



**Atti del XXVII Convegno Nazionale di
Agrometeorologia**

AGROMETEOROLOGIA: DALL' INFORMAZIONE ALL'APPLICAZIONE

OSIMO (AN), 11-13 Giugno 2025

A cura di Francesca Ventura, Gabriele Cola, Francesca Di Cesare

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari
Università di Bologna

ISBN 9788854971943

DOI <https://doi.org/10.6092/unibo/amsacta/8370>

Comitato Scientifico

Francesca Ventura

Gabriele Cola

Filiberto Altobelli

Anna Dalla Marta

Chiara Epifani

Federica Rossi

Emanuele Scalcione

Danilo Tognetti

Comitato Organizzatore

Michela Busilacchi

Cristiano Peroni

Angela Sanchioni

Danilo Tognetti

Segreteria Organizzativa

Simone Falzoi

Tiziana La Iacona

Irene Vercellino

Bologna, 2025



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>

**XXVII Convegno Nazionale di
Agrometeorologia**

AGROMETEOROLOGIA: DALL' INFORMAZIONE ALL'APPLICAZIONE

OSIMO (AN), 11-13 Giugno 2025

A cura di Francesca Ventura, Gabriele Cola, Francesca Di Cesare

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari

Università di Bologna

AGROMETEOROLOGIA: DALL' INFORMAZIONE ALL' APPLICAZIONE

L'incertezza dei dati meteorologici e loro qualità <i>Claudio Cassardo</i>	1
---	---

SESSIONE 1 - Strumenti e dati per la gestione delle risorse idriche e del suolo

Verso un servizio climatico operativo per la previsione della siccità <i>Arianna Di Paola, Ramona Magno, Edmondo Di Giuseppe, Sara Quaresima, Leandro Rocchi, Massimiliano Pasqui</i>	4
--	---

Stima dei fabbisogni irrigui a scala regionale attraverso l'integrazione di diverse fonti di dati. Metodologie e campi di applicazione <i>Danilo Tognetti, Giovanni Ciabocco, Mauro Tiberi, Angela Sanchioni, Stefano Leonesi</i>	9
---	---

Studio del regime precipitativo medio ed estremo dell'Italia centro-settentrionale <i>Simone Gabriele Parisi, Gianluca Alimonti, Luigi Mariani</i>	14
---	----

Sperimentazione di deficit idrico sul sistema suolo-pianta-atmosfera: caso di studio su <i>Vitis vinifera</i> L. (cv Teroldego) in Trentino Alto Adige <i>Cecilia Mattedi, Fabio Zottele, Francesco Centurioni, Amelia Caffarra, Stefano Corradini</i>	19
--	----

Confronto tra ibridi di mais convenzionali e arido-tolleranti nell'areale Veneto <i>Gaetano Roberto Pesce, Vittoria Giannini, Carmelo Maucieri</i>	24
---	----

Le regioni agricole italiane maggiormente sottoposte a stress idrico <i>Edmondo Di Giuseppe, Sara Quaresima, Arianna Di Paola, Marina Baldi, Marco Simonetti, Massimiliano Pasqui</i>	29
--	----

Riso e gestione dell'acqua: metodi irrigui a confronto <i>Carlo Camarotto, Ilenia Cicero, Maria Giordano, Gaetano Roberto Pesce, Carmelo Maucieri.....</i>	34
Impatto del riscaldamento globale sulle emissioni di CO ₂ dal suolo: analisi di due sistemi colturali attraverso una simulazione di lungo periodo a scala regionale <i>Leonardo Vario, Marco Perfetto, Mara Gabbrielli, Alessia Perego, Giorgio Ragaglini.....</i>	37
Valutazione dell'inaccuratezza e degli errori dell'evapotraspirazione stimata con modelli di telerilevamento satellitare su agrumeti e pistacchieti microirrigati nelle condizioni semi-aride della California <i>Daniele Zaccaria, Gaetano Alessandro Vivaldi, Pasquale Steduto, Richard L. Snyder, Octavio L. Lagos, Francisco Gomez Diaz, Lorenzo Cigarra Guinez.....</i>	42

POSTER

Analisi dell'evapotraspirazione e delle performance del fagiolo in risposta al deficit idrico e all'applicazione fogliare di glicinbetaina <i>Andrea Carli, Roberto Vivoli, Giulia Pastacaldi, Leonardo Verdi, Anna Dalla Marta.....</i>	44
La piattaforma CliNe: come valutare il futuro delle disponibilità idriche a livello territoriale. <i>Andrea Cicogna, Valentina Gallina, Giovanni Massaro, Fabio Zecchini, Alessandro Marchesan, Paolo Ceccon.....</i>	49
Il CeDATeR come esempio virtuoso di strumento operativo a supporto dell'agricoltura in Lombardia <i>Lorenzo Craveri, Fabio Olivotti, Stefano Roverato.....</i>	54
Dataset climatico su griglia con topografia complessa: confronto di metodi nella regione Abruzzo <i>Carina I. Argañaraz, Andreu Salcedo-Bosch, Simone Lolli, Gabriele Curci.....</i>	59

Valutazione dei trend pluviometrici in Abruzzo nell'arco temporale 1974 -2024 <i>Bruno Di Lena, Lorenzo Vergni, Gabriele Curci.....</i>	63
Il sito web dell'osservatorio di agro-meteo-climatologia del Crea. Servizi agro- meteo-climatici per l'Italia <i>Barbara Parisse, Roberta Alilla, Giulia Maria Bellucci, Fausto Carbonari, Flora De Natale, Chiara Epifani, Farid Faridani, Eleonora Gerardi, Antonio Gerardo Pepe, Antonella Pontrandolfi.....</i>	66
Monitoraggio dell'evapotraspirazione e della produttività della soia in condizioni di stress idrico attraverso dati a terra e satellitari <i>Giulia Pastacaldi, Graziano Ghinassi, Leonardo Verdi, Anna Dalla Marta.....</i>	70
Densità di semina ottimale del mais e irrigazione per aspersione: una on-farm experimentation <i>Gaetano Roberto Pesce, Luca Cestaro, Carmelo Maucieri.....</i>	74
Impiego dell'intelligenza artificiale per la stima dell'evapotraspirazione di riferimento <i>Giorgia Raimondi, Jacopo Bonato, Carmelo Maucieri.....</i>	77
Irrigazione di precisione in Trentino: come SWAB affronta le sfide idriche <i>Fabio Zottele, Cecilia Mattedi, Francesco Centurioni, Stefano Corradini.....</i>	80

SESSIONE 2 - Strumenti e dati per la gestione dei processi produttivi

Calibrazione di modelli fenologici per prevedere l'inizio della fioritura e migliorare la gestione dell'apiario

Riccardo Rossi, Sergi Costafreda-Aumedes, Chiara Epifani, Fausto Carbonari, Giacomo Trombi, Luciano Massetti, Marco Mancini, Aldo Dal Prà, Marco Moriondo, Marco Bindi, Luisa Leolini.....84

Fioritura e produzione di nettare in *Robinia pseudoacacia*: una prima analisi del ruolo della temperatura

Fausto Carbonari, Tiziana La Iacona, Federico Spanna, Irene Vercellino, Luca Allais, Alessandro Revelli, Chiara Epifani.....89

Migliorare la stima della radiazione solare e dell'evapotraspirazione per i modelli colturali utilizzando il metodo Hargreaves-Samani a scala Europea

Marco Perfetto, Leonardo Vario, Giorgio Ragagnoli, Gabriele Cola.....94

Applicazione del modello di simulazione dinamico ARMOSA in Piemonte a differenti scale territoriali

Jacopo Maffia, Stefano Barbero, Federico Spanna, Maria Governa, Elena Anselmetti, Marco Acutis, Alessia Perego, Marco Botta.....98

Valutazione dell'influenza delle tendenze meteorologiche sulla qualità del farro

Leonardo Verdi, Riccardo Rossi, Lorenzo Arcidiaco, Michele Moretta, Anna Dalla Marta, Simone Orlandini, Enrico Palchetti, Marco Mancini..... 102

Simulazioni di rese di mais in Veneto in pieno campo e a mesoscala

Gaetano Roberto Pesce, Ramin Ataeidoost, Carmelo Maucieri, Luigi Mariani.....106

Clima regionale in Basilicata: risultati del report agroclimatico dell'Alsia 2000–2023

Emanuele Scalcione, Pietro Dichio, Maria Lanfredi, Rosa Coluzzi, Vito Imbrenda.....111

Analisi dei fattori pedoclimatici per la coltivazione del pisello da industria: verso un indice di compatibilità <i>Elisabetta Baldassarri, Katia D'ercoli, Francesca Mancini, Angela Sanchioni, Ugo Testa, Danilo Tognetti, Michele Tonnini</i>	115
Innovazione e cooperazione nel progetto WHEAT <i>Eva Lorrai, Vittorio Addis, Carlino Casari, Stefania Gaviano, Fabio Porcu, Mauro Salis, Carlo Milesi</i>	119
Climatologia recente dei parametri feno-fisiologici simulati nei vigneti piemontesi <i>Alessandra Ciriotti, Valentina Andreoli, Claudio Cassardo</i>	123
Confronto di indicatori di condizioni meteorologiche estreme elaborati da fonti di dati agrometeorologici eterogenee <i>Giovanni Paolo Colucci, Irene Salotti, Elena Filipescu, Daniele Trincherò, Paola Battilani</i>	128
Sensori meteorologici wireless nel territorio del Sulcis per alimentare modelli per la previsione delle malattie della vite <i>Irene Salotti, Giovanni Paolo Colucci, Elena Filipescu, Paola Battilani, Daniele Trincherò</i>	133

POSTER

- Cambiamenti climatici e impollinatori selvatici: una possibile coesistenza?
Marina Baldi, Dino Biancolini.....138
- Approcci modellistici per la simulazione della fenologia del girasole (*Helianthus annuus* L.) in scenari di cambiamento climatico
Francesca Di Cesare, Giovanni Maria Poggi, Marco Vignudelli, Francesca Ventura.....143
- WHEATZARD (Wheat Zeroing in on Adaptive Response to Drought): uno studio per la valutazione dell'impatto dello stress idrico sulle simulazioni fenologiche del frumento
Giovanni Maria Poggi, Simone Bregaglio, Francesca Ventura.....148
- Interfaccia web per le aziende agricole italiane che producono grano: sostenibilità economica e ambientale
Marco Simonetti, Alessandro Manna, Edmondo Di Giuseppe, Concetta Cardillo, Antonella Del Signore, Arianna Di Paola, Antonio Gattone, Massimiliano Pasqui, Sara Quaresima, Ilaria Zappitelli, Piero Toscano, Piera Cascioli, Alessandro Ceccarelli, Gianfranco Giulioni.....153
- Efficienza dell'uso dell'acqua per l'irrigazione in un nocciuleto con diverse densità di piantagione e due regimi di irrigazione
Chiara Traini, Simona Lucia Facchin, Bruno di Lena, Daniela Farinelli....157

THE UNCERTAINTY OF METEOROLOGICAL DATA AND THEIR QUALITY

L'INCERTEZZA DEI DATI METEOROLOGICI E LORO QUALITÀ

Claudio Cassardo¹

¹ Dipartimento di Fisica, Università di Torino, via Pietro Giuria 1, 10125, Torino (To)

[*claudio.cassardo@unito.it](mailto:claudio.cassardo@unito.it)

Abstract

The intrinsic uncertainty of weather forecasts is due to the atmospheric chaos (in other words, to the sensitivity to initial conditions), global observation limits (which are sparse and imprecise), numerical model approximations (mostly parameterizations, and/or resolution). Complex atmosphere-ocean-land interactions are other elements able to increase the uncertainty. A clear communication of uncertainty (mostly using a probabilistic approach) is essential, also because understanding uncertainty is a crucial factor for taking informed decisions. In this sense, the ensemble systems (e.g. ensembles of multiple simulations) could be a good method to communicate uncertainty and quantify scenario probabilities.

Parole chiave

Caos; modelli; dati iniziali; confini; insieme;

Keywords

Chaos; Models; Initial Data; Boundaries; Ensemble

Introduzione

Le previsioni meteorologiche, così come le previsioni di qualunque tipo, sono ineludibilmente interconnesse ad una caratteristica di base: l'incertezza. Infatti, ogni tentativo di fornire dei valori futuri relativi allo stato dell'atmosfera, o *a fortiori* di tradurli in tipologie di tempo, è intrinsecamente legato a un grado di incertezza che è fondamentale comprendere per poter interpretare correttamente le informazioni e agire di conseguenza. Questa incertezza non è il sintomo di un fallimento scientifico da parte della scienza meteorologica, ma è una manifestazione intrinseca della complessità dinamica e caotica dell'atmosfera terrestre, unitamente alle limitazioni insite nei nostri strumenti di osservazione e nei modelli di simulazione.

La natura caotica dell'atmosfera

Le sorgenti di incertezza nei modelli meteorologici sono molteplici e interagiscono in modi complessi e spesso non lineari, anche per via della non linearità delle equazioni stesse che ne regolano il moto. Una delle fonti primarie di tale incertezza risiede nella natura caotica dell'atmosfera. I sistemi caotici sono caratterizzati da una forte sensibilità alle condizioni iniziali: piccole variazioni nello stato iniziale del sistema possono portare a divergenze esponenziali nelle sue evoluzioni future, a partire da un certo momento della simulazione. Nel contesto meteorologico, ciò significa che minuscole imprecisioni nella misurazione delle variabili atmosferiche attuali (temperatura, pressione, umidità, vento, ecc.) possono amplificarsi rapidamente nel tempo, rendendo le previsioni a lungo termine intrinsecamente più incerte. Il celebre "effetto farfalla", metafora coniata dal meteorologo Edward Lorenz, illustra vividamente questo principio: un battito d'ali di una farfalla in un punto del globo potrebbe teoricamente innescare, dopo un certo periodo, un uragano dall'altra parte del mondo, per via della perturbazione infinitesima del moto atmosferico ad opera del battito d'ali

della farfalla. Sebbene la realtà sia molto più complessa e non così direttamente causale, l'immagine sottolinea la profonda interconnessione e la sensibilità dell'atmosfera.

Il problema dei dati iniziali

Un'altra fonte cruciale di incertezza deriva dalle limitazioni delle osservazioni. I modelli meteorologici, sofisticati programmi di calcolo che simulano i processi atmosferici basandosi sulle leggi della fisica e della fluidodinamica, necessitano di un quadro dettagliato e accurato dello stato iniziale dell'atmosfera come punto di partenza per le loro simulazioni. Questo quadro è costruito attraverso una vasta rete di osservazioni globali, che include stazioni meteorologiche a terra, boe oceaniche, radiosonde lanciate da palloni aerostatici, satelliti meteorologici e aerei, e altri strumenti di remote sensing (Pasini, 2003). Tuttavia, questa rete osservativa, pur se estesa e in continua evoluzione, presenta inevitabili lacune. La copertura geografica non è uniforme, con aree remote e oceaniche meno monitorate rispetto a zone continentali densamente popolate e sviluppate. Inoltre, ogni strumento di misura ha una sua precisione e accuratezza, introducendo un certo grado di errore nelle osservazioni. Qualche numero può aiutare la comprensione. Si consideri un modello meteorologico globale con risoluzione pari a 1° in longitudine e latitudine (alle medie latitudini, equivalenti a circa 100 km). Quanti punti griglia avrebbe tale modello su un piano orizzontale? Essendoci 90° di latitudine per emisfero e 360 meridiani da 1° (180 ad est di Greenwich e 180° ad ovest), il totale è di 64800. Tuttavia, i modelli globali di oggi hanno risoluzioni molto maggiori: ad esempio, il modello che gira presso l'European Center for Medium-range Weather Forecast ha una risoluzione di circa 9 km, ovvero all'incirca 0,1° in longitudine e latitudine, il che porta a un numero complessivo di punti griglia sulla Terra di 6,480,000. Ma il numero di osservazioni disponibili, quasi esclusivamente

sulla terraferma, arriva a fatica a 50000 punti di misura, mentre se saliamo al di sopra della superficie, di sonde che trasmettono valori a terra (quasi sempre dislocate su terraferma) ce ne sono soltanto poche centinaia. Tutto ciò rende molto chiaro come le interpolazioni necessarie per le inizializzazioni dei valori sui punti griglia dei modelli introducano inevitabilmente delle imprecisioni nei valori iniziali. D'altra parte, l'assimilazione dei dati, ovvero l'insieme delle tecniche statistico-matematiche usate per combinare le osservazioni meteorologiche in modo da fornire la migliore stima possibile dello stato attuale dell'atmosfera, riducendo l'incertezza derivante dalle limitazioni delle osservazioni, rimane un momento cruciale per la realizzazione delle previsioni meteorologiche.

Le approssimazioni dei modelli

Le imperfezioni intrinseche dei modelli meteorologici rappresentano un'ulteriore fonte significativa di incertezza. I modelli sono basati su un sistema di equazioni derivate dalle leggi fondamentali della fisica, che descrivono i processi chiave dell'atmosfera, come il movimento dell'aria, il trasferimento di calore e umidità, la formazione delle nubi e delle precipitazioni, e le interazioni con la superficie terrestre e gli oceani. Tuttavia, la complessità di questi processi è tale che non possono essere rappresentati in modo esatto da un insieme finito di equazioni risolvibili computazionalmente (ad esempio, le equazioni di Navier-Stokes non hanno una soluzione analitica). Per superare le limitazioni di risoluzione spaziale e temporale, i modelli utilizzano delle parametrizzazioni, mentre per il secondo problema si usano dei metodi di integrazione numerica. Le parametrizzazioni sono rappresentazioni semplificate di processi fisici che avvengono su scale troppo piccole per essere risolte direttamente dalla griglia numerica del modello. Ad esempio, la formazione delle nubi e delle precipitazioni coinvolge una microfisica complessa che non può essere simulata esplicitamente in un modello globale. Invece, si usano parametrizzazioni basate su relazioni statistiche e su assunzioni semplificate per stimare l'effetto di questi processi sulla scala più ampia del modello. La scelta delle parametrizzazioni, le loro formulazioni specifiche e i valori dei parametri utilizzati introducono ulteriori fonti di incertezza, poiché diverse parametrizzazioni possono fornire risultati diversi per gli stessi processi. Va poi detto che i modelli meteorologici sono in continua evoluzione, in quanto si cerca di migliorare costantemente le equazioni utilizzate, di sviluppare parametrizzazioni nuove e più accurate. Per questo motivo, ogni modello ha i suoi punti di forza e di debolezza, e nessun modello è perfetto. Così accade che modelli differenti, sviluppati da centri di previsione diversi in tutto il mondo, possano produrre previsioni leggermente o significativamente diverse per lo stesso evento meteorologico. Questa variabilità inter-modello è un'ulteriore manifestazione dell'incertezza intrinseca.

Le interazioni dell'atmosfera con i suoi confini

Le interazioni tra l'atmosfera e le altre componenti del sistema Terra, come gli oceani, la superficie terrestre e la criosfera, introducono ulteriori livelli di complessità e incertezza. Gli oceani, ad es., hanno una grande inerzia termica e scambiano calore e umidità con l'atmosfera su scale temporali più lunghe. La temperatura superficiale del mare è un fattore cruciale che influenza la formazione e l'intensificazione di fenomeni meteorologici come i cicloni tropicali. Allo stesso tempo, anche la previsione dell'evoluzione della temperatura superficiale del mare è soggetta a incertezza, che si propaga poi alle previsioni atmosferiche, in quanto anche il mare è un fluido per il quale valgono equazioni analoghe a quelle atmosferiche. Allo stesso modo, le condizioni della superficie terrestre, come l'umidità del suolo e la copertura nevosa, influenzano gli scambi di calore e umidità con l'atmosfera e possono avere un impatto significativo sul tempo locale.

L'interpretazione e la comunicazione delle previsioni

Vorrei introdurre un aspetto spesso sottovalutato, ovvero quello dell'interpretazione e della comunicazione delle previsioni, intimamente legato all'incertezza. Anche una previsione accurata in termini di dati numerici può essere fraintesa o usata in modo errato se comunicata in modo inadeguato (Pasini, 2020). Le previsioni meteorologiche oggi spesso includono informazioni probabilistiche, sovente associate a percentuali di accadimento di determinati fenomeni (ad es. la probabilità del 60% di pioggia). Tuttavia, la comprensione di cosa significhi esattamente questa probabilità può variare significativamente, soprattutto quando la comunicazione è demandata alla presenza di icone che spesso generalizzano troppo il messaggio e non lo approfondiscono nel modo dovuto. Una comunicazione chiara e concisa dell'incertezza previsionale, eventualmente usando metodi di visualizzazione intuitivi e l'impiego di linguaggi non tecnici e privi di ambiguità sono passi fondamentali per migliorare la comprensione e l'uso delle previsioni, soprattutto quando si esce dai pochi giorni e ci si addentra nella cosiddetta "terra di nessuno" delle previsioni a lungo range o stagionali.

Le previsioni di insieme (ensemble)

Uno dei metodi più potenti per visualizzare e quantificare l'incertezza nelle previsioni meteorologiche è l'utilizzo dei sistemi di insieme. Invece di eseguire una singola simulazione del modello con un singolo set di condizioni iniziali, i sistemi di insieme eseguono un gran numero di simulazioni parallele (spesso decine o addirittura centinaia) usando lo stesso modello (in realtà, si usa una versione dello stesso modello a risoluzione inferiore, per rendere più rapide le simulazioni), ognuna partendo da condizioni iniziali leggermente diverse (le cui differenze vengono prescritte con algoritmi statistici). Queste perturbazioni iniziali sono progettate per rappresentare le incertezze stimate nelle osservazioni iniziali. Analizzando la dispersione delle previsioni tra i membri dell'insieme, è possibile ottenere una stima della probabilità di diversi scenari meteorologici. Ad esempio, se la maggioranza dei membri d'insieme prevede lo

stesso tipo di fenomeno, la fiducia in questa previsione è maggiore rispetto a un caso in cui le previsioni dei membri sono ampiamente divergenti, indicando una maggiore incertezza. I sistemi ensemble forniscono anche informazioni utili sulla possibile gamma di risultati (ad esempio, la temperatura massima o la quantità di precipitazioni) e sulla probabilità di accadimento di eventi estremi, e soprattutto mostrano senza ombra di dubbio come, all'avanzare della scadenza previsionale, si abbia un rapido decadimento nella qualità previsionale.

Conclusioni

In conclusione, l'incertezza è una caratteristica intrinseca delle previsioni meteorologiche, derivante dalla natura caotica dell'atmosfera, dalle limitazioni nelle osservazioni, dalle approssimazioni nei modelli e dalle complessità delle interazioni nel sistema Terra. Tuttavia, la comunità scientifica sta compiendo progressi significativi nello sviluppo di metodologie avanzate, come i sistemi ensemble, il continuo miglioramento dei modelli, l'assimilazione dei dati, per quantificare e gestire questa incertezza. Una comunicazione efficace dell'incertezza è altrettanto importante per consentire agli utenti di prendere decisioni informate e di mitigare i potenziali impatti negativi degli eventi meteorologici.

Per chi si trova ad usare le uscite dei modelli meteorologici, di qualunque tipologia (globali, a mesoscala, o regionali, ecc.), è quanto mai importante essere a conoscenza della tipologia di incertezze associate a tali dati. Spesso i dati di uscita dei modelli meteorologici diventano i dati di input per altre tipologie di modelli, per esempio per studi di impatto, con il risultato che le incertezze sui primi andranno inevitabilmente a propagarsi sulle uscite dei secondi. Risulta quindi indispensabile avere contezza dell'esistenza di tali incertezze, così come è importante saperla quantificare, proprio per riuscire ad associare un'incertezza anche ai prodotti finali.

Bibliografia

- Pasini A., 2003. I cambiamenti climatici. Meteorologia e clima simulato. Bruno Mondadori, Milano, 288 pp.
- Pasini A., 2020. L'equazione dei disastri. Codice ed., Torino, 151 pp.

TOWARDS AN OPERATIONAL CLIMATE SERVICE FOR DROUGHT FORECASTING

VERSO UN SERVIZIO CLIMATICO OPERATIVO PER LA PREVISIONE DELLA SICCITÀ

Arianna Di Paola^{1*}, Ramona Magno², Edmondo Di Giuseppe¹, Sara Quaresima, Leandro Rocchi², Massimiliano Pasqui¹.

¹ Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la BioEconomia (CNR-IBE), Roma, Italia

² Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la BioEconomia (CNR-IBE), Sesto Fiorentino, Italia ³

Abstract

An effective climate service must engage stakeholders and respond to the needs of end users. However, obstacles remain that limit the transition from climate information to operational application, particularly for seasonal forecasts, which face challenges such as low accuracy, non-stationarity, and spatial-temporal gaps between historical and forecast data. The Drought Observatory, through the Drought Scan system, proposes an innovative approach to address these issues by analyzing two case studies: the 2017 and 2022 agronomic seasons in the Po Valley, both marked by droughts that severely affected maize and rice cultivation. The objective is to demonstrate how the use of seasonal forecasts to estimate the probability of extreme drought can support more effective strategies for crop and water management

Parole chiave

Servizi Climatici, Previsioni stagionali, Siccità, Gestione Idrica, Adattamento agricolo

Keywords

Climate Services, Seasonal Forecasts, Drought, Water Management, Agricultural Adaptation

Introduzione

La gestione efficace della siccità richiede strumenti in grado di anticipare gli scenari futuri e supportare decisioni operative con sufficiente anticipo. Sebbene le previsioni climatiche stagionali rappresentino una risorsa potenzialmente strategica in tal senso, la loro applicazione concreta, soprattutto in contesti complessi come il bacino del Mediterraneo, resta limitata (Doblas-Reyes *et al.*, 2013; Prodhomme *et al.*, 2016). Inoltre, numerose barriere ne ostacolano l'uso operativo: difficoltà nella comunicazione probabilistica delle informazioni, scarsa traduzione delle variabili previste in impatti concreti, e una persistente distanza tra il linguaggio della previsione e i bisogni decisionali reali (Bruno Soares and Dessai, 2016).

Per affrontare queste sfide, il presente lavoro propone un approccio innovativo basato sull'integrazione del sistema Drought Scan (DS, Di Paola *et al.*, 2025), sviluppato per il monitoraggio e la previsione della siccità a scala di bacino, con metodologie di previsione stagionale adattate a scopi operativi. Il Drought Scan, attraverso indicatori sintetici orientate all'utente come la CDN (Cumulative Deviation from Normal) e il $D_{(SPI)}$ (Standardized Integrated Drought Index), permette una diagnosi oggettiva e tempestiva dello stato idrico del Bacino idrografico e delle sue risorse, superando la frammentazione tipica degli indici climatici tradizionali. A partire da questa infrastruttura analitica, sono stati sviluppati due percorsi previsionali: il primo basato sull'utilizzo diretto delle previsioni climatiche stagionali (i.e., *Seasonal Climate Forecast*, SCF) dinamiche fornite dal sistema ECMWF, il secondo su modelli di

regressione supervisionata (i.e., *Machine Learning*, ML) addestrati per predire l'evoluzione futura degli indici di siccità.

Attraverso l'applicazione di questi strumenti ai casi studio delle stagioni agronomiche del 2017 e del 2022 nella Valle del Po, entrambe segnate da eventi siccitosi severi, il lavoro intende valutare in che misura l'integrazione tra previsioni stagionali e sistemi analitici di tipo "decision-oriented" possa effettivamente migliorare il supporto decisionale nel settore agricolo.

In particolare, si propone un approccio volto a superare alcune barriere che limitano l'uso e la diffusione delle previsioni stagionali, attraverso:

- i) la produzione di indicatori applicativi orientati all'utente, come il $D_{(SPI)}$;
- ii) l'adozione di un approccio "seamless", in grado di fornire una narrativa coerente del rischio climatico su diversi orizzonti temporali;
- iii) l'inclusione di soglie di incertezza e misure di dispersione;
- iv) la presentazione trasparente e intuitiva delle informazioni di verifica.

Tali progressi possono favorire l'adozione tempestiva di strategie agronomiche, come la scelta delle varietà, la gestione idrica o la programmazione delle semine, in contesti caratterizzati da una crescente vulnerabilità climatica.

Materiali e Metodi

Il sistema Drought Scan (DS) come base per la previsione stagionale della siccità

Il Drought Scan (DS) è un framework analitico progettato per il monitoraggio, la previsione e l'analisi della siccità a scala di bacino idrografico. Basato sull'analisi delle precipitazioni mensili (P) e, quando disponibile, della portata media mensile fluviale (Q) alla sezione di chiusura del bacino, consente di interpretare gli eventi siccitosi lungo un continuum meteorologico-idrologico, analizzando congiuntamente l'input atmosferico e la risposta idrologica.

Alla base del sistema vi è l'utilizzo di indici mensili standardizzati su scale da 1 a 36 mesi (SPI e SQI) con il metodo (McKee, 1993), elaborati attraverso strumenti complementari: la Cumulative Deviation from Normal (CDN), che rappresenta l'andamento cumulato delle anomalie pluviometriche standardizzate espresse in SPI1, le heatmap delle serie SPI₁₋₃₆ e SQI₁₋₃₆, e l'indice sintetico $D_{\{SPI\}}$. Quest'ultimo fornisce una sintesi dell'informazione contenuta in tutte le scale temporali di SPI1-36 attraverso una media ponderata, dando maggior risalto alle anomalie nelle scale temporali breve. Il $D_{\{SPI\}}$ permette di cogliere simultaneamente eventi siccitosi significativi a diverse scale temporali, raccogliendo le informazioni in unico indicatore sintetico ma saliente.

Il sistema è stato calibrato sul Bacino del Po, dove valori di $D_{\{SPI\}} \leq -1$ si sono dimostrati indicatori affidabili delle grandi siccità storiche dal 1960 a oggi. Per questo motivo il presente studio si concentra sulle previsioni stagionali ottenute per il $D_{\{SPI\}}$ in alcuni momenti decisionali critici in due anni che si sono rilevati molto severi per la siccità.

Anni di studio e configurazione delle simulazioni

L'efficacia delle previsioni stagionali è stata testata considerando due anni particolarmente siccitosi: il 2017, che ha avuto gravi impatti sulla coltivazione del mais nell'area del Bolognese, e il 2022, caratterizzato da una perdita importante di coltivazioni di riso nella zona di Vercelli.

Per simulare realisticamente l'uso operativo delle previsioni, sono stati selezionati i mesi di dicembre e aprile come periodi di rilascio delle previsioni stagionali, corrispondenti rispettivamente alla fase di scelta varietale e alla fase di semina. Per prevedere l'evoluzione del $D_{\{SPI\}}$, sono stati utilizzati due approcci complementari: 1) Uso delle previsioni stagionali del modello ECMWF; 2) calibrazione di un algoritmo regressivo di machine learning.

Nel primo approccio, si utilizzano le previsioni mensili prodotte dal sistema SEAS5, il modello stagionale operativo dell'ECMWF (Johnson et al., 2019), distribuito attraverso il Copernicus Climate Change Service. Il sistema SEAS5 fornisce previsioni estese fino a sette mesi in avanti, generate a partire dal primo giorno di ogni mese. Ogni previsione consiste in un ensemble di 51 membri, mentre per il periodo di riferimento storico (1981–2016) è disponibile un set di hindcast con 25 membri, utilizzato sia per la verifica delle performance del modello che per la calibrazione delle anomalie.

Le previsioni mensili SEAS5 vengono processate calcolando le anomalie di precipitazione rispetto alla climatologia interna del modello (1981–2016). Queste anomalie vengono quindi riconvertite in quantitativi assoluti applicandole alla climatologia osservativa (i.e., ARCIS dataset, Pavan et al., 2019), al fine di ottenere una stima plausibile della precipitazione futura. Sulla base di tali valori, vengono poi calcolati gli indici SPI multiscala e, successivamente, il $D_{\{SPI\}}$. Per ciascun mese e orizzonte previsionale si considera la media dell'ensemble, accompagnata da bande di incertezza rappresentate da ± 0.5 , ± 1 e ± 2 deviazioni standard calcolate tra i membri. Questo consente non solo di ottenere una previsione puntuale, ma anche di quantificare la dispersione e l'affidabilità associata a ciascuna simulazione. Il secondo approccio implementa un modello regressivo basato su Extreme Gradient Boosting (XGBoost) con impostazioni di default, un algoritmo di boosting supervisionato che costruisce un modello regressivo migliorando iterativamente gli errori residui nel processo di training (Bentéjac et al., 2020). Per ciascun orizzonte temporale da uno a sette mesi è stato addestrato un modello XGBoost separato, utilizzando come predittori un set di indici derivati da alcune teleconnessioni oceaniche note (Tab. 1) e come target il $D_{\{SPI\}}$ con un lag corrispondente all'orizzonte di previsione. Gli indici oceanici considerati sono costruiti a partire dalle prime due componenti principali (EOF1 e EOF2) delle anomalie di temperatura superficiale del mare (SST) in aree chiave del sistema climatico globale. Tali componenti rappresentano le principali modalità di variabilità spaziale delle SST, e sono comunemente utilizzate per sintetizzare la dinamica delle teleconnessioni oceaniche (Barnston & Livezey, 1987).

Nel disegno del modello regressivo si è ritenuto fondamentale garantire una coerenza semantica-strutturale tra la natura del target e quella dei predittori. In particolare, gli indici di teleconnessione oceanica sono stati elaborati adottando una trasformazione analoga a quella utilizzata per la precipitazione, applicando lo stesso schema multiscala che definisce il $D_{\{SPI\}}$: i valori mensili dell'indice sono stati aggregati su finestre mobili da 1 a 36 mesi, ponderati secondo la stessa funzione di peso geometrico adottata per il $D_{\{SPI\}}$, e successivamente standardizzati rispetto ad una baseline equivalente a quella del target. Il risultato è un nuovo indicatore, formalmente omologo al $D_{\{SPI\}}$, che riflette la dinamica integrata e le persistenze interne dell'indice oceanico. Parallelamente, è stato costruito un analogo indicatore cumulativo (CDN del predittore), capace di descrivere deviazioni prolungate rispetto alla norma e di catturare segnali di stress atmosferico-oceanico latente. Questa trasformazione consente di allineare non solo le caratteristiche statistiche, ma anche la struttura informativa degli input al target previsto, migliorando la compatibilità tra le rappresentazioni e favorendo l'identificazione di relazioni latenti difficilmente accessibili attraverso predittori monoscala.

La calibrazione e la validazione dell'algoritmo di machine learning per ciascun mese previsionale (lead time) è stata effettuata tramite una K-Fold Cross Validation (CV) con $K=10$. L'accuratezza delle previsioni nel processo di CV è

stata valutata attraverso il calcolo del RMSE, utilizzato poi per rappresentare graficamente l'incertezza associata a ogni previsione mediante bande di ± 1 e ± 2 RMSE attorno al valore stimato di $D_{\{SPI\}}$.

Tab.1 – Lista degli indici di Teleconnessione adoperati.

Tab.1 - Teleconnection indices used list.

Predictor	Extended region name	Area [lat] - [lon]
MED	Mediterranean Basin	[36°,44°] - [6°,30°]
IND	Indian Ocean basin	[-50°,50°] - [30°,130°]
TRIP	North Atlantic Basin	[10°,70°] - [-80°,0°]
NINO	El NINO 3.4 region	[-5°,5°] - [120°,170°]

Uso degli scenari What-If per supportare l'interpretazione

Per supportare l'interpretazione delle traiettorie previsionali, il Drought Scan implementa una serie di scenari ipotetici (What-If Scenarios). Questi scenari simulano l'andamento del $D_{\{SPI\}}$ ipotizzando variazioni note della precipitazione normale, moltiplicata per sette fattori: 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 e 2.00.

Attraverso il ricalcolo del $D_{\{SPI\}}$ per ciascuno scenario ipotetico di precipitazione è possibile ottenere una griglia di risposte idrologiche teoriche. Le traiettorie delle previsioni del $D_{\{SPI\}}$ (sia SCF che ML) possono quindi essere facilmente lette in relazione agli scenari What-If, aiutando a tradurre il significato operativo delle previsioni in base a deviazioni percentuali note rispetto alla norma pluviometrica.

Risultati e Discussione

I risultati presentati in Fig. 1 e Fig. 2 mostrano una buona coerenza con la struttura metodologica proposta. In entrambi i casi — sia per la stagione 2016/2017 che per il più recente evento siccitoso del 2021/2022 — i due approcci previsionali SCF e ML dimostrano la capacità di cogliere l'andamento generale del $D_{\{SPI\}}$ nella finestra mensile considerata. Nel caso del 2021/2022 (Fig. 2), le previsioni da dicembre 2021 riescono a rappresentare una traiettoria discendente che anticipa correttamente la persistenza e l'intensificazione della siccità primaverile ed estiva solo nel caso ML.

In generale, tutte le previsioni esplorate mantengono le traiettorie all'interno di scenari plausibili. Questo comportamento è coerente con quanto atteso, poiché la capacità predittiva si riduce fisiologicamente nel caso degli eventi estremi, sia per SCF che per ML.

In entrambe le annate analizzate, il confronto visivo con gli scenari sintetici WHAT-IF consente di interpretare le traiettorie previste in termini probabilistici e condizionali, rafforzando l'idea che l'approccio adottato favorisca una lettura informata e strutturata del rischio climatico. Più che fornire una previsione puntuale, il sistema si dimostra utile nella costruzione di un quadro decisionale flessibile e leggibile, dove i segnali di rischio emergono in modo coerente e compatibile con la logica multitemporale alla base del $D_{\{SPI\}}$.

Conclusioni

Il lavoro presentato ha proposto e testato un sistema previsionale per l'indice multiscala $D_{\{SPI\}}$, esplorando sia le previsioni stagionali del modello ECMWF che un algoritmo di apprendimento automatico. Coerentemente con l'impostazione iniziale, l'attenzione non si è concentrata esclusivamente sulla bontà numerica delle previsioni, ma sulla costruzione di uno strumento coerente, interpretabile e potenzialmente utile in un contesto decisionale agronomico. L'adozione di un approccio seamless, in grado di fornire una narrativa continua e coerente del rischio climatico su diversi orizzonti temporali, ha permesso di integrare fonti informative distinte all'interno di una cornice operativa unica. La combinazione tra la griglia di scenari sintetici What-If e le previsioni simulate consente una lettura intuitiva e trasparente delle traiettorie future, rendendo esplicite le ipotesi pluviometriche alla base di ciascuno scenario. Allo stesso tempo, l'utilizzo di un indicatore tailor-made come il $D_{\{SPI\}}$, confrontato direttamente nella sua forma osservata e simulata, offre un sistema di verifica facilmente leggibile, accessibile anche a utenti non specialisti.

I risultati ottenuti pongono le basi per future estensioni, in cui il sistema potrà essere ulteriormente rafforzato mediante l'integrazione di previsioni climatiche più accurate, predittori aggiuntivi e variabili o soglie operative definite in modo partecipativo con gli utenti finali

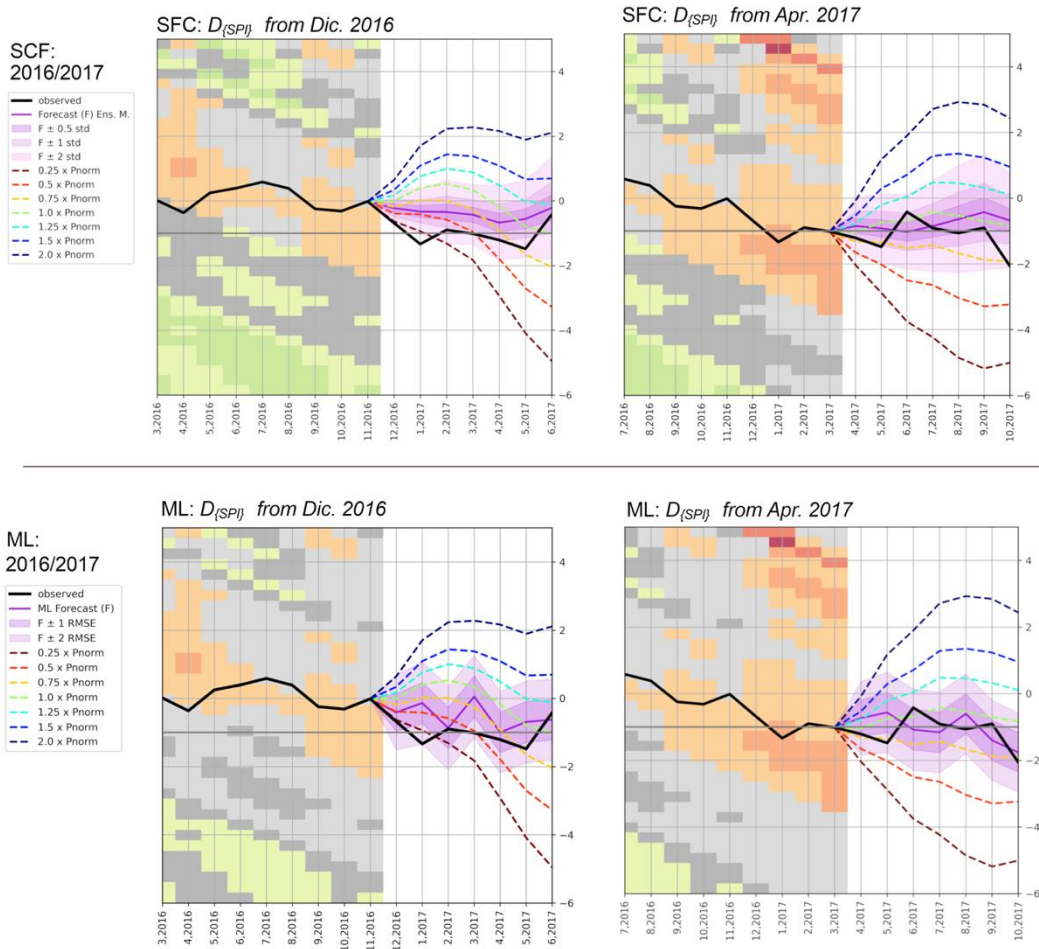


Fig. 1 – Previsioni stagionali del $D_{(SPI)}$ per il bacino del Po (da dicembre 2016 e aprile 2017; durata: 7 mesi). Riga superiore: SCF (ECMWF); riga inferiore: ML (XGBoost). Le previsioni sono sovrapposte agli scenari WHAT-IF. Linea nera: $D_{(SPI)}$ osservato; sfondo grigliato colorato: heatmap SPI1–36 (verde = umido, rosso = secco) dove ogni riga è una scala SPI (SPI1 = prima riga, SPI36=ultima riga); banda bianca verticale: inizio del periodo previsionale; linee tratteggiate colorate: scenari WHAT-IF (espressi come frazioni/multipli di P_{norm}); in SCF la linea viola è la media d'ensemble (fasce = ± 0.5 , ± 1 , $\pm 2 \sigma$); in ML la linea viola è previsione (fasce = ± 0.5 , ± 1 , ± 2 RMSE del modello)

Fig. 1 – Seasonal forecasts of the $D_{(SPI)}$ for the Po River basin (initialized in December 2016 and April 2017; forecast horizon: 7 months). Top row: SCF (ECMWF); bottom row: ML (XGBoost). Forecasts are superimposed on the WHAT-IF scenarios. Black line: observed $D_{(SPI)}$; colored gridded background: SPI1–36 heatmap (green = wet, red = dry), where each row corresponds to an SPI time scale (SPI1 = top row, SPI36 = bottom row); white vertical band: start of the forecast period; colored dashed lines: WHAT-IF scenarios (expressed as fractions/multiples of P_{norm}); in SCF, the purple line represents the ensemble mean (shaded areas = ± 0.5 , ± 1 , ± 2 standard deviations); in ML, the purple line represents the prediction (shaded areas = ± 0.5 , ± 1 , ± 2 model RMSE).

