzo finale degli alimenti (Bazilian et al., 2011). A conferma di questa relazione, è stata osservata una forte correlazione tra l'andamento dei prezzi dei prodotti alimentari e quello delle fonti energetiche nel mercato internazionale; è stato calcolato un coefficiente di correlazione pari a 0.94 tra gli indici dei prezzi del cibo e quelli del petrolio nel periodo compreso tra il 2002 e il 2012 (Ringler et al., 2013).

Per comprendere e migliorare la sostenibilità dei sistemi agricoli, negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi indicatori finalizzati a quantificare l'efficienza nell'utilizzo delle risorse. Gli indicatori idrici consentono di valutare il consumo e l'efficienza d'uso dell'acqua, mentre quelli energetici permettono di stimare i fabbisogni energetici diretti e indiretti associati alle diverse attività agricole. Parallelamente, gli indicatori produttivi e ambientali forniscono informazioni sulla capacità del sistema di mantenere elevati livelli produttivi limitando al contempo gli impatti sull'ambiente. Tradizionalmente, le valutazioni dei sistemi colturali tendono a concentrarsi su una singola dimensione (come la produttività, il consumo idrico o l'impiego di energia); tuttavia, questo approccio non consente di cogliere le relazioni esistenti tra le diverse componenti del sistema agricolo, anzi potrebbe portare a conclusioni distorte. Un miglioramento dell'efficienza irrigua potrebbe richiedere maggiori consumi energetici, così come un incremento delle rese produttive potrebbe determinare un aumento degli impatti ambientali. Per questa ragione, il Nexus WEF promuove l'impiego di metodologie multi-indicatore capaci di integrare simultaneamente le tre dimensioni all'interno di un unico quadro analitico (Li et al., 2021). L'impiego di indici integrati, modelli di simulazione e metodi di valutazione bio-economica risulta essenziale per processare dati interdisciplinari e confrontare differenti scenari gestionali, supportando le scelte strategiche di lungo periodo (Endo et al., 2017; Flammini, 2014).

Nello specifico per la componente idrica vengono comunemente considerati gli indicatori consumo totale di acqua, il consumo idrico indiretto associato agli input produttivi, la produttività idrica espressa come rapporto tra resa e acqua utilizzata (Water Use Efficiency, WUE) e la produttività economica dell'acqua, calcolata in relazione al reddito generato per unità di risorsa consumata. Per la componente energetica vengono valutati i consumi diretti come carburanti, energia elettrica e lavoro umano impiegati nelle operazioni agricole, sia quelli indiretti, associati alla produzione e all'utilizzo di fertilizzanti, fitofarmaci, sementi e macchinari (Karamian et al., 2021). Tra gli indicatori più utilizzati rientrano la produttività energetica (Energy Use Efficiency, EUE) e la produttività economica dell'energia. La dimensione alimentare viene generalmente rappresentata attraverso indicatori di resa produttiva e parametri qualitativi delle produzioni agricole, fondamentali per valutare l'effettiva capacità del sistema di garantire sicurezza alimentare.

In questo ambito si colloca il Water–Energy–Food Nexus Index (WEFNI), un indice sintetico sviluppato per valutare in maniera integrata le prestazioni dei sistemi agricoli rispetto all'utilizzo congiunto delle tre risorse. Numerosi studi in letteratura ne documentano l'efficacia come strumento di supporto alle decisioni gestionali e di orientamento agronomico (El-Gafy, 2017; Fabiani et al., 2020; Karamian et al., 2021; Li et al., 2021). Il WEFNI viene generalmente costruito attraverso procedure di normalizzazione e ponderazione degli indicatori selezionati, consentendo di sintetizzare in un unico valore adimensionale le prestazioni complessive del sistema culturale (Karamian et al., 2021). Valori più elevati dell'indice indicano una maggiore capacità del sistema di mantenere un equilibrio stabile ed efficiente tra utilizzo delle risorse idriche, consumo energetico e produzione alimentare (Li et al., 2021).

Nonostante il crescente interesse scientifico, le applicazioni del Nexus WEF risultano ancora relativamente limitate. Diversi autori evidenziano pertanto la necessità di sviluppare ulteriori studi orientati alla gestione aziendale, in grado di tradurre i principi del Nexus in strumenti operativi di supporto alle decisioni del singolo agricoltore per la pianificazione e l'ottimizzazione degli input produttivi (Han et al., 2020). La transizione verso questi modelli nasce dalla consapevolezza che le sfide ambientali future non possano trovare risposta in soluzioni settoriali isolate o in rimedi passivi a breve termine (Zhang et al., 2022). Infine, Keairns et al, 2016 sottolinea la necessità di una revisione critica dei metodi attualmente esistenti per la valutazione del Nexus, al fine di identificare le migliori pratiche e sviluppare strumenti sempre più accessibili e applicabili ai diversi contesti territoriali e produttivi.

Nel bacino del Mediterraneo, la crescente scarsità delle risorse idriche rappresenta una delle principali criticità per la sostenibilità dei sistemi agricoli, in particolare per le colture cerealicole coltivate prevalentemente in asciutta, come il frumento duro. Gli effetti del cambiamento climatico, descritti nel capitolo precedente, stanno infatti aumentando la frequenza e l'intensità degli stress idrici durante il ciclo colturale, con ripercussioni sia sulla stabilità delle rese sia sulla qualità delle produzioni. Nonostante i progressi registrati nella produttività agricola negli ultimi decenni, gli eventi siccitosi continuano a rappresentare una delle principali cause di riduzione delle produzioni a livello mondiale. Le perdite produttive associate alla siccità influenzano non soltanto la disponibilità di derrate alimentari, ma anche il funzionamento dei mercati agricoli, la dinamica dei prezzi e gli impatti ambientali legati ai sistemi di produzione alimentare, con potenziali conseguenze sulla sicurezza alimentare globale (Zhang et al., 2018).

In questo scenario, l'irrigazione di soccorso rappresenta una delle possibili strategie di adattamento per ridurre gli effetti dello stress idrico e aumentare la resilienza della coltura. Tuttavia, l'introduzione dell'irrigazione comporta inevitabilmente un aumento dell'utilizzo di risorse idriche ed energetiche, poiché le operazioni di approvvigionamento, pompaggio e la distribuzione dell'acqua richiedono infatti energia, determinando un incremento dei costi di produzione e della pressione esercitata sulle risorse naturali disponibili. A tali consumi si aggiungono quelli associati alle altre operazioni colturali. Ad esempio, per la coltivazione del frumento sono stati stimati consumi energetici di 3400 MJ per le operazioni di semina, mentre per lavorazione del terreno e raccolta rispettivamente 800 e 650 MJ, evidenziando come la produzione cerealicola sia fortemente dipendente dall'impiego di energia lungo l'intero ciclo produttivo (Chang Y, 2016).

Di conseguenza, qualsiasi intervento volto ad aumentare la disponibilità idrica per la coltura deve essere valutato considerando anche gli effetti sul fabbisogno energetico complessivo del sistema. Un incremento della produttività ottenuto attraverso l'irrigazione potrebbe infatti comportare un aumento dei consumi energetici e degli impatti ambientali associati alle operazioni agricole. Per tale motivo, la sostenibilità dell'irrigazione di soccorso non può essere valutata esclusivamente sulla base dell'aumento delle rese produttive, ma è necessario adottare un approccio più ampio che consideri simultaneamente la produzione alimentare ottenuta, le risorse idriche impiegate e l'energia necessaria per realizzare l'intervento irriguo.

Come evidenziato da recenti studi, nelle aree mediterranee caratterizzate da crescente scarsità idrica risulta sempre più necessario adottare approcci di valutazione integrata in grado

di considerare contemporaneamente l'efficienza d'uso dell'acqua, il consumo energetico e la produzione agricola (Marrocu et al., 2025). In tale contesto, il Nexus WEF offre il quadro metodologico ideale per processare tali interdipendenze. L'applicazione dell'approccio Nexus al frumento duro sottoposto a irrigazione di soccorso può quindi fornire informazioni utili per comprendere se e in quale misura tale pratica rappresenti una soluzione sostenibile per affrontare le sfide poste dal cambiamento climatico.

Capitolo 3

MATERIALI E METODI

3.1 Area di studio e disegno sperimentale

L'attività sperimentale è stata condotta presso l'Azienda Agraria Sperimentale "Pasquale Rosati" dell'Università Politecnica delle Marche, localizzata nel comune di Agugliano (AN) (43°32'39.8" N; 13°21'39.5" E). L'area è caratterizzata da un clima temperato di tipo oceanico con influenze sub-mediterranee; la precipitazione media annua si attesta intorno agli 800 mm, mentre la temperatura media annuale è pari a 15.4 °C.

Il suolo dell'area sperimentale presenta una tessitura franco-argillosa, con pH pari a 8.4. Le principali caratteristiche chimico-fisiche comprendono un contenuto di carbonio organico dell'1.5%, azoto totale dello 0.1%, fosforo disponibile pari a 5.1 mg kg⁻¹ e potassio scambiabile di 204.6 mg kg⁻¹. Il punto di appassimento e la capacità di campo risultano rispettivamente del 17% e del 35.2% in peso.

La prova parcellare presenta tre appezzamenti contigui e omogenei, ciascuno avente dimensioni di 120 × 30 m, in cui sono state confrontate tre differenti strategie gestionali caratterizzate da un diverso livello di mitigazione degli stress colturali. La strategia Business-as-Usual (BAU) rappresenta la gestione ordinaria adottata dagli agricoltori del territorio marchigiano e prevede assenza di irrigazione, fertilizzazione convenzionale e difesa fitosanitaria secondo i principi della difesa integrata della regione Marche. La strategia Enhanced Conventional (ECV) si differenzia dalla precedente per l'introduzione dell'irrigazione di soccorso, mantenendo invariati gli altri interventi agronomici. Infine, la strategia Zero-Stress (ZST) è stata progettata per ridurre al minimo gli stress idrici, nutrizionali e biotici attraverso un sistema di fertirrigazione e un programma dedicato di protezione delle colture.

Ciascuna strategia gestionale è stata combinata con due differenti sistemi di lavorazione del terreno: aratura convenzionale a una profondità di 40 cm (CT=conventional tillage) e minima lavorazione fino a 15 cm (MT= minimum tillage). Abbiamo in totale un numero di sei trattamenti, che esprimeremo come: BAU-CT (Business as Usual – Conventional Tillage), BAU-MT (Business as Usual – Minimum Tillage), ECV-CT (Enhanced Conventional –

Conventional Tillage), ECV-MT (Enhanced Conventional – Minimum Tillage), ZST-CT (Zero Stress - Conventional Tillage), ZST-MT (Zero Stress - Minimum Tillage).

I trattamenti sono stati applicati a quattro colture inserite in una rotazione quadriennale: frumento duro (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*), girasole (*Helianthus annuus* L.), favino (*Vicia faba minor* L.) e mais (*Zea mays* L.).