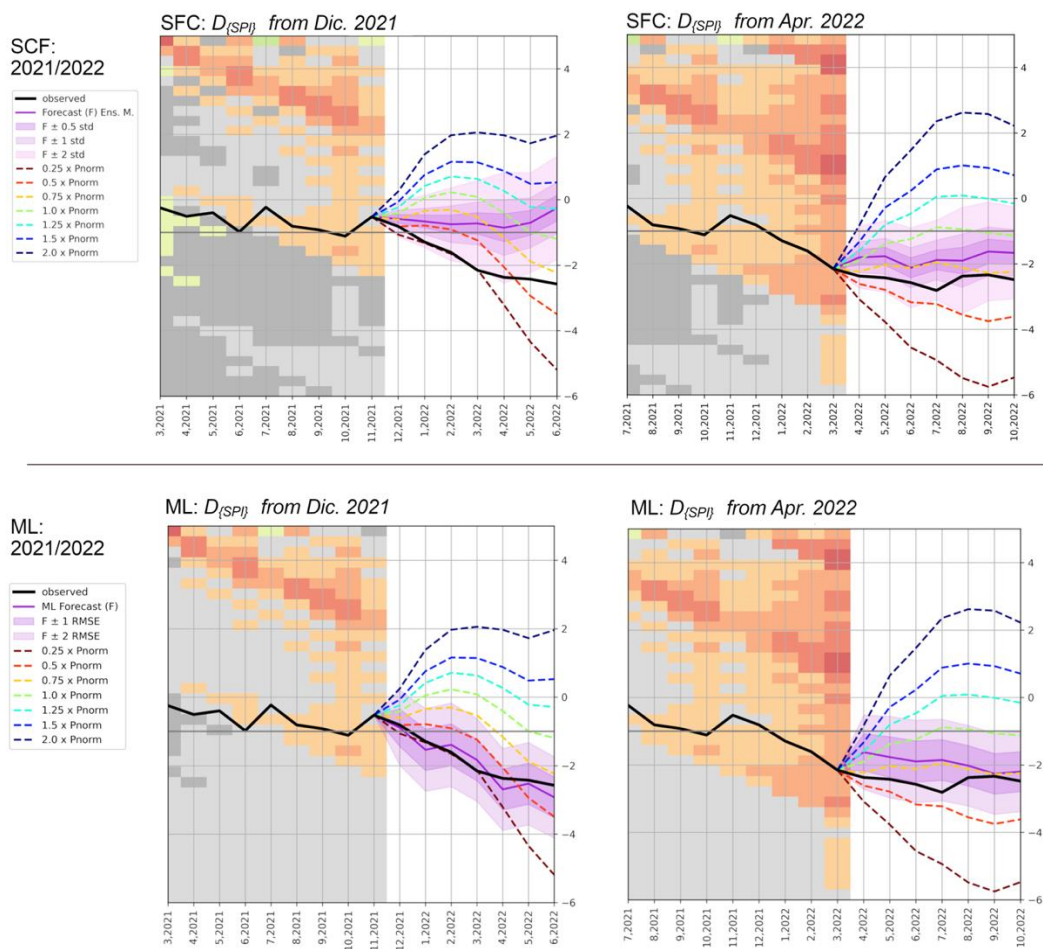


Fig. 2 – Previsioni stagionali del $D_{\{SPI\}}$ per il bacino del Po (da dicembre 2021 e aprile 2022; durata: 7 mesi). Colori e simboli come in Fig.1.

Fig. 2 – Seasonal forecasts of the $D_{\{SPI\}}$ for the Po River basin (initialized in December 2021 and April 2022; forecast horizon: 7 months). Colors and symbols as in Fig. 1.

Bibliografia

- Di Paola A, Di Giuseppe E, Magno R, Quaresima S, Rocchi L, Rapisardi E, et al. Building a framework for a synoptic overview of drought. *Science of the Total Environment*. 2025;958:177949.
- Bentéjac C, Csörgő A, Martínez-Muñoz G. A comparative analysis of gradient boosting algorithms. *Artif Intell Rev*. 2021 Mar; 54(3):1937–67.
- Johnson SJ, Stockdale TN, Ferranti L, Balmaseda MA, Molteni F, Magnusson L, et al. SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system. *Geoscientific Model Development*. 2019;12(3):1087–117.
- Prodhomme C, Doblas-Reyes F, Bellprat O, Dutra E. Impact of land-surface initialization on sub-seasonal to seasonal forecasts over Europe. *Clim Dyn*. 2016 Aug;47(3–4):919–35.

- Bruno Soares M, Dessai S. Barriers and enablers to the use of seasonal climate forecasts amongst organisations in Europe. *Climatic Change*. 2016 Jul;137(1–2):89–103.
- Doblas-Reyes FJ, Andreu-Burillo I, Chikamoto Y, García-Serrano J, Guemas V, Kimoto M, et al. Initialized near-term regional climate change prediction. *Nature communications*. 2013;4(1):1715.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. California; 1993. p. 179–83.
- Barnston AG, Livezey RE. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly weather review*. 1987;115(6):1083–126.
- Pavan V, Antolini G, Agrillo G, Auteri L, Barbero R, Bonati V, et al. The ARCIS project. *Ital J Agrometeorol*. 2013;2(18):51–5.

ESTIMATION OF IRRIGATION REQUIREMENTS AT REGIONAL SCALE THROUGH THE INTEGRATION OF DIFFERENT DATA SOURCES. METHODOLOGIES AND FIELDS OF APPLICATION *STIMA DEI FABBISOGNI IRRIGUI A SCALA REGIONALE ATTRAVERSO L'INTEGRAZIONE DI DIVERSE FONTI DATI. METODOLOGIE E CAMPI DI APPLICAZIONE*

Danilo Tognetti^{1*}, Giovanni Ciabocco², Mauro Tiberi², Angela Sanchioni¹, Stefano Leonesi¹

¹ Agenzia per l'Innovazione nel Settore Agroalimentare e della Pesca "Marche Agricoltura Pesca", Via Thomas A. Edison 2, 60027, Osimo (AN)

² Direzione Agricoltura e sviluppo rurale, Dipartimento Sviluppo Economico, Regione Marche, Via Tiziano 44, 60125, Ancona (AN)

* tognetti_danilo@amap.marche.it

Abstract

In accordance with the DM MIPAF 31 July 2015 guidelines for the regulation by the Regions of the methods of quantification of water volumes for irrigation, the Marche Region has activated an estimation system based on the use of climate data from the meteorological network of the Agrometeo AMAP service, surface data derived from the graphic CAP and through a series of elaborations using the CROPWAT 8.0 application developed by FAO. This work describes the data used, the estimation procedure, the main outputs and the possible applications at regional scale.

Parole chiave

Irrigazione, CropWat, Fabbisogni irrigui

Keywords

Irrigation, CropWat, water requirements

Introduzione

Le disposizioni della direttiva quadro acque (2000/60/CE) e la normativa derivata e connessa, perseguono gli obiettivi di ottimizzare l'uso della risorsa acqua anche a scopi irrigui, approfondendone gli aspetti conoscitivi della quantità e qualità disponibile e attuando politiche di risparmio nell'uso. La Direzione Agricoltura e Sviluppo Rurale ASR della Regione Marche, con Delibera di Giunta Regionale n. 590/2017, ha approvato i criteri e modalità regionali di quantificazione dei volumi idrici ad uso irriguo, coerentemente con le Linee Guida del Decreto Ministeriale MIPAF del 31 luglio 2015, prevedendo, tra l'altro, le disposizioni per la misurazione dei prelievi dai corpi idrici o, qualora non tecnicamente possibile o economicamente svantaggioso, per la loro stima attraverso metodologie riconosciute a livello internazionale.

Dal 2019 la Direzione ASR, per tramite di strutture tecniche interne - E.Q. Monitoraggio e Cartografia dei Suoli in collaborazione con il Servizio Agrometeo della regione Marche dell'AMAP (Agenzia per l'Innovazione nel Settore Agroalimentare e della Pesca "Marche Agricoltura Pesca") - ha implementato una metodologia di stima dei fabbisogni irrigui basata sull'integrazione di apposite banche dati (meteo-climatiche, pedologiche e agricole) secondo le linee guida FAO proposte nel Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements (Richard et al. 1998) utilizzando l'applicativo CROPWAT 8.0 for Windows un programma per la gestione e la programmazione dell'irrigazione. (Smith et al. 2009)

In questo articolo si descrive la particolare procedura utilizzata per la stima dei fabbisogni irrigui su base mensile,

per il periodo 2014-2024 per il territorio della Regione Marche, attività realizzata su specifica richiesta della Direzione Ambiente e Risorse Idriche della Regione Marche a supporto delle attività di aggiornamento della pianificazione di bilancio idrico e idrologico, del parziale aggiornamento del Piano di Tutela delle acque (PTA) e della verifica della capacità di utilizzo degli invasi per far fronte alle esigenze idriche. La richiesta nasce dalla necessità di conoscere le esigenze irrigue del comparto agricolo nel bilancio idrico complessivo, e dalla necessità di valutare l'andamento temporale e spaziale dei prelievi idrici per l'irrigazione a scala regionale, fattore di fondamentale importanza ai fini della gestione della risorsa acqua.

Materiali e Metodi

Modello e basi di calcolo

Negli anni 70 la FAO propone metodi di previsione del fabbisogno idrico delle colture per superare le difficoltà di ottenere dati da misurazioni accurate in campo. Con la pubblicazione dell'*Irrigation and Drainage Paper No. 24 "Crop Water Requirements"* vengono proposte le prime linee guida per calcolare il fabbisogno idrico delle colture in diverse condizioni climatiche e agronomiche. Nel documento il fabbisogno idrico delle colture è definito come "la quantità d'acqua necessaria per soddisfare la perdita d'acqua per evapotraspirazione (ET_{crop}) di una coltura esente da malattie, che cresce in ampi campi in condizioni del suolo non restrittive, tra cui acqua e fertilità del suolo, e che raggiunge il pieno potenziale produttivo nell'ambiente di coltivazione dato". (Doorenbos et al. 1982)

Va sottolineata la differenza tra fabbisogno idrico della coltura (e/o della sommatoria delle colture che insistono in un determinato territorio agricolo) e la richiesta di acqua per scopo irriguo (per singola coltura o per l'intero comparto del territorio considerato). Il fabbisogno idrico o Crop Water Requirements CWR qui utilizzato è un concetto potenziale basato su assunti di condizioni pedo-ambientali e di produzione; le scelte agronomiche dell'agricoltore, combinate con l'estrema variabilità ambientale determinano elevate differenze tra la CWR e l'acqua realmente utilizzata a scopo irriguo per la singola coltura. La differenza tra CWR territoriale e richiesta di acqua del comparto agricolo si amplia esponenzialmente se si considera poi la mancanza di dati certi sulle effettive superfici irrigate. È rimarcare dunque la differenza tra Fabbisogno idrico delle colture e Fabbisogno irriguo ai fini di bilancio idrico territoriale.

Attraverso questo lavoro sfruttando le funzioni di calcolo della CWR del software Cropwat 8.0 si è stimato il deficit idrico per tutto il territorio della Regione Marche, considerando le differenze pedoambientali e climatiche per Ambienti Omogenei di Riferimento AOR e restituendo i dati aggregati per Autorità di Ambito Territoriale Ottimale AATO per mese negli anni 2014-2024.

Il software Cropwat 8.0, partendo dalla definizione di CWR, calcola nello specifico modulo il deficit idrico delle colture per decade per l'intera stagione di crescita della pianta, come differenza tra l'evapotraspirazione delle colture in condizioni standard (ETc) e le precipitazioni efficaci (Peff).

$$CWR = \sum_1^{365} (ETc - Peff)$$

La precipitazione efficace si riferisce a quella porzione di pioggia che può essere effettivamente utilizzata dalle piante, dunque la precipitazione totale al netto delle perdite per deflusso superficiale e per percolazione profonda. La quantità d'acqua effettivamente disponibile nel terreno dipende dalla tipologia di suolo, dalla pendenza, dalla copertura della coltura, dall'intensità delle precipitazioni e dal contenuto idrico iniziale del suolo (Smith et al. 2009).

L'evapotraspirazione delle colture in condizioni standard è definita come l'evapotraspirazione di colture esenti da malattie, ben fertilizzate, coltivate in grandi campi, in condizioni ottimali dell'acqua nel suolo e che raggiungono la piena produzione nelle condizioni climatiche date. Viene calcolata con la formula:

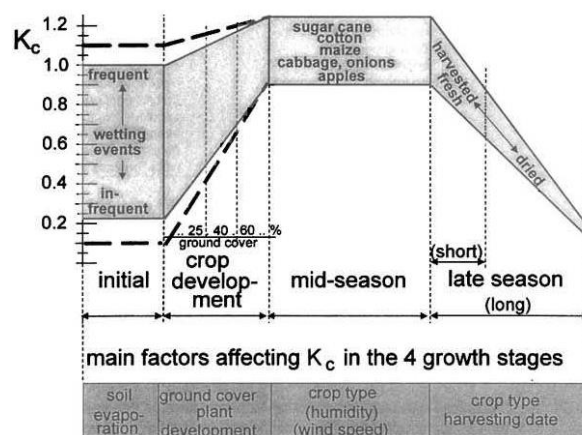
$$ETc = Kc * ETo$$

ETo è la domanda evaporativa dell'atmosfera indipendentemente dal tipo di coltura, dallo sviluppo della coltura e dalle pratiche di gestione; l'acqua è considerata abbondantemente e disponibile sulla superficie evapotraspirante di riferimento, di conseguenza i fattori del suolo non influenzano l'ETo. Gli unici fattori che influenzano l'ETo sono i parametri climatici calcolati a partire dai dati meteorologici.

Kc è il coefficiente di coltura, parametro che integra in sé gli effetti delle caratteristiche fisiologiche che governano la traspirazione suolo-pianta-aria di una specifica coltura rispetto alla coltura di riferimento standard per ETo. Questo parametro è influenzato principalmente dal tipo di coltura e, in misura minore, dal clima e dall'evaporazione del suolo (Smith et al. 2009).

Fig.1 - Coefficiente colturale Kc per le diverse fasi di sviluppo della pianta e principali fattori che lo determinano.

Fig.1- Crop coefficient Kc for the different stages of plant development and main factors that determine it.



Il Kc per una data coltura varia durante le fasi di crescita, poiché la copertura del suolo, l'altezza della coltura e la superficie fogliare cambiano con lo sviluppo della coltura stessa, secondo lo schema in Figura 1.

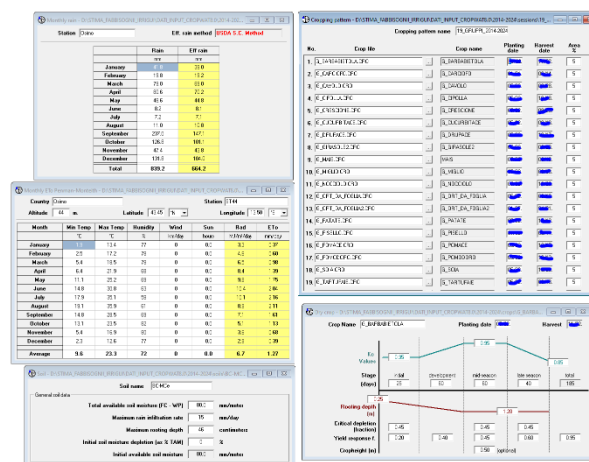


Fig.2 – Moduli per l'inserimento dati nell'applicativo CROPWAT 8.0 for Windows.

Fig.2 - Data entry forms of the application CROPWAT 8.0 for Windows.

Il Servizio Agrometeo dell'AMAP della Regione Marche ha fornito i dati mensili necessari a calcolare ETo e Peff come dati di input del software; dati forniti per ogni stazione meteorologica selezionata rappresentativa del territorio per AOR per gli anni 2014 – 2024.

Il modello risulta particolarmente sensibile al variare della Peff e propone diversi metodi per la sua stima partendo dalla precipitazione totale: una percentuale fissa da settare rispetto alla pioggia totale, una formula empirica e una formula proposta dall'USDA Soil Conservation Service, o, in casi particolari (esempio nelle serre) non considerare la precipitazione. Attraverso alcune prove effettuate variando il singolo parametro e con l'esperienza di altri lavori precedenti, in particolare su modelli per la valutazione

dell’erosione idrica dei suoli, si è ritenuto più accurato utilizzare la formula USDA. La variabilità spaziale del dato climatico è stata considerata attraverso la suddivisione del territorio della Regione Marche in Ambienti Omogenei di Riferimento AOR, si tratta di 11 ambienti omogenei per condizioni pedoclimatiche; per ogni ambiente è stata individuata una stazione meteo rappresentativa dalla quale estrarre i dati necessari per gli anni considerati. Gli Ambienti Omogenei di Riferimento sono stati individuati in passato con appositi studi e utilizzati per diverse applicazioni di discretizzazione del territorio (Tiberi et al. 2014).

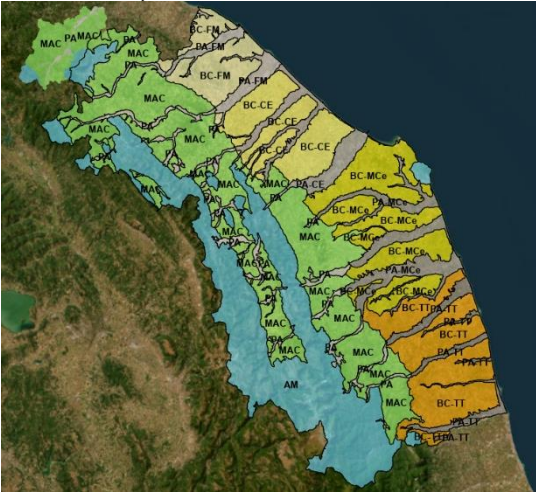


Fig.3 – Mappa degli ambienti omogenei di riferimento.
Fig.3 - Map of homogeneous reference environments.

Utilizzando come base dati la Carta dei Suoli e Paesaggi delle Marche (Tiberi et al. 2006) è stata individuata una tipologia di suolo prevalente e rappresentativa per ogni AOR e da questa estratti i dati di input per il parametro suolo. CROPWAT 8.0 for Windows per il suolo richiede: 1- Total aviable soil moisture (AWC calcolata con pedofunzione per tutte le tipologie di suolo; mappa scala scala 1:250.000 e intersezione con AOR), 2- Maximum rain infiltration rate (dato misurato in campo con specifico progetto di approfondimento sulle proprietà idrauliche dei suoli; misure del coefficiente idraulico saturo K-sat), 3- Maximum rooting depth (da mappa scala 1:250.000 e intersezione con AOR).

Tab.1 - Breve descrizione geografica degli ambienti omogenei di riferimento.

Tab.1 - Brief geographical description of the homogeneous reference environments.

Codici cartografici	Nome e breve descrizione geografica
PA_FM	Pianura Alluvionali tra il Foglia e Metauro
BC_FM	Bassa Collina tra il Foglia e Metauro
PA_CE	Pianura Alluvionali tra il Cesano ed Esino
BC_CE	Bassa Collina tra il Cesano e Esino
PA_MCe	Pianure Alluvionali tra Musone e Chienti
BC_MCe	Bassa Collina tra Musone e Chienti
PA_TT	Valli tra il Tenna e Tronto
BC_TT	Bassa Collina tra il Tenna e Tronto
MAC	Media Alta Collina
PAI	Pianure Interne
AM	Area Montana

CROPWAT 8.0 for Windows è un DSS utile a scala aziendale che può lavorare per singola coltura o per gruppo di colture (cropping pattern, ad esempio settore irriguo); sfruttando il modulo cropping pattern, che gestisce fino ad un massimo di 20 coltivazioni differenti, attraverso una serie di procedure GIS si è potuto utilizzare il software a scala territoriale di regione. Come primo passo si è proceduto a classificare e raggruppare l’universo delle coltivazioni praticate nella Regione Marche potenzialmente definite irrigabili in 20 gruppi di coltivazioni irrigue.

La base dati utilizzata per la definizione delle superfici, delle coltivazioni praticate potenzialmente irrigabili è stata lo strato geografico del fascicolo grafico della PAC; si tratta dello shapefile delle totalità degli appezzamenti dichiarati a coltivazione nel fascicolo aziendale fornito dall’Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura AGEA su specifica richiesta una tantum.



Fig.4 - Dettaglio della copertura dello strato informativo del fascicolo grafico.

Fig.4 - Detail of the information layer coverage of the graphic file.

I dati a disposizione sono relativi agli anni 2019 e 2023, non disponendo della sequenza annuale per tutto il periodo 2014–2024, considerata però la ciclicità delle rotazioni che si può considerare stabile nel breve e medio periodo, i due anni

sono stati utili come riferimento per i periodi 2014-2019 e 2020-2024. Le coltivazioni sono state accorpate per similitudine nello sviluppo fisiologico della pianta in relazione al fabbisogno irriguo.

L'accorpamento ha generato la semplificazione di circa 290 colture (tipologie di superfici/codice prodotto) in 19 classi o gruppi di coltivazioni irrigue; questo ha permesso di calcolare la CWR per gli anni di riferimento, per le 19 tipologie di coltivazioni e per ognuno degli 11 ambienti omogenei di riferimento.

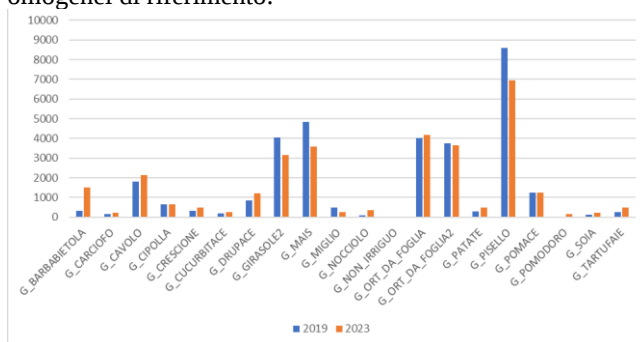


Fig.5 – Ettari coltivati per gruppo irriguo nel territorio della Regione Marche.

Fig.5 – Hectares cultivated per irrigated group in the territory of the Marche Region.

Attraverso la creazione di specifici gruppi fittizi sono stati considerati i secondi raccolti e/o le coltivazioni a più cicli, ad esempio il Girasole in secondo raccolto o più cicli di ortaggi, ne consegue che la seconda coltura o il secondo ciclo sia trattato come un aumento di superficie irrigua per anno rispetto alla reale superficie. Per ogni gruppo irriguo sono stati definiti i parametri di coltivazione necessari al modello e inseriti nell'apposito modulo Crop.

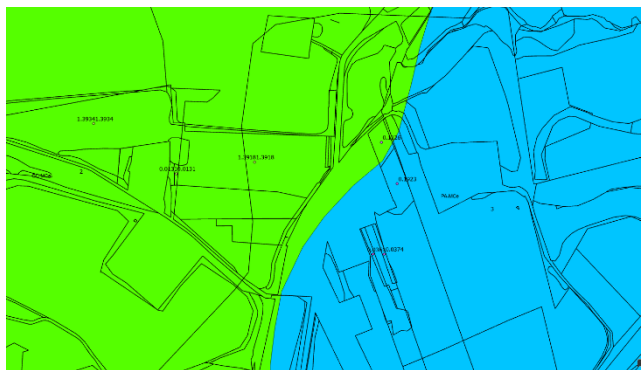
Il modulo Crop richiede alcuni fattori che contribuiscono in maniera determinante alla definizione della CWR e sono: 1- Coefficiente culturale (K_c): coefficiente che integra l'effetto delle caratteristiche fisiologiche della coltura specifica rispetto alla coltura di riferimento, principale parametro che trasforma l'evapotraspirazione di riferimento nell'evapotraspirazione standard (Richard et al. 1998); 2- Stadi di sviluppo della pianta: si tratta di una suddivisione del ciclo vegetativo della coltura al fine di attribuire diversi K_c per ogni periodo e/o altri parametri di calcolo (Richard et al. 1998). Ci sono poi parametri più specifici legati alla fisiologia della pianta che sono: 3- Profondità delle radici minima e massima durante lo sviluppo: parametro che definisce la capacità della coltura di sfruttare la riserva idrica del suolo; 4- Punto critico di stress (p): livello critico di umidità del suolo al quale si verifica il primo stress da siccità, i valori sono espressi come frazione dell'acqua disponibile (TAW parametro suolo), normalmente variano tra 0.4 e 0.6, valori bassi valgono per colture sensibili con apparati radicali limitati, mentre valori più alti per colture con radici profonde e dense; 5- Fattore di risposta della resa (K_y): fattore che mette in relazione la diminuzione della resa con il deficit di evapotraspirazione. Colture tolleranti del deficit idrico avranno una diminuzione della resa proporzionalmente minore all'aumentare del deficit idrico

($K_y < 1$), mentre colture sensibili avranno una diminuzione della resa proporzionalmente maggiore ($K_y > 1$) (Doorenbos J et al. 1979); 6- Altezza massima della coltura: parametro facoltativo che consente la regolazione dei valori del coefficiente culturale in condizioni non standard, in particolare con valori di umidità relativa che si discostano notevolmente dal 45% o con velocità del vento superiore o inferiore a 2.0 m/s.

Per calcolare il fabbisogno generale a scala regionale e di AATO da introdurre nel bilancio idrico sono state calcolate le superfici in ettari coperte da colture potenzialmente irrigate per ogni ambiente omogeneo raggruppate per gruppo irriguo. Solo i poligoni degli appezzamenti con coltivazioni classificate potenzialmente irrigabili sono stati trasformati in punti (centroide), questi hanno poi concorso alla sommatoria della superficie. In Figura 6 è possibile apprezzare la procedura di calcolo in ambiente GIS: i colori differenti delle due aree si riferiscono a due AOR distinti, i centroidi appaiono solo negli appezzamenti con coltivazioni classificate potenzialmente irrigabili e hanno colori differenti per gruppo irriguo, la presenza del raddoppio della superficie in alcuni numeri è lo specifico caso della seconda coltura o il doppio ciclo (girasole o ortive da foglia).

Fig.6 - Esempio di calcolo delle superfici.

Fig.6 - Example of surface calculation.



Risultati e Discussione

Effettuati i 121 run del modello necessari a considerare 11 anni (2014-2014) per 11 AOR (stazioni meteo e dati suoli differenti) si sono ottenuti i mm di deficit idrico o CWR per i 20 gruppi irrigui. Gli output di modello sono stati trattati trasformando i mm di CWR in mc/ha, moltiplicando poi per gli ettari del gruppo irriguo, aggregando per AOR e AATO, si ha una stima della CWR totale espressa in Mm3 per superficie territoriale di riferimento (regione, AOR, AATO). Guardando la Figura 7 riferita al totale della CWR per l'intero territorio regionale si osserva un debole trend in aumento che non è però statisticamente significativo come risultato da un test di Mann-Kendall applicato con un livello di significatività fissato al 95%. Ulteriori anni di analisi potranno chiarire il trend, se si osserva però l'andamento mensile del fabbisogno irriguo per tutti gli 11 anni

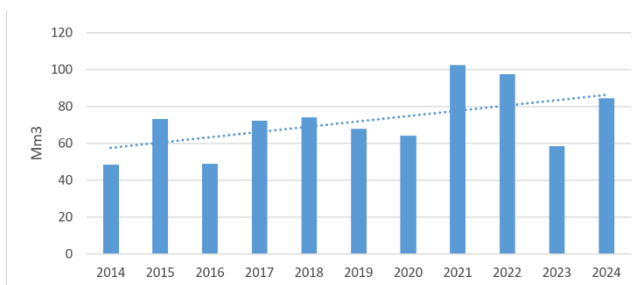


Fig.7 – Stima dei fabbisogni irrigui della Regione Marche come deficit idrico dal 2014 al 2024.

Fig.7 – Estimated irrigation needs of the Marche Region as water deficit from 2014 to 2024.

è possibile individuare la finestra di possibile maggior richiesta di acqua per scopo irriguo; analizzando Figura 8 è possibile individuare alcuni anni dove la richiesta è già sensibilmente presente prima del mese di giugno (esempio 2021 e 2022), confrontando così i due grafici Figure 7 e 8 si può vedere che proprio gli anni con maggior deficit nella stagione primaverile sono quelli con maggior deficit totale.

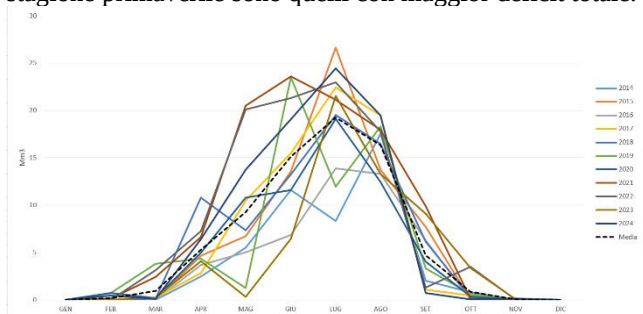


Fig.8 – Andamento mensile del fabbisogno irriguo della Regione Marche come deficit idrico per gli anni 2014-2024.

Fig.8 – Monthly trend of irrigation needs of the Marche Region as water deficit for the years 2014-2024.

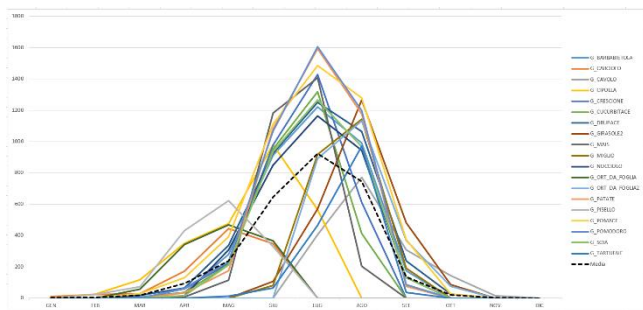


Fig.9 - Stima del fabbisogno irriguo per gruppo di coltivazioni in m³/ha, medie del periodo 2014-2024.

Fig.9 - Estimated irrigation requirement by crop group in m³/ha, 2014-2024 averages.

Attraverso questo lavoro è stato possibile individuare il fabbisogno medio del singolo gruppo irriguo espresso in m³/ha nell'arco dell'anno, dando la possibilità di valutare i periodi di maggior richiesta Figura 9.

Conclusioni

Attualmente non esistono sistemi di misurazione del prelievo irriguo con copertura totale, di conseguenza sono necessari sistemi di stima del fabbisogno idrico delle singole colture irrigate. Non esistono altresì dati certi sull'estensione delle colture irrigate e, anche in questo caso, ci si affida a stime per i territori non serviti da strutture poste sotto misura. Sussistono dunque difficoltà a misurare l'effettivo prelievo idrico per l'irrigazione. L'individuazione delle seconde colture e la sovrapposizione di più cicli di colture irrigue nello stesso appezzamento sono stati stimati. La stima di questo lavoro non tiene conto della reale restituzione in termini di irrigazione rispetto al deficit idrico o CWR da modello. Nonostante i valori di output del modello per gruppo di coltivazione siano comparabili ai dati di letteratura, rimane impossibile definire con certezza la richiesta irrigua, ma tale strumento permette un primo passo verso l'integrazione della richiesta di acqua del comparto agricolo nella pianificazione di bilancio idrico e idrologico della Regione Marche.

Bibliografia

- Doorenbos J., Pruitt W.O., Aboukhaled A., Damagnez J., Dastane N.G., Van den Berg C., Rijtema P.E., Ashford O.M., Frere M., 1982. Crop water requirements. FAO Land and Water Development Division, 144 pp.
- Richard G.A., Luis S.P., Dirk R., Martin S., 1998, Crop Evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements, FAO, Water Resources, Development and Management Service, 174 pp.
- Smith M., Van Halsema G., Maraun F., Izzi G., Wahaj R., Munoz G., 2009, User manual CROPWAT 8.0 for Windows, FAO Water Resources Development and Management Service - Land and Water Development Division.
- Tiberi M., Ciabocco G., Bernacconi C., Bampa F., Dunber M. B., Montanarella L., 2014, MOSYSS Project - Monitoring SYstem of Soils at multiScale. Monitoring system of physical, chemical and biological soil parameters in relation to forest and agricultural land management, Publications Office of the European Union, 136 pp.
- Tiberi M., D'Alessio D., Cassi F., Ciabocco G., Bernacconi C., Budini A., Rossini L., Ricci P., 2006, Suoli e paesaggi delle Marche, Monografia A.S.S.A.M., 303 pp.
- Doorenbos J., Kassam A.H., Bentvelsen C.L.M., Branscheid V., Plusjé J.M.G.A., Smith M., Uittenbogaard G.O., Van Der Wal H.K., 1979, Yield response to water, FAO, 193 pp.

MEAN AND EXTREME PRECIPITATION REGIME ANALYSIS IN NORTH AND CENTRAL ITALY

STUDIO DEL REGIME PRECIPITATIVO MEDIO ED ESTREMO DELL'ITALIA CENTRO-SETTENTRIONALE

Simone Gabriele Parisi (**1), Gianluca Alimonti (*2) , Luigi Mariani (*3)

**1 DIAGRAM S.p.A - Via Cavicchini 9, 44037 Jolanda di Savoia (FE)

Corrisponding author (s.parisi@diagramgroup.it)

*2 INFN - Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano - Via Celoria 16, 20133 Milano

*3 DICATAM – Università degli Studi di Brescia - Via Branze, 43, 25123 Brescia.

Abstract

The study consists of the analysis of the ARCIS rainfall dataset (1961–2023) with data from 1762 stations located in 7 northern and 3 central Italian regions, with a resolution of 4.7 x 4.7 km. The mean annual precipitation shows strong interannual variability, as does the frequency and intensity of extreme events (>50 mm). Identifying areas with significant trends is essential for natural hazard management. On average, 84 % of the areas show no significant increases in frequency and intensity, while about 13 % show significant increases and 3 % show equally significant decreases. The seasonal analysis 1991–2023 shows an increase in extreme events in autumn, especially in November, a slight decrease between January and April, and a strong decrease in August, attributable to the interaction between synoptic circulation and mesoscale factors.

Parole chiave

Eventi estremi, Climatologia delle precipitazioni, Dataset grigliato delle precipitazioni, Trend in frequenza ed intensità

Keywords

Extreme events, Precipitation climatology, Gridded precipitation dataset, Frequency and intensity trends.

Introduction

Jacqueline Katz, the 2022–2023 Albert Einstein Distinguished Educator Fellow at the Library of Congress, noted that in all sciences, stability and change are key concepts. Stability refers to the persistence of systems, while change involves transformation over time. In climatology—the science of the climate system—these concepts are reflected in climate variability and change, which can be driven by internal system dynamics or by natural and human-induced (anthropogenic) forces.

A crucial element of climate studies is precipitation, both in terms of averages and extremes, due to its major impact on ecosystems and human activities such as agriculture, industry, and transportation. Extreme rainfall events can cause floods, landslides, and erosion, particularly relevant for countries like Italy, which has over 8,000 km of coastline and is influenced strongly by the Mediterranean Sea.

Studies in the Mediterranean region show mixed results. Sun et al. (2021) found that about 4% of rainfall stations reported increasing annual maxima, while 4% showed decreases, suggesting a general stability in extreme rainfall. The IPCC (2023) reports that while extreme precipitation is expected to rise globally with warming beyond 1.5°C, this trend does not hold for the Mediterranean region, where a summer decrease is projected.

Research based on station data has supported these findings. For instance, Mariani and Parisi (2013) analyzed Euro-Mediterranean rainfall and disputed earlier claims of increasing extremes despite declining totals. A detailed Italian study by Libertino et al. (2017) examined over 4,500

stations from 1916–2014 and found no significant national trends in extreme precipitation frequency or intensity, supporting the idea of climate stationarity.

Similarly, Fatichi and Caporali (2009), working with Tuscan data, and Pinna (2014), examining Mediterranean stations, found no clear trends in extreme rainfall intensities. Bassi et al. (2011) observed mixed trends across Piemonte, with no dominant spatial pattern. Brunetti et al. (2011) reported decreasing high-intensity rainfall in Calabria after 1950, with increases in lower-intensity events.

Italy's geography makes it particularly prone to extreme weather due to complex topography, sea proximity, and the presence of cold and moist air masses. Factors such as synoptic blocking, humid Mediterranean air, and mountain-induced lifting often lead to intense rainfall. Doswell et al. (1996) emphasized the roles of moisture, vertical motion, and storm efficiency in producing high-intensity, long-duration precipitation events.

An example of such dynamics is the flood in Valencia, Spain (2024), where over 770 mm of rain fell in 14 hours due to high moisture transport, strong convective energy, and deep, warm cloud structures.

Today, rainfall trends can also be studied using gridded datasets like ARCIS, which covers Northern and Central Italy. This study uses ARCIS data from 1961–2023 to analyze spatial patterns and trends in 24-hour extreme precipitation events, aiming to provide insights that support effective land use and risk management strategies.

Data & Methods

The work was done analyzing data from the Climatological Archive for North and Central Italy by the ARCIS

consortium (<https://www.arcis.it/wp/>). This archive is the result of an agreement between some regional meteorological services belonging to the following public bodies: ARPA Piemonte, ARPAL, ARPA Emilia Romagna, ARPA Lombardia, ARPA Veneto, Provincia Autonoma di Trento, Provincia Autonoma di Bolzano, Regione Autonoma Valle D'Aosta, ARPA Friuli-Venezia Giulia. This agreement aimed to the establishment and management of an historical daily precipitation database (Pavan et al., 2013). The ARCIS database contains daily precipitation data from 1961 to 2023, spatialized on 4.7×4.7 km cells for a total of 7605 cells and it is an effective tool for understanding the precipitation evolution over North-Central Italy.

As indicated by Pavan et al. (2018), the data come from 1762 stations located in the ARCIS consortium areas, from stations belonging to 11 Italian administrative regions (Piemonte, Valle d'Aosta, Liguria, Lombardia, Emilia Romagna, Veneto, Trentino Alto Adige, Friuli Venezia Giulia, Toscana, Umbria, and Marche), and from stations close to the Italian borders belonging to foreign national meteorological services. The ARCIS area covers 189343 km² and there is one station every 107.47 km² on average, despite the presence of significant inhomogeneities in the stations spatial distribution. The ARCIS data collection is frequently updated and at present spans from 1961 to 2023. The time series was constructed by joining several stations that did not overlap in time, selecting stations that cover at least 80 percent of the analysis period. The Italian data come partly from the former National Hydrographic Service and subsequently from various local and regional services.

Precipitation data were interpolated on a regular grid of 4.7×4.7 km using a method based on a modified Shepard algorithm (Antolini et al., 2016) that considers topographic distances between stations and the interpolation error was evaluated using a cross-validation technique.

Errors were analyzed according to season and altitude. Low-intensity events tend to be overestimated in low-elevation areas, while high-intensity events are often underestimated, especially in winter. The final product has improved performance in mountainous areas and regions with high station density.

The whole process allowed the construction of a homogeneous and consistent database suitable for describing not only average precipitation values, but also their spatial and temporal variability, which is essential for climate and impact studies.

This paper analyzes precipitations on the Arcis area to obtain an updated climatology referred to average, variability and extreme values for the whole dataset. Moreover, the extreme precipitation temporal trend over the ARCIS area has been analyzed, including the calculation of significantly positive and negative trends at the general level and pixel by pixel. More specifically:

- The intensity trend referred to yearly absolute maximum daily precipitation
- The frequency trend of the number of days per year when daily precipitation exceeds the 50 mm threshold, which can be considered a benchmark for extreme daily precipitation

(<https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/090.htm?> - Fig. 2.34).

Trend analysis was performed using the Mann Kendall test (Gilbert, 1987) that is a nonparametric methodology that allows trends to be analyzed without making assumptions about the data distribution.

This was supplemented by an analysis of the frequency and intensity percentage changes that occurred during 1991-2023 (33 years) compared with the 30-year period 1961-1990 by highlighting them in map products and frequency histograms. The choice of the two reference subperiods was dictated by the fact that 1961-1990 is still recommended by WMO for the computation and tracking global climate anomalies relative to a fixed and common reference period (World Meteorological Organization, 2021 - a) while the 1991-2023 subperiod is after the macroscale circulatory change of the '80s, which global features are described by Reid et al., (2016) while European effects on selected crops are described in Mariani et al. (2012).

The significance of the differences in frequencies of different classes of precipitation in the subperiods 1961-90 e 1991-2023 has been evaluated using the Chi square test "SciPy-stats" library of Python (Skipper et al., 2010).

Results and Discussion

This study presents a comprehensive analysis of precipitation patterns in North and Central Italy using the ARCIS gridded dataset for the period 1961–2023. The dataset offers valuable insights into both mean climatology and extreme rainfall behavior, enabling spatially and temporally resolved assessments of precipitation variability and trends at regional scale.

1. Mean Precipitation Climatology

The annual average precipitation across the ARCIS area reflects a strong orographic influence, with the highest totals in pre-Alpine and northern Apennine zones. By contrast, interior Alpine valleys, plains, and coastal zones generally receive lower rainfall amounts. This spatial structure remains largely consistent with earlier climatological maps derived for earlier periods (e.g., 1921–1950, 1971–1990), confirming the long-term stability of the mean precipitation regime in the region.

The spatial distribution of standard deviation mirrors that of mean precipitation, with greater variability in mountainous areas. Statistical tests (Mann-Kendall) applied to both mean and standard deviation time series confirm the stationarity of annual precipitation, with no significant trends detected in central tendency or dispersion. Notably, four exceptionally wet (1963, 2002, 2010, 2014) and four markedly dry years fall outside the 5th and 95th percentiles, highlighting interannual variability driven by large-scale circulation patterns, such as blocking systems and variations in cyclonic activity.

Human settlement patterns in the region have historically adapted to these spatial and temporal precipitation constraints. Major urban areas typically align with moderate rainfall zones, often near rivers sourced from wetter highland regions. The stability of the long-term average rainfall is of

significant relevance for managing water resources in agriculture, energy, and urban systems.

2. Extreme Precipitation Events: Trends and Spatial Patterns
The analysis of daily extreme precipitation events reveals substantial interannual variability, with daily maxima occasionally exceeding 400 mm. A weak but nearly significant upward trend is observed in annual absolute maximum rainfall (Mann-Kendall $p \approx 0.05$), while the frequency of events exceeding 50 mm shows a non-significant positive trend. However, a shift is evident post-2007, with an increasing number of such events culminating in a peak in 2014.

Spatial maps of absolute maxima and event frequencies illustrate key exposure zones for hydrometeorological hazards. Maximum daily precipitation values and frequencies above 50 mm are notably concentrated in mountainous and pre-Alpine regions, reflecting the combined effects of orographic lifting, synoptic flow patterns, and mesoscale convective systems.

Trend analyses identify statistically significant increases in daily maximum precipitation over 14.66% of the ARCIS area, with declines in only 1.92% of the grid cells. Regions exhibiting intensified extremes include Liguria, Lombardia, Trentino-Alto Adige, Piemonte, and Veneto. Conversely, Friuli Venezia Giulia, Emilia-Romagna, and the central Italian regions of Toscana, Marche, and Umbria show minimal or no trends.

Event frequency trends (>50 mm) are similarly spatially heterogeneous. Lombardia, Veneto, and Trentino-Alto Adige account for the largest shares of positive trends, with over 20% of their territories affected. Declining frequencies are sparse and lack spatial coherence. A comparison between trends in frequency and intensity across regions reveals local nuances—for instance, in Piemonte, increased maxima are not matched by a proportional increase in event frequency.

3. Subperiod Comparison and Correlation with Mean Rainfall

A comparative analysis of two subperiods (1961–1990 vs. 1991–2023) shows that regions experiencing increases in annual maxima and event frequency also report significant positive percentage changes in both variables. The areas of strongest change align closely with previously identified trend hotspots, reinforcing the robustness of observed patterns.

Scatterplots reveal a statistically significant correlation between mean annual precipitation and both extreme metrics—absolute maximum (RX_abs) and frequency of events >50 mm ($R > 0.50$). However, the coefficient of determination is substantially higher for frequency ($R^2 \approx 0.64$) than for maximum intensity ($R^2 \approx 0.14$), suggesting that frequency is more closely tied to macro- and mesoscale processes, while intensity reflects more localized (beta-mesoscale) dynamics.

4. Seasonal and Monthly Patterns of Extreme Rainfall

Analysis of monthly distributions shows a marked seasonal shift in extreme rainfall. The October–November period dominates the frequency of events >50 mm, particularly in the post-1990 subperiod. November, in particular, shows a significant increase, while August and winter months exhibit

reduced frequencies. These findings align with other studies attributing such patterns to warming sea surface temperatures in the Mediterranean, increased moisture availability, and altered atmospheric circulation.

Chi-squared tests comparing the frequency distribution of precipitation events across intensity classes between the two subperiods indicate significant changes. Specifically, there is a statistically significant increase in all intensity classes above 25 mm, with a notable decrease in the lowest class (0–25 mm), suggesting a general shift toward more intense events.

5. Interpretation of Localized Trends and Synoptic-Mesoscale Dynamics

Contrary to the global signal of increasing extreme precipitation (IPCC, 2023), trends in North-Central Italy are not spatially homogeneous. Intensification is confined to specific subregional "nuclei," surrounded by areas showing no change or even slight decreases. This underscores the importance of analyzing precipitation extremes at fine spatial scales (beta- and gamma-mesoscale) and supports the idea that regional precipitation behavior can diverge significantly from global patterns.

The localized nature of intensification is consistent with the complex interaction of meteorological drivers operating across multiple scales. Key contributing processes include: Mediterranean Sea surface temperature rise, enhancing latent heat fluxes and increasing convective potential, particularly in autumn.

Persistence of cold air masses, which, despite Arctic warming, continue to drive strong thermal contrasts with warm Mediterranean air masses.

Cyclogenesis in the Gulf of Genoa and western Mediterranean, which shows high interannual variability but no clear increasing trend.

Synoptic disturbances and atmospheric rivers, which transport moisture from distant sources (e.g., subtropical Atlantic) and interact with local orography to enhance precipitation efficiency.

These findings echo the complex dynamics described in prior studies (e.g., Grazzini et al., 2019; Winschall et al., 2014), where the interaction of moist airflows with orographic barriers and upper-level atmospheric features yields high precipitation rates over limited areas.

6. Data Quality and Gridded Dataset Considerations

The reliability of findings from gridded datasets such as ARCIS hinges on robust validation and homogeneity control. ARCIS data underwent quality control measures, including removal of spurious values, homogeneity testing, and synchronization of observational records. However, broader concerns persist regarding the comparability of historical and recent precipitation measurements, especially due to the technological transition from manual to automatic weather stations between 1980 and 2000.

These changes, coupled with inconsistent international practices in metadata documentation and post-processing (as noted by WMO, 2021), can introduce biases, particularly in extreme event detection. Nonetheless, the ARCIS dataset provides a well-validated basis for trend analysis and

supports continued investigation into climate variability and change across Italy.

7. Implications for Climate Risk and Adaptation

The spatial heterogeneity of precipitation extremes in North-Central Italy highlights the need for locally tailored adaptation strategies. Blanket approaches based on national or even regional averages risk overlooking vulnerable hotspots. Effective climate risk management should consider not only hazard metrics but also exposure and vulnerability, particularly in densely populated or infrastructure-heavy zones.

Given the complex and evolving nature of precipitation extremes, future work should emphasize high-resolution data collection (including sub-daily rainfall measurements), improved modeling of mesoscale processes, and interdisciplinary collaboration between climatologists, hydrologists, and planners.

Tab.1 - Percentuale regionale di pixel con trend significativamente positivo/negativo sul numero di giorni con precipitazioni > 50 mm e precipitazioni massime annuali nel periodo 1961-2023
Tab.1 - Regional percentage of pixels with significantly positive / negative trend on number of days with precipitation > 50 mm, and maximum annual precipitation in the period 1961-2023

Administrative Regions	% significat ive positive pixels (maximu m events)	% significat ive negative pixels (maximu m events)	% non significat ive	% significat ive positive pixels (events > 50 mm)	% significat ive negative pixels (events > 50 mm)	% non significat ive
Piemonte	23.08	0.39	76.53	2.23	6.4	91.37
Valle d'Aosta	1.56	3.13	95.31	3.91	1.56	94.53
Lombardia	31.36	2.7	65.94	30.32	1.66	68.02
Trentino-Alto Adige	25.4	0.71	73.89	24.33	0	75.67
Veneto	9.6	1.6	88.8	20.67	0.53	78.8
Friuli-Venezia Giulia	1.25	1.88	96.87	7.19	0.63	92.18
Liguria	34.58	0	65.42	9.35	0.93	89.72
Emilia-Romagna	3.69	4.92	91.39	1.01	2.68	96.31
Toscana	4.69	1.34	93.97	5.14	1.79	93.07
Umbria	4.26	0.61	95.13	3.65	6.69	89.66
Marche	6.22	2.7	91.08	8.38	2.16	89.46
Tot Area ARCIS	14.66	1.92	83.42	11.66	2.51	85.83

Conclusions

The work was carried on ARCIS dataset which refers to data from Northern Italy and from some regions (three) of Central Italy. This analysis was referred to some average precipitation characteristics for the period 1961-2023 and highlighted that precipitation patterns are stationary despite the presence of a significant interannual variability. The analysis was then extended to intensity and frequency trends of extreme precipitation and highlighted that 83% and 86% of the area does not show significant increases in frequency and intensity respectively, while 11% and 15% show significant increases and 2% and 3% show significant decreases. Finally, regarding seasonality, it was highlighted an extreme phenomena frequency increase in autumn (from

October to December with a more marked increase in November), a weak decrease from January to April and a marked decrease in August. The obtained indications have significant implications in terms of agricultural and hydro-geological territory management.

Finally, we would like to point out that it would be important that the activities will expand also to the remaining part of the Italian Country to have a meteorological data homogeneous gathering system coming from Italian weather station networks (mesonets).

Tab.2 - Numero di eventi divisi per classi nei due sottoperiodi, il periodo (1991-2023) *è stato normalizzato a 30 anni. Per la percentuale di variazione tra i due sottoperiodi, si è considerato quello normalizzato. Sono presenti inoltre P-value e il segno della significatività del trend sul periodo normalizzato.
Tab.2 - Number of events divided by classes in the two subperiods , the period (1991-2023) *has been also normalized to 30 years. For the percentage of variation between the two subperiods ,has been considered the normalized one. P-values and the sign of the trend's significance are also provided for the normalized period.

Class	Total num (1961-1990)	Total num (1991-2023)	Total num (1991-2023) *	Variation (%)	P-Value	Significant trend
0-25	20440061	21385771	19450701	-4.8	0.00E+00	Negative
25-50	1724343	1929040	1753673	1.7	1.03E-55	Positive
50-75	318995	382545	347788	9	5.38E-272	Positive
75-100	90835	103922	94475	16.7	2.94E-229	Positive
100-125	23336	35305	32095	34.6	3.22E-267	Positive
125-150	8960	13993	12907	40.7	3.72E-136	Positive
150-175	3692	6016	5469	48.1	5.97E-77	Positive
175-200	1681	2900	2545	51.4	2.41E-40	Positive
200-625	1618	2793	2539	56.9	2.68E-46	Positive

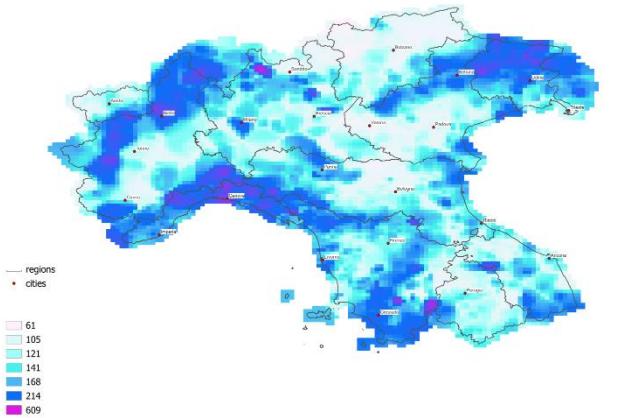


Fig.1 - Mappa delle precipitazioni massime giornaliere assolute per il periodo 1961-2023. La scala dei colori si basa su valori percentili di 7 classi.
Fig.1- Map of absolute maximum daily precipitation for the period 1961 - 2023. The color scale is based on 7 classes percentile values.

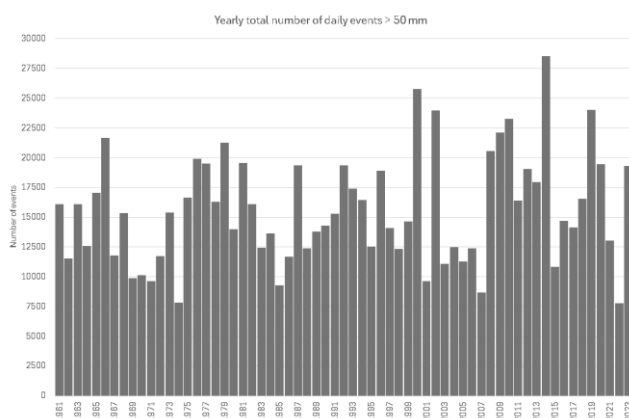


Fig.2 - Diagramma del numero annuale di eventi totali > 50 mm nell'intera area del dataset ARCIS.

Fig.2- Diagram of Yearly number of total events > 50 mm in the whole ARCIS dataset area.

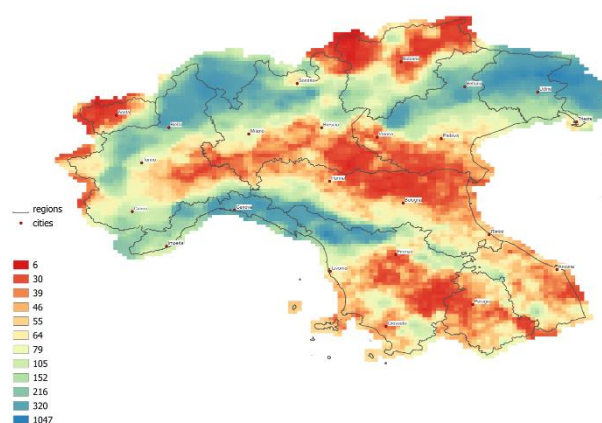


Fig.3 - Mappa del numero totale di eventi pluviometrici giornalieri superiori a 50 mm per il periodo 1961–2023. La scala dei colori si basa sui valori dei percentili delle 12 classi.

Fig.3- Map of the total number of daily rainfall events exceeding 50 mm for the period 1961 – 2023. The color scale is based on 12 classes percentiles values.

References

Antolini, G., Auteri, L., Pavan, V., Tomei, F. (2016). A daily high-resolution gridded climatic data set for Emilia-Romagna, Italy, during 1961–2010. *International Journal of Climatology*. DOI:10.1002/joc.4473.

Bassi, M., Colombino, G., Cremonini, R., Masciocco, L. (2011). Analisi delle piogge estreme in Piemonte. In *Atti del convegno Le modificazioni climatiche ed i rischi naturali*, pp. 53–58.

Brunetti, M., Caloiero, T., Coscarelli, R., Gullà, G., Nanni, T., Simolo, C. (2010). Precipitation variability and change in the Calabria region (Italy) from a high resolution daily dataset. *International Journal of Climatology*, 32(1), 57–73.

Fatichi, S., Caporali, E. (2009). A comprehensive analysis of changes in precipitation regime in Tuscany. *International Journal of Climatology*, 29(13), 1883–1893.

Frei, C., Schär, C. (1998). A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology*, 18(8), 873–900.

Gilbert, R.O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Grazzini, F., Craig, G.C., Keil, C., Antolini, G., Pavan, V. (2019). Extreme precipitation events over northern Italy. Part I: A systematic classification with machine-learning techniques. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 69–85.

IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Libertino, A., Ganora, D., Claps, P. (2019). Evidence for increasing rainfall extremes remains elusive at large spatial scales: the case of Italy. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2019GL083371.

Mariani, L., Parisi, S. (2013). Extreme rainfalls in the Mediterranean area. In: Diodato and Bellocchi (Eds.), *Storminess and Environmental Changes: Climate Forcing and Responses in the Mediterranean Region*. Springer.

Mariani, L., Parisi, S., Cola, G., Failla, O. (2012). Climate change in Europe and effects on thermal resources for crops. *International Journal of Biometeorology*, 56, 1123–1134. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0528-8>.

Pavan, V., Antolini, G., Barbiero, R., Berni, N., Brunier, F., et al. (2013). The ARCIS Project. *Italian Journal of Agrometeorology*, 2/2013, 51–55.

Pavan, V., Antolini, G., Barbiero, R., et al. (2018). High resolution climate precipitation analysis for north-central Italy, 1961–2015. *Climate Dynamics*, 52, 3435–3453. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4337-6>.

Reid, P.C., Hari, R.E., Beaugrand, G., et al. (2016). Global impacts of the 1980s regime shift. *Global Change Biology*, 22(2), 682–703. <https://doi.org/10.1111/gcb.13106>.

Skipper, S., Perktold, J. (2010). *Statsmodels: Econometric and statistical modeling with Python*. Proceedings of the 9th Python in Science Conference.

Sun, Q., Zhang, X., Zwiers, F., Westra, S., Alexander, L.V. (2021). A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. *Journal of Climate*, 34(1), 243–258. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0892.1>.

World Meteorological Organization (2021). Updated 30-year reference period reflects changing climate. <https://wmo.int/media/news/updated-30-year-reference-period-reflects-changing-climate>

EFFECTS OF DEFICIT IRRIGATION PRACTICES ON THE SOIL-PLANT-ATMOSPHERE SYSTEM: A CASE STUDY ON VITIS VINIFERA L. (TEROLDEGO CV.) FROM TRENTINO ALTO ADIGE, ITALY

SPERIMENTAZIONE DI DEFICIT IDRICO SUL SISTEMA SUOLO-PIANTA-ATMOSFERA: CASO DI STUDIO SU VITIS VINIFERA L. (CV TEROLDEGO) IN TRENTINO ALTO ADIGE

Cecilia Mattedi^{1*}, Fabio Zottele¹, Francesco Centurioni¹, Amelia Caffarra², Stefano Corradini¹

¹Fondazione Edmund Mach - Centro di Trasferimento Tecnologico - Agrometeorologia e Irrigazione, San Michele all'Adige, Italy

²ITK, Clapiers, France

* cecilia.mattedi@fmach.it

Abstract

One of the greatest challenges of agriculture is monitoring the water status of plants, to intervene in conditions of water stress to improve the yield quality, due to the changes in annual distribution of precipitation caused by Climate Change. In this experiment, four vines (*Vitis vinifera* L., cv Teroldego, Trentino Alto Adige) were monitored in two different water regimes: with and without irrigation. The Soil-Plant-Atmosphere-Continuum was monitored with plant micro tensiometers (FloraPulse & co, USA), with tensiometers installed in the soil and with a meteorological station recording atmospheric parameters. The 2024 growing season recorded abundant rainfall in spring, and a hot dry period in August. Despite that, non-irrigated plants reached only mild water stress levels. Calendar scheduled irrigation did not bring significant benefits to plants, confirming that a switch to precision irrigation practices is needed to provide the right amount of water at the right time, avoiding water loss through deep percolation.

Parole chiave

Soil-Plant-Atmosphere-Continuum, irrigazione a deficit, viticoltura, stress idrico

Keywords

Soil-Plant-Atmosphere-Continuum, Deficit irrigation, Viticulture, water stress

Introduction

It is now well established that climate change, with rising temperatures and irregular rainfall distribution throughout the year, will lead to an increase in crops' evapotranspiration needs and a greater sensitivity of soils to water scarcity (Calvin et al., 2023).

One of the greatest challenges in agriculture is the monitoring of the plant water status, to intervene in conditions of water stress and to improve yield quality. This is essential in Trentino, that despite being a small area (about 6200 km²) is noted worldwide for its winemaking tradition. Here growers put the main focus on the quality rather than quantity of the product, which can be achieved applying mild water stress to the vines (Van Leeuwen et al., 2009). This can be done by controlling irrigation, so as to apply the right amount of water to the crops when needed.

In the Trentino region irrigation is managed by the irrigation associations, that guarantee water supply to their members through irrigation shifts, often scheduled following a calendar. This approach results to be fair for the association members, but may not bring benefits to the crops, in the sense that vineyards are often over irrigated with consequent loss of water by deep percolation.

The aim of this study is therefore to assess if the scheduled irrigation approach does indeed fulfill the water needs of the vines and to monitor the plant water status with plant microtensiometers (FloraPulse & co, USA) in order to

understand the plant behavior in relation to the external forcings as precipitation and irrigation.

Materials and methods

Experimental site

The experimentation was conducted in a vineyard in Novali, close to Mezzolombardo which is located in the Adige valley in the center of the Alpine region (46°12'35.172"N, 11°6'36.187"E) at about 215 m above sea level. The cultivated variety is Teroldego (*Vitis vinifera* L.), which is an autochthonous grape variety managed using the "pergola doppia" system. The orientation of the vine rows goes from North-East to South-West, and row and vine spacing of the field are 5 m and 0.5 m respectively. The age of the vines is not homogeneous, since numerous plants have been renovated in the past years due to the occurrence of diseases. For the experimentation 4 mature and healthy reference vines were chosen, as similar as possible between each other in terms of trunk diameter, number of branches and number of buds on them. For two of them irrigation was blocked, and the other two were treated following the irrigation calendar of the local irrigation association (shown in Tab.1). The irrigation setup consists of a drip line with emitters with 2.2 l h⁻¹ capacity placed every 0.5 m distance on the pipeline.

Tab. 1 – Irrigation calendar
Tab. 1 – Calendario delle irrigazioni

Date	Start	End	Water [L/emitter]
13/08/2024	15:15	18:15	12.92
15/08/2024	15:15	18:15	16.36
17/08/2024	15:15	18:15	19.00
20/08/2024	15:15	18:15	17.04
22/08/2024	15:15	18:15	16.52
24/08/2024	15:15	18:15	14.20
27/08/2024	15:15	18:15	45.08
29/08/2024	15:15	18:00	4.56
01/09/2024	08:45	12:45	9.76
03/09/2024	15:15	18:15	7.40

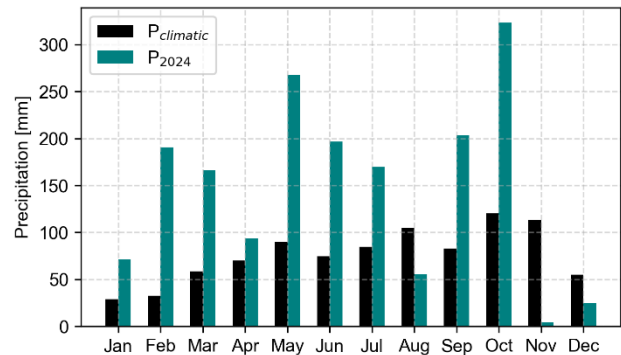


Fig.1 – Monthly precipitation distribution.
Fig.1 – Distribuzione mensile della precipitazione

Climatic framework

Following the Köppen–Trewartha climate classification (Trewartha and Horn, 1980) the climate of the site can be considered as Oceanic (Cfb), being characterized by moderate mean annual temperatures, a marked winter season and well distributed rainfall during the year. However, from the meteorological point of view, year 2024 has been very peculiar. The mean annual temperature recorded was equal to 13.8 °C, which is slightly higher than the climatological mean (13 ± 0.6 °C). The cumulated 2024 rainfall (1766 mm) exceeded the mean annual precipitation by 36% (mean annual precipitation: 1115 ± 292 mm), marking the 2024 year as one of the wettest of the last 30 years. These values were provided by the nearest meteorological station by Fondazione Edmund Mach (Mezzocorona Novali, station id: 45), located approximately 700 m South of the experimental site with data recorded since 1999. The meteorological station also provided air temperature and precipitation data for the experimental period.

Monitoring the Soil-Plant-Atmosphere-Continuum (aka SPAC).

The Soil-Plant-Atmosphere-Continuum is the pathway for water moving from the soil through plants to the atmosphere. The movement of water occurs in response to differences in

the potential energy of water along the SPAC path (Rekwar et al., 2022). The Stem Water Potential (Ψ_{stem}) in the plants was measured with FloraPulse microtensiometers (Lakso et al., 2022), that were installed on 2024, May 9th. For each vine, two probes were installed at different heights above the soil surface: one in the lower part of the stem (0.3 m from the ground) and the other one in the higher part of the stem (1 m from the ground). For each plant the mean value of the two Ψ_{stem} was calculated and used in the data analysis. The Soil Water Potential (Ψ_{soil}) was monitored at 0.3 m depth in the soil using soil tensiometers. A total of 4 tensiometers was installed, one next to each vine, between two drippers under the drip line. They were crafted following the procedure explained by Thalheimer (2013). All these instruments were connected to two dataloggers (one for the irrigated thesis and one for the non irrigated thesis) recording values with a time interval of 15 minutes and sending the data through WiFi connection to the server, allowing a real time monitoring of the status of the sensors and of the experimental site.

Atmospheric variables like air temperature and precipitation were provided by the Mezzocorona Novali meteorological station described before.

Vine balance and grape quality

To assess the vegetative productive equilibrium of the vines the Ravaz Index was estimated for each plant (Ravaz and Sicard, 1903). This index consists in the ratio between the weight of the yield (W_g) and the weight of the biomass (W_b) produced in the growing season:

$$I_{\text{rav}} = W_g W_b^{-1}$$

For this reason, no pruning was performed to the selected vines during all the growing season. The vines were harvested on 2024, September 20th, then all the grapes were weighted, bagged and the following oenological properties of the musts were analyzed (4 samples for each vine): sugar content, pH, total acidity, malic acid, tartaric acid, Yeast Assimilable Nitrogen (YAN) and Potassium (K^+). The biomass grown during the 2024 growing season was collected and weighed on 2024, December 18th.

Tab.2 –Ravaz Index (I_{rav}) for each selected plant.
Tab.2 – Indice di Ravaz (I_{rav}) per ogni pianta della sperimentazione

	Irrigated	Yield (W_g) [kg]	Biomass (W_b) [kg]	I_{rav}
Plant1	NO	6.09	1.92	3.2
Plant2	NO	4.64	2.57	1.8
Plant3	YES	2.12	3.41	0.6
Plant4	YES	6.16	1.13	5.5

to be under-cropped. Shoot growth of the plants is known to be sensitive to water deficit (Dry and Loveys, 1998) and the duration of shoot growth is reduced under low water supply. On the contrary, high availability of water resources enhances it. In Spring 2024 a consistent amount of rainfall was recorded (Fig.1 and Fig.2) in the study area, which almost doubled the climatological mean. The high availability of water in the soil was confirmed by the tensiometers (red and blue line in the lower plot of Fig.2), which recorded Ψ_{stem} values above field capacity (represented by the grey dotted line in Fig.2) for the months of May, June and partially for July. The unlimited availability of water for root uptake in the soil promoted the development of vegetation and shoot growth, reducing the fruits development. However, looking at the quality of the musts (Tab.3), no significant differences were recorded between the irrigated and the non-irrigated vines. Although the representative vines were carefully selected at the beginning of the vegetative season based on trunk diameter, number of shoots, and number of buds, plants later exhibited heterogeneous responses to environmental conditions, which likely contributed to the observed I_{rav} variability within the same treatment.

Microtensiometers have been proven to be an effective method to continuously monitor the plant water status (Mattedi et al., 2024). They help understand how plants rapidly react to water inputs and changes in the atmospheric conditions, allowing a real time monitoring of the stress conditions of the vineyard. Stem Water Potential trends are plotted in Fig.2 and Fig.3, where daily cycles of Ψ_{stem} are appreciable in all the 4 vines, with values that approach 0 MPa before dawn and reach the minimum value around 4 PM, before the sun gets shaded by the surrounding mountains. Notice how the signal is always dampened in the day following precipitation events.

Tab.3 -Oenological characterization of the musts of the two thesis (YAN: Yeast Assimilable Nitrogen)
Tab.3 – Risultati delle analisi enologiche dei mosti delle due tesi (YAN: azoto prontamente assimilabile)

	Irrigated	Non-irrigated
Sugar content	247.85 ± 33.09 g l ⁻¹	239.09±31.76 g l ⁻¹
pH	3.55± 0.19	3.38 ± 0.14
Total acidity	11.24 ± 1.38 g l ⁻¹	11.69 ± 1.82 g l ⁻¹
Malic acidity	7.15 ± 1.36 g l ⁻¹	6.46 ± 1.61 g l ⁻¹
Tartaric acid	6.06 ± 0.60 g l ⁻¹	6.41 ± 0.33 g l ⁻¹
YAN	278.6 ± 76.3 mg l ⁻¹	241.1 ±83 mg l ⁻¹
K+	3.33 ± 0.53 g l ⁻¹	3 ± 0.58 g l ⁻¹

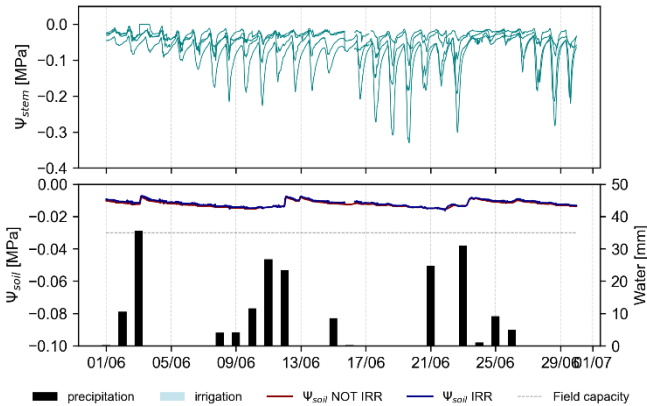


Fig.2- Trends of Stem water potential (Ψ_{stem}) of the 4 vines, Soil Water Potential (Ψ_{soil}), precipitation and irrigation at the beginning of the growing season (June). No irrigation was applied in this period. Despite being in the same environmental conditions, the plants presented variable Ψ_{stem} trends.

Fig.2 – Potenziale idrico delle piante (Ψ_{stem}), potenziale idrico del suolo (Ψ_{soil}), precipitazione e irrigazioni, all'inizio della stagione vegetativa (giugno). Si noti che in questo periodo non sono state effettuate irrigazioni.

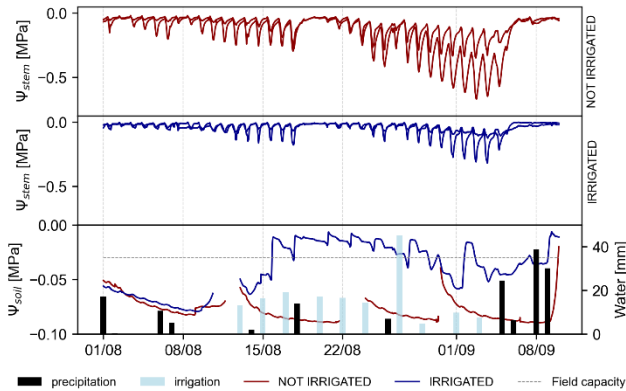


Fig.3- Trends of Stem water potential (Ψ_{stem}), Soil Water Potential (Ψ_{soil}), precipitation and irrigation for irrigated (blue) and non irrigated (red) vines in the driest month (August).

Fig.2 – Andamenti del potenziale idrico della pianta (Ψ_{stem}), del potenziale idrico del suolo (Ψ_{soil}), della precipitazione e delle irrigazioni per le due tesi (irrigato in blu, non irrigato in rosso), nel mese con meno precipitazioni (agosto).

Results and discussion

Tab. 2 summarizes the values of the Ravaz index estimated for every plant. Optimal vegetative productive balance is achieved with I_{rav} being in the interval between 5 and 7, values that are higher than the optimum range are over-cropped (large yield production and smaller vine) and values lower than the optimum range are under-cropped, meaning that there is an excess of vegetation with respect to fruit production. Only Plant4 appeared to be in optimal vegetative-productive balance, and all the others turned out

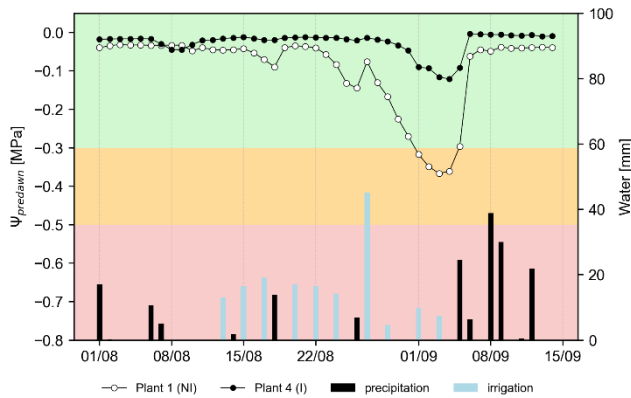


Fig.4 - Predawn water potential of the vines with the better I_{rav} for each thesis (green: no stress; orange: mild water stress; red: severe water stress, from Deloire et al. (2020)).
Fig.4 – Potenziale idrico all'alba delle due vigne, una per tesi, con I_{rav} migliore (verde: nessuno stress idrico; arancio: stress idrico moderato; rosso: stress idrico severo; soglie prese da Deloire et al. (2020)).

An important thing to notice is that for some plants the peaks of the minimum value are more pronounced with respect to the other plants. This highlights how each plant presents its own variability in Ψ_{stem} trend, despite being in the same environmental and meteorological conditions.

These differences can be due to variability in plant canopy development, in root structure (which unfortunately is quite difficult to monitor) and in soil conditions.

A more significant variability in Ψ_{stem} is appreciable in August (Fig.3), when the irrigation association started irrigating after a prolonged period with no precipitation. Ψ_{stem} of the non-irrigated plants reached lower values with respect to the irrigated plants, due to the low water content in the soil which is confirmed by the low values of Ψ_{soil} (red line in the lower plot of Fig.3). In order to assess the water stress of the vines, $\Psi_{predawn}$ was analyzed filtering the Ψ_{stem} values at 5:00 AM for the vines that were in the better vegetative-productive equilibrium (Fig.4). This can be done assuming that Ψ_{stem} at predawn can be compared to the stress threshold values of Ψ_{leaf} at predawn, being the SPAC at equilibrium. The non-irrigated plant presented lower values of $\Psi_{predawn}$ with respect to the irrigated plant. However, the lowest values were around -0.38 MPa, which corresponds to mild water stress (Deloire et al., 2020). Irrigations successfully prevented $\Psi_{predawn}$ values from falling below the mild water stress threshold, but this water could be saved since the non-irrigated plants never reached severe stress values and in two cases irrigations were followed by precipitation in the days after. This is beneficial not only for the water resource management, but also for the product quality, since organoleptic musts properties can be improved by mild vine water stress during maturation (Van Leeuwen et al., 2009).

The same analysis was conducted with Ψ_{midday} , that led to the same results: the lowest Ψ_{midday} (non-irrigated plant) were associated to mild water stress in the same period found before.

Conclusions

The year 2024 has been a peculiar year for water deficit experimentation. The start of the growing season has been extremely wet, and this enhanced shoot growth and inhibited fruit production. August was characterized by almost no water income, and despite the lack of water the non-irrigated plants never reached a compromising level of water stress. On the contrary, mild water stress has proven to be beneficial for improving the quality of the musts and of the wine. For this reason, there is an actual need to transition from the “scheduled irrigation” approach to a “precision irrigation” approach. This is mandatory since the annual precipitation distribution is changing and becoming more erratic throughout the years due to the effects of the ongoing Climate Change. Microtensiometer could play a key role in the monitoring of the crop water status to help the switch of approaches. Frequent and constant consultation of accurate weather forecasts could also be of great help for irrigation management.

Future studies will compare these results with simulations of vine water status generated using the Vintel Decision Support System (Peterlunger et al. 2023), a digital tool designed to simulate water status and optimize irrigation inputs in vineyards. The Vintel system relies on agronomic variables characterizing the vineyard and weather data. This comparison will facilitate the broader application of the practical recommendations derived from this study to additional vineyards, without the need of widespread sensor deployment. Furthermore, it will offer an opportunity to calibrate the Vintel system for the Pergola Trentina training method.

Acknowledgments

We extend our deepest gratitude to Danilo Caset who generously provided the grapevines for the experiment, adapting agricultural practices to accommodate the research needs. His contributions have been invaluable in constructing the tensiometers, executing the wiring and also helping us in installing the microtensiometers. His dedication to monitoring the development throughout the growing season and his insights into data interpretation have been pivotal to the success of our study. We also thank the Florapulse Co. staff for all their technical support

References

- Calvin K., Dasgupta D., Krinner G., Mukherji A., Thorne P.W., Trisos C., Romero J., Aldunce P., Barrett K., Blanco G., Cheung W.W.L., Connors S., Denton F., Diongue-Niang A., Dodman D., Garschagen M., Geden O., Hayward B., Jones C., Jotzo F., Krug T., Lasco R., Lee Y.-Y., Masson-Delmotte V., Meinshausen M., Mintenbeck K., Mokssit A., Otto F.E.L., Pathak M., Pirani A., Poloczanska E., Pörtner H.-O., Revi A., Roberts D.C., Roy J., Ruane A.C., Skea J., Shukla P.R., Slade R., Slangen A., Sokona Y., Sörensson A.A., Tignor M., Van Vuuren D., Wei Y.-M., Winkler H., Zhai P., Zommers Z., Hourcade J.-C., Johnson F.X., Pachauri S., Simpson N.P., Singh C., Thomas A., Totin E., Arias P., Bustamante M., Elgizouli

- I., Flato G., Howden M., Méndez-Vallejo C., Pereira J.J., Pichs-Madruga R., Rose S.K., Saheb Y., Sánchez Rodríguez R., Ürgen-Vorsatz D., Xiao C., Yassaa N., Alegría A., Armour K., Bednar-Friedl B., Blok K., Cissé G., Dentener F., Eriksen S., Fischer E., Garner G., Guivarch C., Haasnoot M., Hansen G., Hauser M., Hawkins E., Hermans T., Kopp R., Leprince-Ringuet N., Lewis J., Ley D., Ludden C., Niamir L., Nicholls Z., Some S., Szopa S., Trewin B., Van Der Wijst K.-I., Winter G., Witting M., Birt A., Ha M., Romero J., Kim J., Haites E.F., Jung Y., Stavins R., Birt A., Ha M., Orendain D.J.A., Ignon L., Park S., Park Y., Reisinger A., Cammaramo D., Fischlin A., Fuglestedt J.S., Hansen G., Ludden C., Masson-Delmotte V., Matthews J.B.R., Mintenbeck K., Pirani A., Poloczanska E., Leprince-Ringuet N., Péan C., 2023. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland., First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Deloire A., Pellegrino A., Rogiers S., 2020. A few words on grapevine leaf water potential. IVES Technical Reviews, Vine And Wine,
- Dry P.R., Loveys B.R., 1998. Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. Australian Journal Of Grape And Wine Research, 4 (3): 140–8.
- Lakso A.N., Santiago M., Stroock A.D., 2022. Monitoring Stem Water Potential with an Embedded Microtensiometer to Inform Irrigation Scheduling in Fruit Crops. Horticulturae, 8 (12): 1207–22.
- Mattedi C., Zottele F., Centurioni F., Caffarra A., Corradini S., 2024. Coupling Stem Water Potential and Soil Water Potential on irrigated and not irrigated vines. Preliminary results for *Vitis vinifera* L. cv Teroldego.
- Peterlunger E., Pichierri A., Calderan A., Braidotti R., Sodini M., Lisjak K., Vanzo A., Debiolles L., Caffarra A., Sivilotti P., 2023. Management of grapevine water status with the DSS Vintel® provides evidence of sustainable irrigation strategies while maintaining wine quality of Pinot gris in Friuli-Venezia Giulia region, NE Italy. IVES Conference Series, GiESCO 2023, Ithaca US.
- Ravaz L., Sicard L., 1903. Sur la brunissure de la vigne. Les Comptes Rendus De L'Académie Des Sciences, 136: 1276–8.
- Rekwar R.K., Patra A., Jatav H.S., Singh S.K., Mohapatra K.K., Kundu A., Dutta A., Trivedi A., Sharma L.D., Anjum M., Anil A.S., Sahoo S.K., 2022. Ecological aspects of the soil-water-plant-atmosphere system. In: Plant Perspectives to Global Climate Changes. Elsevier, pp 279–302.
- Thalheimer M., 2013. A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. Journal Of Agricultural Engineering, 44 (3): 114–9.
- Trewartha G.T., Horn L.H., 1980. An introduction to climate, 5th ed. McGraw-Hill, New York.
- Van Leeuwen C., Trégoat O., Choné X., Bois B., Pernet D., Gaudillère J.-P., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? OENO One, 43 (3): 121–34.

COMPARISON BETWEEN CONVENTIONAL AND DROUGHT-TOLERANT MAIZE HYBRIDS IN THE VENETO REGION

CONFRONTO TRA IBRIDI DI MAIS CONVENZIONALI E ARIDO-TOLLERANTI NELL'AREALE VENETO

Gaetano Roberto Pesce^{1*}, Vittoria Giannini¹, Carmelo Maucieri¹

¹ Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente (DAFNAE), Università degli Studi di Padova, Agripolis, Viale dell'Università 16 - 35020 Legnaro (PD)

*gaetano.pesce@unipd.it

Abstract

The performances of drought-tolerant maize hybrids were compared to those of conventional ones during 2024 growing season in Veneto region. The research was also focused on other two main factors: FAO earliness class (FC) and water management (irrigated and rainfed). The findings indicate that there were no significant differences in grain yield and biomass production between conventional and drought-tolerant hybrids within each FC. This lack of difference may be attributed to the unusual precipitation that characterized the growth cycle, which also accounts for the relatively small differences observed between the parameters of irrigated and rainfed plots. However, a notable effect of FC was observed, with higher FCs correlating with increased yields (11.2 t DM ha⁻¹ for FC 300, 11.8 t DM ha⁻¹ for FC 400, and 12.9 t DM ha⁻¹ for FC 500). Notably, the drought-tolerant hybrids demonstrated higher apparent transpiration rates than their conventional counterparts during the last week of July (7.5 mm day⁻¹ for drought-tolerant compared to 6.7 mm day⁻¹ for conventional hybrids). This suggests that although yield differences were not significant, the drought-tolerant hybrids exhibited a different water usage pattern.

Parole chiave

Zea mays L., Resilienza dei sistemi colturali erbacei, Aquamax; Classi FAO, Stress idrico.

Keywords

Zea mays L., Resilience of herbaceous cropping systems, Aquamax; FAO classes, Water stress.