Il disegno sperimentale adottato è di tipo split-plot con tre repliche. La lavorazione del terreno costituisce il fattore assegnato alle parcelle principali (15×120 m), mentre le colture rappresentano il fattore assegnato alle sub-parcelle (4×8 m). La struttura sperimentale è stata replicata tre volte, una per ciascuna strategia gestionale, per un totale di 72 sub-parcelle. Al fine di limitare possibili interferenze tra i trattamenti, le parcelle sono state separate da fasce di rispetto larghe 8 m e le operazioni di distribuzione dei prodotti fitosanitari e irrigui sono state effettuate in condizioni di assenza di vento.

Nel presente studio è stata considerata esclusivamente la coltura del frumento duro, varietà Tirex, nell'annata agraria 2023-2024. Nella tabella 3-1 sono riportate le operazioni colturali e le date di esecuzione fatte nei vari trattamenti.

Tabella 3-1: operazioni colturali per la coltivazione di grano duro nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).

Trattamento	Operazione colturale	CT	MT
BAU	Aratura	5 Ott 23	-
	Erpice a dischi	-	12 Ott 23
	Coltivatore chisel	19 Ott 23	19 Ott 23
	Erpice rotante	30 Ott 23	-
	Semina	4 Dic 23	4 Dic 23
	Concimazione N	9 Feb 24	9 Feb 24
	Concimazione N	26 Feb 24	26 Feb 24
	Concimazione N	29 Mar 24	29 Mar 24
	Diserbo	5 Apr 24	5 Apr 24
	Fungicida	28 Apr 24	28 Apr 24
	Raccolta	26 Giu 24	26 Giu 24
ECV	Aratura	5 Ott 23	-
	Erpice a dischi	-	12 Ott 23
	Coltivatore chisel	19 Ott 23	19 Ott 23
	Erpice rotante	30 Ott 23	-
	Concimazione N-P	4 Dic 23	4 Dic 23
	Semina	4 Dic 23	4 Dic 23
	Concimazione S-N	9 Feb 24	9 Feb 24
	Irrigazione	21 Feb 24	21 Feb 24
	Concimazione S-N	26 Feb 24	26 Feb 24
	Concimazione N	29 Mar 24	29 Mar 24
	Diserbo	5 Apr 24	5 Apr 24
	Fungicida	28 Apr 24	28 Apr 24
	Raccolta	26 Giu 24	26 Giu 24
ZST	Aratura	5 Ott 23	-
	Erpice a dischi	-	12 Ott 23
	Coltivatore chisel	19 Ott 23	19 Ott 23
	Erpice rotante	30 Ott 23	-
	Concimazione N-P	4 Dic 23	4 Dic 23
	Semina	4 Dic 23	4 Dic 23
	Concimazione S-N	9 Feb 24	9 Feb 24

Irrigazione	20 Feb 24	20 Feb 24
Concimazione S-N	26 Feb 24	26 Feb 24
Insetticida	15 Mar 24	15 Mar 24
Fertirrigazione	25 Mar 24	25 Mar 24
Diserbo	5 Apr 24	5 Apr 24
Insetticida e fungicida	10 Apr 24	10 Apr 24
Fertirrigazione	11 Apr 24	11 Apr 24
Fertirrigazione	22 Apr 24	22 Apr 24
Fungicida	28 Apr 24	28 Apr 24
Fertirrigazione	2 Mag 24	2 Mag 24
Raccolta	26 Giu 24	26 Giu 24

Di seguito nella tabella 3-2 sono riportati i dettagli delle tipologie, titoli e quantità di fertilizzanti impiegati nei vari trattamenti.

Per quanto riguarda la concimazione non ci sono state differenze tra le due tipologie di lavorazioni nei tre trattamenti. La concimazione in ZST è stata eseguita con fertirrigazione, ad eccezione delle prime tre concimazioni eseguite con spandiconcime come per gli altri trattamenti.

Tabella 3-2: dettaglio sulla concimazione del grano duro nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).

Trattamento	Fertilizzazione	CT	MT
BAU	100kg/ha nitrato ammonico 27	9 Feb 24	9 Feb 24
	100kg/ha nitrato ammonico 27	26 Feb 24	26 Feb 24
	200kg/ha urea 46	29 Mar 24	29 Mar 24
ECV	250 Kg/ha nutrimila p 18-20	4 Dic 23	4 Dic 23
	125kg/ha sulfotec 34-0-0 + 28 SO ₃	9 Feb 24	9 Feb 24
	125kg/ha sulfotec 34-0-0 + 28 SO ₃	26 Feb 24	26 Feb 24
	200kg/ha urea 46	29 Mar 24	29 Mar 24
ZST	250 Kg/ha map 12-52	4 Dic 23	4 Dic 23
	125kg/ha sulfotec 34-0-0 + 28 SO ₃	9 Feb 24	9 Feb 24
	125kg/ha sulfotec 34-0-0 + 28 SO ₃	26 Feb 24	26 Feb 24
	fertirr. 215 kg/ha nutriliquid pro 30-0-0	25 Mar 24	25 Mar 24
	fertirr. 108 kg/ha nutriliquid pro 30-0-0	11 Apr 24	11 Apr 24
	fertirr. 108 kg/ha nutriliquid pro 30-0-0	22 Apr 24	22 Apr 24
	fertirr. 108 kg/ha nutriliquid pro 30-0-0	2 Mag 24	2 Mag 24

Sono stati inoltre riportati la quantità di acqua irrigua distribuita e la modalità di irrigazione nella tabella 3-3.

In ZST l'irrigazione è avvenuta mediante fertirrigazione (manichetta). In ECV è stata eseguita un'irrigazione di soccorso con irrigatore ad ala bagnante per aspersione. Non vi sono state differenze irrigue all'interno dei tre trattamenti nelle due lavorazioni.

Tabella 3-3: dettaglio sull'irrigazione del grano duro nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).

Trattamento	Irrigazione	CT	MT
BAU	-	-	-
ECV	15 mm per aspersione ala bagnante	21 Feb 24	21 Feb 24
ZST	15 mm microirrigazione	20 Feb 24	20 Feb 24
	10 mm fertirrigazione	25 Mar 24	25 Mar 24
	10 mm fertirrigazione	11 Apr 24	11 Apr 24

15 mm fertirrigazione	22 Apr 24	22 Apr 24
15 mm fertirrigazione	2 Mag 24	2 Mag 24

Sono riportati nella tabella 3-4 i trattamenti fitosanitari eseguiti e i prodotti commerciali con le quantità distribuite.

Non vi sono state differenze nei tre trattamenti tra CT e MT; ECV e BAU si eguagliano nella gestione fitosanitaria.

Tabella 3-4: dettaglio sui trattamenti fitosanitari su grano duro nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).

Trattamento	Trattamento fitosanitario	CT	MT
BAU	erbicida floranet 1,5 l/ha	5 Apr 24	5 Apr 24
	fungicida elatus era 1l/ha	28 Apr 24	28 Apr 24
ECV	erbicida floranet 1,5 l/ha	5 Apr 24	5 Apr 24
	fungicida elatus era 1l/ha	28 Apr 24	28 Apr 24
ZST	insetticida pirimor 50 0,26 kg/ha	15 Mar 24	15 Mar 24
	erbicida floranet 1,5 l/ha	5 Apr 24	5 Apr 24
	insett. mavrik 0,2 l/ha + fung. prosaro plus 1l/ha	10 Apr 24	10 Apr 24
	fungicida elatus era 1l/ha	28 Apr 24	28 Apr 24

3.2 Rilievi fenologici, fisiologici e componenti della resa

Nel corso della stagione colturale 2023-2024 la coltura del frumento duro è stata periodicamente monitorata per valutarne lo stato fisiologico e lo stadio fenologico durante l'intero ciclo di sviluppo. Le osservazioni fenologiche sono state eseguite con frequenza settimanale e la determinazione delle diverse fasi di crescita è stata effettuata utilizzando la scala BBCH, ampiamente impiegata per la descrizione delle fasi di sviluppo delle colture cerealicole.

Al termine del ciclo colturale è stata misurata la resa del campione di dieci piante per ogni parcella e poi raccolta l'intera parcella grazie all'utilizzo della mietitrebbia parcellare. Sono stati misurati parametri qualitativi come il contenuto proteico della granella e l'indice di glutine mediante analizzatore NIR (near infrared).

3.3 Monitoraggio agrometeorologico e del contenuto idrico del suolo

Per il monitoraggio delle condizioni ambientali e colturali e quindi per la gestione dell'irrigazione è stata predisposta una rete di sensori installata all'interno dell'area sperimentale. In particolare, è stata utilizzata una stazione meteorologica Agrisense (Netsens S.r.l., Italia) per la registrazione dei principali parametri agrometeorologici, affiancata da sonde Drill & Drop (Sentek Technologies, Australia) per il monitoraggio del profilo del suolo.

Le sonde sono state impiegate per la misura del contenuto idrico volumetrico, della temperatura del terreno e della concentrazione ionica a differenti profondità lungo il profilo, con punti di rilevamento distanziati di 10 cm. I dati raccolti sono stati trasmessi attraverso una rete di comunicazione LoRaWAN mediante protocollo SDI-12 e successivamente archiviati su una piattaforma cloud dedicata.

3.4 Definizione e calcolo degli indicatori del Water Energy Food Nexus

La valutazione del Water-Energy-Food Nexus (WEF Nexus) è stata effettuata attraverso il calcolo di indicatori rappresentativi delle componenti idrica, energetica, alimentare, ai quali è stata integrata la dimensione economica per valutare la sostenibilità finanziaria del sistema colturale.

3.4.1 Indicatori idrici

La componente idrica del Water-Energy-Food Nexus della coltivazione di grano duro nei sei trattamenti è stata valutata considerando il consumo totale di acqua e l'efficienza d'uso dell'acqua.

Nello studio sono stati considerati esclusivamente i consumi idrici diretti, e non quelli indiretti, come il consumo idrico per la produzione degli input impiegati per la coltivazione di grano duro. Di conseguenza il consumo idrico totale della coltura (Crop Water Use, CWU) è stato calcolato come il volume totale di acqua utilizzata dalla coltura durante il ciclo produttivo, espresso in $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ secondo la formula:

$$CWU = P_e + I$$

dove:

- CWU è il consumo idrico totale della coltura ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$);
- P_e sono le precipitazioni durante il ciclo colturale ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$);
- I è il volume irriguo distribuito ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$);

L'efficienza d'uso dell'acqua (Water Use Efficiency, WUE) è stata calcolata come rapporto tra la resa della granella e il consumo idrico totale della coltura, secondo la seguente formula:

$$WUE = \frac{Y}{W}$$

dove:

- Y rappresenta la resa della granella (kg ha^{-1});
- W rappresenta il consumo idrico totale della coltura ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), sopra calcolato.