Introduction

La produzione globale di mais (*Zea mays* L.) è cresciuta negli ultimi decenni, grazie ai progressi tecnologici trainati da una crescente domanda di cibo e sicurezza alimentare. Esso è oggi una delle colture più diffuse al mondo, con una produzione annua che attualmente supera 1,2 miliardi di tonnellate su una superficie coltivata di poco più di 201 milioni di ettari (FAO, 2025). Il mais contribuisce a oltre il 20% dell'apporto calorico totale nella dieta umana (Shiferaw et al., 2011), tuttavia la maggior parte del mais prodotto (circa il 57%) viene utilizzata per l'alimentazione animale (Erenstein et al., 2022). Poiché si prevede che entro il 2050 la popolazione mondiale raggiungerà circa 9,7 miliardi di persone (Gu et al., 2021), urge incrementare la produzione agricola, tanto più che, insieme all'incremento demografico, si dovranno affrontare gli effetti negativi del cambiamento climatico, tra cui la siccità. In questo scenario, si aggrava il problema della competizione per l'acqua tra uso umano, agricolo e industriale (Lobell et al., 2014). Dato che invertire il cambiamento climatico, soprattutto a breve termine, non è una via praticabile, è fondamentale che il settore agricolo adotti strategie di adattamento, tra cui la coltivazione di varietà di mais con una maggiore tolleranza alla siccità, alla quale esso è particolarmente vulnerabile rispetto ad altre colture cerealicole (Yasin et al., 2024).

In questo lavoro sono presentati i risultati di una sperimentazione in cui tre ibridi di mais convenzionali (CONV) sono messi a confronto con tre ibridi tolleranti alla siccità (TS). Gli ibridi appartengono a tre diverse classi di

precocità e sono stati testati in regime irriguo (IRR) e non irriguo (NonIRR). Con questo studio si intende fornire un contributo di conoscenza sul potenziale degli ibridi TS come soluzione sostenibile per mitigare gli impatti dei cambiamenti climatici sulla produzione di mais.

Materiali e Metodi

La sperimentazione è stata condotta da aprile a settembre 2024 presso l'Azienda Agraria Sperimentale "Lucio Toniolo" dell'Università di Padova, situata a Legnaro, in provincia di Padova, Veneto, Italia (45°20'59.8" N, 11°56'53.3" E, 7 m s.l.m.). I dati della tessitura consentono di classificare il suolo come franco argilloso, secondo l'USDA (2017). Il contenuto in sostanza organica del suolo (SO) era del 2% (w/w), mentre la conducibilità dell'estratto saturo è stata trovata pari a 0.17 dS/m. Le costanti idrologiche del suolo sono state calcolate utilizzando la tessitura, la SO e la conducibilità elettrica, attraverso le equazioni di Saxton e Rawls (2006). Il volume dell'acqua alla capacità di campo (CC) è stato calcolato pari a 31,9%, mentre al punto di appassimento (PA) al 19,0%. L'acqua disponibile per le piante (AD), pertanto era CC-PA= 12,9%. La quantità di acqua facilmente disponibile (AFD) per il mais è stata assunta pari alla metà dell'AD (Allen et al., 1998); quindi, il punto critico colturale (PCC) si raggiungeva quando il valore di umidità in termini volumetrici era del 25,5%.

Il clima locale è temperato con estati umide. Le temperature medie dei mesi più caldi superano i 22 °C (clima subtropicale

umido (Cfa) secondo la classificazione climatica di Köppen). Per la caratterizzazione del clima locale, sono state utilizzate le precipitazioni e le temperature di un periodo di 30 anni (1° gennaio 1994 - 31 dicembre 2023). Tali dati sono stati ottenuti dalla stazione meteorologica di Legnaro dell’Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale (ARPAV), situata a circa 430 metri dal campo sperimentale. La precipitazione annuale media è di 819 mm e i mesi di maggio (90.7 mm), ottobre (79.8 mm) e novembre (89.2 mm) sono mediamente i più piovosi (Fig. 1). Il numero medio di giornate di pioggia (> 1 mm) per anno è di 80.

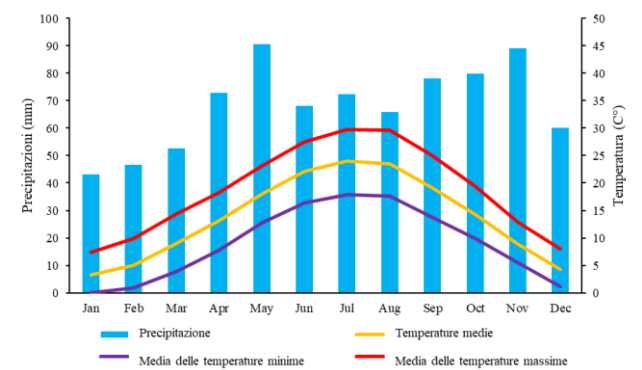


Fig. 1 – Precipitazioni e temperature medie mensili del sito sperimentale nel periodo 1994-2023.

Fig. 1 – Mean monthly precipitation and temperature in the experimental site in the period 1994-2023.

Nel corso della prova, sul campo sperimentale sono caduti 523 mm distribuiti in 36 giorni piovosi. Il mese più piovoso è stato maggio, con 194 mm, e il mese più caldo è stato luglio, con una temperatura media di 26,4 °C. I 32 °C rappresentano la temperatura cardinale massima (Sánchez et al., 2014). Durante giugno sono stati registrati 15 giorni con massime sopra i 32 °C, così come a luglio. Ad agosto ci sono stati 20 giorni con massime sopra i 32 °C, mentre a settembre solo 3 nella prima settimana.

La sperimentazione in campo è stata effettuata adottando un disegno fattoriale a split plot su un’area totale di 2827 m². Il campo è stato inizialmente suddiviso in due plot principali in base alla gestione dell’acqua (GA): IRR e NonIRR. In ciascuno dei plot principali sono stati testati 6 ibridi di mais (Tab. 2), di cui due appartenenti alla classe FAO (CF) 300, due alla 400, e due alla 500. In ciascuna di tali coppie uno degli ibridi era TS (tecnologia Aquamax® di Corteva Agriscience), mentre l’altro era CONV. Ogni ibrido è stato testato in tre repliche per ciascuna GA; pertanto, il campo sperimentale è stato suddiviso in 36 parcelle, ciascuna delle dimensioni di 7 m x 6.25 m, risultanti dal prodotto di 6 (ibridi) x 2 (modalità di GA) x 3 (repliche). Tutti gli ibridi sono stati forniti da Corteva Agriscience.

Tab. 2 – Ibridi impiegati nella sperimentazione, la loro classe FAO e il loro tipo (tollerante alla siccità o convenzionale).

Tab. 2 – Hybrids employed in the experimentation, their FAO class, and their type (drought tolerant or conventional)

Ibrido	CF	Tipo
P9889	300	TS
P9363	300	CONV
P0217	400	TS
P0362	400	CONV
P0900	500	TS
P0937	500	CONV

CF = classe FAO;
TS = tollerante alla siccità;
CONV = convenzionale

Due piani di concimazione differenti sono stati adottati per tenere conto delle diverse CF. Per gli ibridi appartenenti alle CF 300 e 400, sono stati applicati 25 kg ha⁻¹ di N sotto forma di urea, 100 kg ha⁻¹ di P₂O₅ come perfosfato triplo e 110 kg ha⁻¹ di K₂O come solfato di potassio al momento della semina. Un ulteriore apporto di 125 kg ha⁻¹ di N è stato fornito allo stadio V6. Per la CF 500, sono stati applicati 50 kg ha⁻¹ di N, 125 kg ha⁻¹ di P₂O₅ e 145 kg ha⁻¹ di K₂O al momento della semina, seguiti da un ulteriore apporto di 150 kg ha⁻¹ di N allo stadio V6.

Dopo l’aratura a una profondità di 30 cm, i letti di semina sono stati preparati utilizzando un erpice rotante. La semina è avvenuta il 29 aprile a una profondità di 5 cm, con una distanza tra le file di 75 cm e una distanza tra le piante di 17 cm, per una densità di circa 8 piante per metro quadrato. Un trattamento insetticida è stato effettuato il 19 luglio per il controllo della piralide del mais (*Ostrinia nubilalis*) e della diabrotica del mais (*Diabrotica virgifera virgifera*).

Per determinare il momento dell’intervento irriguo nel trattamento IRR, sono state effettuate visite *in situ*. L’irrigazione è stata fornita con volumi tali che la disponibilità idrica non fosse mai un fattore limitante. Gli interventi irrigui sono stati effettuati nei giorni 11, 17, 23, 26 e 31 di luglio e il 6 di agosto.

Il 22 luglio è stato effettuato un campionamento delle piante. Per ciascuna parcella, sono state selezionate e prelevate due piante simili, dopo averle recise appena sopra il livello del terreno. Di tali campioni è stato determinato peso fresco, numero di foglie e, allo scopo di determinare la *leaf area index* (LAI), anche l’area fogliare. Quest’ultima è stata determinata tramite un misuratore di area fogliare LI-3100 (Li-Cor inc., Lincoln, Nebraska). I campioni sono stati successivamente essiccati a 65 °C fino al raggiungimento del peso costante, dopodiché è stato registrato il loro peso secco. Dal 22 al 29 luglio, è stata misurata la traspirazione apparente (T-app) utilizzando un Licor Li-600. Le misurazioni sono state effettuate sulle foglie di due piante per parcella, quattro volte al giorno: alle 00:00, 06:00, 12:00 e 18:00.

Al momento della raccolta, la resa in granella è stata registrata utilizzando una mietitrebbia dotata di bilancia. Alcuni chilogrammi di granella sono stati prelevati da ciascuna parcella. Questi campioni sono stati pesati e

analizzati per il contenuto di proteine, grassi e amido utilizzando un Infratec grain analyzer a infrarossi vicini (NIR) della Foss Analytics. Dopo l'analisi, i campioni sono stati posti in stufa a 65 °C fino al raggiungimento del peso costante, per calcolarne il contenuto in sostanza secca. La biomassa residua di ciascuna parcella è stata quindi raccolta utilizzando una trincia-raccogliatrice parcellare. La biomassa ottenuta è stata pesata tal quale e poi pesata nuovamente dopo l'essiccazione in stufa a 65 °C fino al raggiungimento di un peso costante. Per ciascun trattamento è stato calcolato il rapporto tra granella raccolta e la biomassa totale, per ottenere l'*harvest index* (HI).

Per gli ibridi appartenenti alle CF 400 e 500, è stato monitorato il contenuto di umidità del suolo attraverso datalogger ZL6 (Meter©) posizionati nel campo sperimentale. I relativi sensori sono stati collocati a tre profondità: 10 cm, 30 cm e 50 cm. I datalogger hanno anche raccolto dati sulla conducibilità elettrica (dS/m) e sulla temperatura del suolo. Il contenuto d'acqua del suolo, la conducibilità elettrica e la SO del suolo sono stati utilizzati per calcolare il potenziale idrico del suolo.

Risultati e Discussione

In condizioni NonIRR, gli ibridi di mais TS non hanno mostrato differenze significative nella resa in granella rispetto agli ibridi CONV. Al contrario, sia la GA sia la CF hanno mostrato un effetto debole ma significativo ($P < 0,05$) sulla resa, mentre non sono state rilevate interazioni significative tra i fattori (Tab. 3). Infatti, al crescere della CF la resa è aumentata, con valori medi di 11,2 t DM ha⁻¹ per CF 300, 11,8 t DM ha⁻¹ per CF 400 e 12,9 t DM ha⁻¹ per CF 500. Sebbene le rese medie degli ibridi appartenenti alla CF 300 e quelle dei CF 500 differiscano significativamente le une dalle altre ($P < 0,01$), esse sono statisticamente non dissimili da quelle degli ibridi CF 400. Analogamente, la GA ha influenzato significativamente la resa in granella. In condizioni IRR, infatti, la resa è stata più alta (12,5 t DM ha⁻¹) che in NonIRR (11,4 t DM ha⁻¹).

Per quanto riguarda la biomassa residua, non sono stati osservati effetti principali significativi né interazioni. Nella media dei trattamenti, la quantità di biomassa secca post-raccolta è stata di 9,0 t ha⁻¹ (Tab. 3).

Gli ibridi TS e CONV hanno mostrato HI simili (0,57 e 0,58, rispettivamente) (Tab. 3). Tra le CF, HI è variato in maniera non significativa da 0,57 (per CF 300 e 400) a 0,59 (CF 500) (Tab. 3). Nemmeno la GA ha determinato effetti significativi sull'HI con un valore medio di 0,58 (Tab. 3).

Tab.3 - Rese in granella, biomassa residua e harvest index (HI) in funzione del tipo, della classe FAO e della gestione dell'acqua. All'interno di ciascun fattore e della stessa variabile, i valori contrassegnati da lettere diverse sono significativamente differenti secondo il test LSD di Fisher ($P < 0.05$).

Tab.3 - Grain yields, residual and total biomass as affected by type, FAO class, and water management. Within each factor and variable, values that do not share a letter are significantly different at Fisher's LSD test ($P < 0.05$).

Fonte di variazione	Rese (t ss ha ⁻¹)	Biomassa residua (t ss ha ⁻¹)	HI
Tipo (T)			
TS	11,7	8,9	0,57
CONV	12,2	8,8	0,58
Classe FAO (CF)			
300	11,2b	8,7	0,57
400	11,8ab	9,0	0,57
500	12,9a	8,9	0,59
Gestione acqua (GA)			
IRR	12,5a	8,8	0,59
NonIRR	11,4b	8,9	0,56
ANOVA			
Effetti principali			
T	ns	ns	ns
CF	*	ns	ns
GA	*	ns	ns
Interazioni			
T × CF	ns	ns	ns
T × GA	ns	ns	ns
CF × GA	ns	ns	ns
T × CF × GA	ns	ns	ns
ns = non significativa; *= $p < 0.05$. ss = sostanza secca; TS = tollerante alla siccità; CONV = convenzionale; IRR = gestione irrigua; NonIRR = gestione non irrigua			

Il LAI è stato sensibile alla CF, variando significativamente dal 2,5 di CF 300 al 2,9 delle CF 400 e 500 (Tab. 4). Per quanto riguarda la T-app, gli ibridi TS hanno raggiunto nella settimana dal 22 al 29 luglio valori significativamente superiori (7,5 mm d⁻¹) rispetto a quelli dei CONV (6,7 mm d⁻¹) (Tab. 4). Anche la CF ha avuto un effetto significativo sulla T-app, con gli ibridi CF 300 che hanno mostrato il tasso di traspirazione più basso (6,3 mm d⁻¹), mentre gli ibridi appartenenti alle CF 400 e 500 hanno presentato valori più elevati (7,2 e 7,7 mm d⁻¹, rispettivamente) (Tab. 4).

Gli ibridi TS sono selezionati per garantire performance migliori dei CONV in condizioni di stress idrico e l'assenza di differenze significative di resa tra gli uni e gli altri in regime NonIRR è inaspettata. Tuttavia, bisogna considerare che nel sito sperimentale il periodo primaverile-estivo del

2024 è stato caratterizzato da una piovosità abbondante (Fig. 2).

Tab.4 - Leaf area index (LAI) e traspirazione apparente (T-app) misurati tra il 22 e il 29 luglio 2024 ed espressi in funzione del tipo, della classe FAO e della gestione dell'acqua. All'interno di ciascun fattore e della stessa variabile, i valori contrassegnati da lettere diverse sono significativamente differenti secondo il test LSD di Fisher ($P < 0.05$).

Tab.4 - Leaf area index (LAI) and apparent transpiration (T-app) measured between July 22 and July 29, 2024, and expressed in relation to type, FAO class, and water management. Within each factor and the same variable, values marked with different letters are significantly different according to Fisher's LSD test ($P < 0.05$).

Fonte di variazione	LAI	T-app (mm d ⁻¹)
Tipo (T)		
TS	2,7	7,5a
CONV	2,7	6,7b
Classe FAO (CF)		
300	2,5b	6,3b
400	2,9a	7,2a
500	2,8a	7,7a
Gestione acqua (GA)		
IRR	2,8	7,2
NonIRR	2,6	6,9
ANOVA		
Effetti principali		
T	ns	*
CF	*	*
GA	ns	ns
Interazioni		
T × CF	ns	ns
T × GA	ns	ns
CF × GA	ns	ns
T × CF × GA	ns	ns

ns = non significativo; * = $p < 0,05$; ** = $p < 0.01$.
TS = tollerante alla siccità; CONV = convenzionale;
IRR = gestione irrigua; NonIRR = gestione non irrigua

Inoltre, gli stress idrici (θ al di sotto del punto critico culturale) a cui sono state esposte le piante in NonIRR sono stati lievi e di breve durata (Fig. 3). Quindi è possibile che essi non siano stati sufficienti a evidenziare differenze tra gli ibridi TS e quelli CONV in termini di resa e biomassa. Inoltre, le fasi in cui lo stress idrico può lasciare il segno sulla resa del mais sono la fioritura, l'impollinazione e la fecondazione (Daryanto et al., 2016; Kim and Lee, 2023) e, guardando Fig. 3, queste fasi erano in gran parte passate quando lo stress si è verificato. In altre specie è stato particolare in scenari di stress idrico moderato o incerto.

riscontrato che la tolleranza alla siccità è correlata negativamente con la resa in condizioni ottimali (Sprenger et al., 2015).

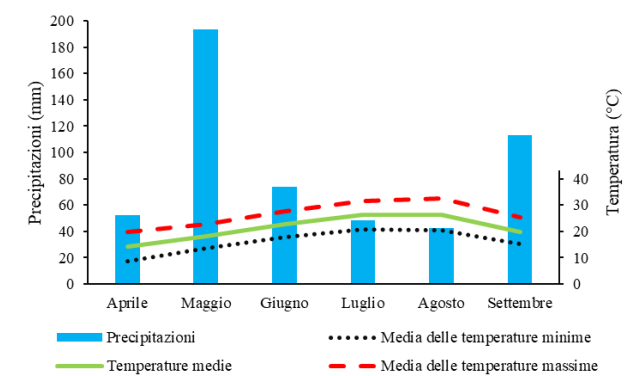


Fig. 2 – Precipitazioni e temperature mensili durante la sperimentazione (aprile-settembre 2024).

Fig. 2 – Monthly precipitation and temperature in the experimental period (April-September 2024)

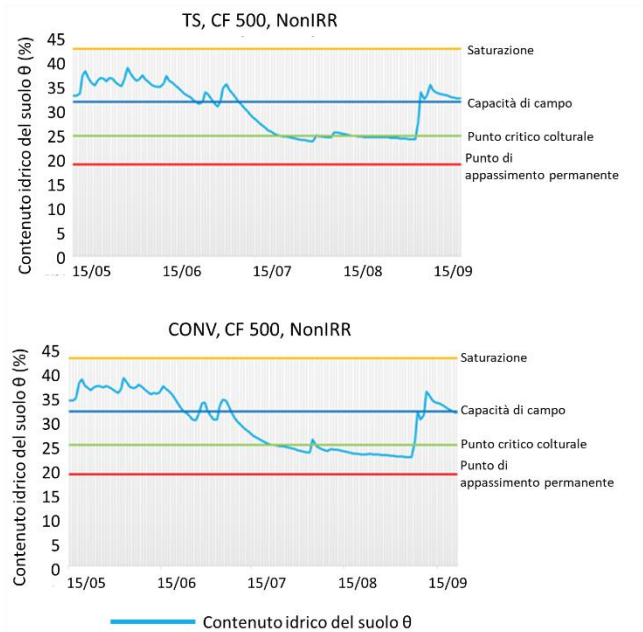


Fig. 3 – Contenuto idrico del suolo (θ) monitorato durante la sperimentazione in parcelle non irrigue (NonIRR) con ibridi della classe FAO (CF) 500, sia tolleranti alla siccità (TS), sia convenzionali (CONV).

Fig. 3 – Soil water content (θ) over experimental period of non-irrigated (NonIRR) plots with hybrids belonging to FAO class (CF) 500, including both drought-tolerant (TS) and conventional (CONV) varieties.

Poiché questa correlazione negativa non è stata riscontrata sul mais nel presente studio, si può pensare che, almeno nelle condizioni pedoclimatiche in cui si è svolta la sperimentazione, gli ibridi TS non siano penalizzati rispetto ai CONV in caso di stress idrico assente o lieve. Questo aspetto di resilienza dei TS è interessante, in L'aumento della resa osservato all'aumentare della CF non

sorprende. Più lungo, infatti, è il ciclo, maggiore è in linea di massima l'accumulo di fotosintati. Allo stesso modo non sorprende che le parcelle IRR abbiano avuto una resa leggermente superiore rispetto a quelle NonIRR.

Conclusioni

Il confronto tra ibridi di mais TS con ibridi CONV non ha fornito le indicazioni attese sulla idoneità dei primi a fare fronte agli stress idrici perché, a causa del decorso piovoso del periodo della prova, non si sono verificati che brevi e poco intensi periodi di stress idrico. Un fatto curioso, anch'esso contrario alle aspettative, è che gli ibridi TS hanno mostrato mediamente una T-app più alta di quelli CONV. Ciò indicherebbe che gli ibridi TS potrebbero aver usato più acqua senza un beneficio per la resa. Invece, ciò che ha influenzato le prestazioni degli ibridi in quasi tutti gli aspetti misurati è stata la CF: più lungo il periodo di crescita, maggiore la produttività. Infine, sebbene gli ibridi TS non abbiano avuto prestazioni migliori rispetto agli ibridi CONV, non hanno neanche avuto prestazioni inferiori. Alla luce di tutto questo, ulteriori sperimentazioni sono necessarie per investigare il comportamento degli ibridi Aquamax in annate caratterizzate da condizioni di stress idrico più intense e durature nel tempo.

Ringraziamenti

Studio Finanziato dall'Unione europea - Next Generation EU, Missione 4 Componente 2 CUP C93C22002790001, Spoke 4, Work Package 4.2, Task 4.2.1 "Farm network setup (Living Labs): a network of farms representative of the different agricultural systems to apply innovative technologies for the sustainable management of crops, animals and forests".

Bibliografia

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome.

Daryanto S., Wang L., Jacinthe P. A., 2016. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PloS one*, 11(5), e0156362.

Erenstein O., Jaleta M., Sonder K., Mottaleb K., Prasanna B. M., 2022. Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food security*, 14(5), 1295-1319.

FAO, 2025. FAOSTAT database. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

Gu D., Andreev K., Dupre M. E., 2021. Major trends in population growth around the world. *China CDC weekly*, 3(28), 604.

Kim K. H., Lee B. M., 2023. Effects of climate change and drought tolerance on maize growth. *Plants*, 12(20), 3548.

Lobell D. B., Roberts M. J., Schlenker W., Braun N., Little B. B., Rejesus R. M., Hammer G. L., 2014. Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the US Midwest. *Science*, 344(6183), 516-519.

Sánchez B., Rasmussen A., Porter J. R., 2014. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Global change biology*, 20(2), 408-417.

Saxton K. E., Rawls W. J., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.

Shiferaw B., Prasanna B. M., Hellin J., Bänziger M., 2011. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food security*, 3, 307-327.

Sprenger H., Rudack K., Schudoma C., Neumann A., Seddig S., Peters, R., ..., Köhl K. (2015). Assessment of drought tolerance and its potential yield penalty in potato. *Functional Plant Biology*, 42(7), 655-667.

USDA, 2017. Soil Survey Manual-Handbook No. 18. United States Department of Agriculture, 603 pp.

Yasin S., Zavala-García F., Niño-Medina G., Rodríguez-Salinas P. A., Gutiérrez-Diez A., Sinagawa-García S. R., Lugo-Cruz E., 2024. Morphological and Physiological Response of Maize (*Zea mays* L.) to Drought Stress during Reproductive Stage. *Agronomy*, 14(8), 1718.

IDENTIFICATION OF KEY ITALIAN AGRICULTURAL AREAS FACING WATER DEMAND DEFICITS

LE REGIONI AGRICOLE ITALIANE MAGGIORMENTE SOTTOPOSTE A STRESS IDRICO

Edmondo Di Giuseppe^{1*}, Sara Quaresima¹, Arianna Di Paola¹, Marina Baldi¹, Marco Simonetti¹ and Massimiliano Pasqui¹

¹ Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Bioeconomia, Roma

[*edmondo.digiuseppe@cnr.it](mailto:edmondo.digiuseppe@cnr.it)

Abstract

Several recent studies have identified a decline in snow trends in the Northern Hemisphere beginning in 1981. This decline jeopardizes water resources and leads to various issues, including production losses in the agricultural sector. This paper presents a climate analysis covering the period from 1981 to 2023, focusing on identifying agricultural hotspots based on water demand in Italy. For this analysis, we utilize climate data from the ERA5-Land reanalysis. To establish a basic climatic water balance for the spring-summer and autumn-winter growing seasons, we employ the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index at the six-month time scale for September and March, respectively. Furthermore, we estimate the probability of experiencing a certain number of drought events using a Non-Homogeneous Poisson distribution. For the summer growing season, we identified 2003, 2017, 2022, 2011, and 2021 as the five most unfavorable years, while for the winter, they were 1990, 1989, 2002, 2012, and 2007.

Parole chiave

ERA5-Land Reanalysis, Indice di siccità (SPEI), Processo di Poisson non omogeneo (NHPP)

Keywords

ERA5-Land Reanalysis, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, Non-Homogeneous Poisson Process

Introduzione

Questo lavoro contiene un'analisi climatica delle regioni agricole italiane finalizzata all'individuazione delle aree dedicate alle coltivazioni che maggiormente sono in difficoltà a seguito di un incremento della domanda idrica. In generale, la siccità agricola è per lo più legata a condizioni di umidità del suolo che rispondono alle anomalie delle precipitazioni su scala relativamente breve. Per questo, l'analisi è stata effettuata considerando una finestra temporale di 6 mesi che delinea il periodo delle stagioni di crescita estiva e invernale. Una rassegna completa delle definizioni e dei concetti di siccità è fornita in Mishra and Singh, 2010. Inoltre, l'analisi è stata effettuata a partire dal 1981, a seguito delle conclusioni dell'ultima valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), che ha rilevato quanto l'equivalente in acqua della neve primaverile dell'emisfero settentrionale sia "generalmente diminuito" dal 1981 (Masson-Delmotte *et al.*, 2021). In particolare, Gottlieb and Mankin, 2024 hanno rilevato una tendenza al calo della neve in 82 dei 169 principali bacini fluviali dell'emisfero settentrionale, evidenziando un chiaro segnale di rischio per le risorse idriche.

Materiali e Metodi

Le aree di interesse di questo studio sono le 773 Regioni Agricole (RA) in cui può essere suddivisa l'Italia sulla base di alcune caratteristiche fisiche, agronomiche e di valore fondiario. Infatti, le RA sono delineate a partire dall'indagine sul mercato fondiario, dei cui dati l'INEA tiene traccia dal 1992. Una ricostruzione puntuale delle RA è stata effettuata

da Quaresima *et al.*, 2024, che, nell'ambito del loro lavoro, hanno prodotto e rilasciato liberamente anche uno "shapefile" utilizzato in questo studio.

I dati climatici utilizzati in questo studio provengono da ERA5-Land Reanalysis, realizzati nell'ambito del programma C3S Climate Data Store (Copernicus Climate Change Service, 2019). In particolare, è stata scelta la versione Land poiché "ERA5-Land descrive l'evoluzione dei cicli dell'acqua e dell'energia sulla terraferma in modo coerente, ed è particolarmente adatto per analizzare tendenze e anomalie" (Muñoz-Sabater *et al.*, 2021). ERA5-Land ha una risoluzione temporale oraria e le serie prodotte vanno dal 1950 ad oggi con una risoluzione spaziale di 0.1°x 0.1° per cella della griglia e CRS WGS84. I dati di temperatura sono stati convertiti da Kelvin a Celsius utilizzando la formula $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$. I dati delle precipitazioni sono stati convertiti da metri a millimetri.

In primo luogo, l'evapotraspirazione potenziale oraria (PET) è stata calcolata come proxy della domanda atmosferica di acqua. L'evapotraspirazione potenziale oraria è stata calcolata utilizzando l'equazione di Penman-Monteith della FAO descritta in Allen, 1998. Questo metodo richiede sette variabili climatiche: le componenti zonali e meridionali della velocità del vento, la temperatura dell'aria e del punto di rugiada, le componenti solari nette e termiche nette della radiazione e la pressione atmosferica sulla superficie terrestre. Maggiori dettagli sono forniti in Singer *et al.*, 2021. La libreria "terra" di R è stata utilizzata per il calcolo della PET (Hijmans, 2023). In secondo luogo, i dati sono stati cumulati per creare una serie temporale con una risoluzione

di 6 mesi che copre il periodo dal 1981 al 2023. Per chiudere il bilancio idrico semestrale, l'evapotraspirazione notturna è stata annullata.

Per rappresentare il bilancio idrico climatico, è stato scelto l'indice standardizzato di precipitazione ed evapotraspirazione (SPEI), sviluppato da Vicente-Serrano *et al.*, 2009). Lo SPEI è calcolato sulla base della differenza mensile tra precipitazioni e PET. Più specificamente, la serie storica di tale differenza è associata ad una distribuzione log-logistica ed i parametri stimati sono utilizzati per trasformare il dato originario (precipitazioni-PET) in una variabile normale standard con media zero e varianza unitaria. Conseguentemente, lo SPEI ha una configurazione gaussiana in cui l'entità della deviazione dalla media è una misura probabilistica della gravità di un evento umido o secco.

In questo studio, il ruolo chiave è la mancanza di disponibilità di acqua per la produzione agricola. Pertanto, l'analisi si concentra sul lato negativo della distribuzione SPEI, conteggiando il numero di eventi al di sotto della soglia di -1.5 dello SPEI, che rappresenta l'unione degli eventi siccitosi con un impatto grave e molto grave. In particolare, si considerano lo SPEI a 6 mesi di Settembre e lo SPEI a 6 mesi di Marzo per rappresentare, rispettivamente, la stagione di crescita primaverile-estiva (dal 1° aprile al 30 settembre) ed autunno-vernina (dal 1° ottobre al 31 marzo). Inoltre, è utile evidenziare che la serie temporale delle precipitazioni e della PET per ciascuna regione agricola è stata calcolata facendo la media dei valori di tutte le celle della griglia ERA5-Land che coprono il poligono della corrispondente regione agricola.

Infine, un processo non omogeneo di Poisson (NHPP) è stato adottato per descrivere il numero medio di eventi siccitosi riscontrati nel periodo di studio. In generale, la distribuzione di Poisson si adatta a rappresentare i tempi di attesa tra un evento e l'altro. Poiché, in questo studio, è stata fissata una soglia per identificare alcuni valori di interesse dello SPEI (siccità con un impatto grave e molto grave), gli eventi al di sotto di tale soglia si verificano in momenti specifici che consentono l'utilizzo della distribuzione di Poisson. Inoltre, il tempo di attesa tra un evento e l'altro può variare nel tempo a causa, per esempio, del cambiamento climatico. In questo contesto, la distribuzione statistica standard diventa un NHPP in quanto il parametro che descrive la distribuzione di Poisson viene lasciato libero di variare nel tempo. Tuttavia, questa correzione richiede l'utilizzo di una funzione continua che sia in grado di descrivere la suddetta variazione del parametro. Sulla base di quanto descritto nel paragrafo 2.3.2 di Di Giuseppe *et al.*, 2019, in questo studio è stata adottata una funzione strutturata come una cosiddetta "power law". L'approccio della legge di potenza consente il calcolo dei tempi di ritorno degli eventi siccitosi e l'uso del test χ^2 per l'analisi del "trend" (Crow, 1974).

Risultati e Discussione

Gli anni più critici per le condizioni di siccità relativamente al periodo 1981-2023 sono stati identificati contando il numero di regioni agricole coinvolte in episodi di siccità inferiori alla soglia SPEI di -1.5. I primi 10 anni più critici per la stagione di crescita primaverile-estiva ed autunno-vernina sono riportati nella Tabella 1. Si noti che, nel caso della stagione autunno-vernina, 5 dei 10 anni più critici si sono registrati tra il 1980 ed il 1990 e che i primi 2 posti della graduatoria sono occupati dal 1989 e dal 1990.

Tab.1 - I 10 anni più critici per numero di Regioni Agrarie interessate da eventi siccitosi gravi o molto gravi durante la stagione di crescita primaverile-estiva e autunno-vernina.

Tab.1 - Top 10 ranking of critical years based on the number of agricultural regions experiencing severe or extreme drought conditions during the spring-summer and autumn-winter growing seasons.

Primavera/Estate		Autunno/Inverno	
Anno	n° RA	Anno	n° RA
2003	485	1990	643
2017	254	1989	485
2022	157	2002	482
2011	150	2012	236
2021	119	2007	131
2007	96	1992	68
1985	88	2022	62
2001	59	2000	53
2006	59	1995	44
1997	52	1987	40

Le mappe di 4 anni critici per ciascuna stagione di crescita sono riportate nella Figura 1 e nella Figura 2. Se, in aggiunta agli episodi riportati nella Tabella 1, si considerano anche gli episodi di siccità moderata, vale a dire quelli con un valore di SPEI compreso nell'intervallo (-1;-1.5), tali mappe permettono di valutare la dislocazione spaziale dell'impatto dovuto ad episodi di siccità moderata (colore giallo) e grave o molto grave (colore rosso). Nel caso della stagione autunno-vernina, si è preferito visualizzare il 2007 invece del 1989 al fine di evidenziare l'impatto geografico di un evento siccitoso più recente.

Per quanto riguarda la stagione primaverile-estiva, si rileva chiaramente l'impronta dell'ondata di caldo del 2003 che ha interessato quasi tutto il centro-nord dell'Italia e gran parte della Sardegna. La recente siccità del 2022 ha interessato, invece, soltanto le aree dell'Italia nord-occidentale e parte di quella nord-orientale, mentre è stata ben più estesa la siccità del 2017. Tuttavia, è utile sottolineare che la siccità primaverile-estiva del 2022 era iniziata nelle stesse zone già dall'autunno dell'anno precedente (vedi Figura 3).

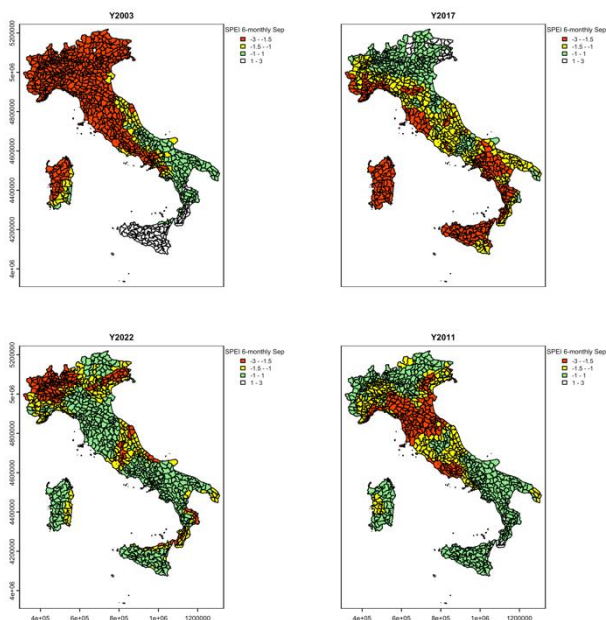


Fig.1 – Mappa dell’impatto dovuto ad episodi siccitosi nei 4 anni più critici nel periodo 1981-2023, per la stagione di crescita primaverile/estiva.

Fig.1 – Map of the top 4 ranking critical years in 1981-2023, for drought events in the spring/summer growing season.

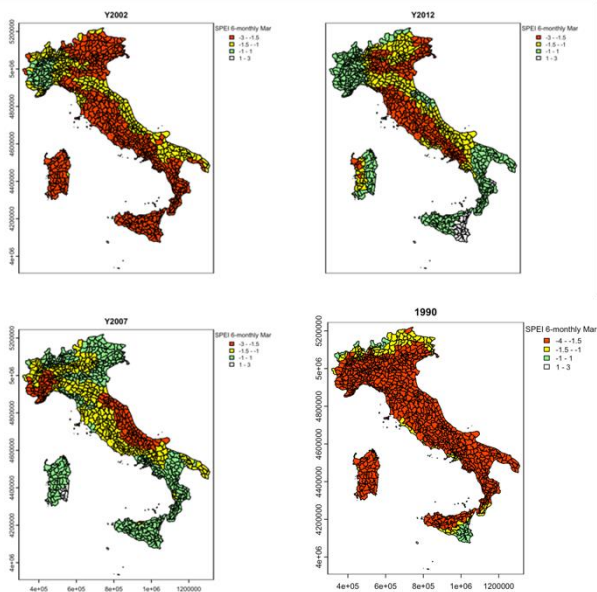


Fig.2 – Mappa dell’impatto dovuto ad episodi siccitosi in 4 anni critici nel periodo 1981-2023, per la stagione di crescita autunno/vernina.

Fig.2 – Map of the 4 critical years in 1981-2023, for drought events in the autumn/winter growing season.

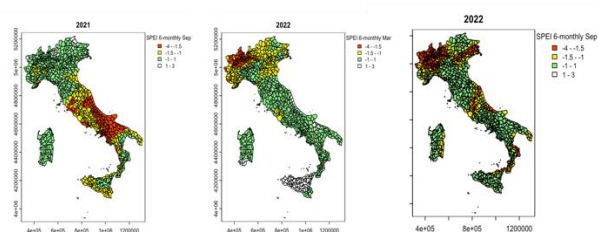


Fig.3 – Sequenza di mappe relative agli episodi siccitosi della stagione di crescita primavera/estate 2021 (sx), autunno/inverno 2022 e primavera/estate 2022 (dx).

Fig.3 – Sequence of maps relating to the drought episodes of the spring/summer 2021 growing season (left), autumn/winter 2022 and spring/summer 2022 (right).

Infine, le mappe di Figura 4 e 5 illustrano le stime del parametro della distribuzione di Poisson. Come accennato nella sezione Materiali e Metodi, questo parametro indica l’inverso del tempo di attesa medio tra un evento siccitoso ed il successivo. In altre parole, esso è una misura della probabilità di occorrenza degli episodi siccitosi stimata sulla base di quanto osservato nel periodo 1981-2023. Pertanto, valori del parametro più elevati mostrati sulle mappe indicano una maggiore probabilità che si verifichi un evento di siccità. Inoltre, calcolando l’inverso del valore indicato, si ha una misura del numero medio di anni che trascorrono mediamente tra un evento e l’altro. Ad esempio, al valore di 0.40 indicato come massimo nella mappa di Figura 4 è associato un tempo medio di attesa tra episodi siccitosi gravi e molto gravi di $1/0.40=2,5$ anni.

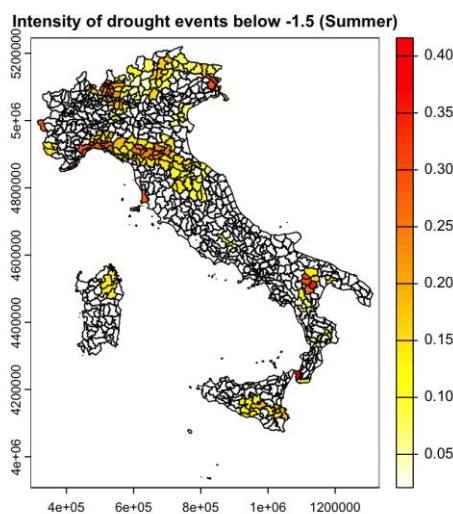


Fig.4 – Mappa della probabilità di occorrenza di episodi siccitosi gravi e molto gravi nel periodo 1981-2023, per la stagione di crescita primaverile/estiva.

Fig.4 - Map of the probability of occurrence of severe and extreme drought episodes in the period 1981-2023, for the spring/summer growing season.

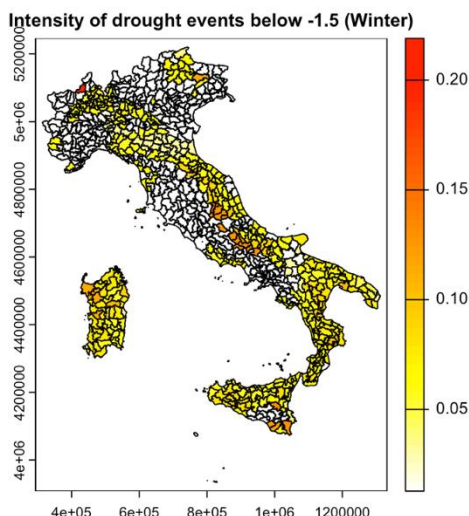


Fig.5 – Mappa della probabilità di occorrenza di episodi siccitosi gravi e molto gravi nel periodo 1981-2023, per la stagione di crescita autunno/inverno.

Fig.5 - Map of the probability of occurrence of severe and extreme drought episodes in the period 1981-2023, for the autumn/winter growing season.

Nel caso della stagione di crescita autunno-vernina, il tempo medio di attesa tra un episodio siccitoso grave o molto grave e l'altro è più lungo rispetto alla stagione primaverile-estiva. Tuttavia, il territorio sottoposto a stress idrico durante la stagione autunno-vernina è molto più esteso rispetto a quello della stagione primaverile/estivo. Come risulta dalla Figura 5, il tempo più lungo è un caso isolato ed è pari a $1/0.20=5$ anni, mentre sono molto più numerose le regioni agricole che hanno un tempo medio pari a $1/0.08=12.5$ anni. Per alcune regioni agricole dell'Appennino centrale, della Sardegna e della Sicilia si evidenzia un tempo medio pari a $1/0.15=6.5$ anni.

Conclusioni

Questo studio analizza le regioni agricole italiane che sono maggiormente sottoposte a stress idrico durante le stagioni di crescita primavera-estate e autunno-inverno. Il conteggio degli eventi siccitosi gravi e molto gravi occorsi nel periodo di studio 1981-2023 ha rivelato che gli anni più critici, relativamente alla porzione di territorio interessato, sono stati il 2003, 2017, 2022, 2011 e 2021 per la stagione primavera-estate; ed il 1990, 1989, 2002, 2012 e 2007 per la stagione autunno-vernina. Emerge chiaramente come il fenomeno della siccità grave sia concentrato maggiormente negli ultimi anni della serie osservata nel caso della stagione primaverile-estiva, ma non in quella autunno-vernina. In ogni caso, in entrambe le stagioni di crescita, episodi siccitosi gravi e molto gravi sono osservabili anche nel primo decennio del periodo osservato. Ciò determina che la stima del trend degli eventi siccitosi gravi e molto gravi non risulti statisticamente significativa nella maggior parte dei casi, ad eccezione di alcune regioni agricole relativamente alla stagione di crescita primaverile-estiva, quando si considerino

anche gli eventi di siccità moderata. Tali aree sono localizzate nel basso Piemonte, Liguria ed alta Toscana tirrenica, in Puglia e Basilicata orientale oltre che poche zone della Sicilia sud-orientale e della Sardegna meridionale.

D'altro canto, la stima della probabilità di occorrenza dei fenomeni siccitosi con impatto grave o molto grave mostra che, nel caso della stagione di crescita primaverile-estiva, le regioni agricole nord-orientali, della Liguria e della fascia appenninica toско-umbro-emiliana, della Sardegna settentrionale, della Sicilia sud-orientale e della Basilicata hanno una maggiore probabilità che si verifichi un evento di siccità mentre nel caso della stagione autunno-vernina, una significativa probabilità di occorrenza di eventi siccitosi coinvolge gran parte della penisola italiana, da nord a sud, soprattutto lungo il mare Adriatico, ma anche nelle due isole maggiori. Inoltre, i risultati ottenuti includendo anche gli eventi siccitosi con un impatto moderato mostrano una chiara estensione spaziale delle aree coinvolte, soprattutto durante la stagione autunno-vernina.

Ringraziamenti

Questo studio è stato realizzato nell'ambito del Progetto "NEUTRALISE: Land use adaptation to cope with drought and heat waves in the Italian agricultural sector: impacts, risks and synergies for achieving the environmental targets" (P2022LFR5M) finanziato dall'Unione Europea – Next Generation EU attraverso il bando emanato dal Ministero dell'Università e della Ricerca per il finanziamento di progetti di ricerca di rilevante interesse nazionale (PRIN-PNRR 2022).

Bibliografia

- Allen R. G., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Copernicus Climate Change Service, 2019. "ERA5-Land Hourly Data from 2001 to Present." ECMWF. <https://doi.org/10.24381/CDS.E2161BAC>.
- Crow L.H., 1974. Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems. In Reliability and Biometry, edited by F. Proschan and R. G. Serfling, 379–410. SIAM.
- Di Giuseppe E., Pasqui M., Magno R., and Quaresima S., 2019. A Counting Process Approach for Trend Assessment of Drought Condition. Hydrology 6 (4): 84.
- Gottlieb A.R., and Mankin J.S., 2024. Evidence of Human Influence on Northern Hemisphere Snow Loss. Nature, 625 (7994): 293–300.
- Hijmans, R.J. 2025. Terra: Spatial Data Analysis. Manual, R package version 1.8-44, <https://rspatial.org/>.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N. et al., 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA, Cambridge University Press.

- Mishra A.K., Singh V.P., 2010. A Review of Drought Concepts. *Journal of Hydrology*, 391 (1): 202–16.
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., et al., 2021. ERA5-Land: A State-of-the-Art Global Reanalysis Dataset for Land Applications. *Earth System Science Data*, 13 (9): 4349–83.
- Quaresima S., Nino P., Cardillo C., Di Paola A., 2024. Unlocking New Opportunities for Spatial Analysis of Farms' Income and Business Activities in Italy: The Agricultural Regions in Shapefile Format. *Data*, 9 (12): 2306-5729.
- Singer M.B., Asfaw D. T., Rosolem R, Cuthbert M.O, Miralles D.G., MacLeod D., Quichimbo E.A., and Michaelides K, 2021. Hourly Potential Evapotranspiration at 0.1° Resolution for the Global Land Surface from 1981-Present. *Scientific Data*, 8 (1): 224.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., and López-Moreno J.I., 2009. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23 (7): 1696–1718.

RICE AND WATER MANAGEMENT: A COMPARISON OF IRRIGATION METHODS

RISO E GESTIONE DELL'ACQUA: METODI IRRIGUI A CONFRONTO

Carlo Camarotto^{1*}, Ilenia Cicero², Maria Giordano¹, Gaetano Roberto Pesce¹, Carmelo Maucieri¹

¹ DAFNAE, Università degli Studi di Padova

² SAAF, Università degli Studi di Palermo

* carlo.camarotto@unipd.it

Abstract

The management of rice through submersion is widely adopted worldwide. However, the sustainability of this production system is increasingly threatened by ongoing climate change, which is leading to a more frequent reduction in the water volumes available for the agricultural sector. Micro-irrigation could represent a viable strategy to reduce the water volumes required for rice production. In this context, a field experiment was launched in 2024 in Veneto. The primary objective of the experiment was to quantify the water balance of the two different management methods (submersion and micro-irrigation) by measuring inputs (rainfall and incoming water volumes) and outputs (paddy field runoff and evapotranspiration, estimated using the micrometeorological method). The analysis was conducted on an experimental area of approximately 40 hectares under real field conditions.

Parole chiave

Riso, Irrigazione, Sostenibilità, Cambiamento climatico, Bilancio idrico

Keywords

Rice, Irrigation, Sustainability, Climate change, Water balance

Introduzione

Il riso rappresenta una delle colture più coltivate a livello globale (FAO, 2025). Storicamente la produzione di riso è effettuata in sommersione e a ciò è associata un elevato uso di risorsa idrica (Bouman *et al.*, 2007). Tuttavia, in un contesto di crescente incertezza climatica e progressiva riduzione della disponibilità d'acqua, questo metodo tradizionale si trova ad affrontare sfide sempre più pressanti (Nguyen and Ferrero, 2006). L'urgenza di adottare strategie più sostenibili ha spinto la ricerca verso l'individuazione di tecniche alternative in grado di garantire una produzione efficiente e resiliente. Tra queste, la micro-irrigazione si configura come una soluzione promettente per migliorare l'efficienza nell'uso dell'acqua nel settore risicolo (Parthasarathi *et al.*, 2018). Numerosi studi si stanno concentrando sul confronto tra sistemi irrigui tradizionali e innovativi, con particolare attenzione al bilancio idrico e all'efficienza delle risorse impiegate (Sharda *et al.*, 2017). In tale ambito si inserisce il presente studio, avviato nel 2024 in Veneto, che si propone di analizzare le differenze tra la coltivazione del riso con sommersione e con micro-irrigazione. Verranno presentati i risultati preliminari di uno studio pilota, volto a gettare le basi per una sperimentazione triennale, con l'obiettivo di fornire dati concreti a supporto di pratiche agricole più sostenibili in un'epoca di crescente scarsità idrica.

Materiali e Metodi

Lo studio è stato condotto nel Comune di Eraclea, nella pianura orientale del Veneto, presso l'azienda agricola "La Fagiana". All'interno del territorio comunale sono stati selezionati due siti sperimentali distinti: un campo coltivato a riso con tecnica tradizionale di sommersione (RS – 17 ha),

localizzato in località Brian (N 45° 35' 12.111", E 12° 48' 26.346"), e un campo gestito con micro-irrigazione (RM – 22,5 ha), situato in località Torre di Fine (N 45° 34' 35.934", E 12° 44' 43.037").

L'area è caratterizzata da un clima temperato umido sub-continentale, tipico della pianura veneta, con precipitazioni medie annue intorno a 900 mm, distribuite relativamente in modo uniforme durante l'anno ma con picchi stagionali in primavera e autunno. La temperatura media annua si attesta sui 13,5 °C, con valori medi massimi di 29 °C in luglio e minimi di 0 °C in gennaio. L'evapotraspirazione di riferimento è stimata in circa 850 mm/anno (ARPAV, 2024). Il territorio rientra nel comprensorio del Consorzio di Bonifica Veneto Orientale, caratterizzato da una complessa rete idraulica situata tra i fiumi Piave e Livenza, che consente una gestione integrata delle pratiche irrigue e del drenaggio agricolo. I suoli presentano prevalente origine alluvionale, con tessitura limosa e la presenza localizzata di paleo-alvei a tessitura più grossolana. L'altimetria dei siti oscilla tra -1 e -2,5 m s.l.m. (Comune di Eraclea, 2021).

Per il confronto tra i due metodi irrigui, sono state installate due stazioni di monitoraggio, una per ciascun sito, con l'obiettivo di valutare l'efficienza dei metodi adottati (Sharda *et al.*, 2017; Miniotti *et al.*, 2016). Ogni stazione è stata dotata della seguente strumentazione:

- Stazione meteorologica (ATMOS 41, Meter Group, USA), per la misurazione continua di temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità del vento, radiazione solare e precipitazioni.
- Cinque sonde di umidità del suolo (Teros 12, Meter Group), posizionate a profondità di 10, 20, 30, 40 e 50

cm, per monitorare il contenuto idrico lungo il profilo radicale.

- Sensore di evapotraspirazione (LI-710, LI-COR Biosciences, USA) per la misurazione diretta del flusso di vapore acqueo dalla superficie del suolo.
- Sei termistori (107, Campbell Scientific, USA), disposti verticalmente a 20, 60, 100, 140 e 180 cm, per la caratterizzazione del profilo termico dell'aria all'interno e sopra la coltura.
- Due datalogger: Zentra (Meter Group) per la raccolta dei dati da stazione meteorologica e sonde di umidità, e CR300 (Campbell Scientific) per i sensori di evapotraspirazione e i termistori.
- Due misuratori di flusso (Greyline AVFM 6.1, Pulsar Measurement, UK) installati all'ingresso e all'uscita del campo RS, per la quantificazione dei volumi idrici impiegati con il metodo per sommersione.
- Sistema di misura integrato per il campo RM, con registrazione diretta dei volumi d'acqua erogati dall'impianto di micro-irrigazione (Netafim, Israel).

Il bilancio idrico è stato determinato per entrambi i campi tenendo conto di tutti gli apporti e le perdite idriche, secondo l'equazione proposta da Miniotti *et al.* (2016):

$$I + R = ET + P + D + \Delta S_s$$

dove:

I = volume irriguo fornito,

R = precipitazione,

ET = evapotraspirazione,

P = percolazione netta,

D = deflusso superficiale,

ΔS_s = variazione dello stoccaggio idrico nel suolo.

La percolazione netta (P), definita come il flusso netto al di sotto della zona radicale (includendo eventuale risalita capillare), è stata calcolata come termine residuo dell'equazione di bilancio.

La *water productivity* (WP) è stata valutata per ciascun sistema come rapporto tra la resa in granella (kg) e il volume totale di acqua impiegata (m^3).

La raccolta dati è avvenuta in continuo durante l'intera stagione culturale, con frequenze di acquisizione differenziate in base al tipo di parametro monitorato.

Risultati e Discussione

Nel corso del 2024, le condizioni climatiche rilevate nei due siti sperimentali sono risultate complessivamente simili, pur presentando alcune differenze rilevanti. Durante il periodo colturale (maggio–ottobre), le stazioni meteorologiche hanno registrato temperature medie identiche pari a 20,9 °C. Tuttavia, le precipitazioni cumulate hanno mostrato una certa variabilità spaziale: 689,4 mm a Brian (campo RS) e 760,2 mm a Torre di Fine (campo RM), con una differenza pari a circa il 10%.

La distribuzione delle piogge è risultata irregolare, con due periodi particolarmente piovosi: maggio, con oltre 200 mm di precipitazioni, e il bimestre settembre–ottobre, in cui si

sono cumulati oltre 350 mm. Questi episodi sono stati intervallati da una fase estiva (giugno–agosto) caratterizzata da una marcata carenza idrica, con un totale di poco superiore a 100 mm, condizione potenzialmente critica per lo sviluppo della coltura.

L'evapotraspirazione di riferimento (ET_0), calcolata secondo la formula standardizzata di Penman–Monteith, ha mostrato valori cumulati simili nei due siti: 561,9 mm a Brian e 566,6 mm a Torre di Fine. I valori giornalieri di ET_0 hanno raggiunto picchi prossimi a 6 mm/giorno durante le ondate di calore estive, evidenziando una significativa pressione evaporativa sulla coltura.

La resa in granella della varietà Carnaroli Classico è risultata significativamente più elevata nel sistema tradizionale rispetto alla micro-irrigazione. Il campo RS ha ottenuto una produzione di 3,4 Mg/ha, mentre il campo RM ha raggiunto solo 1,7 Mg/ha, evidenziando una riduzione del 50%. In entrambi i campi si sono manifestati attacchi diffusi di brusone (*Pyricularia grisea* (Cooke) Sacco), che hanno compromesso fortemente le rese, normalmente attestate intorno a 6,0 Mg/ha per RS e 4,5 Mg/ha per RM.

I dati sperimentali sull'evapotraspirazione effettiva (ET) hanno evidenziato differenze tra i due sistemi colturali. Il campo RS ha registrato un valore cumulato di 507,9 mm, mentre il campo RM ha mostrato 435,0 mm, con una riduzione del 16,8%. Coerentemente, i coefficienti culturali (K_c) medi per l'intero ciclo colturale sono stati pari a 0,84 per RS e 0,74 per RM. Limitando l'analisi al trimestre estivo (giugno–agosto), i valori medi di K_c sono aumentati rispettivamente a 0,91 e 0,81.

Le percolazioni nette, stimate tramite il bilancio idrico, sono risultate sensibilmente superiori nel sistema a sommersione, con valori medi giornalieri di circa 7 mm nei periodi di allagamento continuo. Nel sistema RM, la percolazione netta si è mantenuta intorno ai 2 mm/giorno, a testimonianza di una maggiore efficienza nella gestione idrica.

Le quantità nette di irrigazione evidenziano un marcato divario tra i due sistemi: il campo RS ha richiesto complessivamente 1800 mm d'acqua durante la stagione colturale, mentre il campo RM ha impiegato 740 mm, con una riduzione del 59% nei volumi irrigui.

Infine, la WP è risultata pari a 0,19 kg/ m^3 per il campo RS e a 0,23 kg/ m^3 per il campo RM, indicando un miglioramento del 21,2% in favore del sistema micro-irrigato.

Conclusioni

I risultati preliminari di questo studio pilota, condotto nella stagione 2024, offrono indicazioni rilevanti sul potenziale della micro-irrigazione come pratica alternativa alla tradizionale sommersione nella coltivazione del riso. Pur in presenza di rese contenute, fortemente penalizzate dalla diffusione del brusone, il sistema a micro-irrigazione ha evidenziato una marcata riduzione dei volumi irrigui (–59%) e un incremento dell'efficienza d'uso dell'acqua (+21,2%) rispetto al sistema convenzionale.

Questi dati suggeriscono che, in assenza di criticità fitosanitarie e in condizioni agronomiche ottimali, i vantaggi della micro-irrigazione potrebbero risultare ancora più

significativi, con potenziali ricadute positive sia sul piano ambientale che produttivo.

È tuttavia fondamentale evidenziare che i risultati si basano su un singolo anno di sperimentazione e sono dunque da considerarsi preliminari. Le condizioni climatiche anomale del 2024, unite all'elevata incidenza di patologie fungine, hanno inciso in modo sostanziale sulle rese, limitando la piena espressione del potenziale produttivo dei due sistemi. A partire dal 2025 verrà avviata una sperimentazione triennale strutturata, finalizzata a validare in modo più solido e statisticamente robusto le performance agronomiche, idriche ed economiche dei due metodi di coltivazione. Lo studio pilota ha posto le basi tecniche e metodologiche per l'implementazione di questo percorso di ricerca, che si propone di offrire indicazioni operative per una risicoltura resiliente, efficiente e adattata ai nuovi scenari climatici e alla crescente pressione sulle risorse idriche.

Ringraziamenti

Lo studio è stato condotto all'interno del Progetto AGRITECH (Finanziato dall'Unione europea - Next Generation EU, Missione 4, Componente 2, CUP C93C22002790001). Spoke 4, Work Package 4.2, Task 4.2.1 "Farm network setup (Living Labs): a network of farms representative of the different agricultural systems to apply innovative technologies for the sustainable management of crops, animals and forests".

Bibliografia

- ARPAV, 2024. Meteo e Clima 2024 – Rapporto annuale. [www.arpa.veneto.it].
- Bouman B.A.M., Lampayan R.M., Tounk T.P., 2007. Water management in irrigated rice: coping with water scarcity. IRRI, Los Banos, 54 pp.
- Comune di Eraclea, 2021. Piano delle Acque del Comune di Eraclea. San Donà di Piave: Consorzio di Bonifica Veneto Orientale.
- FAO, 2025. FAOSTAT. [www.fao.org/faostat/en/#home].
- Miniotti E.F., Romani M., Said-Pullicino D., Facchi A., Bertora C., Peyron M., Sacco D., Bischetti G.B., Lerda C., Tenni D., Gandolfi C., Celi L., 2016. Agro-environmental sustainability of different water management practices in temperate rice agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 222, 235–248.
- Nguyen N.V., Ferrero A., 2006. Meeting the challenges of global rice production. *Paddy and Water Environment*, 4: 1-9.
- Parthasarathi T., Vanitha K., Mohandass S., Vered E., 2018. Evaluation of drip irrigation system for water productivity and yield of rice. *Agronomy Journal*, 110(6): 2378-2389.
- Sharda R., Mahajan G., Siag M., Singh A., Chauhan B.S., 2017. Performance of drip-irrigated dry-seeded rice (*Oryza sativa* L.) in South Asia. *Paddy and water environment*, 15: 93-100.

IMPACT OF CLIMATE WARMING ON SOIL CO₂ EMISSIONS: LONG-TERM REGIONAL-SCALE SIMULATION ANALYSIS IN TWO DIFFERENT CROPPING SYSTEMS

IMPATTO DEL RISCALDAMENTO GLOBALE SULLE EMISSIONI DI CO₂ DAL SUOLO: ANALISI DI DUE SISTEMI COLTURALI ATTRAVERSO UNA SIMULAZIONE DI LUNGO PERIODO A SCALA REGIONALE

Vario Leonardo¹, Marco Perfetto^{1*}, Mara Gabbrielli¹, Alessia Perego¹, Ragaglini Giorgio¹

¹ Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali, Università degli Studi di Milano, via Celoria 2, 20133, Milano (MI)

[*marco.perfetto@unimi.it](mailto:marco.perfetto@unimi.it)

Abstract

Climate change significantly affects soil respiration and biogeochemical cycles, necessitating increasingly resilient cropping systems. This study evaluated soil heterotrophic respiration (Rh) trends in response to climate variability. Using the ARMOSA cropping system model, calibrated and validated with continuous CO₂ measurements, we simulated soil CO₂ emissions over 40 years for two different cropping systems across 21 soil classes embedded in 37 meteorological grids from the Agri4Cast network in the Emilia-Romagna region. A Random Forest algorithm identified average temperature and annual cumulative precipitation as the main climatic variables influencing Rh. Among different cropping systems and soil types, the correlation analysis between annual average temperature and simulated Rh estimated a CO₂ emission response ranging from -0.94 to 10.48 g CO₂ per kg of SOC per 1°C increase in annual mean temperature ($p < 0.001$, Pearson's $r = 0.46$). Lastly, the results emphasize that more productive cropping systems, which return larger crop residues to the soil, are more resilient to temperature rising by having a lower mineralization rate preventing from an excess of SOC depletion.

Parole chiave

CO₂, Sistemi colturali, Modelli di simulazione, Cambiamento climatico, SOC

Keywords

CO₂, Cropping systems, Process-based model, Climate change, SOC

Introduzione

La respirazione del suolo è uno dei principali flussi del ciclo globale del carbonio, apportando un contributo pari a circa 75×10^{15} g di C al bilancio annuo (Chen et al., 2011). Il flusso totale di CO₂ verso l'atmosfera è rappresentato dalla respirazione totale del suolo (Rs) ed è composto da: (i) una quota prodotta da organismi autotrofi (respirazione autotrofa, Ra), derivante dal metabolismo delle radici delle piante; (ii) una quota sviluppata da organismi eterotrofi (respirazione eterotrofa, Rh), dovuta ai processi di decomposizione e mineralizzazione del carbonio organico del suolo (SOC) (Zhang et al., 2013). Il riscaldamento climatico può influenzare fortemente questo processo, per il suo effetto su temperatura e umidità del suolo, che regolano sia la respirazione microbica che radicale (Sherman et al., 2012).

Per valutare gli effetti del cambiamento climatico in atto sulla respirazione eterotrofa del suolo, in questo studio è stato combinato l'uso di dati meteorologici giornalieri di lungo periodo con il modello di simulazione di sistema colturale basato su processi ARMOSA (Perego et al., 2013) a scala regionale per la regione Emilia-Romagna.

Materiali e Metodi

Il modello di simulazione ARMOSA (Perego et al 2013) è stato utilizzato per simulare le emissioni di CO₂ dai suoli e le variazioni di SOC dei sistemi colturali simulati. ARMOSA è un modello di sistema colturale basato sui processi che, a time-step giornaliero, simula la crescita delle colture, e i cicli dell'acqua, carbonio ed azoto nel suolo in differenti condizioni gestionali del sistema colturale e pedoclimatiche. Il modello è stato calibrato e validato rispetto alle emissioni di CO₂ e al bilancio carbonio in Gabbrielli et al. 2025, utilizzando misure giornaliere di CO₂ in due sistemi colturali (Tab. 2), replicati in due siti italiani (41.49 N, 15.5 E; 44.48 N, 12.17 E): un sistema convenzionale basato sulla gestione tipica della zona (CCS) e un sistema efficiente (ECS) basato su scelte agronomiche guidate da un sistema di supporto alle decisioni. I dati osservati sono stati utilizzati per la calibrazione (CCS) e validazione (ECS) del modello ARMOSA.

I dati meteorologici di lungo periodo (1979-2022) della regione Emilia-Romagna necessari alle simulazioni sono stati ottenuti dal database Agri4Cast (Toreti, 2014). I dati meteo utilizzati sono: temperatura giornaliera massima e minima (°C), temperatura media annua (°C), velocità del vento (m s^{-1}), radiazione solare globale (MJ m^{-2}), precipitazione giornaliera (mm) e evapotraspirazione di

riferimento (ET0, mm), tutti interpolati su una griglia di 25x25 km. Le celle sono state selezionate in funzione dell'altitudine (inferiore a 300 m.s.l.m.) in modo da essere coerenti con le prove sperimentali su cui il modello è stato calibrato e validato, ottenendo 37 differenti celle. Per il periodo di tempo considerato e per l'intera regione la temperatura media annuale è di $13.8 \pm 2.2^{\circ}\text{C}$, con una temperatura massima media di $34.8 \pm 2.3^{\circ}\text{C}$ e una minima media di $7.3 \pm 3.2^{\circ}\text{C}$. La precipitazione cumulata media è di 687 ± 221 mm, mentre ET0 annuale media è di 926.7 ± 77 mm. I dati meteorologici sono stati sottoposti ad analisi mediante modelli di regressione lineare, impiegando come variabili indipendenti gli anni e come variabili dipendenti le temperature medie annue e le precipitazioni cumulate annuali, al fine di quantificare i trend climatici relativi all'incremento termico e alle variazioni nei regimi pluviometrici.

Tab. 1- *Contenuto di sabbia e argilla per i due strati di suolo nelle diverse classi di suolo individuate (parte superiore della tabella). Quantità di SOC per le tre classi individuate, rispettivamente: Low, Medium e Peaty (parte inferiore).*
 Tab. 1 – *Sand and clay content for the two soil layers across the different identified soil classes (upper part), and SOC quantity for the three identified classes: Low, Medium, and Peaty (lower part).*

Tessitura				
Profondità (m)	<= 0.45		> 0.45	
Frazione (%)	Sabbia	Argilla	Sabbia	Argilla
C	13.9	53.7	13.3	55.2
CL	22.5	34.8	23.1	36
L	36.7	21.6	38.7	20.8
SaL	71.4	9.9	81.5	6.7
SiC	8	44.3	7	47.2
SiCL	15.1	31.3	13.7	30.7
SiL	8.8	25.8	7.6	26
SOC (%)				
Profondità (m)	L (%)	M (%)	Peaty (%)	
<= 0.45	0.97	1.84	10.8	
> 0.45	0.58	1.11	7.54	

Le informazioni relative ai differenti suoli della regione sono state ottenute tramite il geoportale dell'Emilia-Romagna, applicando un filtro che ha selezionato esclusivamente i profili di suoli coltivati situati a un'altitudine inferiore ai 300 m s.l.m., al fine di costruire un database rappresentativo delle condizioni pedologiche di interesse. Il risultato è un insieme di 271 profili distinti, gestiti attraverso un database PostGIS basato su PostgreSQL. Il database dei suoli è stato sottoposto ad una *cluster analysis* in funzione del contenuto di argilla (%), sabbia (%) e SOC (%). L'analisi è stata svolta utilizzando il package R *NbClust* (Charrad et al., 2014), con il metodo di classificazione Manhattan distance. I risultati della cluster analysis hanno permesso di raggruppare i suoli

in 21 classi con combinazioni diverse di tessitura e livelli di SOC, a ciascuna classe è stato associato il valore medio di SOC, argilla e sabbia a due diverse profondità (> e < 45 cm). Identificando sette diverse classi di suolo e tre diversi livelli di carbonio organico (Tabella 1).

Per ciascuna cella climatica, sono state simulate tutte le classi di suolo ottenute dalla combinazione tra tessitura e livello di SOC ed entrambi i sistemi colturali, CCS ed ECS. Sono stati inoltre considerati quattro anni distinti come punto di inizio delle simulazioni (1979–1982), al fine di garantire la presenza di tutte le colture previste nella rotazione per ciascun anno e ottenere un dato medio annuo della rotazione colturale. La gestione della rotazione colturale, comprese le date di semina e delle lavorazioni, è stata mantenuta costante, assegnando un giorno fisso dell'anno, mentre le fertilizzazioni azotate sono state eseguite in funzione dello stadio fenologico della coltura in modo coerente con quanto effettivamente fatto nelle condizioni sperimentali (Tab. 2).

Tab.2 – *Rotazione colturale, giorno dell'anno (DOY) di semina, fertilizzazione azotata totale e quantità di irrigazione nei sistemi CCS ed ECS*
 Tab.2 - *Crop rotation, sowing DOY, total nitrogen fertilization and irrigation amount in CCS and ECS systems.*

Cropping system	Crop	Sowing DOY	N rate (kg N ha ⁻¹)	Irrigation amount (mm)
CCS	Maize	92	208	45
	Durum wheat	295	156	-
	Processing tomato	116	138	366
	Durum wheat	295	156	-
ECS	Pea	328	-	-
	Durum wheat + Alfalfa	295	130	-
	Processing tomato	116	109	Automatic
	Durum wheat + Alfalfa	295	130	-

I risultati ottenuti dalle simulazioni, aggregati a livello annuale sono stati analizzati al fine di identificare i fattori trainanti dei processi di respirazione del suolo, impiegando un algoritmo di Random Forest (RF, Wriht e Ziegler 2017). L'algoritmo è stato applicato su un fattore di emissione (EF) calcolato come il rapporto tra le emissioni di CO₂ cumulate annue e il contenuto di carbonio organico nel suolo all'inizio di ciascun anno associato all'emissione. I predittori utilizzati per l'algoritmo sono stati: contenuto di argilla (%), sabbia (%), SOC ad inizio anno (%), il sistema colturale, la quantità di C apportata dai residui colturali (t ha⁻¹), la temperatura media annua (°C), le precipitazioni annue cumulate (mm), l'ET0 cumulata annua (mm) ed infine alcuni indicatori di frequenza di eventi estremi come il numero di giorni all'anno con assenza di precipitazioni (d), il numero di giorni con assenza di precipitazioni (d) e con temperatura massima superiore ai 30 °C (d) ed il numero di ondate di calore annue.

I risultati del RF sono stati analizzati attraverso le metriche di IncNodePurity (*Increase in Node Purity*) che indica quanto ogni variabile contribuisce a migliorare la purezza dei nodi individuati dal modello per suddividere i dati all'interno degli alberi decisionali e la %IncMSE (*Increase in Mean Squared Error*), che indica quanto peggiora la performance del modello (in % di incremento dell'errore quadratico medio) quando la variabile viene permutata. Più è alto il valore, più quella variabile è considerata importante per fare previsioni accurate. Infine, i risultati sono stati visualizzati graficamente attraverso l'uso di *partial dependence plot* (PDP) che hanno lo scopo di evidenziare quanto cambia la previsione media del modello al variare di una certa variabile, isolate le altre e quindi rappresentare la sensitività del modello alle singole variabili.

Risultati e discussione

L'analisi della regressione lineare tra gli anni in analisi e la temperatura media annuale (Fig.1) ha evidenziato una tendenza positiva statisticamente significativa ($p < 0.001$) nel periodo considerato. Il coefficiente angolare stimato ($0.0465 \text{ }^{\circ}\text{C yr}^{-1}$) indica un incremento medio annuo della temperatura, che si traduce in un incremento di circa 1.85°C nei 40 anni considerati per la regione Emilia-Romagna. Il modello mostra una buona capacità esplicativa, con un valore di R^2 pari a 0.40. La retta di regressione tracciata in Fig. 1 evidenzia visivamente tale andamento crescente. Questo trend positivo suggerisce un progressivo riscaldamento del clima locale, in linea con quanto osservato su scala più ampia a livello nazionale ed europeo (Toreti and Desiato, 2008).

La variabilità di temperatura che è possibile osservare lungo la linea di regressione è riconducibile alla variabilità spaziale delle diverse celle della griglia Agri4Cast. Al contrario, non sono state rilevate variazioni statisticamente significative in relazione alle variabili relative al bilancio idrologico.

Il progressivo incremento della temperatura media annua, oltre a rappresentare una manifestazione dei cambiamenti climatici in atto, assume particolare rilevanza nel contesto delle dinamiche biogeochimiche del suolo, per il suo potenziale effetto sui processi di mineralizzazione della sostanza organica e, conseguentemente, le emissioni di CO_2 dal suolo all'atmosfera. In quest'ottica, l'impiego del modello Random Forest ha permesso di approfondire l'importanza relativa delle variabili climatiche, pedologiche e gestionali nella stima del fattore di emissione della CO_2 , evidenziando il contributo differenziato di ciascun predittore.

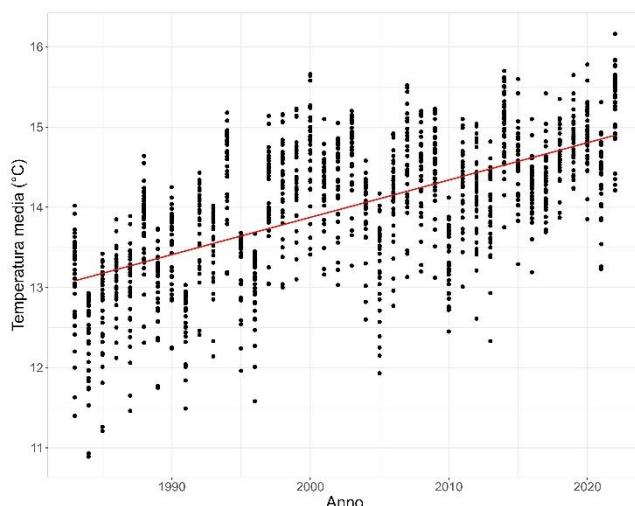


Fig.1- Temperatura media annua delle diverse griglie meteo analizzate nel periodo temporale dal 1982 al 2022. Ciascun punto rappresenta la temperatura media di una griglia. La linea rossa rappresenta la linea di regressione lineare.

Fig.1- Average annual temperature of the different weather grids analyzed during the period from 1982 to 2022. Each point represents the average temperature of a grid. The red line represents the linear regression line

Il modello RF ha evidenziato che il fattore di emissione della CO_2 risponde in maniera significativa ad alcune delle variabili di predizione selezionate (Fig 2). Tra queste la più influente è risultata essere il SOC, con una %IncMSE di circa 544.0 e il valore più alto anche in termini di IncNodePurity, confermando un presumibile effetto del contenuto organico di carbonio e le emissioni stimate.

Tra le variabili climatiche, la temperatura media annua ha mostrato un impatto significativo (%IncMSE: 55.0), indicando che l'aumento della temperatura può influenzare direttamente il rilascio di CO_2 , verosimilmente per via di una maggiore attività microbica e mineralizzazione della sostanza organica. Anche ET_0 , pioggia, e giorni secchi si sono dimostrati rilevanti, confermando l'importanza del bilancio idrico del suolo nel processo emissivo.

Tra le variabili gestionali, il carbonio derivante dai residui colturali è tra le più importanti, sottolineando l'effetto dei residui organici sulle dinamiche del carbonio nel suolo. La variabile sistema (CCS vs ECS, Fig. 2) ha un impatto contenuto ma non trascurabile, riflettendo le differenze di gestione nei due sistemi colturali, e rispecchiando soprattutto il differente apporto di C dai residui.

Infine, la bassa importanza di variabili come la posizione geografica o la minore o maggiore ricorrenza di eventi estremi, suggerisce che alcuni effetti spaziali o eventi estremi a 5 giorni non siano stati tra i principali driver delle emissioni nel contesto considerato.

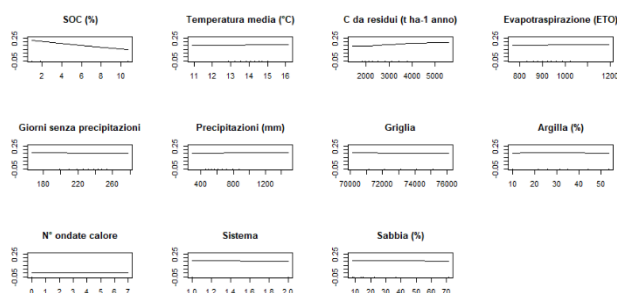


Fig.2 - Partial dependence plot per il metamodello di RF sulla stima del fattore di emissione. Sull'asse delle y è riportato il valore del fattore di emissione, l'asse delle x è variabile in funzione della variabile rappresentata. L'ordine dei grafici rappresenta l'ordine di importanza delle variabili
Fig.2 - Partial dependence plot for the RF metamodel on the estimation of the emission factor. The y-axis shows the value of the emission factor, while the x-axis varies depending on the variable represented. The order of the plots reflects the importance ranking of the variables.

Le correlazioni individuate tra fattore di emissione e temperatura per le diverse classi di suolo e per le diverse combinazioni di SOC e sistema mostrano in media degli indici di correlazione significativi ($p < 0.001$, Pearson's $r = 0.46$). In figura 3 si osserva una chiara tendenza all'aumento del fattore di emissione con l'incremento della temperatura, e in relazione alla progressione cronologica: anni più recenti sono caratterizzati da una temperatura media più elevata e conseguentemente da più alti livelli di EF. Si osserva come suoli caratterizzati da un elevato contenuto di SOC iniziale tendono ad essere meno dispersi intorno alla retta di regressione lineare, con una ridotta variabilità dell'EF in risposta alle diverse temperature medie annue. Ad alti livelli di SOC l'influenza del sistema è limitata e l'incremento medio del fattore di emissione è di $6.6 \pm 0.4 \text{ g CO}_2 \text{ kg SOC}^{-1} + 1^\circ\text{C}$ a prescindere dalla tessitura e dal sistema colturale. Nei suoli con contenuti di carbonio inferiori, invece, la variabilità per effetto della temperatura tende ad aumentare, pur mantenendo dei trend molto chiari e statisticamente significativi. In particolare, nei suoli con contenuto di carbonio medio e basso, il sistema CCS mostra una maggiore variabilità, pur mantenendo trend di emissione positivi rispetto all'incremento della temperatura. L'effetto della tessitura sul fattore di emissione, come per l'effetto del sistema e del livello di SOC tende ad essere più evidente per i suoli con contenuti di carbonio ridotti, ed in particolare quando la componente argillosa tende a diminuire a scapito di un incremento del contenuto di sabbia le variazioni tendono ad essere più evidenti. Per contenuti di SOC medi si evidenziano variazioni di emissione molto elevate ($7.33 \pm 2.56 \text{ g CO}_2 \text{ kg SOC}^{-1} + 1^\circ\text{C}$), in questo gruppo di suoli si raggiunge la risposta massima all'incremento di temperatura, in particolare in suoli con tessitura franco-limosa (SiL) nel sistema CCS con un incremento di $10.48 \text{ g CO}_2 \text{ per kg di SOC}^{-1} \text{ per } +1.0^\circ\text{C}$, mentre il minimo viene raggiunto nei suoli franco sabbiosi (SaL) con un incremento di $0.1 \text{ g CO}_2 \text{ per kg di SOC per } 1^\circ\text{C}$. Infine nei suoli caratterizzati da un

livello di SOC ridotto si osservano dei fattori di emissione che tendenzialmente sono maggiori rispetto agli altri sistemi, ma le variazioni in risposta alla temperatura tendono ad assumere gli stessi andamenti dei suoli con SOC media, seppur con una risposta dell'emissione alla temperatura ridotti ($5.43 \pm 1.92 \text{ g CO}_2 \text{ kg di SOC}^{-1} + 1^\circ\text{C}$). All'interno di questa classe di SOC si osserva la variazione minima del fattore di emissione in risposta alla temperatura ($-0.94 \text{ g CO}_2 \text{ per kg di SOC } + 1^\circ\text{C}$), per un suolo franco sabbioso (SaL) nel sistema ECS.

Dall'analisi ciò che emerge è che i suoli caratterizzati da un elevato livello di SOC, mantengono un fattore di emissione sempre minore rispetto a livelli di SOC inferiori, ed un incremento dell'emissione che tende ad essere meno variabile tra le diverse combinazioni di fattori, a causa, appunto del maggiore contenuto di SOC che porta ad uniformare le emissioni e a stabilizzarle (in termini assoluti) su livelli più elevati, risentendo meno del carbonio apportato con i residui colturali rispetto alle altre combinazioni. L'effetto del sistema racchiude, infatti, al suo interno l'effetto del C apportato con i residui che come visto in precedenza rappresenta un importante driver del processo. L'effetto più marcato della gestione colturale si evidenzia in suoli con livelli di SOC inferiori, in particolare è evidente come il sistema CCS che porta ad una maggiore produzione di C residuo, garantisce una maggiore resilienza all'incremento di temperatura, con una minore mineralizzazione della SOC stabile, favorendo la mineralizzazione dei residui colturali, preservando il C accumulato nel suolo e operando come accumulo di carbonio e non come fonte.

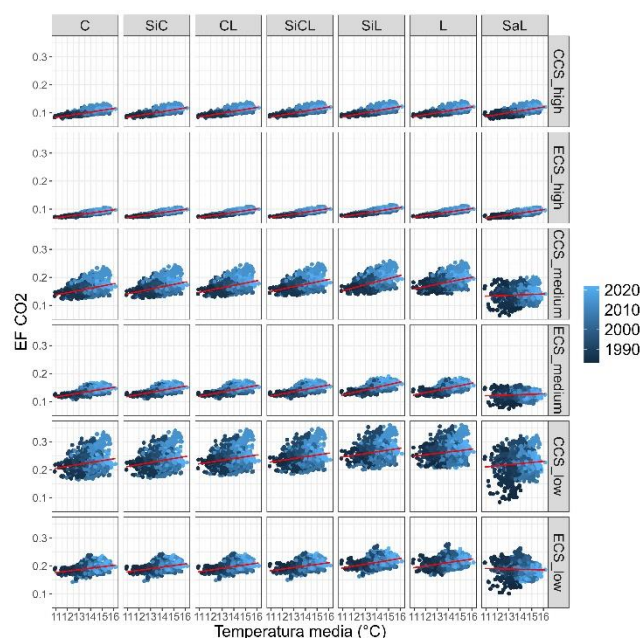


Fig.3 - Correlazione tra temperature e fattore di emissione per classe di suolo (variabile in alto), sistema e contenuto di SOC (variabile a sinistra)

Fig.3 - Correlation between temperatures and emission factor by soil class (variable at the top), system, and SOC content (variable on the left)

Conclusioni

Il riscaldamento climatico, con l'aumento della temperatura, influisce significativamente sulle emissioni di CO₂ dal suolo, in particolare i suoli con bassi contenuti di carbonio organico (SOC), sono più esposti, avendo un EF che tende ad aumentare maggiormente all'incremento della temperatura. Infatti, i risultati dello studio evidenziano che in un'analisi di scenario di lungo periodo lo stock di SOC è il fattore più rilevante nel determinare le emissioni di CO₂, seguito dalle variabili climatiche e dalla gestione agricola, come l'apporto di C dai residui colturali. I suoli con elevato SOC mostrano emissioni più stabili, mentre quelli con contenuti più bassi sono più sensibili alle variazioni termiche.

Il sistema culturale ECS, con una gestione più efficiente, favorisce la riduzione delle emissioni di CO₂, ma causa un incremento del rischio di perdita di C stabile. Al contrario un sistema culturale più produttivo garantisce un maggior mantenimento del carbonio stabile nel suolo, pur evidenziando emissioni maggiori. Questi risultati suggeriscono che le politiche agricole mirate all'accumulo di C nel suolo necessitano di tool specifici a supporto di prescrizioni specifiche.

Bibliografia

- Charrad, M., Ghazzali, . N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2014). NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, 61(6), 1–36.
- Chen, X., Post, W.M., Norby, R.J. *et al.* Modeling soil respiration and variations in source components using a multi-factor global climate change experiment. *Climatic Change* **107**, 459–480 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9942-2>
- Gabbrielli, M., Perfetto, M., Botta, M., Volpi, I., Castellucci, A., Ruggeri, M., Allegranza, M., Alessi, N., Vario, L., Acutis, M., Perego, A., Ragaglini, G., 2025. Optimization of agronomic management positively affects soil GHG emission: viable solutions of mitigation in moist and dry Mediterranean climate zones. *European Journal of Agronomy* 168. [Accepted]
- Perego, A., Giussani, A., Sanna, M., Fumagalli, M., 2013. The ARMOSA simulation crop model: Overall features, calibration and validation results. *Italian Journal of Agrometeorology* 42.
- Sherman, C., M. Sternberg, and Y. Steinberger. 2012. 'Effects of Climate Change on Soil Respiration and Carbon Processing in Mediterranean and Semi-Arid Regions: An Experimental Approach'. *European Journal of Soil Biology* 52 (September):48–58. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.06.001>.
- Toreti, Andrea (2014): Gridded Agro-Meteorological Data in Europe. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID: http://data.europa.eu/89h/jrc-marsop4-7-weather_obs_grid_2019
- Toreti, Andrea, and Franco Desiato. 2008. 'Changes in Temperature Extremes over Italy in the Last 44 Years'. *International Journal of Climatology* 28 (6): 733–45. <https://doi.org/10.1002/joc.1576>.
- Wright, M. N., & Ziegler, A. (2017). ranger: A Fast Implementation of Random Forests for High Dimensional Data in C++ and R. *Journal of Statistical Software*, 77(1), 1–17. <https://doi.org/10.18637/jss.v077.i01>
- Zhang, Q., Lei, H.M., Yang, D.W., 2013. Seasonal variations in soil respiration, heterotrophic respiration and autotrophic respiration of a wheat and maize rotation cropland in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology* 180, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.028>.