L'unità di misura della WUE è espressa in kg m^{-3} e indica la quantità di granella prodotta per unità di acqua utilizzata dalla coltura.

3.4.2 Indicatori energetici

La componente energetica del Water-Energy-Food Nexus della coltivazione di grano duro nei sei trattamenti è stata valutata mediante il calcolo del consumo energetico totale e dell'efficienza d'uso dell'energia.

Nello studio sono stati considerati esclusivamente i consumi energetici diretti, e non quelli indiretti, come il consumo energetico per la produzione degli input impiegati per la coltivazione di grano duro. Di conseguenza il consumo energetico totale (Energy Consumption, EC) è stato determinato come somma degli apporti energetici associati alle principali operazioni, includendo il consumo di gasolio, l'eventuale energia elettrica impiegata e il lavoro umano:

$$EC = E_{diesel} + E_{elettricità} + E_{lavoro\ umano}$$

dove:

- E_{diesel} rappresenta l'energia derivante dal consumo di carburante (MJ ha^{-1}); il quantitativo di diesel impiegato per le operazioni colturali nei sei trattamenti è stato ricavato dal Decreto Masaf del 30/12/2015 “Determinazione dei consumi medi dei prodotti petroliferi impiegati in lavori agricoli ai fini delle applicazioni delle aliquote ridotte o dell'esenzione dell'accisa”.
- $E_{elettricità}$ rappresenta l'energia elettrica impiegata nelle operazioni colturali (MJ ha^{-1}); comprende la voce irrigazione quindi energia necessaria per il pompaggio dell'acqua, che varia in funzione delle infrastrutture locali (Rodríguez Díaz et al., 2011).
- $E_{lavoro\ umano}$ rappresenta l'energia associata al lavoro umano (MJ ha^{-1}); questa varia in funzione della meccanizzazione, della coltura, dello sviluppo economico (Fabiani et al., 2020). Il quantitativo di ore lavorative umane necessarie per la coltivazione di grano duro è stato ricavato dalla tabella per la determinazione del tempo - lavoro relativo all'attività agricola allegata al DGR n.6 del 2013 Regione Marche.

Nel caso del nostro sito di sperimentazione l'irrigazione avviene sfruttando acqua piovana da un vaso artificiale, tramite una motopompa a diesel; di conseguenza il consumo

energetico legato all'irrigazione non viene conteggiato nel fattore E elettricità ma nel fattore E diesel; il trasporto nei campi avviene senza ausilio di pompa, ma sfruttando la forza di gravità in quanto questi si trovano più in basso rispetto all'invaso, quindi senza alcun consumo energetico.

Per ciascun input, i dati rilevati sono stati convertiti in unità energetiche (MJ ha^{-1}) mediante specifici coefficienti energetici reperiti in letteratura. I coefficienti utilizzati per la conversione sono riportati nella tabella 3-5 e sono stati desunti da Karamian et al., 2021. È importante sottolineare che questo approccio si concentra esclusivamente sulla dimensione quantitativa dell'uso dell'energia e non discrimina tra fonti rinnovabili e non rinnovabili.

Tabella 3-5: equivalenti energetici per la produzione di colture agricole

Classe	Equivalente energetico (MJ)
<i>A. Energia degli input diretti</i>	
<i>Lavoro umano</i>	1.96 h^{-1}
<i>Carburante diesel</i>	$56,31 \text{ l}^{-1}$
<i>Elettricità</i>	$3,6 \text{ KWh}^{-1}$
<i>B. Energia degli output</i>	
<i>Granella di frumento</i>	$14,7 \text{ kg}^{-1}$

L'efficienza d'uso dell'energia (Energy Use Efficiency, EUE) è stata calcolata come rapporto tra l'energia contenuta nella produzione ottenuta (E_{output}) e il consumo energetico totale (EC):

$$EUE = \frac{E_{output}}{EC}$$

dove:

- E_{output} rappresenta l'energia contenuta nella granella prodotta (MJ ha^{-1}); il contenuto energetico della granella è stato calcolato considerando la resa in granella e il coefficiente energetico riportato in tabella 3-1;
- EC rappresenta il consumo energetico totale del sistema colturale (MJ ha^{-1}), sopra calcolato.

L'EUE è un indicatore adimensionale che esprime il rapporto tra il contenuto energetico complessivo accumulato nella granella e l'energia totale consumata lungo per produrla.

3.4.3 Indicatori alimentari

La componente alimentare del WEF Nexus è stata descritta attraverso parametri quantitativi e qualitativi della produzione di frumento duro nei sei trattamenti, fondamentale per valutare l'effettiva capacità del sistema di garantire sicurezza alimentare.

L'indicatore quantitativo principale è rappresentato dalla resa della granella, espressa in t ha⁻¹.

Gli indicatori qualitativi considerati sono il contenuto proteico della granella espresso in % sul tal quale e l'indice di glutine, anch'esso espresso in % sul tal quale, utilizzati per valutare la qualità della produzione ottenuta nei sei trattamenti.

3.4.4 Indicatore economico

In tale elaborato si è deciso di aggiungere un indicatore economico al nesso WEF, per ampliare la sostenibilità anche dal punto di vista economico. La valutazione economica della coltivazione di grano duro dei sei trattamenti è stata effettuata mediante l'efficienza economica della resa, (Yield Economic Efficiency, YEE), utilizzata per descrivere la convenienza economica delle differenti strategie colturali.

L'indice è stato calcolato con la seguente formula:

$$YEE = \frac{Y}{C_{tot}}$$

dove:

- Y rappresenta la resa della granella (t ha⁻¹);
- C_{tot} i costi totali di produzione della coltivazione di frumento duro (€ ha⁻¹).

L'unità di misura della YEE è t €⁻¹ e indica la quantità di prodotto (espressa in tonnellate di granella) ottenuta per ogni euro investito nei costi totali di produzione del sistema colturale.

Nei costi totali di produzione sono considerati i costi delle lavorazioni effettuate e i costi degli input impiegati, come riportato in formula:

$$C_{tot} = C_{lavorazioni} + C_{input}$$

I costi delle lavorazioni sono stati stimati mediante il tariffario APIMA e comprendono le voci riportate in formula:

$$C_{lavorazioni} = C_{preparazione} + C_{semina} + C_{concimazione} + C_{trattamenti} + C_{irrigazione} + C_{raccolta}$$

dove:

- $C_{preparazione}$ è il costo delle operazioni effettuate per la preparazione del letto di semina (€ ha⁻¹);

- C_{semina} è il costo dell'operazione di semina (€ ha⁻¹);
- $C_{concimazione}$ è il costo dell'operazione di concimazione (€ ha⁻¹);
- $C_{trattamenti}$ è il costo delle operazioni di trattamenti fitosanitari (€ ha⁻¹);
- $C_{irrigazione}$ è il costo dell'operazione di distribuzione dell'acqua, variabile in base alle modalità di irrigazione (€ ha⁻¹);
- $C_{raccolta}$ è il costo dell'operazione mietitrebbiatura (€ ha⁻¹).

Gli importi del tariffario APIMA sono comprensivi dei costi relativi all'operatore agricolo, al carburante, alle quote di ammortamento e manutenzione delle macchine, agli interessi sul capitale e agli altri oneri previsti dal tariffario.

La voce costo operatore agricolo viene associata unicamente alle operazioni meccanizzate perché il grano duro è una coltura molto meccanizzabile e le poche lavorazioni manuali necessarie incidono poco sulla voce costi.

I costi degli input impiegati sono stati calcolati mediante i costi effettivamente sostenuti dall'azienda sperimentale per la coltivazione di grano duro, secondo la seguente formula:

$$C_{input} = C_{sementi} + C_{fertilizzanti} + C_{fitofarmaci} + C_{acqua}$$

dove:

- $C_{sementi}$ è il costo delle sementi impiegate (€ ha⁻¹);
- $C_{fertilizzanti}$ è il costo dei fertilizzanti distribuiti durante il ciclo colturale (€ ha⁻¹);
- $C_{fitofarmaci}$ è il costo dei prodotti fitosanitari impiegati (€ ha⁻¹);
- C_{acqua} è il costo della risorsa idrica utilizzata per l'irrigazione e/o la fertirrigazione (€ ha⁻¹);

Tutti i costi fanno riferimento ad acquisti effettuati dall'azienda agraria al netto di IVA (solo imponibile).

L'approccio adottato consente di confrontare i sei trattamenti considerando sia i costi diretti degli input sia i costi operativi delle lavorazioni colturali, fornendo una valutazione complessiva dell'efficienza economica delle diverse strategie irrigue e fertilizzanti.

3.5 Definizione e calcolo dell'indice sintetico WEFNI

Al fine di valutare in maniera integrata le prestazioni dei sei trattamenti oggetto di studio, è stato costruito un indice sintetico Water-Energy-Food Nexus Index (WEFNI), adattando la metodologia proposta da Juwana et al., 2012. L'indice consente di sintetizzare in un unico

valore le diverse dimensioni del Nexus water-energy-food, facilitando il confronto tra i diversi trattamenti considerati e quindi i diversi sistemi irrigui.

L'analisi è stata condotta considerando sei indicatori, suddivisi nelle quattro dimensioni del Nexus. La dimensione idrica è rappresentata dall'efficienza d'uso dell'acqua (Water Use Efficiency, WUE); la dimensione energetica è rappresentata dall'efficienza energetica (Energy Use Efficiency, EUE); la dimensione economica è rappresentata dall'indicatore efficienza economica della resa (Yield Economic Efficiency, YEE), mentre la dimensione alimentare include la resa in granella, il contenuto proteico e il contenuto di glutine.

Sono stati esclusi da questa analisi gli indicatori riguardanti il consumo idrico totale della coltura (Crop Water Use, CWU) e il consumo energetico totale (Energy Consumption, EC); questo perché inserire contemporaneamente sia un indicatore di consumo assoluto sia l'indicatore di efficienza corrispondente genera un problema metodologico chiamato ridondanza/co-linearità.

Poiché gli indicatori considerati sono espressi in unità di misura differenti, deve essere effettuata una normalizzazione mediante il metodo Min-Max riscalo.

Gli indicatori sono caratterizzati da una relazione positiva con la sostenibilità per cui la normalizzazione è avvenuta secondo l'espressione della massimizzazione:

$$X_i = 0,5 + \left(1,5 \times \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}\right)$$

dove:

- X_i = valore normalizzato dell'indicatore;
- x_i = valore osservato per il trattamento considerato;
- x_{min} = valore minimo assunto da quell'indicatore tra tutti i trattamenti;
- x_{max} = valore massimo assunto da quell'indicatore tra tutti i trattamenti

In questo modo, per tutti gli indicatori, valori normalizzati più elevati corrispondono a prestazioni migliori, mentre valori più bassi indicano prestazioni peggiori.