APPRAISING INACCURACY AND ERRORS OF SATELLITE-DERIVED ET FOR MICROIRRIGATED CITRUS AND PISTACHIO ORCHARDS IN CALIFORNIA'S SEMI-ARID CONDITIONS

VALUTAZIONE DELL'INACCURATEZZA E DEGLI ERRORI DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE STIMATA CON MODELLI DI TELERILEVAMENTO SATELLITARE SU AGRUMETI E PISTACCHIETI MICROIRRIGATI NELLE CONDIZIONI SEMI-ARIDE DELLA CALIFORNIA

Daniele Zaccaria^{1*}, Gaetano Alessandro Vivaldi², Pasquale Steduto¹, Richard L. Snyder¹, Octavio L. Lagos³, Francisco Gomez Diaz¹, Lorenzo Cigarra Guinez³

¹ University of California, Davis (USA) – Department of Land, Air, and Water Resources

² University of Bari Aldo Moro (Italy) - Department of Soil, Plant and Food Sciences

³ University of Concepción (Chile) - Water Resources Center for Agriculture and Mining

* dzaccaria@ucdavis.edu

Abstract

In California's major citrus and pistachio growing regions, the current and projected water supply limitations resulting from droughts, tightening environmental regulations and increasing climate variability call into question the sufficiency of water supplies to sustain the citrus and pistachio acreage and yield statewide. In recent years, water agencies and regulators have turned to satellite remote-sensing (SRS) models to estimate orchard evapotranspiration (ET) for sustainable groundwater management compliance and surface-groundwater conjunctive use planning. Yet without rigorous ground-truthing and validation, these models can produce ET estimates that deviate substantially from reality in microirrigated orchards (± 15 -50% and beyond). Preliminary results from our applied research indicate that widely used SRS-based models markedly overestimate ET in citrus orchards while underestimating it in pistachio orchards. These biases stem primarily from the coarse pixel resolution of satellite imagery, which prevents accurate separation of tree-canopy reflectance from the soil background, and the models' failure to account for crop-specific stomatal responses to some weather parameters.

Parole chiave:

Consumo Idrico delle Colture; Telerilevamento Satellitare; Eddy Covariance; Frutteti Microirrigui; OpenET

Keywords:

Crop Evapotranspiration; Satellite Remote Sensing; Eddy Covariance; Microirrigated Orchards; OpenET

Introduction

Over the past ten years, California's primary citrus and pistachio growing regions have experienced severe water shortages, driven by drought, depletion of groundwater aquifers, and restrictive environmental regulations. In the face of increasing climate variability and limitations on water resources, achieving sufficient accuracy in estimating crop evapotranspiration (ET) and the water productivity under various climatic conditions is essential to ensure adequate supplies for fruit and nut growing areas, maintain or adjust the cropped acreage, transfer water between hydrologic units, and implement efficient irrigation management. In California, information on ET for microirrigated citrus and pistachio orchards is both scarce and outdated. Moreover, orchard ET and water productivity vary greatly depending on climatic conditions, planting density, tree row orientation, canopy vigor, and cultural practices, all of which influence the interception of radiation, tree transpiration, and yield. At present, it is unclear what level of ET estimation accuracy is considered acceptable by the various stakeholders in the fruit and nut production industry and by water management agencies. Meanwhile, many irrigation districts and Groundwater Sustainability

Agencies (GSAs) have recently adopted satellite remote sensing (SRS) models, which when not adequately calibrated and validated, can produce highly uncertain and inaccurate orchard ET estimates, as documented by recent studies (e.g., He et al., 2021; Jin et al., 2018; Dughel et al., 2024).

In this management context, a team of researchers from the University of California, Davis, conducted field measurements of actual ET in microirrigated citrus and pistachio orchards across the Central Valley using micro-meteorological methods based on the surface energy-balance (eddy covariance). The ground-based measured values were then compared with ET estimates produced by seven satellite remote sensing models available on the OpenET web platform, in order to assess their accuracy and identify the main sources of error.

Materials and Methods

The research team instrumented several citrus and pistachio production orchards with arrays of sensors to capture, over multiple consecutive growing seasons, the micro-meteorological variables of the surface energy balance - specifically net radiation (Rn), sensible heat flux (H), and soil heat flux (G). At the same time, the key biophysical

parameters governing crop evapotranspiration and consumptive water use were measured, drawing on both in-situ technologies and ground-based surveys employing proximal and remote sensing techniques.

Satellite-derived ET estimates were generated using models that are either based on the residual of the energy balance method, or on reflectance-based crop coefficient (K_c) from multispectral or thermal data, and then systematically compared to the field measured ET at various temporal scales and spatial resolutions to quantify discrepancies, uncertainties, and errors. In details, daily and monthly ET values were retrieved from the OpenET web platform, which provides independent estimates from six models (METRIC, SEBAL, SSEBop, ALEXI/DisALEXI, TopSIMS, and JPL-PT) plus an ensemble model product that averages the four most closely-aligned ET outputs.

Deviations between satellite-modeled and field-measured ET were assessed using a suite of statistical indicators - such as R^2 , NRMSE, mean relative error, Willmott's index of agreement, and the Nash–Sutcliffe efficiency coefficient - to quantify the magnitude and sources of inaccuracy and errors across scales.

Results and Discussion

Figure 1 illustrates the magnitude of deviations between satellite-based ET estimates and ground-measured ET values in a Tulare County's mature mandarin orchard over the 2019-2023 period. Under frequentist approach, deviations are expressed in terms of Normalized Mean Root-Square Error (NMRSE), which quantifies the overall size of the discrepancies, whether due to over- or under-estimation, thus without indicating their direction.

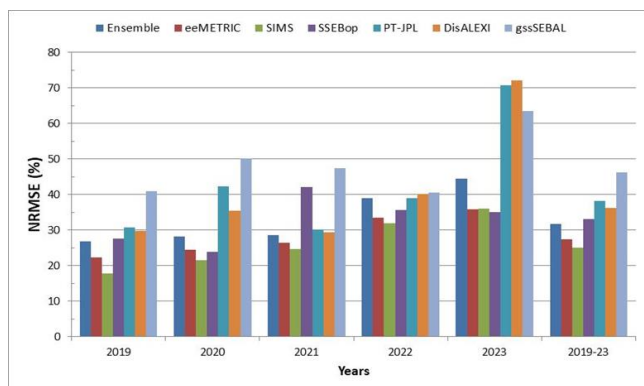


Fig. 1 – Seasonal discrepancies between satellite-derived and field-measured ET in a mature, microirrigated mandarin orchard in Tulare County, California, USA, over the 2019-2023 period.

Fig. 1 - Discrepanze stagionali tra i valori di ET ricavati da satellite e quelli misurati in campo per un agrumeto maturo di mandarini microirrigati nella Contea di Tulare, California (USA), nel periodo 2019–2023.

Figure 2 shows the relationship between the daily ET estimated from the OpenET ensemble model and field-measured ET in the mature microirrigated mandarin orchard in Tulare County, CA for the 2019-2023 crop seasons. The

strong positive bias indicates that the OpenET ensemble model consistently overestimates the trees' consumptive water use.

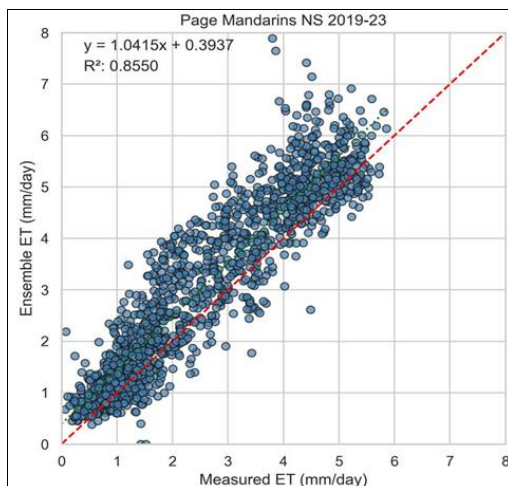


Fig. 2 - Relationship between the daily ET estimated from OpenET ensemble model and field-measured ET in the mature microirrigated mandarin orchard in Tulare County, California (USA) for the 2019-2023 crop seasons.

Fig. 2 - Relazione tra l'ET giornaliera stimata dal modello ensemble di OpenET e quella misurata in campo in un agrumeto maturo di di mandarini microirrigati nella Contea di Tulare, California (USA) nelle stagioni colturali 2019-2023.

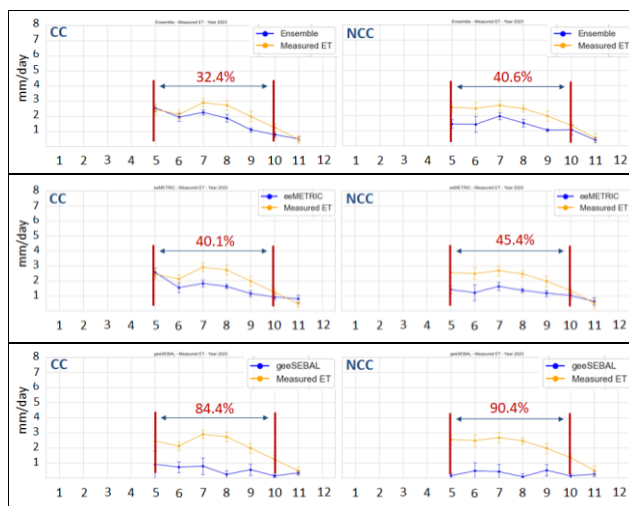


Fig. 3 – Differences between ET estimated with various SRS models and field-measured ET for young microirrigated pistachio orchards grown with cover crop (CC) and clean-cultivated floor (NCC) in Yolo County, California (USA) for the 2023 crop season.

Fig. 3 – Differenze tra ET stimata con vari modelli satellitari e ET misurata in campo per giovani pistacchietti microirrigati coltivati con cover crop (CC) e con suolo diserbato (NCC) nella Contea di Yolo, California (USA), nella stagione colturale 2023.

Figure 3 illustrates that monthly cumulative ET from various SRS-based models for a young, microirrigated pistachio orchard in Yolo County, California (USA) substantially

underestimate the actual consumptive tree water use measured in the field.

Conclusions

Preliminary comparisons between SRS-based and field-measured ET for micro-irrigated citrus and pistachio orchards in California's Central Valley indicate that satellite-derived estimates of tree consumptive water use are systematically biased and suffer from significant inaccuracies and errors arising from multiple sources, including:

- ✓ **Crop-specific meteorological responses:** SRS-based ET models often fail to capture how different species uniquely respond to temperature, humidity, and vapor-pressure deficit.
- ✓ **Coarse spatial resolution:** At 30 m × 30 m pixels, satellite-based models cannot distinguish tree or vine canopy from the underlying soil background, and therefore the optical and thermal reflectance are blended together.
- ✓ **Instantaneous snapshot limitations:** Daily ET from SRS-based models is inferred from mid-morning satellite overpasses - capturing mid-morning tree behavior, which is Temperature & RH sensitive - without correcting for diurnal physiological changes in plant transpiration.
- ✓ **Error propagation from temporal gaps:** Interpolating ET between infrequent overpasses (every 5, 8, or 16 days) necessitates filling over 95% of data gaps, thus compounding uncertainties.

Overall, these preliminary findings reveal significant inaccuracies in OpenET's estimates of tree crop consumptive water use and inconsistent performance across both orchard species and seasons, underscoring the need to develop and calibrate SRS-based ET models that incorporate each species' physiological responses to environmental and growing conditions.

Bibliographic References

- He, R., Jin, Y., Kandelous, M. M., Zaccaria, D., Sanden, B. L., Snyder, R. L., ... & Hopmans, J. W. (2017). Evapotranspiration estimate over an almond orchard using Landsat satellite observations. *Remote Sensing*, 9(5), 436.
- Jin, Y., He, R., Marino, G., Whiting, M., Kent, E., Sanden, B. L., ... & Zaccaria, D. (2018). Spatially variable evapotranspiration over salt affected pistachio orchards analyzed with satellite remote sensing estimates. *Agricultural and forest meteorology*, 262, 178-191.
- Dhungel, R., Anderson, R. G., French, A. N., Skaggs, T. H., Ajami, H., & Wang, D. (2024). Intercomparison of citrus evapotranspiration among eddy covariance, OpenET ensemble models, and the Water and Energy Balance Model (BAITSSS). *Agricultural Water Management*, 304, 109066.

ANALYSIS OF EVAPOTRANSPIRATION AND BEAN PERFORMANCE IN RESPONSE TO WATER DEFICIT AND FOLIAR APPLICATION OF GLYCINE BETAINE

ANALISI DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE E DELLE PERFORMANCE DEL FAGIOLO IN RISPOSTA AL DEFICIT IDRICO E ALL'APPLICAZIONE FOGLIARE DI GLICINBETAINA

Andrea Carli*, Roberto Vivoli, Giulia Pastacaldi, Leonardo Verdi, Anna Dalla Marta

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI) – Università degli Studi di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144, Firenze

[*andrea.carli@unifi.it](mailto:andrea.carli@unifi.it)

Abstract

Evapotranspiration is a key parameter for irrigation management and water balance modelling in crop systems. This study was conducted in a growth chamber to evaluate the effects of three different irrigation levels and foliar application of glycine betaine on morphological and physiological characteristics, water consumption, water use efficiency and biomass distribution in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. Crop evapotranspiration (ET_c) was highest in the treatment at field capacity (FC) and significantly reduced at 50% FC. Transpiration (T) showed significant differences between treatments, with maximum values ($1.3\text{--}1.4\text{ mm day}^{-1}$) during flowering and pod development under FC conditions. ET_c was positively correlated with leaf area index (LAI) and NDVI. The results indicate that irrigation at 70% FC allows considerable water savings without significantly compromising yield, offering a sustainable strategy for bean cultivation.

Parole chiave

Stress idrico, Partizione dell'evapotraspirazione, Consumo di acqua, Efficienza d'uso dell'acqua, Irrigazione deficitaria

Keywords

Water stress, Evapotranspiration partitioning, Water consumption, Water use efficiency, Deficit irrigation

Introduction

In arid and semi-arid regions, such as those in the Mediterranean basin, drought represents the primary abiotic stress negatively affecting crop productivity. To mitigate its effects, it is essential to understand crop water requirements, which are defined as the amount of water needed to compensate for losses to the atmosphere through evapotranspiration (ET_c) (Er-Raki *et al.*, 2010). ET_c is one of the most critical components of the water cycle in agricultural soils. Accurately measuring or estimating ET_c is therefore vital for quantifying hydrological processes occurring between soil, plant, and atmosphere, and for making informed decisions on irrigation management (Gowda *et al.*, 2008).

Several methods and instruments are available to measure ET_c at the field scale, including high-cost approaches such as the eddy covariance method and scintillimeters. In open-field conditions, ET_c is often estimated using the crop coefficient (K_c) method, based on reference ET_c values derived from various models. In controlled environments, a practical, low-cost, and reliable method for measuring ET_c involves the direct weighing of pots. This technique allows for the quantification of water lost through evaporation (E) and transpiration (T) over specific time intervals. It also enables the comparison of ET_c between species, substrates, and irrigation regimes, providing valuable information for agronomic management.

Phenotyping plant responses to water deficit is a key strategy for developing genotypes with enhanced drought tolerance. One of the primary responses to water limitation is the reduction of foliar T, which helps to minimize excessive water loss (Osakabe *et al.*, 2014). Under water stress conditions, T decreases significantly due to partial or complete stomatal closure, which in turn reduces carbon assimilation and biomass accumulation (Pieruschka *et al.*, 2010). While plant T is linked to productive physiological activity, E is a non-productive water loss that diminishes water use efficiency (WUE) (Kool *et al.*, 2014). Thus, independently quantifying E and T can provide critical insights into improving WUE.

Research has shown that E accounts for the majority of ET_c during the early stages of crop growth, primarily due to limited canopy coverage (Gong *et al.*, 2021). Biophysical indicators such as the leaf area index (LAI) and remote sensing-based reflectance indices like the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) can potentially be used to estimate ET_c rates (Alam *et al.*, 2018).

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is used in this study due to its global importance as the most widely cultivated legume for direct human consumption (FAOSTAT, 2019), and its suitability for pot cultivation under controlled conditions. In recent years, increasing attention has been given to the use of biostimulants in agriculture to prevent or alleviate environmental stresses.

Among them, glycine betaine (GB) has emerged as one of the most promising osmoprotectants. It is an organic osmolyte that accumulates in various plant species in response to abiotic stress, including drought (Ashraf and Foolad, 2007).

This study aims to: (1) assess the agronomic and physiological responses of common bean under varying water availability; (2) evaluate the effect of foliar-applied GB on plants subjected to irrigation deficit; and (3) determine the water requirements of common bean by measuring ET_c under different treatments and distinguishing between its T and E components.

Materials and Methods

The experiment was conducted between January and April 2025 in a growth chamber under controlled climatic conditions, using a completely randomized design consisting of five treatments with six replicates each, for a total of 30 pots. The environmental conditions in the chamber were set to 16 hours of light at 25 °C and 8 hours of darkness at 20 °C.

Each pot, measuring 20 × 20 cm with a total volume of 5 L, was perforated at the bottom to allow for water drainage. The pots were filled with 5.7 kg of sandy loam soil (12.7% clay, 31.5% silt, 55.8% sand) collected from the CREA experimental farm in Fagna (43°59'00.4"N, 11°20'48.6"E), Scarperia (FI), and analyzed for its physical, chemical, and hydrological properties. The soil was collected during the summer, air-dried to constant weight, and then placed in the pots.

Before transplanting, the dry soil in each pot was irrigated to saturation and allowed to drain for 24 hours to determine the water content at field capacity (FC). Bean seeds (*Phaseolus vulgaris* L., cv. 'Supernano giallo') were pre-germinated in a germinator to ensure uniform plant establishment. All pots were brought to field capacity at the time of transplanting.

Three irrigation regimes were established: 100% FC, 70% FC (split into 70B, with biostimulant, and 70NB, without), and 50% FC (50B and 50NB). Irrigation volumes (IW) were calculated before each watering by weighing each pot and applying the following formula (Ünlükara et al., 2015):

$$IW = (W_{FC} - W) \times C_{AW}$$

where IW is the volume of water to be applied, W_{FC} is the pot weight at field capacity, W is the pot weight before irrigation, and C_{AW} is the coefficient of water application (1.0, 0.7, or 0.5 depending on the treatment). Irrigation was performed manually, distributing the water evenly across the soil surface. Irrigation was triggered whenever the soil water content in the 100% FC treatment dropped to about 40% below FC. A total of seven differentiated irrigations were applied during the crop cycle.

Plants in the biostimulant treatments received foliar applications of glycine betaine (GB; 97%, Greenstim, Comercial Química Massó, S.A.) at a concentration of 30 mM. The biostimulant was applied three times: at the beginning of flowering, at full flowering, and at the onset of pod development.

ET_c was determined by weighing the pots every two days between 10:00 and 11:00 a.m. using an electronic balance (1 g resolution). After each measurement, pots were randomly relocated within the chamber to avoid positional effects. Three additional pots without plants, filled with the same soil, were used to estimate E and thus calculate T by difference.

NDVI readings were taken every 7–8 days using the GreenSeeker® sensor (Trimble, Sunnyvale, California, USA), positioned 60 cm above the fully expanded apical leaf. To analyze the trends in ET_c , T, and NDVI, the crop cycle was divided into four phenological stages: vegetative (V), flowering (F), pod development (D), and ripening (R). Before harvest, the water status of the plants was assessed by calculating the relative leaf water content (RWC) on three leaves per plant (taken from the central leaves of the first three stems). Fresh weight (FW) was recorded immediately after detachment, followed by turgid weight (TW) after 24 h of rehydration in demineralized water in the dark, and dry weight (DW) after oven drying at 70 °C for 72 h. RWC was calculated as:

$$RWC (\%) = [(FW - DW) / (TW - DW)] \times 100.$$

At harvest, all leaves were placed on a white surface and photographed. Leaf area (LA) was measured using ImageJ software, and the leaf area index (LAI) was calculated by dividing the total leaf area (cm²) by the surface area of the pot (cm²) (Ibrahim et al., 2024). Leaf area values were also used to calculate transpiration per unit leaf area (T/LA; g cm⁻²).

All aboveground plant parts were separated and oven-dried at 70 °C to constant weight to determine dry biomass. Roots were washed, sieved, and also dried to determine belowground biomass. WUE was calculated as the ratio between total dry biomass (g) and cumulative ET_c (kg).

Results and Discussion

Preliminary results show that the different irrigation treatments affected ET_c , with a significant reduction ($P < 0.05$) in the 50% FC treatment. In particular, cumulative ET_c was highest for the FC treatment, showed a slight reduction in the 70% FC treatment, and a significant reduction in the 50% FC treatment (Fig. 1). A similar trend was observed for daily ET_c across the different crop stages (Fig. 2). The highest ET_c rates (2.7 mm d⁻¹) were recorded for the FC treatment during the flowering and pod development stages, while the lowest value (1.7 mm d⁻¹) was observed in the 50NB treatment at the maturity stage.

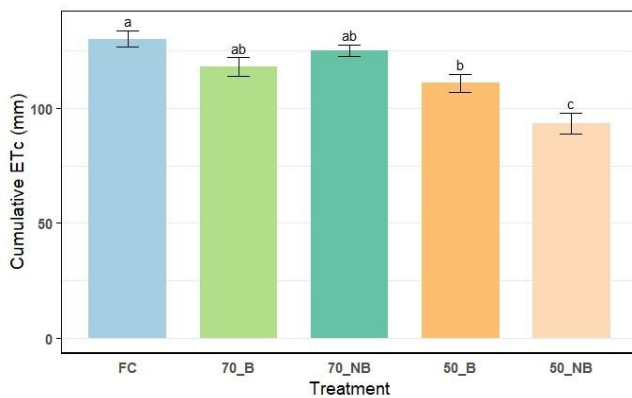


Fig.1 – Evapotraspirazione cumulata (ET_c ; mm) del fagiolo nei cinque trattamenti. Le barre di errore indicano l'errore standard su entrambi i lati della media. Lettere diverse indicano differenze significative tra i trattamenti ($P < 0,05$).

Fig.1 - Cumulative evapotranspiration (ET_c ; mm) of the bean in the five treatments. Error bars indicate the standard error on both sides of the mean. Different letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

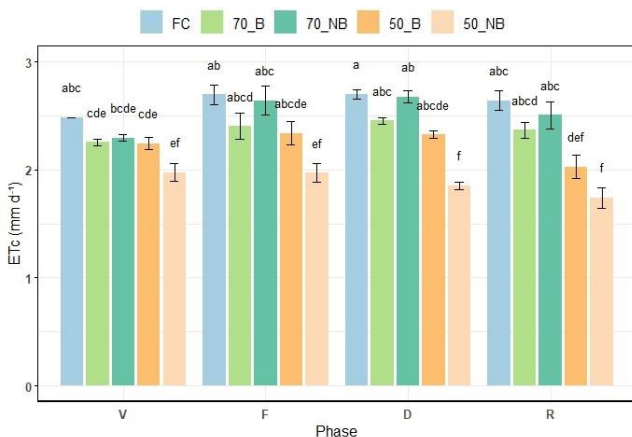


Fig.2 – Evapotraspirazione giornaliera (ET_c ; mm d^{-1}) del fagiolo nei diversi trattamenti raggruppati per fase fenologica. Le barre di errore indicano l'errore standard su entrambi i lati della media. Lettere diverse indicano differenze significative tra i trattamenti e tra le fasi fenologiche ($P < 0,05$).

Fig.2 - Daily evapotranspiration (ET_c ; mm d^{-1}) of the bean in the different treatments grouped by phenological stage. Error bars indicate the standard error on both sides of the mean. Different letters indicate significant differences between treatments and between phenological phases ($P < 0.05$).

In addition, the daily T trend at different phenological stages was studied (Fig. 3), revealing significant differences both between treatments and crop stages. Lower T rates were recorded during the early vegetative phase, mainly attributable to the reduced leaf area and lower plant demand. No significant differences in T were observed

between the flowering and pod development phases. At FC during the mid-phase of the crop cycle, T rates were 1.3–1.4 mm d^{-1} . At 70% FC, no significant differences were observed between biostimulant-treated and untreated plants. However, at 50% FC, the biostimulant appeared to allow significantly higher T rates. Figure 3 also shows that beans have the highest water requirements during flowering and pod development, which are thus critical phases for irrigation management.

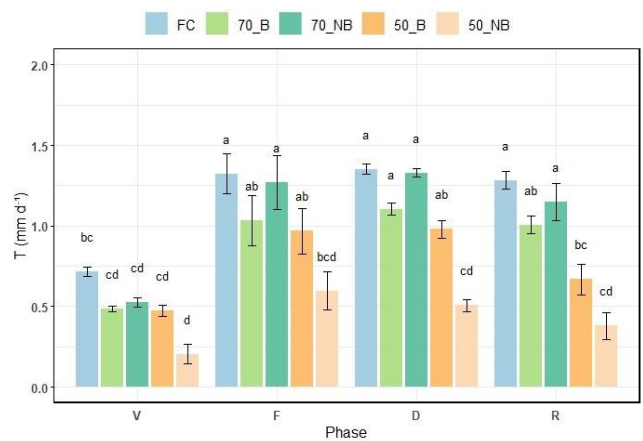


Fig.3 – Traspirazione giornaliera (T ; mm d^{-1}) del fagiolo nei diversi trattamenti raggruppati per fase fenologica. Le barre di errore indicano l'errore standard su entrambi i lati della media. Lettere diverse indicano differenze significative tra i trattamenti e tra le fasi fenologiche ($P < 0,05$).

Fig.3 - Daily transpiration (T ; mm d^{-1}) of the bean in the different treatments grouped by phenological stage. Error bars indicate the standard error on both sides of the mean. Different letters indicate significant differences between treatments and between phenological phases ($P < 0.05$).

At harvest, the highest LAI values were recorded in the 70NB and FC treatments (2.8 and 2.7 $cm^2 cm^{-2}$, respectively), while the lowest value (1.7 $cm^2 cm^{-2}$) was observed in the 50NB treatment. The correlation between LA and ET_c was assessed (Fig. 4a), revealing a strong positive correlation between the two variables ($r = 0.842$). Furthermore, the relationship between daily ET_c and NDVI values measured during the different phenological stages was investigated (Fig. 4b). When grouping the stages, a significant ($P = 0.0014$) and positive correlation between NDVI and ET_c rates was found. Pearson correlations and separate linear regressions were performed to identify any differences between the stages. The pod development stage was found to be the most accurate for estimating evapotranspiration rates using NDVI measurements ($R^2 = 0.924$, $P = 0.009$). Plants irrigated at FC maintained a high leaf hydration status until harvest (7 days after the last irrigation), with the highest RWC values (92.6%). The 70B treatment also resulted in high hydration status (90.8%), while the RWC value in the 70NB treatment was significantly lower (85.4%). This suggests that the biostimulant may have contributed to water saving,

possibly by reducing foliar water loss. This is consistent with the lower T values observed in maturing 70B plants. These results align with the findings of WeiBing and Rajashekar (1999), where GB treatment led to a slower decline in leaf water potential in beans under drought stress. For plants irrigated at 50% FC, no significant differences in RWC were observed between biostimulant-treated and untreated plants (Tab. 1).

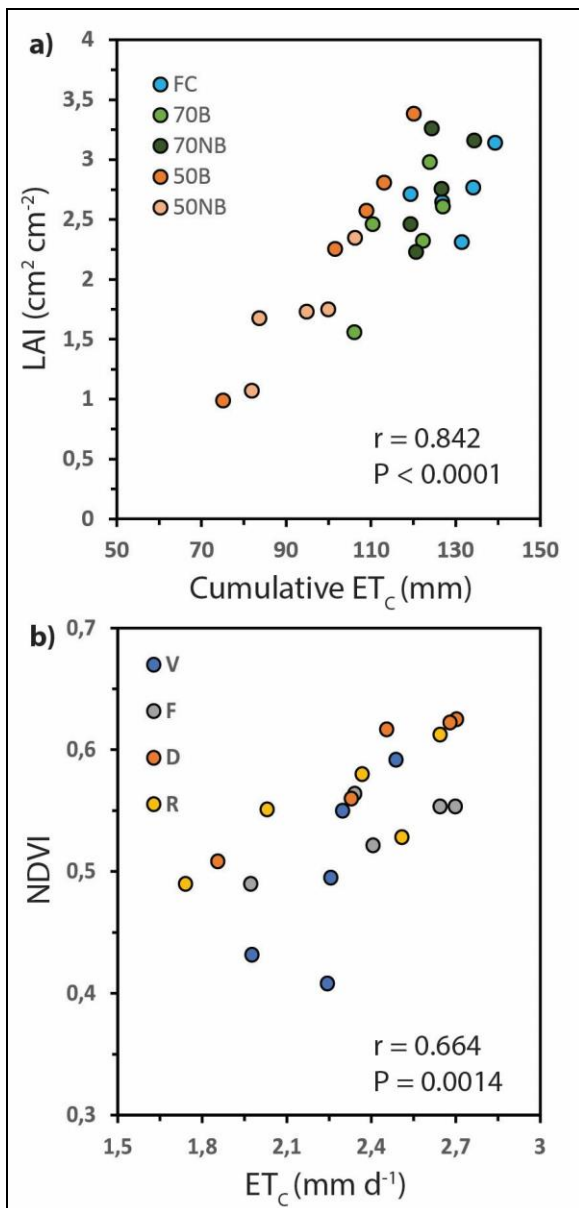


Fig.4 – a) Correlazione tra indice di area fogliare (LMA; $\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) ed evapotraspirazione cumulata (ET_c ; mm) del fagiolo nei cinque trattamenti; b) correlazione tra NDVI ed evapotraspirazione giornaliera (ET_c ; mm d^{-1}) del fagiolo nei cinque trattamenti raggruppati per fase fenologica.

Fig.4- (a) Correlation between leaf area index (LMA; $\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) and cumulative evapotranspiration (ET_c ; mm) of the bean in the five treatments; (b) correlation between NDVI and daily evapotranspiration (ET_c ; mm d^{-1}) of the bean in the five treatments grouped by phenological stage.

No significant differences in WUE were observed among treatments, with an average value of 2.7 g dry biomass per kg of evapotranspired water, except for plants irrigated at 50% FC without biostimulant (2.4 g kg^{-1}). Plants irrigated at 100% and 70% FC produced more pods on average than those irrigated at 50%, but biostimulant application in the most stressed plants seemed to mitigate this reduction in yield.

A significant difference in T per unit leaf area was observed between the 100% and 70% treatments compared to the 50% treatments, with a 50% reduction in T in the 50NB treatment compared to the FC treatment (Tab. 1).

Finally, the distribution of dry biomass among the different plant organs was analyzed in relation to the treatments (Fig. 5). No significant differences were found in biomass partitioning across treatments, with average values of 61–65% for whole pods, 25–28% for leaves and stems, and 9–11% for roots. The only treatment showing a significant difference was 50B, where the percentage allocated to pods decreased (51%), while the allocation to above-ground biomass (35%) and roots (14%) increased. The treatment with GB under 50% irrigation significantly increased biomass production.

Tab.1 – ANOVA sulle differenze tra le piante per quanto riguarda il contenuto relativo di acqua (RWC), l'indice di area fogliare (LAI), il peso secco dei baccelli, delle foglie e lo stelo, delle radici, il peso secco della biomassa totale (epigea più ipogea), efficienza d'uso dell'acqua (WUE) e della traspirazione per unità fogliare (T/LA). Lettere diverse indicano differenze significative tra i trattamenti ($P < 0,05$).

Tab.1 - ANOVA on plant differences in relative water content (RWC), leaf area index (LAI), dry weight of pods, leaves and stem, roots, dry weight of total biomass (epigeal and hypogean), water use efficiency (WUE) and transpiration per leaf unit (T/LA). Different letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

Treatment	RWC (%)	LAI (cm^2/cm^2)	DW pods (g/plant)	DW leaves and stem (g/plant)	DW roots (g/plant)	DW total biomass (g/plant)	WUE (g/Kg)	T/LA (g/ cm^2)
FC	92,6 a	2,7 a	7,1 a	2,8 ab	1,1 ab	11,0 a	2,7 a	2,0 a
70B	90,8 ab	2,4 ab	5,9 ab	2,7 ab	1,1 ab	9,7 ab	2,6 a	1,8 a
70NB	85,4 c	2,8 a	7,1 a	2,9 a	1,0 ab	11,1 a	2,8 a	1,8 a
50B	87,5 bc	2,4 ab	5,1 ab	3,4 a	1,4 a	10,0 a	2,8 a	1,3 b
50NB	87,3 bc	1,7 b	4,6 b	1,8 b	0,8 b	7,1 b	2,4 ab	1,0 b

Biomass distribution (%)

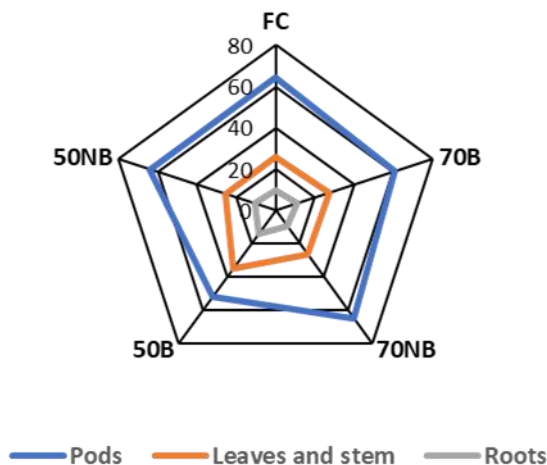


Fig.5 – Ripartizione percentuale della biomassa secca tra baccelli, foglie più stelo e radici.

Fig.5 - Percentage distribution of dry biomass between pods, leaves plus stem and roots.

Conclusions

The results of this study showed that ET_c and T values were significantly higher in the full irrigation treatments compared to the most severe water deficit treatment (50% FC). T increased with increasing LAI, indicating a close relationship between T and plant canopy development. Key findings, such as the correlations between LAI and NDVI with ET_c , and the distribution of biomass among different plant organs under varying irrigation levels, may be useful in the development of predictive models. The study provides insights into bean water consumption trends across different growth stages, which can support the optimization of irrigation scheduling. Based on the results, even under protected conditions and with potted plants, irrigation at 70% FC did not significantly reduce bean productivity. Therefore, irrigation management based on soil field capacity should consider these findings: substantial water savings may be achieved with minimal yield loss, reducing both waste and management costs for farmers. Nevertheless, further trials are necessary to fully understand these dynamics, involving multiple irrigation levels and different soil types.

References

Alam, M. S., Lamb, D. W., & Rahman, M. M. (2018). A refined method for rapidly determining the relationship between canopy NDVI and the pasture evapotranspiration coefficient. *Computers and electronics in agriculture*, 147, 12-17.

- Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and experimental botany*, 59(2), 206-216.
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Boulet, G., & Williams, D. G. (2010). Using the dual approach of FAO-56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region. *Agricultural water management*, 97(11), 1769-1778.
- FAOSTAT, 2019. Dry Bean Production. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Gong, X., Qiu, R., Ge, J., Bo, G., Ping, Y., Xin, Q., & Wang, S. (2021). Evapotranspiration partitioning of greenhouse grown tomato using a modified Priestley-Taylor model. *Agricultural Water Management*, 247, 106709.
- Gowda, P. H., Chavez, J. L., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A., & Tolk, J. A. (2008). ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation science*, 26, 223-237.
- Ibrahim, Y. M., Buyuktas, D., & Karaca, C. (2024). Evaporation and transpiration components of crop evapotranspiration and growth parameters of lettuce grown under greenhouse conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 150(5), 05024002.
- Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J. L., Sauer, T. J., & Ben-Gal, A. (2014). A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and forest meteorology*, 184, 56-70.
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in plant science*, 5, 86.
- Pieruschka, R., Huber, G., & Berry, J. A. (2010). Control of transpiration by radiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(30), 13372-13377.
- Ünlükara, A., Kurunc, A., & Cemek, B. (2015). Green long pepper growth under different saline and water regime conditions and usability of water consumption in plant salt tolerance. *Journal of Agricultural Sciences*, 21(2), 167-176.
- Xing, W., & Rajashekar, C. B. (1999). Alleviation of water stress in beans by exogenous glycine betaine. *Plant Science*, 148(2), 185-192.

THE CLINE PORTAL: ASSESSING THE FUTURE OF WATER AVAILABILITY AT THE REGIONAL SCALE

LA PIATTAFORMA CLINE: COME VALUTARE IL FUTURO DELLE DISPONIBILITÀ IDRICHE A LIVELLO TERRITORIALE.

Andrea Cicogna^{1*}, Valentina Gallina¹, Giovanni Massaro², Fabio Zecchini², Alessandro Marchesan³, Paolo Ceccon³

¹ ARPA-FVG – S.O.C. Osmer, Via Natisone, 43, 33057 Palmanova (UD) - *andrea.cicogna@arpa.fvg.it

² ARPAV – Dipartimento Regionale Sicurezza del Territorio, Ufficio Climatologia, via G. Marconi 55, 35037, Teolo (PD)

³ Dipartimento di Scienze AgroAlimentari, Ambientali, e Animali, Università degli Studi di Udine, via delle Scienze 206, 33100 Udine (Italia)

Abstract

The CLimate portal for North-East Italy (CliNe, <https://clima.arpa.veneto.it>), developed through a collaboration between the regional environmental protection agencies (ARPA) of Friuli Venezia Giulia and Veneto, provides high-resolution climate projections for north-eastern Italy. The portal, updated in December 2024, includes 13 climate indicators for three future emission scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5), statistically downscaled using data from regional meteorological stations. While the indicators are aggregated at the seasonal level, they are still valuable for assessing future water availability at both regional and local scales. Two examples of CliNe applications are presented:

1. estimating changes in seasonal precipitation from 1991 to 2050 for the Tagliamento River Basin;
2. assessing the impact of climate change on irrigation requirements for spring–summer crops in the upper Friulian plain.

Parole chiave

Proiezioni climatiche, Nord-Est Italia, disponibilità idriche

Keywords

Climate projections, North-East Italy, water availability

Introduzione

In Friuli Venezia Giulia l'irrigazione è una pratica agronomica molto diffusa; la pur elevata piovosità della regione infatti non è sufficiente a soddisfare appieno le elevate richieste idriche delle culture nel periodo estivo, soprattutto nell'alta e media pianura regionale dove i terreni presentano una scarsa capacità di ritenzione idrica.

Di conseguenza il ruolo che l'irrigazione ha nel Friuli Venezia Giulia, in termini di pratica colturale ed investimenti, è davvero notevole. A tal proposito si ricorda che la portata media in concessione a uso irriguo in regione è pari a 88.5 m³/s, pari al 18.4% del prelievo delle acque superficiali. Tale valore risulta secondo solo all'uso idroelettrico che è di 310.7 m³/s (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2015). Le evidenze di una diminuzione delle pluviometrie estive in tutto il Centro Nord Italia dagli anni '60 del secolo scorso ad oggi (Pavan *et al.*, 2023) che, almeno nelle proiezioni climatiche per il panorama emissivo RCP8.5, sembrano continuare fine a fine secolo (ARPA FVG, 2018), impongono una riflessione sull'uso dell'acqua irrigua già da oggi, ma soprattutto per il futuro.

La pratica irrigua è sicuramente uno dei molti campi dove la disponibilità di dati e analisi del clima regionale, comprensive anche di proiezioni nel futuro, costituisce una fonte informativa utile per i documenti di pianificazione e programmazione regionale in cui è obbligatoria la valutazione degli scenari a lungo termine, per opere di ingegneria civile e altre pianificazioni locali e settoriali (MASE, 2023).

Dall'esigenza di disporre di questa fonte informativa nasce la collaborazione tra ARPA FVG e ARPAV per la creazione della piattaforma per il CLima del Nord-Est (CliNe), uno strumento accessibile a tutti, che aiuta a conoscere i possibili

futuri climatici del Veneto e del Friuli Venezia Giulia. (Massaro *et al.*, 2024)

CliNe, aggiornato a dicembre 2024, propone proiezioni climatiche per il territorio del Nord-Est Italia, attraverso tredici indicatori climatici calcolati per 3 possibili scenari emissivi futuri (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5).

CliNe fornisce proiezioni ad alta risoluzione basate su cinque modelli climatici regionali (RCM) europei (EURO-CORDEX; Jacob *et al.*, 2014), selezionati per la loro capacità di riprodurre la climatologia regionale nel periodo di riferimento (ARPA FVG, 2018) e sottoposti a un downscaling statistico con dati delle stazioni meteorologiche regionali.

Nel portale, è possibile visualizzare gli indicatori come mappe (distribuzione spaziale) e serie temporali (tendenze per località specifiche) per i periodi futuri (2021-2050 o 2071-2100) e tre scenari emissivi. I dati possono essere scaricati come immagini (mappe, grafici) o come file binari/testo per aree specifiche o punti di interesse.

Il passo di griglia è 500 m e 5 km, rispettivamente, per gli indicatori relativi alla temperatura e alla precipitazione.

Dalla messa on-line di CliNe gli output della piattaforma sono stati utilizzati da diversi utenti in molti campi, primo fra tutti nella predisposizione di numerosi documenti per le Valutazioni di Impatto Ambientale (VIA), come prescritto da specifiche linee guida di ISPRA (ISPRA, 2020).

Sebbene nella piattaforma gli indicatori climatici siano presentati con aggregazioni minime stagionale, CliNe può essere efficacemente utilizzato anche nella valutazione delle disponibilità idriche.

In questo senso sono qui sono presentati due esempi sull'uso di CliNe.

Stima della variazione delle precipitazioni dal 1991 al 2050 per il bacino del Tagliamento

Questo studio, effettuato da ARPA FVG per il Consorzio di Bonifica Friulana, valuta la variazione della piovosità nel bacino imbrifero del Tagliamento da cui viene derivata l’acqua per i 20.000 ha serviti dal consorzio.