Successivamente, gli indicatori normalizzati sono stati aggregati all'interno delle rispettive dimensioni del Nexus. Per evitare che la diversa numerosità degli indicatori influenzasse il risultato finale, è stato attribuito lo stesso peso alle quattro dimensioni considerate (Water, Energy, Food ed Economic), ciascuna pari al 25% del valore finale dell'indice.

L'indice sintetico WEFNI è stato quindi calcolato come media ponderata delle quattro dimensioni:

$$WEFNI = \sum (w_j \times D_j)$$

dove:

- D_j = punteggio della dimensione j-esima (Water, Energy, Food, Economic);
- w_j = peso attribuito alla dimensione j-esima;

Essendo $w_j = 0,25$ per tutte le dimensioni la formula si trasforma in:

$$WEFNI = 0,25 \times Water + 0,25 \times Energy + 0,25 \times Food + 0,25 \times Economic$$

Poiché i pesi sommano a 1, la formula può essere semplificata come:

$$WEFNI = \frac{Water + Energy + Food + Economic}{4}$$

dove le singole dimensioni sono definite dalla media degli indicatori utilizzati, come espresso nelle formule:

$$Water = WUE_n$$

$$Energy = EUE_n$$

$$Food = \frac{Resa_n + Proteine_n + Glutine_n}{3}$$

$$Economic = YEE_n$$

Il valore del WEFNI varia tra 0.5 e 2. Valori prossimi a 2 indicano sistemi colturali caratterizzati da migliori prestazioni complessive in termini di utilizzo delle risorse idriche ed energetiche, produttività agricola, qualità della produzione e performance economiche, mentre valori prossimi a 0.5 indicano condizioni meno favorevoli.

Il WEFNI è stato calcolato per ciascuno dei sei trattamenti sperimentali.

Capitolo 4

RISULTATI E DISCUSSIONI

In questo capitolo vengono riportati i risultati degli indicatori analizzati per la valutazione del Nexus Water-Energy-Food (WEF) nella coltivazione di frumento duro all'interno dei sei trattamenti sperimentali adottati. Nella parte finale del capitolo viene presentata la sintesi degli indici WEFNI calcolati.

4.1 Indicatori idrici

In Tabella 4-1 sono riportati i risultati relativi agli indicatori della dimensione idrica: la CWU (Crop Water Use, consumo idrico totale della coltura) e la WUE (Water Use Efficiency, efficienza d'uso dell'acqua).

Per quanto riguarda l'indicatore CWU, si riscontrano variazioni tra i tre regimi gestionali (ZST, ECV, BAU), mentre i consumi si mantengono identici tra le due tipologie di lavorazione del terreno (CT, MT) nello stesso trattamento (Tabella 4-1). Trattandosi di un indicatore di consumo, la performance ottimale — ovvero la CWU più contenuta — è stata registrata nel trattamento BAU con $2050 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Rispetto a questo valore, il trattamento ECV mostra un incremento dei consumi idrici del 7.32%; ciò è dovuto all'introduzione di un'irrigazione di soccorso di 15 mm somministrata tramite ala gocciolante. Il consumo idrico più elevato si rileva invece nel trattamento ZST, con un aumento del 31.71% rispetto a BAU, a causa del consistente apporto irriguo totale (65 mm distribuiti tramite microirrigazione nel corso del ciclo colturale).

Per l'indicatore WUE, la massima efficienza d'uso della risorsa idrica rispetto alla produzione di granella è stata raggiunta dalla tesi ECV CT (3.85 kg m^{-3}) come visibile in tabella 4-1. Tutte le restanti tesi mostrano una contrazione dell'efficienza rispetto alla performance migliore: la tesi BAU CT subisce un calo di solo 0.28%, seguita da ECV MT (-13.33%) e da BAU MT (-16.73%). I livelli di efficienza idrica più bassi si concentrano nel trattamento ZST, il quale fa registrare una WUE inferiore del 17.27% nella tesi ZST MT e del 19.38% nella tesi ZST CT rispetto al valore di ECV CT.

Tabella 4-1: Indicatori idrici nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage); CWU= Crop Water Use, WUE=Water Use Efficiency.

Trattamenti	CWU (m ³ ha ⁻¹)	WUE (kg m ³ ⁻¹)
ZST CT	2700	3.11
ZST MT	2700	3.19
ECV CT	2200	3.85
ECV MT	2200	3.34
BAU CT	2050	3.84
BAU MT	2050	3.21

Ciò dimostra come un singolo intervento irriguo di soccorso, distribuito in una fase fenologica critica e combinato alla lavorazione convenzionale del terreno (ECV CT), sia in grado di ottimizzare l'efficienza idrica della coltura e, di conseguenza, la resa finale in granella rispetto alla gestione in asciutta (BAU CT). In questa prospettiva, l'apporto di modesti volumi idrici nei momenti di massimo fabbisogno evapotraspirativo della pianta può determinare incrementi produttivi (+7.1% in ECV CT rispetto a BAU CT) proporzionalmente superiori rispetto alla risorsa distribuita, confermando come l'irrigazione strategica rappresenti una soluzione chiave per elevare la WUE complessiva del sistema colturale (Rosa et al., 2018; Rivosecchi et al., 2024).

Per quanto riguarda la performance di uso dell'acqua registrata dalla tesi BAU CT, l'efficacia dimostrata nonostante la conduzione in asciutta è da imputare a una sincronia tra gli apporti idrici naturali e i fabbisogni della coltura. Questa dinamica appare strettamente correlata alle precipitazioni che, sebbene caratterizzate da un volume totale inferiore alla media di lungo periodo, hanno mostrato una distribuzione favorevole lungo la stagione di crescita del frumento. Nello specifico, gli eventi piovosi si sono concentrati in corrispondenza di fasi fenologiche cruciali — quali l'accestimento, la fioritura e il riempimento della granella (sviluppo del frutto) —, stadi notoriamente determinanti per la definizione delle componenti biometriche della resa (Rivosecchi et al., 2024).

Al contrario, l'irrigazione di soccorso combinata alla minima lavorazione (ECV MT) non ha garantito i medesimi livelli di efficienza idrica riscontrati con la lavorazione tradizionale; ciò conferma come la definizione dei volumi e del calendario ottimale degli apporti irrigui dipenda strettamente dalle altre pratiche di gestione agronomica del campo, incluse le modalità di lavorazione del terreno (Guan et al., 2014; Wang et al., 2018). I risultati evidenziano come la minima lavorazione (MT) abbia esercitato un impatto negativo sull'efficienza d'uso

dell'acqua in tutte le tesi sperimentali. Questo fenomeno si spiega col fatto che le diverse modalità di gestione del suolo alterano la porosità e la densità apparente del terreno, modificando sia la ritenzione idrica sia la resistenza meccanica all'esplorazione radicale; di conseguenza, la pianta subisce una limitazione nella capacità di assorbimento idrico e nutritivo che si riflette in una minore efficienza complessiva (Blanco-Canqui & Ruis, 2018; Guan et al., 2015). Inoltre, si conferma una delle funzioni principali dell'aratura in suoli marchigiani tendenzialmente argillosi, cioè quella di decompattare il terreno.

In conclusione, i risultati confermano che la coltura del grano duro negli areali marchigiani non può essere gestita come una coltura a irrigazione totale (full irrigation). L'abbondante input idrico distribuito nel trattamento ZST (65 mm) non ha infatti generato alcun incremento sulla resa finale, traducendosi unicamente nel peggioramento dei valori di efficienza d'uso dell'acqua (WUE), che si sono attestati come i più bassi tra tutte le tesi. Tale dinamica trova un perfetto riscontro scientifico in quanto dimostrato da Marrocu et al., 2025 il quale evidenzia come il passaggio a un regime irriguo completo non comporti benefici produttivi rispetto a una gestione idrica parziale o in deficit (deficit irrigation).

4.2 Indicatori energetici

In Tabella 4-2 sono descritti i risultati del calcolo degli indicatori della dimensione energetica: l'EC (Energy Consumption, consumo energetico totale) e l'EUE (Energy Use Efficiency, efficienza d'uso dell'energia).

L'indicatore EC evidenzia variazioni di forte entità tra i sei trattamenti (Tabella 4-2). Il consumo energetico più contenuto (valore ottimale) è stato riscontrato nella tesi BAU MT (8773 MJ ha⁻¹). La tesi ECV MT evidenzia un incremento dei consumi del 36.52%, principalmente a causa del carburante impiegato per l'irrigazione di soccorso e per la concimazione aggiuntiva. Nei sistemi a lavorazione convenzionale (CT), l'aggravio energetico risulta decisamente più marcato: +51.39% per BAU CT e +87.92% per ECV CT. Tale discrepanza è interamente riconducibile alle differenti gestioni agronomiche e alle operazioni di preparazione del letto di semina; l'aratura profonda, infatti, richiede un dispendio di gasolio notevolmente superiore rispetto alla minima lavorazione, riflettendosi direttamente sull'input energetico totale. I consumi più elevati in assoluto si sono registrati nei trattamenti ZST, con incrementi pari al 617.55% per ZST MT e al 662.52% per ZST CT rispetto alla tesi ottimale. Questo aumento del consumo energetico è causato dall'ingente volume di carburante richiesto per il pompaggio dell'acqua nei sistemi di microirrigazione e fertirrigazione, oltre che per le lavorazioni aggiuntive necessarie ad azzerare gli stress biotici e abiotici. In sintesi, il consumo

energetico complessivo in questo studio varia in funzione della voce carburanti; la quota relativa all'energia elettrica si azzera, poiché i consumi irrigui sono stati interamente computati come gasolio della motopompa, mentre il lavoro umano fornisce un contributo ampiamente minoritario. Questa ripartizione trova un riscontro in Marrocu et al., 2025, i cui risultati confermano come il bilancio energetico globale sia dominato dall'uso di carburante per i mezzi agricoli. In linea con tali evidenze, anche Fabiani et al., 2020 sottolinea come i combustibili fossili costituiscano l'input diretto più rilevante nella produzione del grano duro, arrivando a incidere tra il 50% e il 58% sul computo energetico totale. Ciò conferma come la dipendenza dal gasolio rappresenti il principale elemento di criticità per l'efficienza di qualsiasi scenario colturale.

L'efficienza d'uso dell'energia (EUE), misurata rispetto al contenuto energetico della granella, raggiunge il massimo nella tesi BAU MT (11.03), seguita da ECV MT che si posiziona come seconda miglior performance (Tabella 4-2). Contrazioni più marcate rispetto alla tesi migliore si registrano in BAU CT (-20.90%) e in ECV CT (-31.42%), mentre i livelli minimi si osservano nei trattamenti ZST, con decrementi dell'81.76% (ZST MT) e dell'83.28% (ZST CT) rispetto al risultato migliore (Tabella 4-2).

Il miglior risultato è stato ottenuto dalla tesi BAU MT; ciò dimostra che, nella maggior parte dei trattamenti, la maggiore resa registrata, e quindi il maggior contenuto energetico accumulato nella granella, non ha compensato il massiccio impiego di input energetici. Questo trend impone una riflessione sulla necessità di razionalizzare le operazioni colturali, ad esempio sostituendo gli input più energivori come il diesel attraverso l'ammodernamento del parco macchine con motorizzazioni a fonti rinnovabili o l'adozione di attrezzature per lavorazioni combinate.

L'introduzione dell'irrigazione comporta inevitabilmente un aumento dell'utilizzo di risorse energetiche. L'approvvigionamento, il pompaggio e la distribuzione dell'acqua richiedono infatti energia, determinando un incremento dei costi di produzione e della pressione esercitata sulle risorse naturali disponibili, ai quali si aggiungono i consumi associati alle restanti operazioni colturali (Chang Y, 2016). Ciononostante, il fatto che la seconda miglior performance energetica globale sia stata registrata in ECV MT evidenzia un aspetto cruciale: l'apporto energetico supplementare richiesto dall'irrigazione di soccorso e dalla quota integrativa di azoto è stato agronomicamente efficiente. L'incremento della resa (e del conseguente output energetico della granella) ha infatti quasi interamente giustificato il surplus di input investito, confermando che gli interventi mirati nei momenti di reale necessità della

coltura permettono di coniugare la produttività della pianta e l'efficienza energetica del sistema.

Di contro, l'efficienza energetica si abbassa vertiginosamente in ZST MT e ZST CT, avvicinandosi a un indice prossimo all'unità, in cui l'energia spesa eguaglia quasi quella prodotta. Tale evidenza conferma che un dispendio di input così massiccio nel grano duro non trova una contropartita in termini di incremento produttivo, avvalorando la necessità di orientare la gestione colturale verso strategie agronomiche a minor impatto energetico. In quest'ottica, aumentare l'efficienza nell'uso delle risorse (risparmiando input a parità di output) si configura come una scelta strategica imprescindibile per affrontare la sfida globale di ridurre il divario di resa delle colture, senza generare un'ulteriore espansione delle superfici agricole o l'aggravamento del degrado ambientale (Foley et al., 2011; Silva et al., 2021; Francioni et al., 2024).

Tabella 4-2: Indicatori energetici nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage); EC= Energy Consumption, EUE= Energy Use Efficiency.

Trattamenti	EC (MJ ha ⁻¹)	EUE
ZST CT	66896	1.84
ZST MT	62952	2.01
ECV CT	16486	7.56
ECV MT	11976	9.02
BAU CT	13281	8.72
BAU MT	8773	11.03

4.3 Indicatori alimentari

La Tabella 4-3 espone i risultati relativi agli indicatori della dimensione alimentare quantitativa e qualitativa: resa in granella, contenuto percentuale di proteine e contenuto percentuale di glutine. I parametri sono espressi su granella con umidità media del 12%.

La produttività quantitativa più elevata è stata registrata nella tesi ZST MT, grazie all'elevata distribuzione di input. Rispetto a questo valore massimo, la tesi ECV CT mostra una riduzione contenuta, pari all'1.51%, seguita da ZST CT con un decremento del 2.56% e da BAU CT con una riduzione dell'8.48%. Nonostante nella tesi ECV CT siano stati impiegati meno input energetici, nutritivi e idrici, questa ha registrato una resa maggiore di ZST CT. Inoltre, nella tesi ECV CT si è registrata una resa maggiore di BAU CT impiegando una concimazione e un'irrigazione aggiuntiva. Le contrazioni produttive più severe si sono

verificate nei regimi condotti in minima lavorazione (MT), con riduzioni della resa del 14.63% in ECV MT e del 23.58% in BAU MT rispetto alla tesi più produttiva (Tabella 4-3).

La tesi con la maggior resa in granella è stata ZST MT, in cui si mirava ad azzerare gli stress biotici e abiotici, con un elevato impiego di input idrici, nutritivi ed energetici. Come riportato da Abdelraouf et al., 2013 l'impiego dei maggiori input permette di ottenere i massimi valori assoluti di resa in granella. Inoltre, fondamentale non è solo la quantità di input utilizzati per raggiungere rese produttive elevate, ma anche la modalità; la fertirrigazione permette di intervenire anche in fasi del ciclo colturale in cui la coltura ha determinate esigenze nutritive ed idriche e non è più possibile entrare in campo con mezzi agricoli (Abdelraouf et al., 2013). Potrebbe essere discusso il fatto che ZST CT ha raggiunto la terza posizione in termini produttivi mentre ZST MT la prima; in questo caso la minima lavorazione non ha influenzato negativamente la resa produttiva, anzi il contrario. Una possibile spiegazione è che la fertirrigazione abbia concentrato acqua e nutrienti negli strati superficiali del terreno, riducendo la necessità di un intenso approfondimento radicale e mitigando gli effetti negativi generalmente associati alla minima lavorazione. Questa interpretazione trova riscontro nello studio di Fan et al., 2025, che ha evidenziato una risposta produttiva relativamente maggiore dei sistemi conservativi e a minima lavorazione rispetto agli interventi di fertirrigazione.

In linea con quanto osservato da Marrocu et al., 2025, in cui l'irrigazione deficitaria ha incrementato le rese del 53.5% e del 65.4% rispetto al controllo in asciutta, la gestione idrica ha determinato aumenti produttivi anche nella presente sperimentazione. Ne è una prova l'interessante performance di ECV CT, classificatasi come seconda miglior tesi produttiva con uno scarto di appena 0,13 t ha⁻¹ rispetto al massimo di ZST MT. In questo caso, l'intervento irriguo di soccorso ha probabilmente evitato l'instaurarsi di stress idrici, preservando la conduttanza stomatica e l'attività fotosintetica a favore di un'elevata resa finale.

D'altra parte, le tesi ECV MT e BAU MT hanno registrato le rese più basse, suggerendo che, in assenza di una gestione particolarmente intensiva degli input, la minima lavorazione possa rappresentare un fattore limitante per la produttività.

Per quanto riguarda i parametri qualitativi, come riportato nella tabella 4-3, il contenuto proteico della granella ha raggiunto il valore massimo nella tesi ZST CT, dati gli elevati input nutritivi, oltre che idrici. Rispetto a ZST CT, la tesi ECV CT mostra una riduzione di 0.6 punti percentuali, mentre ZST MT e BAU CT evidenziano entrambi una contrazione di 0.9 punti percentuali. In ECV CT si è misurato un contenuto proteico maggiore rispetto a ZST MT e BAU CT (scarto di 0.3 punti percentuale). I livelli qualitativi più bassi sono stati rilevati in

ECV MT e BAU MT, i quali hanno registrato uno scarto negativo di 1.3 punti percentuali rispetto alla tesi ottimale (Tabella 4-3).

In questo contesto, l'irrigazione può essere configurata come una strategia che influenza la qualità; come evidenziato da Marrocu et al., 2025, infatti, una maggiore disponibilità idrica permette maggiori apporti di N tramite fertilizzazione, con ricadute positive sia sulla dimensione della granella sia sul contenuto proteico.

Trova qui una coerente conferma il risultato ottenuto nel trattamento ZST CT, che ha registrato la migliore performance in termini di contenuto proteico. Questo primato qualitativo è da imputare all'elevato input nutritivo azotato che caratterizza la strategia zero stress; inoltre, l'adozione della fertirrigazione ha permesso di dilazionare e distribuire i fertilizzanti anche dopo la fase di fioritura. È ampiamente documentato, infatti, come gli apporti azotati in questa fase tardiva aiutino la traslocazione dell'azoto dalle foglie alle cariossidi, favorendo processi di sintesi e di accumulo delle proteine nella granella.

Un aspetto di particolare interesse emerge dal confronto tra le tesi ZST MT e BAU CT, che hanno registrato il medesimo contenuto proteico nonostante le profonde differenze nelle strategie agronomiche adottate. Sotto il profilo quantitativo, tuttavia, la tesi ZST MT ha conseguito una resa nettamente superiore rispetto a BAU CT (Tabella 4-3). Alla luce di quanto riportato da Marrocu et al., 2025, è possibile ipotizzare che la qualità d'uso finale della granella possa risultare comunque superiore nelle condizioni irrigue. Nelle parcelle condotte in asciutta, infatti, l'elevato tenore proteico potrebbe non riflettere un effettivo miglioramento della qualità tecnologica, ma derivare piuttosto da un minore accumulo di carboidrati e amido nelle cariossidi causato dalla limitata disponibilità idrica. Tale fenomeno, oltre a ridurre la resa finale, determina un aumento relativo della concentrazione proteica nella granella e potrebbe quindi spiegare la convergenza dei valori proteici osservata tra le due tesi, fornendo una plausibile interpretazione fisiologica del fenomeno.

Il più basso contenuto proteico è stato registrato nelle tesi ECV MT e BAU MT (Tabella 4-3), probabilmente sempre per il ridotto assorbimento di nutrienti e acqua dovuto alla minima lavorazione, come spiegato e supportato sopra.

Il contenuto di glutine rispecchia il trend delle proteine, evidenziando la performance migliore in ZST CT (Tabella 4-3). Rispetto a questo parametro, le altre tesi mostrano riduzioni pari a 1.4 punti percentuali (ECV CT), 1.9 punti percentuali (BAU CT) e 2.0 punti percentuali (ZST MT). I valori di glutine inferiori sono stati misurati in ECV MT e BAU MT, evidenziando un decremento rispetto al valore massimo rispettivamente di 2.9 e 3.0 punti percentuali (Tabella 4-3).

Questi risultati concordano con l'effetto positivo dell'irrigazione sul contenuto di glutine, in linea con quanto riscontrato da Zhao et al., 2024. Pertanto, la gestione irrigua può essere associata ad un potenziale miglioramento della qualità tecnologica della granella, con particolare riferimento all'attitudine alla pastificazione, dato che la costituzione di un reticolo glutinico forte consente una migliore tenuta in cottura della pasta (Dexter et al., 1989). A tal proposito, sulla scorta di quanto suggerito in letteratura da Marrocu et al., 2025, è possibile riscontrare una tendenza di tipo incrementale tra l'aumento dell'apporto idrico e l'indice di glutine (GI). Questa dinamica suggerisce che, l'ottimizzazione della disponibilità idrica nel corso del ciclo colturale possa comunque aver favorito una parziale espressione qualitativa delle frazioni proteiche, offrendo una plausibile chiave di lettura sui riscontri tecnologici finali.

Tabella 4-3: Indicatori alimentari nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).