Materiali e Metodi

Per la stima territoriale delle piogge stagionali nell’area di interesse sono stati estratti da CliNe i layer di piovosità stagionale dal 2021 al 2050 per il panorama emissivo RCP4.5 utilizzando l’ensemble dei 5 modelli climatici. Le mappe medie stagionali dei 30 anni (2021-2050) sono state confrontate con le analoghe mappe digitali ottenute dall’interpolazione delle stazioni di misura nel trentennio di riferimento 1991-2020 per il Friuli Venezia Giulia (ARPA FVG, 2023).

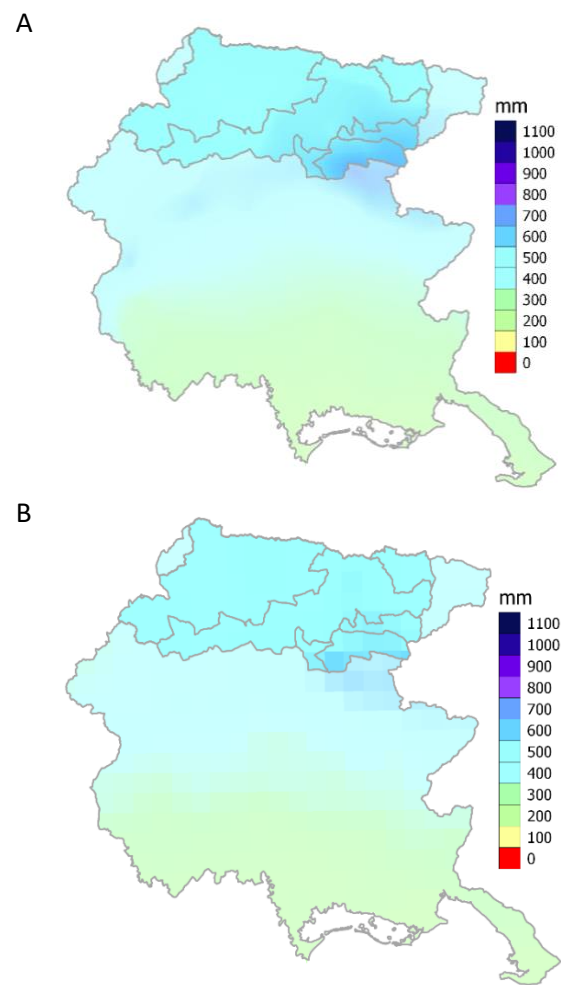


Fig.1 - Estate (giugno, luglio, agosto): precipitazioni totali medie per il periodo 1991-2020 (A) e per il 2021-2050 nello scenario RCP4.5 (B). Nell’immagine è evidenziato il bacino del Tagliamento.

Fig.1 - Summer (June, July, August): mean of the total precipitation for the period 1991-2020 (A) and for 2021-2050 under the RCP4.5 scenario (B). The Tagliamento River Basin is highlighted in the image.

A titolo di esempio in fig. 1 A e B sono evidenziate le mappe pluviometriche per la stagione estiva nei due trentenni.

In tali immagini vengono presentate anche le geometrie (shapeFile) del bacino imbrifero del Tagliamento da cui viene derivata l’acqua irrigua per il Consorzio. Tali shapeFile sono stati utilizzati per la stima territoriale delle variabili indagate.

In tab.1 vengono riassunti i dati di precipitazione media nelle diverse stagioni per i due trentenni 1991-2020 e 2021-2050 (scenario RCP4.5) per la sola area del bacino del Tagliamento.

Tab.1 - Dati di precipitazione media per le diverse stagioni nei due periodi 1991-2020 e 2021-2050 (scenario RCP4.5) per il bacino del Tagliamento.

Tab.1 - Mean precipitation data for different seasons in the periods 1991-2020 and 2021-2050 (RCP4.5 scenario) for the Tagliamento River Basin.

INVERNO		PRIMAVERA		ESTATE		AUTUNNO	
1991-2020	2021-2050	1991-2020	2021-2050	1991-2020	2021-2050	1991-2020	2021-2050
307 mm	285 mm	410 mm	483 mm	498 mm	455 mm	678 mm	605 mm

L’analisi di Tab.1 mostra come la pluviometria media estiva nel periodo 2021-2050 diminuirà mediamente del 10% rispetto al trentennio 1991-2020 con una conseguente diminuzione percentuale uguale o maggiore dell’acqua irrigua disponibile. L’aumento delle precipitazioni primaverili potrebbe in parte compensare in termini di rifornimento irriguo la diminuzione delle piogge estive, ma la limitata altimetria delle Alpi Carniche e Giulie non consente già oggi accumuli significativi di neve. Con l’aumento delle temperature tali accumuli saranno presumibilmente ancora più limitati (Matiu et al. 2021).

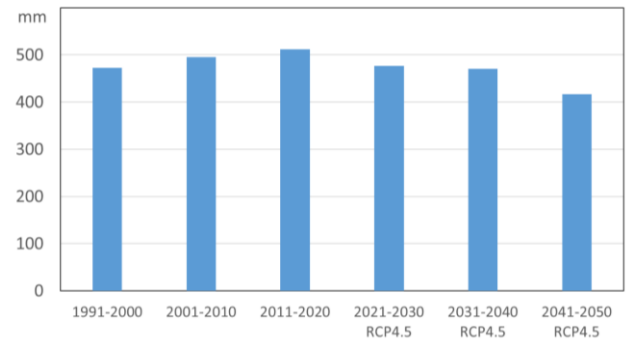


Fig.2 - Estate (giugno, luglio, agosto): precipitazioni totali medie nel bacino del Tagliamento misurate nei 3 decenni dal 1991 al 2020 e stimate dal 2021-2050 nello scenario RCP4.5.

Fig.2 - Summer (June, July, August): decadal mean of the total precipitation in the Tagliamento River Basin measured from 1991 to 2020 and estimated for 2021-2050 under the RCP4.5 scenario.

Nella fig. 2 viene presentata la pluviometria estiva del bacino del Tagliamento a livello decennale. Si nota come fino al 2020 le pluviometrie sono sostanzialmente costanti. Questo risultato trova riscontro nell’analisi di Pavan et al. (2023)

dove si evidenzia come le piogge estive dal 1961 al 2022 nelle zone alpine (dove ricade gran parte del Bacino imbrifero del Tagliamento) non presentino un trend in diminuzione. La fig. 2 mostra inoltre come le piogge individuate delle proiezioni climatiche nei decenni successivi diminuiscano in modo progressivamente più marcato.

Stima dell'impatto del cambiamento climatico sui fabbisogni irrigui di colture primaverili-estive dell'alta pianura friulana

Questo studio è stato effettuato nell'ambito del lavoro di tesi del dott. Alessandro Marchesan che ha visto come relatore il prof. Paolo Ceccon. Nel lavoro sono stati analizzati gli attuali bisogni irrigui delle coltivazioni erbacee maggiormente diffuse in Friuli Venezia Giulia in un comune dell'alta pianura Friulana (Cordenons, PN); si è quindi valutato come varieranno i bisogni irrigui futuri nel breve e nel lungo periodo, secondo diversi panorami emissivi.

Risultati

I dati relativi al clima e ai terreni del comune di Cordenons, forniti rispettivamente dalla piattaforma CliNe e dal servizio pedologico di ERSa FVG, hanno permesso lo sviluppo e l'analisi del bilancio idrico stagionale di colture estive quali mais, sorgo, girasole e soia. Sono stati considerati i tre terreni presenti nel territorio comunale (T1, T2 e T3), e le simulazioni sono state condotte su tre trentenni (1976-2005 storico, 2021-2050 futuro vicino e 2071-2020 futuro lontano) e secondo tre panorami emissivi (RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5).

I terreni.

Nei bilanci idrici sono state utilizzate le tipologie dei tre terreni più rappresentativi del comune di Cordenons (PN):

T1- franco-sabbioso, profondo 40 cm con 40% scheletro (rappresentativo di circa il 15% della superficie coltivata comunale);

T2- franco, profondo 60 cm con 25% scheletro (rappresentativo di circa il 45% della superficie coltivata);

T3 - franco-limoso, profondo 60 cm con 0% scheletro (rappresentativo di circa il 40% della superficie coltivata).

I bilanci idrici stagionali

La stima delle richieste irrigue (o del corrispondente deficit irriguo) è stata stimata per il trimestrale estivo risolvendo l'equazione di conservazione della massa che rappresenta sinteticamente il ciclo dell'acqua:

deficit irriguo estivo = $RR_{tot} - ET_c - (R + Inf) + \text{riserva idrica iniziale}$

dove:

- RR_{tot} = precipitazione estiva;
- ET_c = evapotraspirazione culturale massima estiva della coltura;
- R = quantitativo d'acqua di ruscellamento superficiale estiva;
- Inf = quantitativo d'acqua di infiltrazione estiva.

- riserva idrica iniziale = quantitativo d'acqua presente nel terreno a fine primavera.

La quantità $RR_{tot} - ET_c$ può essere definita come Bilancio idroclimatico culturale, mentre la somma $(R + Inf)$ come perdite complessive. Di conseguenza:

deficit irriguo estivo = Bilancio idroclimatico culturale - perdite + riserva idrica iniziale

L'evaporazione massima della coltura è stata stimata secondo il modello FAO (1979) come:

$$ET_c = ET_0 * K_c$$

Per la stima dell' ET_0 è stata utilizzata la formulazione di Hargreaves e Samani (Hargreaves *et al.*, 1987). Hargreaves Samani è utilizzata abitualmente per calcoli a livello giornaliero/decadale/mensile, in via preliminare è stato possibile un suo uso a livello stagionale confrontando le elaborazioni effettuate con i dati giornalieri (T_{min} , T_{med} e T_{max}) della serie di Udine 1961-2020, versus quelle ottenute con i dati termici medi stagionali.

Il grafico riportato in Fig. 3 mostra come la differenza tra il calcolo dell'evapotraspirazione estiva calcolata attraverso i dati stagionali, sia trascurabile rispetto al calcolo della stessa attraverso i dati giornalieri.

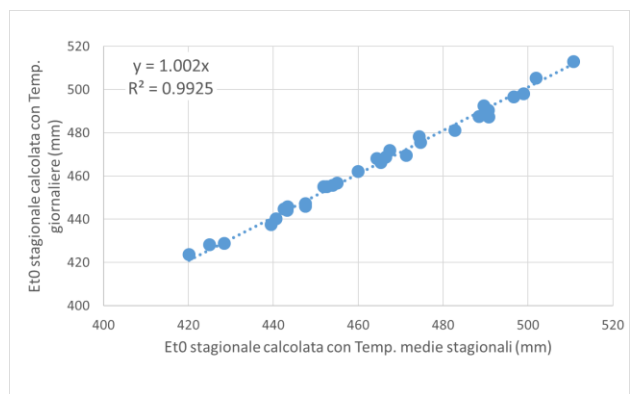


Fig.3 - Udine 1961-2020, dispersione tra dati di ET_0 stagionale (mm) e l' ET_0 stagionale calcolata come cumulo dell'evapotraspirazione giornaliera (mm) sempre relativa all'estate.

Fig.3 - Udine 1961-2020: dispersion between summer ET_0 data (mm) and the summer ET_0 calculated as the sum of daily evapotranspiration (mm).

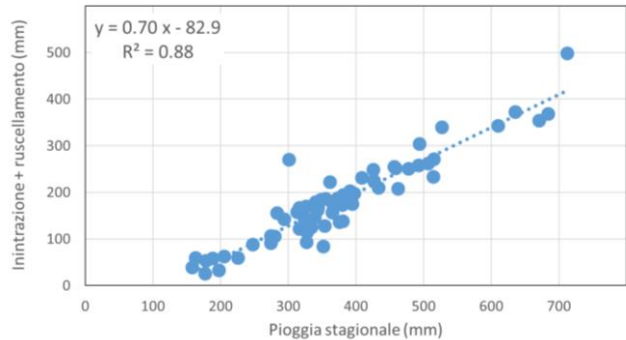
Nella stima dell'evaporazione massima culturale necessaria per il calcolo del bilancio idroclimatico stagionale primaverile è stato utilizzato, indipendentemente dalla coltura seminativa praticata, un K_c medio di 0,5. Il bilancio idroclimatico primaverile è utile per determinare lo stato idrico dei terreni a inizio estate. Per la stima dell'evaporazione massima delle colture nei mesi estivi si è fatto riferimento ai valori standard di K_c utilizzati da ARPA FVG nei servizi di Bilancio idrico territoriale ARGICS (Cicogna *et al.*, 2024) comunque derivati dal quaderno 33 della FAO (1979). Analogamente, i coefficienti di risposta

produttiva (delle colture prese in esame (Ky) – che rappresentano il rapporto tra il deficit di evapotraspirazione e il deficit di resa – sono stati tratti dalla medesima fonte. La tabella 2 mostra i valori di Kc e Ky utilizzati.

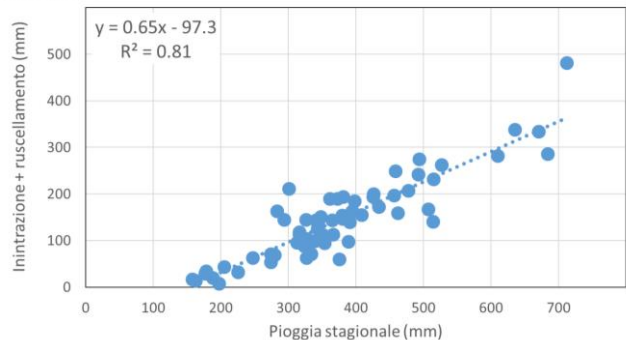
Tab.2 - Kc e Ky estivi per coltura
Tab.2 - Summer Kc e Ky for each crop.

Coltura	Epoca semina	Kc estivi	Ky estivi
Mais FAO 600	Inizio aprile	0.93	1.25
Girasole	Metà aprile	0.82	0.95
Sorgo	Inizio maggio	0.90	0.9
Soia	Meta maggio	0.96	0.85

Terreno 1



Terreno 2



Terreno 3

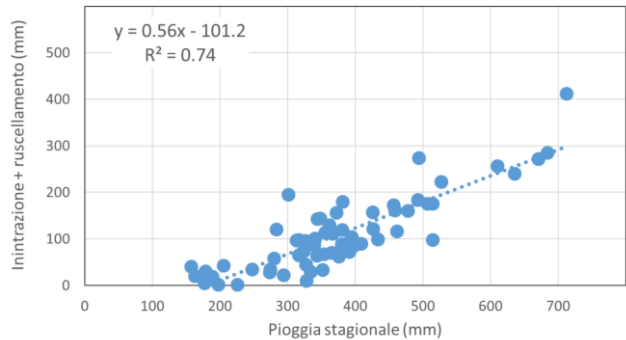


Fig.4 - 1961-2020: Grafici a dispersione tra perdite medie estive (ruscellamento + infiltrazione) per mais, girasole, sorgo e soia e corrispondenti precipitazioni nei tre terreni utilizzati. Si evidenziano le relative rette interpolanti.
Fig.4 - Udine 1961–2020: scatter plots of the mean summer losses (runoff + infiltration) for maize, sunflower, sorghum, and soybean versus corresponding precipitation across the three soil types used. For each graph the trend lines are shown.

Le perdite stagionali (percolazione + ruscellamento) sono state stimate in ognuno dei tre terreni come frazione delle precipitazioni stagionali. Similmente alla stima dell’ET0 si è fatto riferimento a bilanci idrici giornalieri per il periodo 1961-2020: la sommatoria nelle singole stagioni di percolazione e ruscellamenti giornalieri sono state messe in relazione con le corrispondenti piogge stagionali. Poiché in ogni terreno i volumi di percolazione e ruscellamento delle quattro colture utilizzate nei bilanci idrici giornalieri non sono risultate molto diverse nei medesimi anni, questi sono stati mediati. Per ogni terreno utilizzato si è quindi determinata la relazione lineare tra pioggia e perdite per percolazione e ruscellamento (Fig. 4) Le relazioni così individuate sono state utilizzate nella stima delle perdite nei bilanci idrici calcolati con i dati trimestrali di proiezione climatica. Infine le perdite produttive, dovute al deficit irriguo stagionale, sono state determinate secondo la consolidata relazione:

$$\text{Perdita produttiva} = K_y * (ET_c - \text{deficit irriguo}) / ET_c$$

I risultati intesi come stima del deficit estivo e perdite produttive per le diverse colture, terreni, trentenni e panorami emissivi, sono illustrati in Fig 5 e Fig 6. Uno dei risultati più chiari che emergono dallo studio è l’aumento futuro delle perdite produttive - o del fabbisogno irriguo- rispetto allo storico, specie in mais e soia e nel panorama emissivo RCP 8.5.

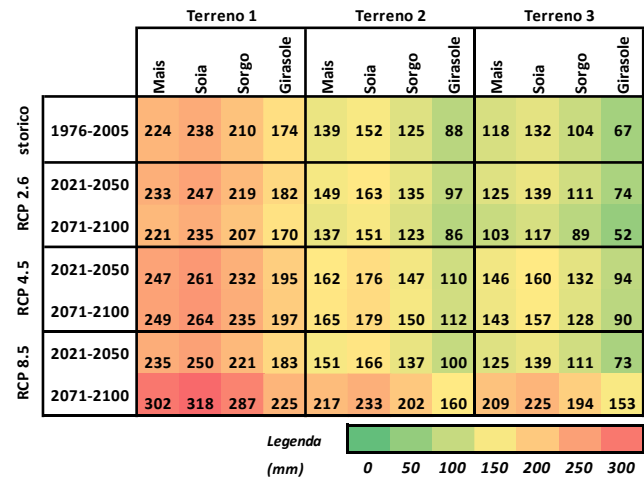


Fig.5 - stima del deficit estivo per le diverse colture, terreni, trentenni e panorami emissivi.
Fig.5 - Estimation of summer deficit for different crops, soil types, 30-year periods, and emission scenarios.

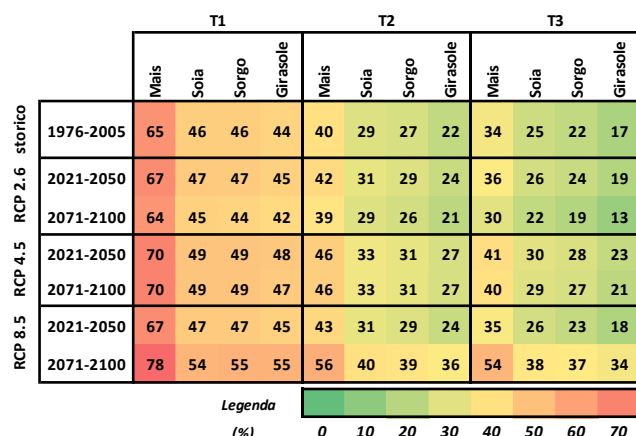


Fig.6 - stima delle perdite produttive per le diverse colture, terreni, trentenni e panorami emissivi.

Fig.6 - Estimation of yield losses for different crops, soil types, 30-year periods, and emission scenarios.

Conclusioni

I due esempi riportati mostrano come la piattaforma CliNe possa essere utile nella stima delle disponibilità idriche future.

Nel primo esempio viene evidenziato come lo strumento possa essere utilizzato a grande scala per stimare le disponibilità idriche nel futuro vicino per un grande Consorzio di Bonifica.

Il secondo esempio mostra come l'approccio semplificato dei bilanci idrici a livello stagionale dia risultati interessanti e utili per la valutazione dell'uso dell'acqua a fini irrigui in scenari futuri di cambiamento climatico. Tali risultati sono comparabili a quelli che emergono da approcci più esaustivi, ma più impegnativi dal punto di vista computazionale, che utilizzano dati giornalieri di pioggia, temperatura e coefficiente culturale (Kc), come ad esempio il caso studio "Effetti dei cambiamenti climatici sulla disponibilità di risorsa idrica" di Olivo *et al.* (ARPA FVG, 2018).

Bibliografia e Sitografia

ARPA FVG, 2018. Studio Conoscitivo dei cambiamenti climatici e di alcuni loro impatti in Friuli Venezia Giulia https://www.meteo.fvg.it/clima/clima_fvg/03_cambiamenti_climatici/01_REPORT_cambiamenti_climatici_e_impatti_per_il_FVG/impattiCCinFVG_marzo2018.pdf

ARPA FVG, 2023. Il clima del Friuli Venezia Giulia pp 72 https://www.meteo.fvg.it/clima/clima_fvg/02_documenti_descrittivi_report_e_approfondimenti/01_Il_clima_del_Friuli_Venezia_Giulia/clima_fvg-divulgativo.pdf

Cicogna A., Tuzzi S., Medeossi R., Ermacora E., Barbieri S., Volpe V., Sandra M., Manzoni L., Stel L., Caron V., 2024. Bilanci idrici territoriali in FVG: uno strumento per la valutazione dello stato idrico dei suoli, della percorribilità e delle micotossine del mais. Atti del convegno AIAM 2024, 103-107

<https://doi.org/10.6092/unibo/amsacta/7718>

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO irrigation and drainage paper 33, Roma 1979.

Hargreaves, G.H. & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1(2):96-99.

ISPRA, 2020 Valutazione di impatto ambientale. Norme tecniche per la redazione degli studi di impatto ambientale Linee Guida SNPA n. 28/2020 – ISBN: 978-88-448-0995-9

Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen, O.B., Bouwer L.M., Braun A., Colette A., Déqué M., Georgievski G., Georgopoulou E., Gobiet A., Menut L., Nikulin G., Haensler A., Hempelmann N., Jones C., Keuler K., Kovats S., Kröner N., Kotlarski S., Kriegsmann A., Martin E., van Meijgaard E., Moseley C., Pfeifer S., Preuschmann S., Radermacher C., Radtke K., Rechid D., Rounsevell M., Samuelsson P., Somot S., Soussana J.F., Teichmann C., Valentini R., Vautard R., Weber B. and Yiou P., 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14:563-578.

MASE, 2023. Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici.

Massaro G., Gallina V., Cicogna A., Zecchini F., Rech F., Resci G., Delillo I., Micheletti S., 2024. Portal of regional climate projections for North-Eastern Italy: a novel tool for adaptation in agriculture at local scale Atti del convegno AIAM 2024, 79-83 <https://doi.org/10.6092/unibo/amsacta/7718>

Matu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C. M., Marty, C., Morin, S., Schöner, W., Cat Berro, D., Chiogna, G., De Gregorio, L., Kotlarski, S., Majone, B., Resch, G., Terzagio, S., Valt, M., Beozzo, W., Cianfarra, P., Gouttevin, I., Marcolini, G., Notarnicola, C., Petitta, M., Scherrer, S. C., Strasser, U., Winkler, M., Zebisch, M., Cicogna, A., Cremonini, R., Debernardi, A., Faletto, M., Gaddo, M., Giovannini, L., Mercalli, L., Soubeyroux, J.-M., Sušnik, A., Trenti, A., Urbani, S., and Weigluni, V. - 2021 : Snow cover in the European Alps: Station observations of snow depth and depth of snowfall, Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019 , Cryosphere, Volume 15, Issue 3, pp.1343-1382, <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2015. Progetto di Piano di Tutela delle Acque. Direzione centrale ambiente ed energia.

THE CEDATER AS A POSITIVE EXAMPLE OF AN OPERATIONAL TOOL TO SUPPORT AGRICULTURE IN LOMBARDY

IL CEDATER COME ESEMPIO VIRTUOSO DI STRUMENTO OPERATIVO A SUPPORTO DELL'AGRICOLTURA IN LOMBARDIA

Lorenzo Craveri^{1*}, Fabio Olivotti², Stefano Roverato²

¹ ERSAF-Regione Lombardia

² ANBI Lombardia

* lorenzo.craveri@ersaf.lombardia.it

Abstract in inglese

Rainfall trends in recent years, which even a recent analysis by ERSAF shows little change in the number of rainy days in Lombardy, show that attention to the issue of water for irrigation use is increasingly important for agriculture in our region. ANBI Lombardy, the regional association of the “Consorzi di Gestione e Tutela del Territorio e delle Acque Irrigue” (Consortia for the Management and Protection of Irrigated Land and Water), has since 2017 started and manages the Centro Dati Acqua e Territorio Rurale - CeDATeR, which aims to build a centralized and homogeneous system of all information related to the regional irrigation assets. The Data Center also operates on behalf of the Lombardy Region and relies on the scientific collaboration of the University of Milan - Department of Agricultural and Environmental Sciences, Production, Landscape, Agroenergy (DiSAA) and ERSAF.

Parole chiave

Irrigazione, Lombardia, Conoscenza, Monitoraggio, Pianificazione

Keywords

Irrigation, Lombardy, Knowledge, Monitoring, Planning

Introduzione

Il sistema irriguo lombardo rappresenta un unicum a livello nazionale: 40.000 km di canali in grado di assicurare l'irrigazione estiva sull'85% della superficie coltivata in Lombardia. L'andamento delle precipitazioni negli ultimi anni sembra dimostrare che l'approvvigionamento idrico, anche in Lombardia, nei prossimi anni potrebbe non essere più garantito. In una recente analisi di ERSAF, riferita ai trend delle precipitazioni degli ultimi 34 anni, si conferma che la forte variabilità interannuale delle precipitazioni potrebbe mettere in crisi il sistema; un approfondimento dei risultati di questa analisi sarà mostrato successivamente. Sempre più, nell'immediato futuro, sarà necessaria una forte sinergia tra gli enti che sul territorio si occupano dello studio e del monitoraggio della risorsa idrica in regione. Tra di essi vi sono sicuramente ERSAF (*l'Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste*) ed ANBI Lombardia. ANBI Lombardia è l'Associazione regionale dei Consorzi di Gestione e Tutela del Territorio e delle Acque Irrigue, altresì chiamati Consorzi di bonifica, che sono enti pubblici economici a carattere associativo facenti parte del Sistema degli enti e delle società regionali (SIREG). Ciascuno di essi è nominalmente titolare di un territorio, denominato Comprensorio di bonifica, all'interno del quale è chiamato ad operare con compiti e responsabilità volte principalmente al controllo della circolazione idrica a servizio dell'irrigazione e per la bonifica, intesa come difesa idraulica del suolo. Recenti normative ne hanno incrementato le competenze a campi quali la produzione di energia rinnovabile, la fruizione turistica, la valorizzazione ambientale, specificando che il

loro operato deve essere volto ad assicurare l'uso plurimo dell'acqua. Particolare importanza viene data dal sistema dei Consorzi di bonifica alla conoscenza e allo studio del territorio; a tale proposito ANBI Lombardia gestisce il Centro dati CeDATeR (*Centro Dati Acqua e Territorio Rurale*) di Regione Lombardia e ANBI Lombardia. Il CeDATeR opera dal 2017 con l'obiettivo di costruire un sistema centralizzato e omogeneo di tutte le informazioni riguardanti il patrimonio irriguo regionale, allo scopo di supportare la pianificazione della risorsa idrica attraverso un approccio scientifico basato su dati certi e verificati. Numerose sono le attività svolte dal Centro dati e tutte impennate attorno a due pilastri fondamentali, quello della conoscenza del complesso patrimonio irriguo regionale e della sua descrizione con dati e informazioni, e quello della quantificazione dei volumi idrici effettivamente derivati e transitanti nella rete di rogge e canali: il CeDATeR ha infatti progettato e gestisce il sistema regionale di monitoraggio delle portate ad uso irriguo. Il Centro dati è basato su una infrastruttura di dati spaziali (*SDI - Spatial Data Infrastructure*) in grado di gestire in toto l'informazione spaziale, basata completamente su software open-source. Questa caratteristica presenta numerosi vantaggi, tra cui l'elevato rapporto benefici/costi e una grandissima flessibilità; il CeDATeR è così in grado di raccogliere, mantenere aggiornati ed elaborare una grande mole di dati e di renderli fruibili da parte dei numerosi e differenti soggetti coinvolti nella gestione della risorsa idrica.

Materiali e Metodi

Per l’analisi dei trend dei dati di precipitazioni sulla pianura lombarda sono stati utilizzati 34 anni di dati (1990-2023) di precipitazione giornaliera di 8 stazioni di pianura, rappresentative della variabilità delle aree pianeggianti della regione.

Le stazioni oggetto di analisi sono state:

- 1. Vertemate con Minoprio-CO
- 2. Bergamo
- 3. Brescia
- 4. S. Angelo Lodigiano-LO
- 5. Castello d’Agogna-PV
- 6. Rivolta d’Adda-CR
- 7. Persico Dosimo-CR
- 8. Palidano di Gonzaga-MN

Per queste serie di 34 anni di dati si sono prodotti due “transetti”: il primo comprendente i primi 17 anni (1990-2006) e il secondo comprendente i secondi 17 anni (2007-2023). Per entrambi i “transetti” si sono calcolati i giorni di pioggia medi per ogni decade del mese e si sono calcolate le precipitazioni totali annue, oltre che per ogni singola stagione meteorologica (dicembre-febbraio; marzo-maggio, giugno-agosto, settembre-novembre).

Per l’analisi delle riserve idriche e degli utilizzi di acqua ad uso irriguo sono stati utilizzati i dati resi disponibili dal CeDATeR; questi descrivono i sistemi irrigui relativamente all’80% del territorio agricolo della pianura lombarda, non solo nelle aree gestite direttamente dai Consorzi di bonifica ma anche nei territori in capo a Consorzi irrigui privati. Il sistema di monitoraggio raccoglie i dati rilevati da più di 400 misuratori, di cui 88 in tempo reale sulle principali derivazioni. I misuratori monitorano le portate medie giornaliere o, nel caso dei pozzi, i volumi mensili e sono installati su un totale di 117 derivazioni superficiali e 146 pozzi. In termini assoluti, il numero di derivazioni superficiali monitorate (158) è esiguo rispetto al totale delle derivazioni concesse in Lombardia (2116), tuttavia, in termini di portate medie concesse, le derivazioni superficiali monitorate rappresentano il 77% del totale regionale (845.3 m3/s). I prelievi da falda scontano invece una generale carenza di informazioni rispetto sia alla loro localizzazione e alle portate in concessione, sia ai volumi effettivamente emunti. In termini di portate medie in concessione i pozzi monitorati rappresentano appena l’11% del totale (Tab. 1).

Nei territori non dotati di reti di misuratori il CeDATeR elabora una stima dei volumi irrigui utilizzati attraverso il modello agroidrologico Idragra, sviluppato dall’Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali (UNIMI-DiSAA) e basato sul calcolo del fabbisogno irriguo delle principali colture agrarie.

Tab. 1 - Numero di captazioni irrigue in Lombardia con le relative portate medie concesse a confronto con il livello di copertura del sistema di monitoraggio in termini di portate in concessione.

Tab. 1 - Number of irrigation diversions in Lombardy with the relative average daily flow rate under concession in comparison with the percentage of coverage of the monitoring system in terms of daily flow rate under concession.

Tipo di captazione	n. captazioni in concessione	Portate medie in concessione (m ³ /s)	Portate medie in concessione monitorate (m ³ /s)	% Portate monitorate sul totale concesso
Da acque superficiali	2116	845.3	649.1	77%
Da acque sotterranee	7740	87.9	9.3	11%

Risultati e Discussione

Le analisi effettuate sulle 8 serie storiche di pianura citate nel precedente paragrafo, mettono in mostra alcuni trend delle precipitazioni tra la prima fase del periodo (1990-2006) e la seconda fase del periodo (2007-2023). Nello specifico si evidenzia che il numero dei giorni di pioggia totali annui (Tab. 2), tra la prima fase e la seconda fase, non subisce una sostanziale modifica ma vi è una variazione all’interno dei singoli mesi dell’anno. Nello specifico i mesi invernali, nel corso del secondo periodo (2007-2023), hanno un maggior numero di giorni piovosi medi, con una differenza particolarmente marcata nel mese di febbraio. Altre differenze si rilevano nei mesi autunnali, con un minor numero di giorni piovosi nel secondo periodo (2007-2023) nei mesi di settembre ed ottobre.

Non sono invece univoci i risultati sulle precipitazioni totali annue (Tab. 3), che registrano variazioni comprese tra un -9% (Castello d’Agogna-PV) e un +12% (Vertemate con Minoprio-CO). Come già detto per i giorni di pioggia, le variazioni si possono apprezzare nei quantitativi mensili che seguono le stesse tendenze dei giorni di pioggia: maggiori precipitazioni invernali nel secondo periodo, e minori precipitazioni mensili a settembre ed ottobre, sempre nel secondo periodo. A tal proposito è utile citare alcuni esempi degli incrementi avvenuti nelle precipitazioni totali mensili di febbraio, tra la prima fase del periodo e la seconda fase del periodo: a S.Angelo Lodigiano-LO si passa da 28 mm a 52 mm, a Palidano di Gonzaga-MN da 28 mm a 54 mm, a Minoprio-CO da 48 mm a 76 mm, a Bergamo da 39 mm a 67 mm.

Tab. 2 – I giorni di pioggia annui delle otto stazioni di riferimento.

Tab. 2 - The annual rainy days in the eight reference stations.

Stazione	Giorni di pioggia totali annui	Giorni di pioggia totali annui	Variazione %
Vertemate con Minoprio-CO	95	100	+5
Bergamo	108	102	-5
Brescia	92	95	+3
S. Angelo Lodigiano-LO	72	71	-1
Castello d’Agogna-PV	76	77	+1
Rivolta d’Adda-CR	89	88	-1
Persico Dosimo-CR	78	85	+9
Palidano di Gonzaga-MN	79	81	+3

Nel contesto rilevato è del tutto evidente che per poter mantenere in equilibrio il sistema agricolo lombardo è imprescindibile conoscere la reale disponibilità idrica sul territorio in ogni momento. La conoscenza approfondita ed in tempo reale delle principali grandezze che determinano l’uso della risorsa consente infatti di attuare due importanti azioni, quella di disporre di un sistema di *supporto decisionale* a breve termine, per intervenire prontamente in caso di criticità, e quella di fornire *supporto alla pianificazione* a medio/lungo termine. Potendo contare su apposite Convenzioni di scambio dati con i due principali Enti strumentali di Regione Lombardia preposti al monitoraggio ambientale, ARPA ed ERSAF, il Centro dati è in grado di dare un contributo fattivo in entrambi gli ambiti citati, come viene mostrato negli esempi che

seguono:

Tab. 3 – Le variazioni nelle precipitazioni totali annue delle otto stazioni di riferimento (mm).

Tab. 3 – Changes in total annual precipitation of the eight reference stations (mm).

Stazione	Precipitazioni annue 90-06	Precipitazioni annue 07-23	Variazione %
Vertemate con Minoprio-CO	1164	1312	+12
Bergamo	1096	1171	+7
Brescia	960	949	-1
S. Angelo Lodigiano-LO	743	753	+1
Castello d’Agogna-PV	751	687	-9
Rivolta d’Adda-CR	886	861	-3
Persico Dosimo-CR	744	801	+7
Palidano di Gonzaga-MN	681	693	+2

1) Supporto decisionale

Il confronto tra le disponibilità di riserve idriche e i prelievi in atto consente di analizzare nel dettaglio l’andamento della stagione irrigua per ciascuno dei principali corpi idrici superficiali. Attraverso una *dashboard* preimpostata è così possibile rappresentare in un grafico l’andamento della stagione irrigua in corso e di quelle passate. Come caso emblematico si riporta il grafico relativo al bacino idrico del fiume Adda nella stagione irrigua 2022, la più critica degli anni recenti per i sistemi irrigui lombardi (Fig. 1). In esso si ritrovano due differenti rappresentazioni:

· *grafici a linee* mostrano l’andamento delle riserve idriche, in particolare in blu il volume stoccato sotto forma di riserva nivale (*Snow Water Equivalent - SWE*), in grigio il volume invasato nei bacini idroelettrici montani e in

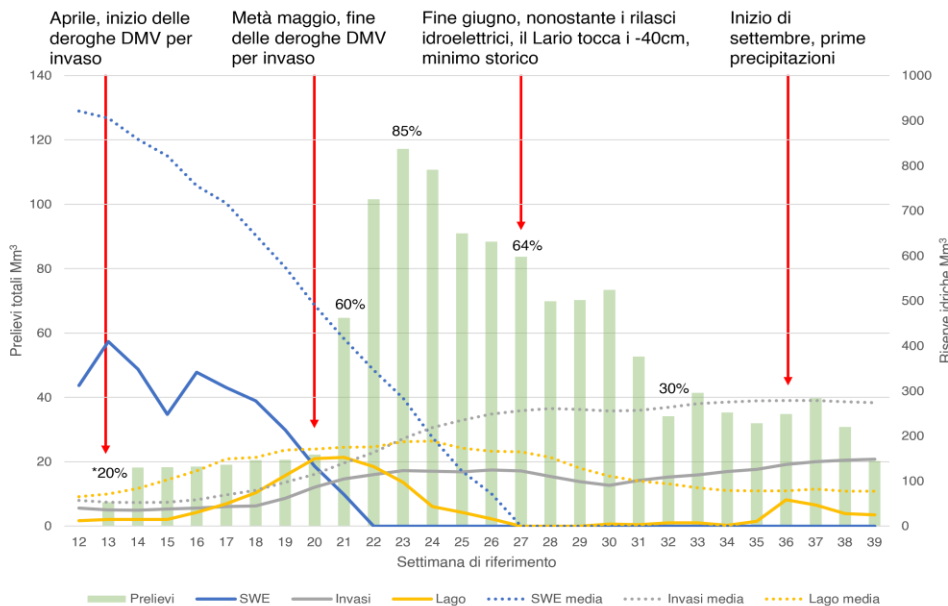


Fig. 1 - Andamento delle riserve idriche e dei volumi prelevati nel bacino del fiume Adda nella stagione irrigua 2022.

Fig. 1 - Trends in water reserves and volumes withdrawn in the Adda river basin during the 2022 irrigation season.

giallo il volume disponibile nel lago regolato. Con la linea continua viene rappresentato il 2022 mentre la linea puntinata mostra il valore storico medio (2006-2020);

· *grafico a colonne*, di colore verde chiaro, con l'andamento dei prelievi cumulati a passo settimanale per tutte le derivazioni monitorate. I valori riportati in percentuale rappresentano il confronto tra le portate erogate e il valore medio erogato nel medesimo periodo storico (fonte *Laghi.net*).

I grafici mostrano chiaramente come l'andamento della stagione sia stato influenzato dall'estrema povertà di risorsa idrica a disposizione e dall'azione regionale che ha cercato di limitare i danni all'agricoltura. In particolare, dall'usuale inizio della stagione irrigua il primo aprile (*settimana 13*) fino a metà maggio (*settimana 20*) i prelievi sono stati praticamente azzerati per effetto della deroga di invaso al DMV concessa da Regione Lombardia. La deroga ha consentito al volume trattenuto nel lago di Como di crescere da 11 milioni di metri cubi a 150 milioni di metri cubi, che rappresenta il massimo stagionale. A partire dalla settimana 21, terminata la deroga, sono partiti i prelievi con portate crescenti fino alla settimana 23, nella quale è stato erogato l'85% della portata media. Con l'azzeramento dell'SWE, avvenuto con cinque settimane di anticipo rispetto alla media, il volume presente nel Lario è sceso rapidamente e con esso anche le portate erogate. Nel frattempo, il Tavolo di coordinamento regionale aveva ricevuto la disponibilità da parte dei gestori idroelettrici alpini di attuare dei rilasci programmati a supporto dell'agricoltura. Il risultato dei rilasci è ben visibile nel grafico, dove si nota che la linea grigia continua delle riserve invase non è cresciuta costantemente come mediamente accade, ma mostra dei punti di flessione e riduzioni. I rilasci hanno permesso di mantenere attive le derivazioni con portate erogate intorno al 60-65% del valore medio. Nonostante gli sforzi profusi, a fine giugno (*settimana 27*) il Lario ha raggiunto il minimo storico e il limite inferiore di regolazione: le portate successivamente erogate, al 30% del valore medio, sono state quindi completamente dipendenti dagli afflussi di monte, per i quali erano determinanti gli ultimi rilasci idroelettrici. Con D.d.g. n.10208 del 13 luglio (*settimana 28*) è stata concessa la deroga temporanea al rilascio del DMV per le utenze consorziate al Consorzio dell'Adda, come ultimo tentativo di recuperare risorsa. In seguito, la situazione è rimasta invariata fino ad inizio settembre (*settimana 35*) in cui si sono verificati i primi fenomeni precipitativi degni di nota.

Strumenti come quello mostrato sono fondamentali per supportare i decisori nei tavoli istituzionali di

coordinamento, come il *Tavolo regionale permanente per l'utilizzo in agricoltura della risorsa idrica e l'Osservatorio permanente sugli utilizzi idrici nel Distretto idrografico del fiume Po*.

2) Supporto alla pianificazione

Conoscere i volumi di acqua transitanti nei sistemi irrigui, a partire dai prelievi fino agli effettivi utilizzi e alle restituzioni, fornisce il quadro complessivo dell'uso di acqua che viene fatto dal comparto agricolo. Numerose sono le analisi che è possibile effettuare; come esempio si porta una analisi comparativa delle stagioni più recenti in termini di prelievi dai corpi idrici superficiali e dalla falda. Per ovviare al fatto che ogni anno si registra un incremento del numero di misuratori installati, che comporta un incremento dei volumi derivati, è stato selezionato un sottoinsieme di misuratori le cui derivazioni risultavano completamente monitorate nell'intero arco temporale di riferimento, ossia le stagioni dal 2016 al 2021 (62 derivazioni superficiali e 52 pozzi). È interessante analizzare i valori di prelievo fatti segnare dalle tre stagioni più recenti, caratterizzate da estrema carenza idrica (2022), carenza idrica per la prima metà della stagione, poi abbondanza (2023) ed infine abbondanza di risorsa per tutta

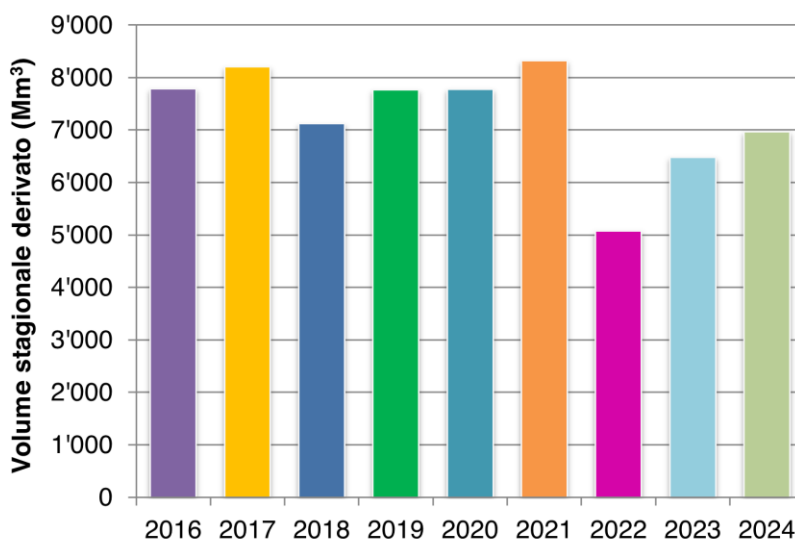


Fig.2 Variazione del volume stagionale complessivamente derivato nel corso delle stagioni irrigue più recenti. Sono state conteggiate unicamente le 62 derivazioni che risultano completamente monitorate nell'intero periodo.