Trattamenti	Resa (t ha ⁻¹)	Proteine %	Glutine %
ZST CT	8.39	14.2	28.8
ZST MT	8.61	13.3	26.8
ECV CT	8.48	13.6	27.4
ECV MT	7.35	12.9	25.9
BAU CT	7.88	13.3	26.9
BAU MT	6.58	12.9	25.8

4.4 Indicatore economico

In Tabella 4-4 sono presentati i risultati dell'efficienza economica della resa (YEE).

L'efficienza economica della resa ha riscontrato il valore più elevato nella tesi BAU MT, configurandosi come l'opzione a maggiore ritorno di produzione per unità di spesa sostenuta. Rispetto a questo valore, le restanti tesi mostrano una progressiva riduzione dell'efficienza: la tesi ECV MT evidenzia un decremento dell'8,88%, seguita da BAU CT (-12,52%) e da ECV CT (-22,92%). La tesi ZST MT mostra una contrazione più accentuata, con una YEE inferiore del 34,55% rispetto al massimo. La performance economica più contratta è stata misurata in ZST CT, valore inferiore del 42,98% rispetto alla tesi ottimale (Tabella 4-4).

L'analisi dell'efficienza economica della resa evidenzia come il legame tra agricoltura ed energia assuma una rilevante dimensione economica e di mercato, poiché le variazioni dei prezzi delle risorse energetiche e dei fattori produttivi influenzano in modo diretto i costi di gestione aziendale (Bazilian et al., 2011; Ringler et al., 2013).

In questo scenario, i risultati ottenuti rispecchiano quasi fedelmente la totalità dei costi affrontati nelle sei tesi sperimentali. La tesi BAU MT ha registrato la migliore performance di YEE, configurandosi come la strategia agronomica meno dispendiosa grazie alle minori spese energetiche della minima lavorazione, al ridotto impiego di input nutritivi e all'assenza di interventi irrigui. Al contrario, BAU CT si è classificata al terzo posto: pur presentando le medesime conduzioni gestionali di BAU MT, ha risentito dei costi economici legati a una lavorazione convenzionale e fortemente energivora come l'aratura.

Tra le due, si colloca al secondo posto la tesi ECV MT. Questo trattamento è risultato più dispendioso rispetto a BAU MT a causa dei costi legati alla distribuzione dell'irrigazione di soccorso (mentre il costo dell'acqua non è stato conteggiato, trattandosi di acqua piovana accumulata in un vaso artificiale). Risulta particolarmente interessante notare come ECV MT abbia mantenuto un valore di YEE superiore rispetto a BAU CT. Per spiegare tale fenomeno concorrono due probabili ipotesi interpretative: da un lato, è plausibile che l'incremento di resa indotto dall'irrigazione di soccorso abbia compensato più che proporzionalmente le spese di distribuzione; dall'altro, i costi strettamente legati all'irrigazione di soccorso in ECV MT potrebbero essere stati inferiori rispetto alla voce di spesa associata all'aratura in BAU CT. In un'ottica di sostenibilità e ottimizzazione delle risorse, potrebbe costituire un interessante spunto sperimentale quello di ripetere la presente prova integrando un sistema di irrigazione alimentato da pompe elettriche asservite a un impianto fotovoltaico aziendale. Questa configurazione permetterebbe di valutare l'effettivo impatto della generazione di energia rinnovabile sulle efficienze economiche di resa nelle varie tesi. Con l'obiettivo di fornire un termine quantitativo di confronto per la maggiore spesa energetica ed economica necessaria a garantire l'irrigazione, l'analisi degli input energetici e dei relativi consumi risulta infatti di fondamentale importanza. Sulla base di tali presupposti, come suggerito da Marrocu et al., 2025, diventa possibile stimare il dimensionamento teorico di una transizione energetica aziendale volta a mitigare o azzerare i costi dell'approvvigionamento idrico.

Infine, le tesi a massimo input (ZST MT e ZST CT) sono risultate le peggiori sotto il profilo dell'efficienza economica (Tabella 4-4). L'estrema intensificazione di risorse energetiche e idriche che caratterizza la strategia zero stress ha determinato un aumento sproporzionato dei costi complessivi che, in ultima analisi, non è stato compensato dall'incremento quantitativo della resa in granella.

Tabella 4-4: Indicatore economico nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage); YEE= Yield Economic Efficiency.

Trattamenti	YEE (t € ⁻¹)
ZST CT	0.0034
ZST MT	0.0040
ECV CT	0.0047
ECV MT	0.0055
BAU CT	0.0053
BAU MT	0.0060

4.5 Water-Energy-Food Nexus Index

In Tabella 4-5 si riportano i valori normalizzati per ciascuna tesi sperimentale.

Tabella 4-5: valori normalizzati degli indicatori nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage); WUE= Water Use Efficiency, EUE= Energy Use Efficiency, YEE= Yield Economic Efficiency.

	ZST CT	ZST MT	ECV CT	ECV MT	BAU CT	BAU MT
WUE_n	0.50	0.60	2.00	0.97	1.98	0.71
EUE_n	0.50	0.53	1.43	1.67	1.62	2.00
RES_n	1.84	2.00	1.90	1.07	1.46	0.50
PROTEIN_n	2.00	0.96	1.31	0.50	0.96	0.50
GLUTIN_n	2.00	1.00	1.30	0.55	1.05	0.50
YEE_n	0.50	0.79	1.20	1.69	1.56	2.00

Per una migliore comprensione visiva delle differenze degli indicatori normalizzati, i dati sono stati sintetizzati graficamente all'interno di grafici radar per ciascun trattamento sperimentale (Figura 4-1, 4-2, 4-3). I grafici radar rappresentano visivamente i compromessi e le sinergie tra gli indicatori associati a ciascun approccio gestionale.

Come mostrato in figura 4-1, il poligono di ZST CT si espande notevolmente verso gli assi di glutine, proteine e resa, registrando per i parametri qualitativi il valore massimo del range (valori normalizzati pari a 2); si tratta, pertanto, di una tesi che spinge fortemente sulla componente produttiva, sia in termini quantitativi sia qualitativi. Al contrario, il profilo si schiaccia in corrispondenza degli indici YEE, WUE ed EUE, dove assume i valori minimi del range (0.5). Questa evidenza dimostra come la tesi abbia registrato indicatori alimentari

elevati, mostrandosi tuttavia insostenibile sotto il profilo dell'efficienza economica, idrica ed energetica.

Il poligono associato a ZST MT (Figura 4-1) mostra un'area complessivamente meno espansa rispetto a quella di ZST CT. Pur presentando un netto picco sull'asse della resa, manifesta valori molto contenuti sugli altri parametri qualitativi della granella; parallelamente, la forma si schiaccia drasticamente in corrispondenza delle efficienze (economica, idrica ed energetica). In definitiva, questa strategia si è rivelata scarsamente efficiente nell'utilizzo delle risorse, offrendo un riscontro positivo esclusivamente sulla resa quantitativa.

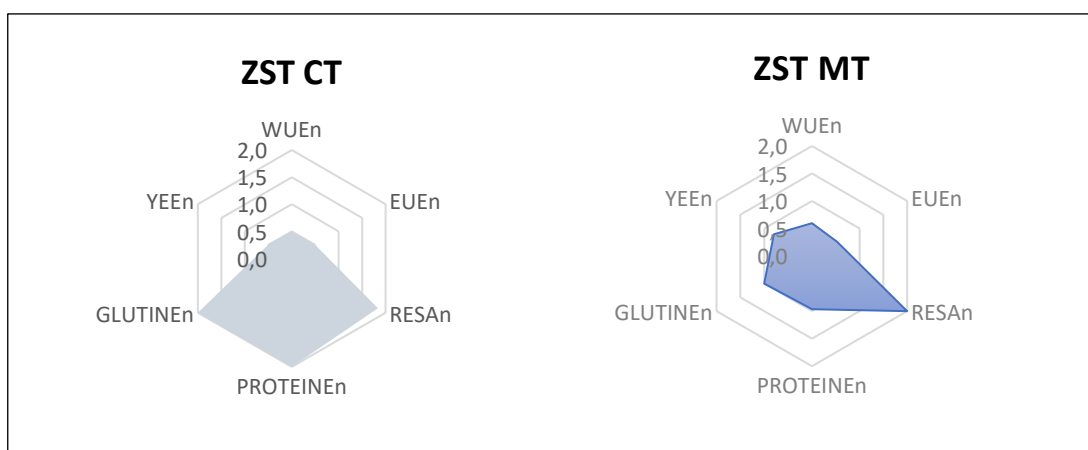


Figura 4-1: grafici radar nel trattamento ZST (Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).

Nella Figura 4-2 si osserva come il poligono relativo a ECV CT risulti notevolmente espanso, configurandosi visivamente come più ampio rispetto a quelli delle tesi analizzate in precedenza. I picchi più evidenti si registrano in corrispondenza della WUE e della resa, con valori prossimi al massimo del range, mentre si riscontrano buone performance per l'EUE, le proteine e il glutine. Il profilo mostra invece un leggero schiacciamento sull'asse della YEE. In sintesi, questa strategia massimizza l'efficienza d'uso dell'acqua e la resa quantitativa, mostrando un lieve limite sul piano dell'efficienza economica, a fronte di risposte medie per i restanti indicatori. Al contrario, ECV MT (Figura 4-2) mostra un poligono decisamente meno espanso e maggiormente contratto verso il centro del grafico. In questo caso, i picchi si collocano sugli assi della YEE e dell'EUE, mentre si evidenziano performance ridotte per la resa, la WUE e i parametri qualitativi della granella. Nel complesso, tale tesi può essere definita sostenibile sotto il profilo economico ed energetico, ma carente dal punto di vista idrico, non garantendo una produttività soddisfacente sia in termini quantitativi sia qualitativi.

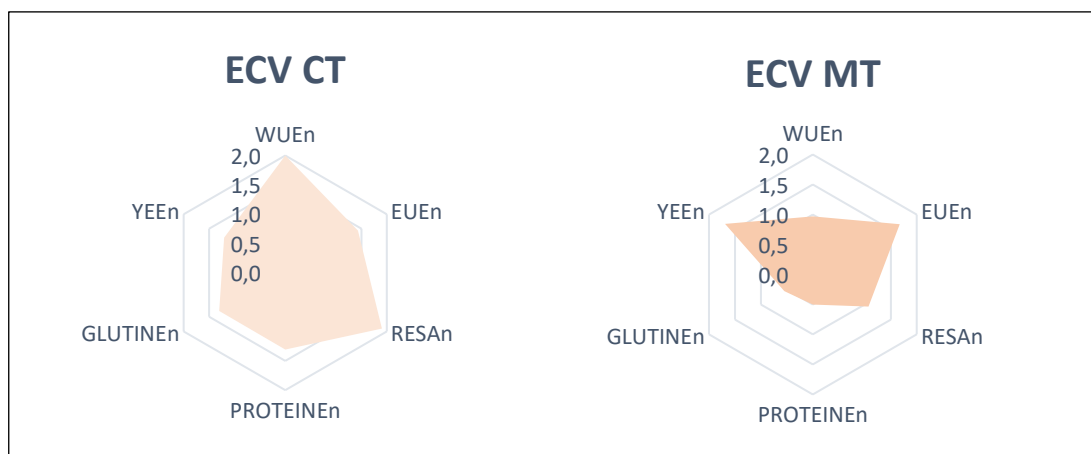


Figura 4-2: grafici radar nel trattamento ECV (Enhanced Conventional) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).

Nella Figura 4-3 si osserva come la tesi BAU CT presenti un poligono notevolmente espanso, equiparabile o potenzialmente superiore, in termini di ampiezza, a quello riscontrato in ECV CT. Il profilo mostra un netto picco sull'asse della WUE, abbinato ad un'elevata espansione in corrispondenza degli indici EUE e YEE; la resa quantitativa fa registrare una discreta performance, mentre si rileva uno schiacciamento sui parametri qualitativi della granella. Nel complesso, questa strategia si configura come equilibrata e sostenibile sotto il profilo dell'efficienza d'uso delle risorse, mostrando un limite quasi esclusivamente sulla componente qualitativa.

La tesi BAU MT (Figura 4-3) mostra invece un poligono fortemente sbilanciato. Il grafico evidenzia due picchi con valori massimi in corrispondenza degli assi YEE ed EUE, a fronte di un drastico schiacciamento su tutti i restanti indicatori. In definitiva, questa opzione gestionale risulta estremamente performante dal punto di vista economico ed energetico, ma carente sotto il profilo dell'efficienza idrica e della produttività, sia in termini quantitativi sia qualitativi.

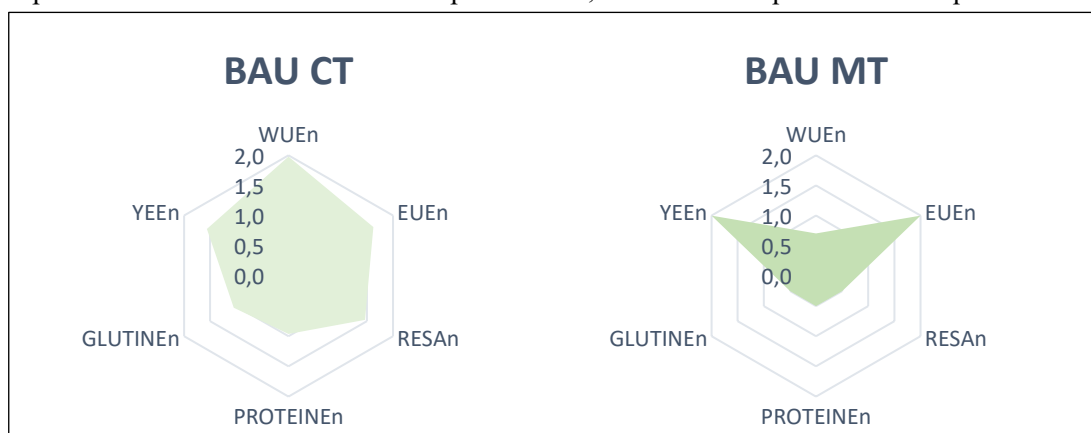


Figura 4-3: grafici radar nel trattamento BAU (Business As Usual) nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).

Per la costruzione dell'indice sintetico finale WEFNI, è stata calcolata la media dei relativi indicatori normalizzati appartenenti alla stessa categoria, come sintetizzato in Tabella 4-6.

Per quanto riguarda la dimensione water è stato considerato l'indicatore WUE, per la dimensione energy l'indicatore EUE, per la dimensione food è stata fatta una media aritmetica tra gli indicatori resa, proteine e glutine (favorendo quindi uno sbilanciamento verso i parametri qualitativi), per la dimensione economic l'indicatore YEE.

Tabella 4-6: valori delle dimensioni del Nexus nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).

Dimensioni Nexus	ZST CT	ZST MT	ECV CT	ECV MT	BAU CT	BAU MT
<i>water</i>	0.50	0.60	2.00	0.97	1.98	0.71
<i>energy</i>	0.50	0.53	1.43	1.67	1.62	2.00
<i>food</i>	1.95	1.32	1.50	0.71	1.16	0.50
<i>economic</i>	0.50	0.79	1.20	1.69	1.56	2.00

I valori finali dell'indice sintetico WEFNI calcolati per i sei trattamenti sono esposti nella tabella 4-7.

L'analisi dell'indice sintetico mostra come il valore di WEFNI più elevato in assoluto venga raggiunto dalla tesi BAU CT, seguita da ECV CT. Tali risultati indicano che la combinazione della lavorazione convenzionale (CT) con una gestione mirata o conservativa degli input garantisce l'equilibrio globale più efficiente all'interno del sistema culturale analizzato.

La tesi BAU CT pur in condizioni di asciutta, è riuscita a garantire una buona risposta produttiva, complice le favorevoli precipitazioni meteoriche registrate nell'anno di sperimentazione. La tesi ECV CT ha registrato un indice WEFNI leggermente inferiore a causa dell'elevato dispendio energetico ed economico comportato dall'irrigazione di soccorso, strettamente dipendente dal consumo di carburante fossile. A tal proposito, come evidenziato in letteratura da Marrocu et al., 2025, l'irrigazione deficitaria moderata rappresenta un compromesso solido, capace di catturare la maggior parte dei benefici in termini di resa e qualità a costi irrigui ed energetici sostanzialmente inferiori.

Al contrario, l'introduzione della minima lavorazione (MT) ha penalizzato l'indice complessivo a causa della marcata contrazione delle rese in granella. Infine, il trattamento ZST, nonostante le elevate performance produttive e qualitative, sconta l'eccessivo dispendio idrico ed energetico imposto dalla microirrigazione spinta, facendo registrare i valori di WEFNI più bassi dell'intero set sperimentale (Tabella 4-7).

Tabella 4-7: valori dell'indice WEFNI nelle tre strategie (BAU= Business As Usual, ECV= Enhanced Conventional, ZST= Zero Stress) e nelle due tipologie di lavorazione (CT= Conventional Tillage, MT= Minimum Tillage).

Trattamenti	WEFNI
ZST CT	0.86
ZST MT	0.81
ECV CT	1.53
ECV MT	1.26
BAU CT	1.58
BAU MT	1.30

CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi ha valutato l'efficienza e la sostenibilità dell'irrigazione nel frumento duro integrando le dimensioni idrica, energetica, alimentare ed economica attraverso l'approccio Water-Energy-Food Nexus.

L'analisi dell'efficienza dell'uso dell'acqua (WUE) ha evidenziato che la gestione idrica influenza direttamente l'efficienza colturale: la full irrigation è risultata insostenibile poiché l'impiego di elevati input idrici non ha generato incrementi produttivi proporzionali. Al contrario, l'irrigazione di soccorso si è confermata la strategia più efficiente, evitando lo stress idrico e garantendo buoni risultati per resa, contenuto proteico e glutine. È emerso inoltre l'impatto negativo della minima lavorazione sulla WUE rispetto alla lavorazione convenzionale. Sotto il profilo energetico ed economico, la efficienza dell'uso dell'energia (EUE) si è dimostrata inversamente proporzionale alla quantità degli input e del carburante impiegati, premiando la tesi a minor consumo. Tuttavia, la combinazione di minima lavorazione e irrigazione di soccorso ha una migliore EUE, provando che interventi mirati coniugano produttività ed efficienza. Di contro, l'elevata spinta produttiva e qualitativa della tesi zero stress tramite fertirrigazione sconta una forte criticità economica, con una efficienza economica della resa che peggiora drasticamente all'aumentare dei costi per input e lavorazioni.

Sintetizzando le interazioni tramite l'indice WEFNI, la conduzione in asciutta ha offerto la risposta più sostenibile, sebbene condizionata da un'annata climatica favorevole che ha evidenziato la vulnerabilità strutturale dell'asciutta alla variabilità stagionale. L'irrigazione di soccorso è un'ottima alternativa per incrementare la produzione, nonostante i costi energetici ed economici dell'intervento. La strategia zero stress è risultata la peggiore per il WEFNI, poiché gli elevati valori produttivi non compensano le inefficienze sistemiche. Di fronte al cambiamento climatico, l'irrigazione di soccorso rappresenta quindi il miglior compromesso tra stabilità produttiva, risparmio idrico e redditività.

BIBLIOGRAFIA

- Abdelraouf, R. E., El Habbasha, S. F., Taha, M. H., & Refaie, K. M. (2013). Effect of irrigation water requirements and fertigation levels on growth, yield and water use efficiency in wheat. *Middle East Journal of Scientific Research*, 16(4), 441–450. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.16.04.11733>
- Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., Steduto, P., Mueller, A., Komor, P., Tol, R. S. J., & Yumkella, K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, 39(12), 7896–7906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039>
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Canaj, K., & Mehmeti, A. (2022). Analyzing the water-energy-environment nexus of irrigated wheat and maize production in Albania. *Energy Nexus*, 7, 100100. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100100>
- Cao, X. C., Shu, R., Guo, X. P., & Wang, W. G. (2019). Scarce water resources and priority irrigation schemes from agronomic crops. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(3), 399–417. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9818-8>
- Ceglar, A., Toreti, A., Zampieri, M., & Royo, C. (2021). Global loss of climatically suitable areas for durum wheat growth in the future. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104049. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2d68>
- Ceglar, A., Zampieri, M., Toreti, A., & Dentener, F. (2019). Observed Northward Migration of Agro-Climate Zones in Europe Will Further Accelerate Under Climate Change. *Earth's Future*, 7(9), 1088–1101. <https://doi.org/10.1029/2019EF001178>
- Chai, J., Shi, H., Lu, Q., & Hu, Y. (2020). Quantifying and predicting the Water-Energy-Food-Economy-Society-Environment Nexus based on Bayesian networks - A case study of China. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120266>
- Chang Y, L. G. Y. Y. Z. L. Y. C. (2016). *Quantifying the water energy-food nexus: current status and trends*.

- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J. P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. In *Nature Climate Change* (Vol. 8, Number 11, pp. 972–980). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- Dalla Marta, A., Orlando, F., Mancini, M., Guasconi, F., Motha, R., Qu, J., & Orlandini, S. (2015). A simplified index for an early estimation of durum wheat yield in Tuscany (Central Italy). *Field Crops Research*, 170, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.09.018>
- Dexter, J. E., Marchylo, B. A., MacGregor, A. W., & Tkachuk, R. (1989). The structure and protein composition of vitreous, piebald and starchy durum wheat kernels. *Journal of Cereal Science*, 10(1), 19–32. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(89\)80031-1](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(89)80031-1)
- El-Gafy, I. (2017). Water–food–energy nexus index: analysis of water–energy–food nexus of crop’s production system applying the indicators approach. *Applied Water Science*, 7(6), 2857–2868. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0551-3>
- Endo, A., Tsurita, I., Burnett, K., & Orenco, P. M. (2017). A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.010>
- Fabiani, S., Vanino, S., Napoli, R., & Nino, P. (2020). Water energy food nexus approach for sustainability assessment at farm level: An experience from an intensive agricultural area in central Italy. *Environmental Science and Policy*, 104, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.10.008>
- Fan, Y., Li, W., Zhang, L., Song, J., Wang, D., Xue, J., Wang, Y., & Gao, Z. (2025). Wheat Nitrogen Use and Grain Protein Characteristics Under No-Tillage: A Greater Response to Drip Fertigation Compared to Intensive Tillage. *Agronomy*, 15(3), 588. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030588>
- Farajian, L., Moghaddasi, R., & Hosseini, S. (2018). Agricultural energy demand modeling in Iran: Approaching to a more sustainable situation. *Energy Reports*, 4, 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.03.002>
- Ferrise, R., Moriondo, M., & Bindi, M. (2011). Probabilistic assessments of climate change impacts on durum wheat in the Mediterranean region. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(5), 1293–1302. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1293-2011>
- Flammini, A. , P. M. , P. L. , D. O. (2014). *Walking the Nexus Talk: Assessing the Water-Energy-Food Nexus in the Context of the Sustainable Energy for All Initiative*.

- Francioni, M., Palmieri, M., Fiorentini, M., Deligios, P. A., Monaci, E., Vischetti, C., Rossa, Ü. B., Trozzo, L., Bianchini, M., Rivosecchi, C., Ledda, L., Orsini, R., Santilocchi, R., & D'Ottavio, P. (2024). Scarcity of P-fertilisers: Humic-complexed phosphate as an adaptive solution for wheat and maize under rainfed conditions. *European Journal of Agronomy*, 156, 127143. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127143>
- Grosse-Heilmann, M., Cristiano, E., Deidda, R., & Viola, F. (2024). Durum wheat productivity today and tomorrow: A review of influencing factors and climate change effects. In *Resources, Environment and Sustainability* (Vol. 17). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2024.100170>
- Guan, D., Al-Kaisi, M. M., Zhang, Y., Duan, L., Tan, W., Zhang, M., & Li, Z. (2014). Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize. *Field Crops Research*, 157, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.015>
- Guan, D., Zhang, Y., Al-Kaisi, M. M., Wang, Q., Zhang, M., & Li, Z. (2015). Tillage practices effect on root distribution and water use efficiency of winter wheat under rain-fed condition in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 146, 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.016>
- Han, D., Yu, D., & Cao, Q. (2020). Assessment on the features of coupling interaction of the food-energy-water nexus in China. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119379>
- Juwana, I., Muttill, N., & Perera, B. J. C. (2012). Indicator-based water sustainability assessment — A review. *Science of The Total Environment*, 438, 357–371. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.093>
- Kahiluoto, H., J. K. J. B. et al. (2019). “Decline in Climate Resilience of European Wheat.”.
- Karamian, F., Mirakzadeh, A. A., & Azari, A. (2021). The water-energy-food nexus in farming: Managerial insights for a more efficient consumption of agricultural inputs. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1357–1371. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.008>
- Keairns D L, D. R. (2016). *The energy-water-food nexus* .
- Kenny JF, B. N. H. S. L. K. L. J. M. (2009). *Estimated Use of Water in the United States in 2005* .
- Konzmann M, G. D. and H. J. (2013). *Climate impacts on global irrigation requirements under 19 GCMs, simulated with a vegetation and hydrology model Hydrol.*
- Kurian M. (2017). *The water-energy-food nexus: trade-offs, thresholds and transdisciplinary approaches to sustainable development Environ.*

- Lazoglou, G., Papadopoulos-Zachos, A., Georgiades, P., Zittis, G., Velikou, K., Manios, E. M., & Anagnostopoulou, C. (2024). Identification of climate change hotspots in the Mediterranean. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80139-1>
- Li, J., Cui, J., Sui, P., Yue, S., Yang, J., Lv, Z., Wang, D., Chen, X., Sun, B., Ran, M., & Chen, Y. (2021). Valuing the synergy in the water-energy-food nexus for cropping systems: a case in the North China Plain. *Ecological Indicators*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107741>
- Liu, C., Zhang, Z., Liu, S., Liu, Q., Feng, B., & Tanzer, J. (2019). Evaluating Agricultural Sustainability Based on the Water–Energy–Food Nexus in the Chenmengquan Irrigation District of China. *Sustainability*, 11(19), 5350. <https://doi.org/10.3390/su11195350>
- Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179–204. <https://doi.org/10.1146/annurev.envIRON.041008.093740>
- Marrocu, M., Dettori, M., Massidda, L., Urracci, G., Pusceddu, G., Mereu, V., Manca, S., & Carboni, G. (2025). Integrating deficit irrigation, crop modelling and Water–Energy–Food nexus to enhance durum wheat resilience in Mediterranean climate conditions. *Agricultural Water Management*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.110001>
- Martínez-Moreno, F., Ammar, K., & Solís, I. (2022). Global Changes in Cultivated Area and Breeding Activities of Durum Wheat from 1800 to Date: A Historical Review. In *Agronomy* (Vol. 12, Number 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051135>
- Mohammadi, R. (2024). Effects of post-flowering drought and supplemental irrigation on grain yield and agro-phenological traits in durum wheat. *European Journal of Agronomy*, 156, 127180. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127180>
- Mueller, N. D. et al. (2012). *Closing yield gaps through nutrient and water management*.
- Neumann, K., Verburg, P. H., Stehfest, E., & Müller, C. (2010). The yield gap of global grain production: A spatial analysis. *Agricultural Systems*, 103(5), 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.02.004>
- Peters Haugrud, A. R., Achilli, A. L., Martínez-Peña, R., & Klymiuk, V. (2025). Future of durum wheat research and breeding: Insights from early career researchers. *The Plant Genome*, 18(1). <https://doi.org/10.1002/tpg2.20453>
- Report of the World Commission on Environment and Development*. (n.d.).
- Ringler, C., Bhaduri, A., & Lawford, R. (2013). The nexus across water, energy, land and food (WELF): Potential for improved resource use efficiency? In *Current Opinion in*

- Environmental Sustainability* (Vol. 5, Number 6, pp. 617–624).
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.002>
- Rivosecchi, C., Mancini, A., Mammarella, F., Cuscianna, A., Deligios, P. A., Fattorini, M., Fiorentini, M., Francioni, M., Bianchini, M., & Ledda, L. (2024). Evaluating the Impact of Various Agronomic Management Practices on Food Loss at the Primary Production Stage Using Proximal and Remote Sensing. *2024 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, 643–648.
<https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor63043.2024.10948777>
- Rodríguez Díaz, J. A., Camacho Poyato, E., & Blanco Pérez, M. (2011). Evaluation of Water and Energy Use in Pressurized Irrigation Networks in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(10), 644–650. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000338](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000338)
- Rosa, L., Rulli, M. C., Davis, K. F., Chiarelli, D. D., Passera, C., & D’Odorico, P. (2018). Closing the yield gap while ensuring water sustainability. *Environmental Research Letters*, 13(10).
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aadeef>
- Schils, R., Olesen, J. E., Kersebaum, K.-C., Rijk, B., Oberforster, M., Kalyada, V., Khitrykau, M., Gobin, A., Kirchev, H., Manolova, V., Manolov, I., Trnka, M., Hlavinka, P., Palosuo, T., Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Lorgeou, J., Marrou, H., Danalatos, N., ... van Ittersum, M. K. (2018). Cereal yield gaps across Europe. *European Journal of Agronomy*, 101, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.09.003>
- Tack, J., Barkley, A., & Hendricks, N. (2017). Irrigation offsets wheat yield reductions from warming temperatures. *Environmental Research Letters*, 12(11), 114027.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8d27>
- Talukder, B., vanLoon, G. W., & Hipel, K. W. (2019). Energy efficiency of agricultural systems in the southwest coastal zone of Bangladesh. *Ecological Indicators*, 98, 641–648.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.030>
- Tian, H., Lu, C., Ciais, P., Michalak, A. M., Canadell, J. G., Saikawa, E., Huntzinger, D. N., Gurney, K. R., Sitch, S., Zhang, B., Yang, J., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, G., Dlugokencky, E., Friedlingstein, P., Melillo, J., Pan, S., Poulter, B., ... Wofsy, S. C. (2016). The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere. *Nature*, 531(7593), 225–228.
<https://doi.org/10.1038/nature16946>
- Toreti, A., Desiato, F., Fioravanti, G., & Perconti, W. (2010). Seasonal temperatures over Italy and their relationship with low-frequency atmospheric circulation patterns. *Climatic Change*, 99(1–2), 211–227. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9640-0>

- Trudgill, D. L., Honek, A., Li, D., & Straalen, N. M. (2005). Thermal time - concepts and utility. *Annals of Applied Biology*, 146(1), 1–14. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.04088.x>
- Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., & Espejo, F. (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9(4), 044001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001>
- Von Grebmer K, R. C. R. M. O. T. W. D. F. H. B. O. T. M. Y. Y. T. J. von O. C. R. J. (2012). *Global Hunger Index: The Challenge of Hunger: Ensuring Sustainable Food Security under Land, Water and Energy Stresses*.
- Walsh, M. J., Gerber Van Doren, L., Shete, N., Prakash, A., & Salim, U. (2018). Financial tradeoffs of energy and food uses of algal biomass under stochastic conditions. *Applied Energy*, 210, 591–603. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.060>
- Wang, Y., Zhang, Y., Zhou, S., & Wang, Z. (2018). Meta-analysis of no-tillage effect on wheat and maize water use efficiency in China. *Science of The Total Environment*, 635, 1372–1382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.202>
- Zhang, J., Campana, P. E., Yao, T., Zhang, Y., Lundblad, A., Melton, F., & Yan, J. (2018). The water-food-energy nexus optimization approach to combat agricultural drought: a case study in the United States. *Applied Energy*, 227, 449–464. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.036>
- Zhang, Y., Cui, J., Liu, X., Liu, H., Liu, Y., Jiang, X., Li, Z., & Zhang, M. (2022). Application of water-energy-food nexus approach for optimal tillage and irrigation management in intensive wheat-maize double cropping system. *Journal of Cleaner Production*, 381. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135181>
- Zhao, J., Xu, X., Liu, S., Jia, J., Li, M., Huang, H., Zhang, G., & Zhao, C. (2024). Optimizing wheat prosperity: innovative drip irrigation and nitrogen management strategies for enhanced yield and quality of winter wheat in the Huang-Huai-Hai region. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1454205>