Fig.2 Variation of the total seasonal volume diverted during the most recent irrigation seasons. Only the 62 derivations that were completely monitored during the entire period were counted

la stagione (2024).

Per le derivazioni superficiali (*Fig. 2*), a fronte di un volume medio stagionale del sessennio di riferimento 2016-2021 pari a 7.8 miliardi di metri cubi, si riscontrano riduzioni per tutti e tre gli anni recenti, in particolare:

- una notevole riduzione nell'anno 2022 (-36%);
- una sensibile riduzione nel 2023 (-18%);
- una riduzione più contenuta nel 2024 (-11%).

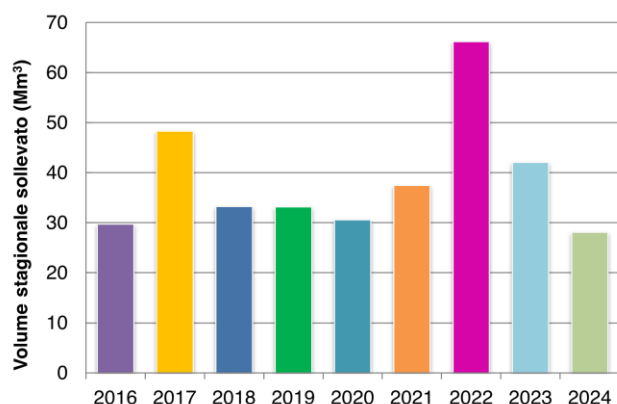


Fig. 3 - Variazione dei volumi stagionali sollevati dalla falda. Sono stati conteggiati unicamente i 52 pozzi che risultano completamente monitorati nell'intero periodo.

Fig. 3 - Variation of the seasonal volumes raised by the aquifer. Only the 52 wells that were completely monitored during the entire period were counted.

Per le derivazioni da acque sotterranee (Fig. 3), a fronte di un volume medio stagionale del sessennio di riferimento 2016-2021 (escluso il 2017 caratterizzato da fabbisogni colturali molto elevati e da uso diffuso di pozzi di emergenza) pari a 32.8 milioni di metri cubi, si riscontra:

- il raddoppio dei volumi nell'anno 2022 (+102%);
- un notevole aumento nel 2023 (+28%);
- una sensibile riduzione nel 2024 (-14%).

Per quanto riguarda le derivazioni da acque superficiali, le riduzioni registrate in tutte e tre le annate sono dovute a due fenomeni differenti. Nel 2022 e 2023 si è trattato infatti di mancanza di risorsa nei fiumi, mentre nel 2024 si è verificata una minor richiesta di acqua dovuta ai marcati apporti meteorici. L'abbondanza della stagione 2024 permette di analizzare il comportamento dei sistemi irrigui tradizionali, contraddistinti dalla necessità di mantenere in carico la rete di canali principali e diramatori anche nei periodi dove la richiesta di acqua è minima. È principalmente per questo motivo che, a fronte di una riduzione notevole dei fabbisogni, specialmente nel primo trimestre della stagione (circa -80%), le derivazioni hanno comunque fatto segnare riduzioni più contenute dei volumi derivati. L'inerzia di questi sistemi irrigui è infatti tale per cui non è possibile scendere al di sotto di un livello minimo di portata derivata, pena l'impossibilità di far fronte tempestivamente ad eventuali successivi periodi asciutti. Diverso è il caso dei territori serviti da impianti di sollevamento meccanico o da pozzi, che derivano solo quando è strettamente necessario. I dati mostrano come nel 2022 e 2023 i pozzi siano stati maggiormente utilizzati per

compensare le riduzioni dei volumi derivati dai corsi d'acqua superficiali, mentre nel 2024 si è verificato il fenomeno opposto. È evidente che stagioni irrigue segnate da riserve idriche superficiali limitate comporta pesanti ripercussioni non solo sui corpi idrici superficiali ma anche sullo stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei che vengono derivati maggiormente. È bene ricordare che questi ultimi presentano tempi di ricarica molto più grandi dei bacini superficiali.

I dati e le elaborazioni del CeDATeR vengono condivisi con Regione Lombardia e con tutti gli Enti che a vario titolo si occupano di gestione della risorsa idrica, in modo da fornire una rappresentazione aggiornata e veritiera dell'uso della risorsa. Solo basandosi su dati certi è possibile pianificare correttamente gli usi dell'acqua senza rischiare di sconvolgere i delicati equilibri che da secoli sono stati garantiti dai sistemi irrigui lombardi.

Infine, in un'ottica di fruibilità delle informazioni e di divulgazione al pubblico, i dati, commentati con grafici e cartine tematiche, vengono pubblicati nei Report sulla stagione irrigua che sono liberamente consultabili sul portale web del Centro dati (v. bibliografia).

Conclusioni

Le variazioni climatiche a cui stiamo assistendo potranno comportare difficoltà di approvvigionamento idrico sempre più frequenti in un futuro non troppo lontano. Per garantire la sicurezza dell'approvvigionamento idrico risulterà sempre più importante una cooperazione tra i decisori politici, gli enti del territorio, e i gestori delle infrastrutture basate su strumenti di pianificazione sostenibile e su sistemi di supporto alle decisioni. Ad oggi il modello del CeDATeR rappresenta il più avanzato sistema di raccolta integrata di dati sui sistemi irrigui attualmente presente in Regione Lombardia e sul territorio nazionale e garantisce un flusso di informazioni in grado di soddisfare le esigenze dettate dalle sfide del nostro tempo.

Bibliografia

- ISPRA - Rapporto SNPA "Gli indicatori del clima in Italia/Il clima in Italia" 2005-2023
- ISPRA - Bilancio idrologico nazionale-stime BIGBANG e indicatori sulla risorsa idrica
- ANBI Lombardia, 2022, Report sulla stagione irrigua 2022
- ANBI Lombardia, 2023, Report sulla stagione irrigua 2024
- ANBI Lombardia, 2024, Report sulla stagione irrigua 2024
- ANBI Lombardia, portale del Centro Dati: cedater.anbilombardia.it
- Laghi.net – portale degli Enti regolatori dei grandi laghi

GRID-BASED CLIMATE DATASET WITH COMPLEX TOPOGRAPHY: A COMPARISON OF METHODS IN THE ABRUZZO REGION

DATASET CLIMATICO SU GRIGLIA CON TOPOGRAFIA COMPLESSA: CONFRONTO DI METODI NELLA REGIONE ABRUZZO

Carina I. Argañaraz^{1,2}, Andreu Salcedo-Bosch³, Simone Lolli³, Gabriele Curci^{1,2*}

¹ Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche, Università degli Studi dell'Aquila, Via Vetoio, 67100 L'Aquila, Italy

² Centro di Eccellenza CETEMPS, Università degli Studi dell'Aquila, Via Vetoio, 67100 L'Aquila, Italy

³ CNR-IMAA, Contrada S. Loja snc, 85050 Tito Scalo (PZ), Italy

* gabriele.curci@univaq.it

Abstract

In this study, we compute daily gridded maps of precipitation and temperature at regional scale in Abruzzo (Central Italy), comparing different interpolation methods: Universal Kriging, Radial Basis Function, and Gradient Boosting Forest. We validated the results against an independent set of stations from the same network used to produce the gridded dataset. The interpolated values were also compared with those obtained from two widely used global datasets (CHELSA and WORLDCLIM). Universal Kriging performed best, with a daily root mean square error of ~ 0.45 mm/day for precipitation and $\sim 1.2^\circ\text{C}$ for temperature. Seasonality affects the bias values, with precipitation being higher in winter and temperature in summer, as well as at isolated stations in mountainous areas. Global datasets show a considerably larger bias for precipitation (RMSE ≥ 60 mm/month) than the local one (35 mm/month) and a too strong altitude effect for temperature, especially in WORLDCLIM.

Parole chiave

Precipitazioni, Temperatura, Metodi di interpolazione, Chelsa, WorldClim

Keywords

Precipitation, Temperature, Interpolation Methods, Chelsa, WorldClim

Introduzione

Ottenere una mappa accurata di variabili ambientali come precipitazione o temperatura per un'area specifica presenta delle difficoltà. Ciò è particolarmente vero per le precipitazioni, che sono intermittenti e presentano un'elevata variabilità spaziale (Page et al., 2022). I dati al suolo su precipitazione e temperatura sono spesso scarsi, con lacune temporali e spaziali (Hadi e Tombul, 2018; Lyra et al., 2018). La quantità e la distribuzione dei dati spaziali influiscono significativamente sull'accuratezza delle mappe risultanti, mentre la scala temporale dei dati influenza la precisione della variabilità in punti spaziali specifici (Berndt e Haberlandt, 2018; Hadi e Tombul, 2018). Inoltre, la stagionalità annuale è un altro fattore che influenza l'accuratezza della previsione delle fluttuazioni climatiche (Arowolo et al., 2017) e, insieme alle caratteristiche topografiche (ad esempio latitudine, longitudine, altitudine, pendenza, uso del suolo, velocità del vento, ecc.), ha un impatto variabile sulla distribuzione spaziale delle precipitazioni e della temperatura (Lyra et al., 2018; Pepin et al., 2022).

L'obiettivo principale di questo studio è quello di ottenere mappe giornaliere a griglia ad alta risoluzione ($\sim 0.01^\circ$) di precipitazione e temperatura (massime e minime giornaliere) a scala regionale per la regione Abruzzo in Italia, da utilizzare prevalentemente come dati di input per la modellistica di adattamento climatico. Abbiamo testato diversi metodi di interpolazione – Universal Kriging, Radial Basis Function Interpolation e Gradient Boosting

Forest – e abbiamo utilizzato un set di stazioni diverso da quello utilizzato per produrre il dataset a griglia per valutare quello che offre le prestazioni migliori in termini di medie climatologiche. Abbiamo quindi valutato l'accuratezza dei database globali ad alta risoluzione ($\sim 0.01^\circ$ e media mensile) disponibili per la stessa area dalle piattaforme Chelsa e WorldClim rispetto a dati osservativi indipendenti. Ciò ci ha permesso di valutare l'affidabilità di questi database globali a scale più piccole e in topografia complessa, nonché l'utilità delle mappe osservative a scala locale.

Materiali e Metodi

L'area di studio corrisponde alla regione Abruzzo, Italia (punto centrale $42^\circ 13'00''\text{N}$; $13^\circ 50'00''\text{E}$), con una superficie di 10.763 km^2 nella parte centro-orientale del Paese (Figura 1). La regione è caratterizzata da una topografia complessa con brusche variazioni altitudinali su brevi distanze; di conseguenza, presenta un moderato gradiente est-ovest di temperatura e precipitazioni. La temperatura media annua diminuisce da $16\text{--}17^\circ\text{C}$ lungo la costa a $3\text{--}4^\circ\text{C}$ sulla cima degli Appennini, mentre la precipitazione media annua aumenta da $600\text{--}700 \text{ mm/anno}$ nelle valli a $1.200\text{--}1.500 \text{ mm/anno}$ sulle montagne (Curci et al., 2021).

I dati delle stazioni sono stati ottenuti dall'Ufficio Idrologico della regione e omogeneizzati seguendo la procedura descritta in (Curci et al., 2021). Le variabili target selezionate per la modellazione includono la

Fig. 1 – Stations used as input data (33 black dots) and validation stations (17 red dots) in the Abruzzo region, Italy

Per valutare la qualità dei dati delle stazioni, abbiamo eseguito un'interpolazione per ciascuna variabile utilizzando i dati giornalieri annuali di tutte le stazioni disponibili (33). Abbiamo quindi rappresentato graficamente le stazioni in base al loro bias medio (Figura 2). Questo approccio ci ha permesso di identificare le stazioni con bias elevati, che, una volta rimossi, avrebbero potuto migliorare la previsione in quelle specifiche posizioni e quindi migliorare i nostri risultati finali.

deviazione complessiva e ha causato un aumento delle deviazioni in altre stazioni a causa dell'"effetto vicino", abbiamo mantenuto l'intero set di dati della stazione per la modellazione delle precipitazioni.

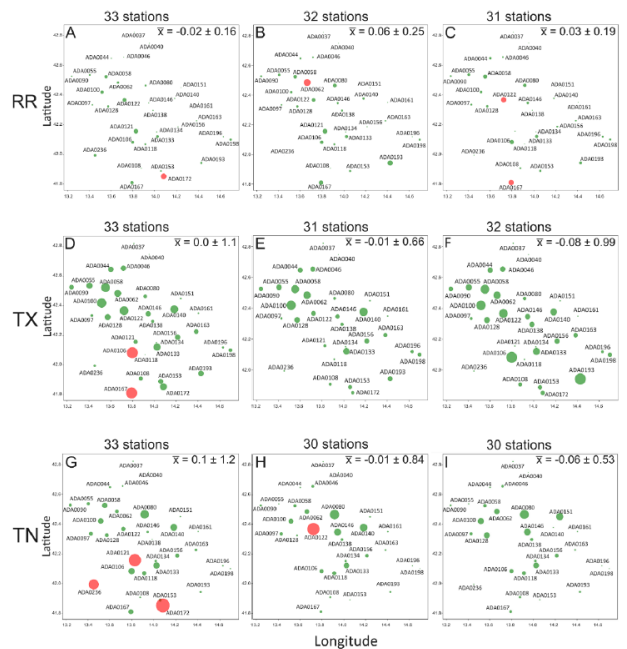


Fig. 2 – Mapped mean bias at each station using annual data across the study area, with overall bias average ($\bar{x} \pm SD$) shown for each case. The circle size is proportional to bias value at each station. Red circles indicate removed stations. RR = daily precipitation; TX = maximum daily temperature; TN = minimum daily temperature.

Per TN, la deviazione media complessiva per tutte le stazioni è stata di $0,1 \pm 1,2$ °C, e le stazioni ADA0172 ($4,4 \pm 1,1$ °C), ADA0121 ($3,55 \pm 0,68$ °C) e ADA0236 ($-2,37 \pm$

0,49 °C) hanno mostrato i valori estremi (Figura 2-G). Abbiamo rimosso queste stazioni e abbiamo eseguito l'interpolazione con 30 stazioni, ottenendo una deviazione complessiva di $-0,01 \pm 0,84$ °C (Figura 2-H). In questa nuova analisi, la stazione ADA0122 è aumentata a $3,57 \pm 0,43$ °C (inizialmente era -0,40). Abbiamo rimosso questa stazione e ripetuto la previsione, ottenendo $-0,10 \pm 0,48$ °C con 29 stazioni. Infine, abbiamo verificato se le stazioni rimosse mostrassero risultati migliori dopo la rimozione. Tre stazioni hanno mostrato risultati migliori: ADA0172, ADA0121 e ADA0122, mentre ADA0236 ha aumentato il suo bias (maggiori dettagli nella Tabella S4). Pertanto, abbiamo utilizzato 30 stazioni per modellare il TN, con un bias complessivo di $-0,06 \pm 0,53$ °C (Figura 2-I).

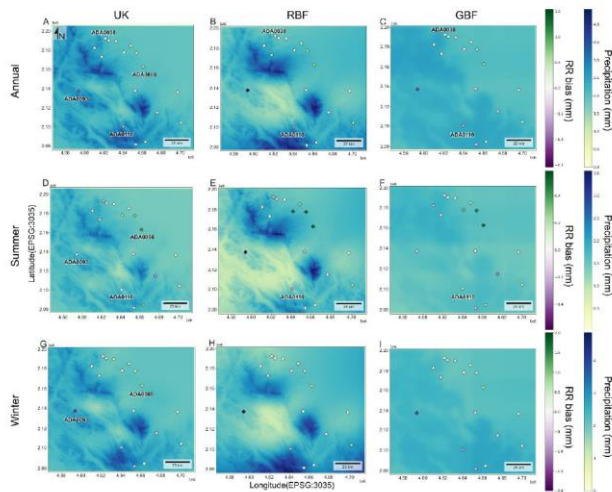


Fig. 3 – Precipitazione accumulata media giornaliera (RR) interpolata nella regione Abruzzo, Italia. Ogni riga rappresenta un set di dati e ogni colonna rappresenta un metodo: UK = Universal Kriging, RBF = Radial Basis Function e GBF = Gradient Boosting Forest. I punti rappresentano le 17 stazioni di validazione e sono riempiti in base al valore di bias medio.

Fig. 3 – Daily average accumulated precipitation (RR) interpolated in the Abruzzo region, Italy. Each row represents a dataset, and each column represents a method: UK = Universal Kriging, RBF = Radial Basis Function and GBF = Gradient Boosting Forest. Points represent the 17 validation stations and are filled according to the average bias value.

La Figura 3 mostra i risultati relativi alle precipitazioni per diversi metodi e dataset (media giornaliera). Il modello generale delle precipitazioni ottenuto con i metodi UK e RBF mostra una forte similarità in tutti e tre i dataset, mentre il GBF manca in particolare di una definizione precisa tra aree umide e secche nella regione di studio. Entrambi i metodi UK e RBF stimano precipitazioni più elevate sugli Appennini, in particolare sopra il Gran Sasso e il Massiccio della Maiella (~1511 mm/anno UK e ~1610 mm/anno RBF) e precipitazioni inferiori nelle Pianure del Fucino (~774 mm/anno UK e ~606 mm/anno RBF) e nell'area di Sulmona (~679 mm/anno UK e ~667 mm/anno RBF) o sulla costa adriatica (~730 mm/anno UK e RBF).

Inoltre, entrambi i metodi identificano una zona umida nell'area di studio meridionale, corrispondente al Parco Nazionale d'Abruzzo, Lazio e Molise, e regioni più secche lungo la costa adriatica.



Fig. 4 – RMSE medio ($\pm$ DS) ottenuto per ciascuna stazione/mese, con ciascun database (CHLSA, WORLDCLIM e Gridded = Universal Kriging). A - Precipitazioni mensili (RR), B - Temperatura massima mensile (TX) e C - Temperatura minima mensile (TN). Le stazioni sono ordinate in ordine crescente di altitudine.

Fig. 4 – Average RMSE ($\pm$ SD) obtained for each station/month, with each database (CHLSA, WORLDCLIM and Gridded = Universal Kriging). A-Monthly precipitation (RR), B-Monthly maximum temperature (TX) and C-Monthly minimum temperature (TN). Stations are arranged in ascending order of altitude.

La validazione dei database (WorldClim, Chelsa e ADAMO) è stata condotta calcolando l'RMSE e la differenza media tra previsioni e osservazioni (bias) in ciascun punto di validazione (le 17 stazioni non utilizzate per la produzione di ADAMO).

I valori mensili delle precipitazioni per entrambi i database globali hanno mostrato RMSEWC = 60 ± 12 mm e RMSECHE = 61 ± 15 mm. Questi valori erano significativamente superiori a quelli ottenuti con ADAMO, RMSEADA = $34,6 \pm 5,8$ mm (Figura 4-A). Pertanto, i valori osservati sono stati sovrastimati in tutte le località. Per quanto riguarda le temperature, i valori globali erano generalmente in maggiore accordo con le osservazioni per

quanto riguarda le precipitazioni. Per il Texas, il modello più accurato è stata la mappa a griglia, RMSEADA = $0,81 \pm 0,10$ °C, seguita da Chelsa, RMSECHE = $1,26 \pm 0,35$ °C, e infine WorldClim, RMSEWC = $1,58 \pm 0,40$ °C. Sia Chelsa che WorldClim mostrano valori simili in tutte le stazioni, ed entrambi i prodotti mostrano un aumento di RMSE con l'altitudine (Figura 4-B). I tre database hanno mostrato una minore precisione nella stima della temperatura minima rispetto a quella massima. Il risultato migliore è stato ottenuto da ADAMO con RMSEADA = $1,09 \pm 0,07$ °C, seguito da RMSECHE = $1,46 \pm 0,40$ °C e RMSEWC = $2,23 \pm 0,41$ °C (Figura 4-C).

Conclusioni

Il Kriging Universale rimane un metodo valido per l'interpolazione delle variabili climatiche (precipitazioni e temperatura) in aree di studio medio-piccole. Risolve in modo accettabile le comuni problematiche di interpolazione, come la bassa densità di stazioni e gli effetti di bordo.

L'uso del DEM come variabile ausiliaria è stato particolarmente rilevante per la temperatura massima giornaliera, seguita dalla precipitazione accumulata giornaliera e infine per la temperatura minima giornaliera. La densità di stazione non ha influenzato le variabili in modo uniforme; le precipitazioni sono apparse maggiormente influenzate negativamente nelle aree a minore densità. Questo effetto è stato chiaramente osservato nelle precipitazioni attraverso la sottostima o la sovrastima dei valori massimi o minimi nelle stazioni di validazione.

I valori medi dei parametri di errore ottenuti con dati annuali si sono costantemente posizionati tra i risultati migliori e peggiori, con l'estate più critica per le temperature e l'inverno per le precipitazioni. I dati ottenuti in questo studio sono disponibili per l'uso su scala locale nella regione Abruzzo con risoluzione temporale giornaliera annuale e risoluzione spaziale di 1 km², con una precisione media di 1 °C per la temperatura massima giornaliera, 1,2 °C per la temperatura minima giornaliera e 0,45 mm per la precipitazione accumulata giornaliera.

L'utilizzo di database globali ad alta risoluzione in regioni con gradienti topografici pronunciati dovrebbe essere prima convalidato con dati al suolo per approssimare meglio l'errore di precisione ed evitare così di trasferire tali errori a modelli predittivi ecologici o climatici. Chelsa e WorldClim mostrano valori di temperatura accettabili a bassa quota (≤ 500 m s.l.m.), mentre i valori delle precipitazioni dovrebbero essere considerati con cautela a scala locale.

Il dataset grigliato prodotto qui (ADAMO) è una solida media climatologica di riferimento di temperatura e precipitazioni per ogni giorno di calendario. La combinazione di mappe a griglia della media e delle sue anomalie consentirà di calcolare mappe a griglia giornaliere di tutte le variabili, il che potrebbe essere utile per applicazioni a cascata come la modellazione dell'adattamento settoriale e la correzione della distorsione

delle proiezioni climatiche globali su scala regionale e locale.

Bibliografia

- Arowolo, A.O., Bhowmik, A.K, Qi, W. & Deng, X. (2017) Comparison of spatial interpolation techniques to generate high-resolution climate surfaces for Nigeria. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.4990>
- Berndt, C. & Haberlandt, U. (2018) Spatial interpolation of climate variables in Northern Germany—Influence of temporal resolution and network density. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 184–202. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.002>
- Curci, G., Guijarro, J.A., Di Antonio, L., Di Bacco, M., Di Lena, B. & Scorzini, A.R. (2021) Building a local climate reference dataset: Application to the Abruzzo regio (Central Italy), 1930-2019. *International Journal of Climatology*, 41, 4414–4436. <https://doi.org/10.1002/joc.7081>
- Hadi, S.J. & Tombul, M. (2018) Comparison of spatial interpolation methods of precipitation and temperature using multiple integration periods. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46, 1187–1199. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0783-1>
- Lyra, G.B., Correia, T.P., de Oliveira-Júnior, J.F. & Zeri, M. (2018) Evaluation of methods of spatial interpolation for monthly rainfall data over the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 134, 955–965. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2322-3>
- Page, T., Beven, K.J., Hankin, B. & Chappell, N.A. (2022) Interpolation of rainfall observations during extreme rainfall events in complex mountainous terrain. *Hydrological Processes*, 36: e14758. <https://doi.org/10.1002/hyp.14758>
- Pepin, N.C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., et al. (2022). Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. *Reviews of Geophysics*, 60, e2020RG000730. <https://doi.org/10.1029/2020RG000730>

ASSESSMENT OF RAINFALL TRENDS IN ABRUZZO OVER THE 1974-2024 TIME PERIOD

VALUTAZIONE DEI TREND PLUVIOMETRICI IN ABRUZZO NELL'ARCO TEMPORALE 1974 -2024

Bruno Di Lena ¹, Lorenzo Vergni ², Gabriele Curci ³

¹Regione Abruzzo – Dipartimento Agricoltura. Ufficio direttiva qualità dei suoli e servizi agrometeo. bruno.dilena@regione.abruzzo.it

²Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali, Università degli studi di Perugia. lorenzo.vergni@unipg.it

³Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche, Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila. gabriele.curci@univaq.it

Abstract

The study analyzed precipitation trends at 33 stations across the Abruzzo region over the period 1974–2024. In particular, the temporal dynamics of cumulative precipitation were examined for the winter, spring, summer, autumn, and annual periods. The significance of the trends was assessed using both the pointwise and regional Mann-Kendall test. The results show predominantly negative trends, which are statistically significant at inland stations during the autumn season.

Parole chiave

pluviometria, regione Abruzzo

Keywords

rainfall, Abruzzo region

Introduzione

La valutazione delle risorse idriche territoriali assume particolare importanza in un contesto ambientale caratterizzato dai cambiamenti climatici. In questo lavoro si analizzano i trend evolutivi delle precipitazioni nella regione Abruzzo con particolare riferimento alla loro distribuzione sul territorio.

Materiali e Metodi

Lo studio climatico è stato effettuato utilizzando i dati pluviometrici giornalieri raccolti in 33 località della regione Abruzzo nell'arco temporale 1974-2024 (Fig.1) dall'Ufficio idrologia, idrografico e mareografico dell'Agenzia Regionale di Protezione Civile dell'Abruzzo e successivamente validati dal CETEMPS dell'Università degli Studi dell'Aquila, secondo la metodologia illustrata in Curci *et al.*, 2021. Le elaborazioni riguardanti le medie e i trend sono state effettuate per le precipitazioni cumulate annuali, mensili e stagionali. • Inverno (gennaio-febbraio-marzo) • Primavera (aprile-maggio-giugno) • Estate (luglio-agosto-settembre) Autunno (ottobre-novembre-dicembre). L'analisi dei trend è stata effettuata con il test non parametrico di Man Kendall (Mann 1945; Kendall 1975). Il test di Mann-Kendall è stato applicato anche per la determinazione del trend a scala regionale (Douglas *et al.*, 2000)

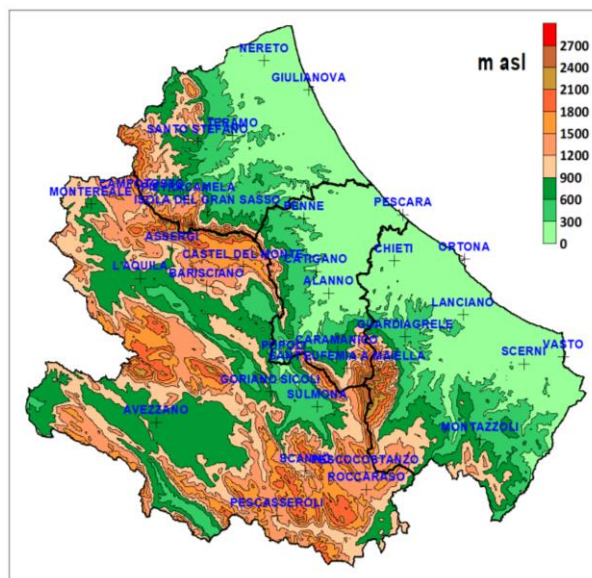


Fig.1 - Mappa della Regione Abruzzo con i nomi delle 33 stazioni meteorologiche e con in alto a destra le classi di altitudine.

Fig.1 – Map of Abruzzo Region with the names of the 33 meteorological stations and on the upper right the altitude class

Risultati e Discussione

I valori medi delle precipitazioni nel periodo invernale (A) si collocano nell'intervallo compreso tra 124,7 mm di Barisciano e 349,5 mm di Sant'Eufemia a Maiella.

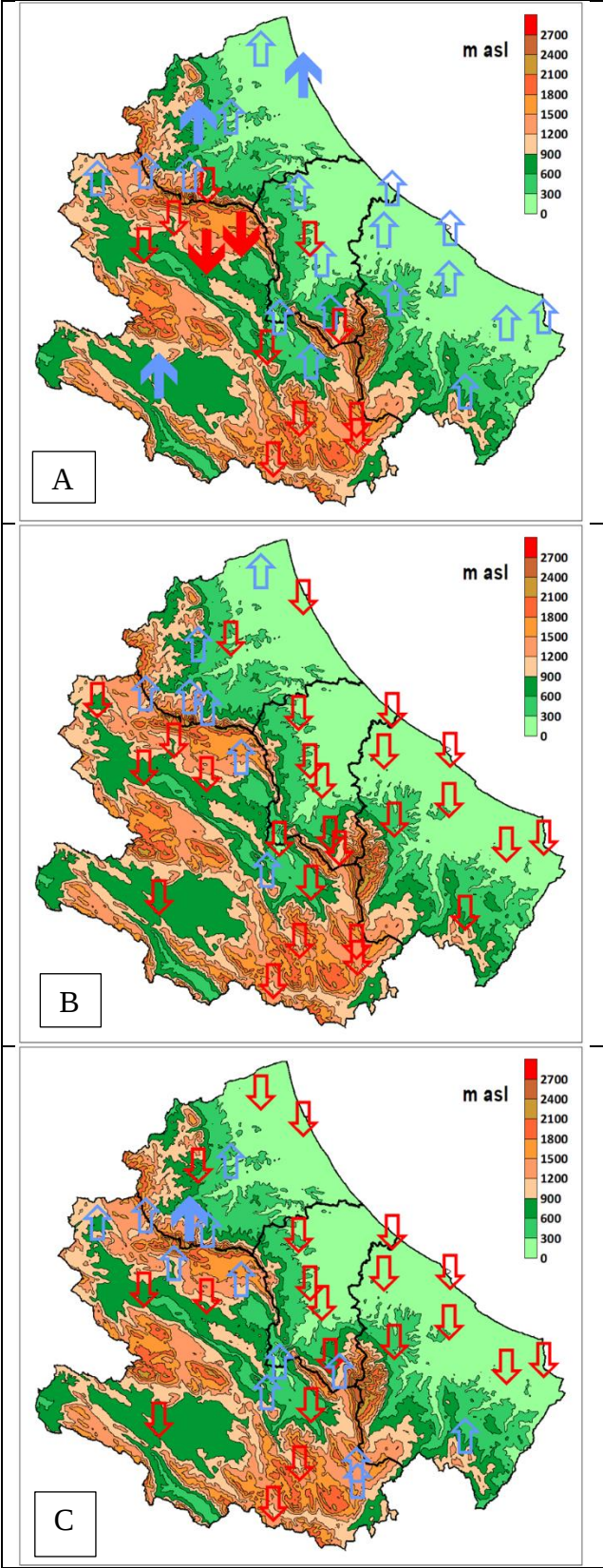
Si sottolinea un calo delle precipitazioni nelle aree interne, significativo nelle località di Barisciano e Castel del Monte. I valori medi delle precipitazioni del periodo primaverile (B) si collocano nell'intervallo compreso tra 144,5 mm di Goriano Sicoli e 322,0 mm di Isola del Gran Sasso

Le elaborazioni relative ai trend evidenziano un calo delle precipitazioni non significativo nella maggior parte delle località. I valori medi delle precipitazioni del periodo estivo si collocano nell’intervallo compreso tra 97,2 mm di Goriano Sicoli e 242,9 mm di Sant’Eufemia a Maiella. Si registra un calo delle precipitazioni non significativo soprattutto nella fascia costiera e le aree collinari limitrofe. Gli aumenti, riguardano 12 stazioni localizzate nelle aree interne. I valori medi delle precipitazioni del periodo autunnale si collocano nell’intervallo compreso tra 187,7 mm di Barisciano e 517,6 mm di Pescasseroli. Si segnala un calo generale delle precipitazioni, significativo in 10 località delle aree interne. I valori medi delle precipitazioni annuali si collocano nell’intervallo compreso tra 603,9 mm di Goriano Sicoli e 1366,9 mm di Sant’Eufemia a Maiella. L’analisi dei trend per le precipitazioni annuali presenta una importante variabilità con un calo significativo nelle aree interne. Il test di Mann-Kendall a scala di areale ha permesso di esprimere una valutazione complessiva sull’andamento delle precipitazioni. Si evidenziano variazioni significative nei mesi di maggio e ottobre, rispettivamente in aumento e in diminuzione (Tab. 1)

Tab. 1 Test di Man Kendall su scala di areale. Le frecce in basso indicano trend decrescenti mentre quelle in alto denotano trend crescenti. Le frecce piene indicano trend significativi con p-value <0.05

Tab. 1 Man Kendall test on areal scale. Downward arrows indicate decreasing trends, while upward arrows indicate increasing trends. Solid arrows indicate significant trends with p-value < 0.05

Periodo	Significatività	trend
gennaio	ns	↕
febbraio	ns	↕
marzo	ns	↕
aprile	ns	↕
maggio	*	↗
giugno	ns	↕
luglio	ns	↕
agosto	ns	↕
settembre	ns	↕
ottobre	*	↘
novembre	ns	↕
dicembre	ns	↕
inverno	ns	↕
primavera	ns	↕
estate	ns	↕
autunno	ns	↕
anno	ns	↕



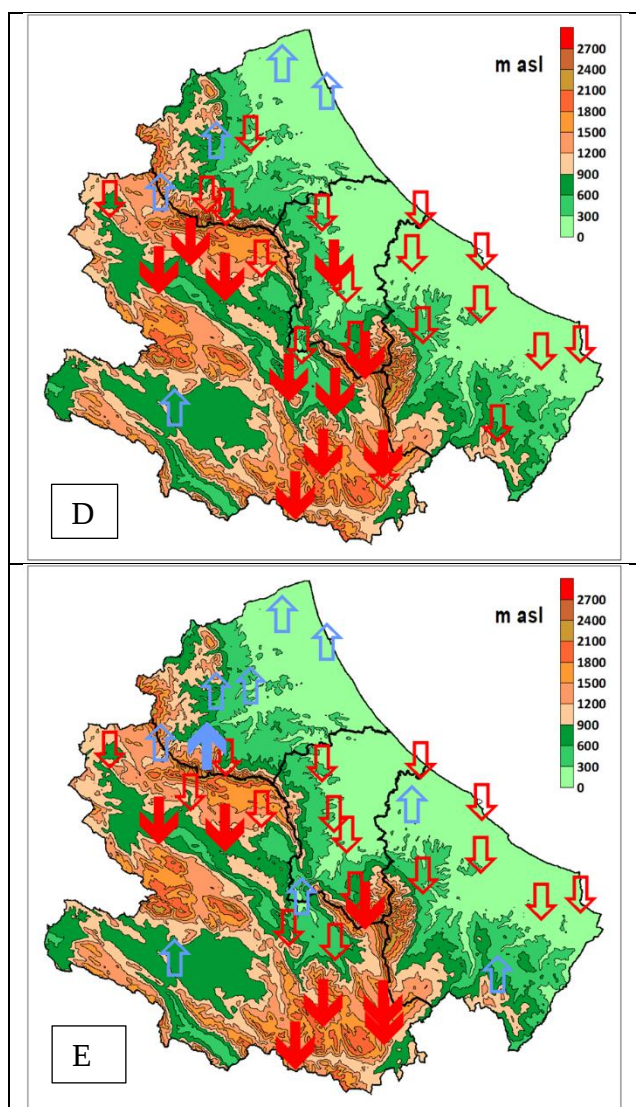


Fig.2 - Distribuzione territoriale dei trend delle precipitazioni stagionali e annuali. A (inverno) B (primavera) C (estate) D (autunno). E (anno).

Le frecce in basso indicano trend decrescenti mentre quelle in alto denotano trend crescenti. Le frecce piene indicano trend significativi con $p\text{-value} < 0.10$

Fig.2 - Territorial distribution of seasonal and annual precipitation trends. A (winter) B (spring) C (summer) D (autumn). E (year). Downward arrows indicate decreasing trends, while upward arrows denote increasing trends. Solid arrows indicate significant trends with $p\text{-value} < 0.10$

Conclusioni

Lo studio mette in evidenza il calo generale delle precipitazioni, significativo soprattutto nel periodo autunnale.

La diminuzione importante riguarda soprattutto le aree interne della Regione le quali peraltro risentono dell'effetto stau endo montano in base al quale le masse d'aria di provenienza adriatica e tirrenica, spinte verso l'interno da strutture depressionarie, scaricano la loro umidità nei rilievi per arrivare, ormai impoverite nelle aree endo-montane.

Bibliografia

- Curci G., Guijarro J.A., Di Antonio L., Di Bacco M., Di Lena B., Scorzini., 2021. A.R. Building a local climate reference dataset: Application to the Abruzzo region (Central Italy), 1930–2019. *Int J Climatol.* 2021; 41:4414–4436. <https://doi.org/10.1002/joc.70814436>
- Sen P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association.* 63, 1379-1389.
- Theil H., 1950. A rank-invariant method for linear and polynomial regression analysis, I,II,III. *Nederlanndse Akademie wetwnschappen.* 53, pp 386-392, 521-525, 1397-1412.
- Douglas R.M., Vogel R.M, Kroll C.N, 2000 Trends in $\bar{Q}$ oods and low $\bar{Q}$ ows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology* 240 (2000) 90±105

THE WEBSITE OF THE CREA OBSERVATORY OF AGRO-METEO-CLIMATOLOGY. AGRO-METEO-CLIMATIC SERVICES FOR ITALY

IL SITO WEB DELL'OSSERVATORIO DI AGRO-METEO-CLIMATOLOGIA DEL CREA. SERVIZI AGRO-METEO-CLIMATICI PER L'ITALIA

Barbara Parisse^{1*}, Roberta Alilla¹, Giulia Maria Bellucci¹, Fausto Carbonari¹, Flora De Natale¹, Chiara Epifani¹, Farid Faridani¹, Eleonora Gerardi¹, Antonio Gerardo Pepe¹, Antonella Pontrandolfi¹

¹ Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria – Centro di ricerca Agricoltura e Ambiente, via della Navicella 4 Roma

* barbara.parisse@crea.gov.it

Abstract

The CREA (Research Center for Agriculture and Environment) Observatory of Agro-Meteo-Climatology has developed a website to valorize and disseminate its research activities. Within a framework of climate variability and change, the Observatory analyzes agrometeorological, climatic and phenological conditions, studying the interactions between meteorological factors and agroforestry ecosystems to set up tools for assessing plant development, crop irrigation requirements, weather-related hazards and disasters in agriculture. Its core activities include the management of the National Agrometeorological Network (RAN), to which a specific website section is devoted, and the creation and maintenance of several databases that are used for agrometeorological monitoring and forecasting, whose materials are published in the Data and Analysis section. The Observatory plays an institutional role by responding to national requests for analysis and reporting, also related to both national and international research projects.

Keywords

Agrometeorological monitoring, crop phenology, agrometeorological forecasting, weather-related risk

Parole chiave

Monitoraggio agrometeorologico, fenologia delle colture, previsioni agrometeorologiche, rischio meteorologico in agricoltura

Introduction

In this work, the structure and contents of the website devoted to the Observatory of Agro-Meteo-Climatology are presented.

Established in 2021, the Observatory is part of the Research Center for Agriculture and Environment, which belongs to the Council for Agricultural Research and Economics (CREA). Its main purpose is to perform meteorological, climatological and phenological analyses for agriculture, also including medium range agrometeorological forecast, at a national and sub-national scale, for both research and institutional aims. In addition, the Observatory is intended to provide decision makers with accurate information to support national agricultural policies on agrometeorological hazards and climate change impacts. Given their primary role in this framework, data collection and management are core activities of the Observatory, which has developed (and continues to develop) several (both gridded and point) databases of agrometeorological variables across Italy. Moreover, the Observatory is responsible for the management of the National Agrometeorological Network (RAN), which has partially been reactivated and will be expanded to improve the availability of agrometeorological observations on the Italian area (Dal Monte et al. 2022).

Materials and Methods

The Observatory has developed several workflows for the pursued lines of research.

The weather phenomena most relevant for agriculture are regularly monitored through the estimation of specific agrometeorological indices (Tab. 1). These indices are based on the MADIA daily gridded dataset over the Italian area (Parisse et al., 2023a.; Parisse et al., 2023b), that is built on the agrometeorological variables derived from ERA5 hourly surface data, with a spatial resolution of 0.25° (horizontal resolution around 31 km). The monitoring includes comparisons with the 1991-2020 reference period, in terms of departures from the average values (anomalies) or from several percentile thresholds. As a result, the Observatory provides maps at a national scale of each of the agrometeorological indices, updated monthly (Parisse et al., 2024).

Besides the monitoring, the Observatory has developed a *medium-range forecasting* system for agrometeorological indices (Tab. 2) aiming to provide an overview of future agrometeorological conditions across the Italian area. Those indices are forecasted up to +5 days using meteorological data from the ICON-EU atmospheric weather prediction model (Reinert et al., 2024), developed by the German Meteorological Service (Deutscher Wetterdienst – DWD). Some indices are “accumulated”, i.e. summed day by day from the start to the end of the forecast period. Similarly, the “number of days” indices estimate how many days the event will occur from the first forecast day. For the indices’

estimation, the chosen model configuration uses the regular rectangular grid version of ICON-EU, which has a spatial resolution of 0.0625° Lon/Lat (~ 6.5 km). The indices are calculated using the 00 UTC run.

Tab. 1 - List of agrometeorological monitoring indices

Tab. 1 – Elenco degli indici agrometeorologici

Acronym	Name
TX	Maximum temperature
TN	Minimum temperature
TXa	Maximum temperature anomalies
TNa	Minimum temperature anomalies
TX90p	Percentage of days when TX>90th percentile
TN90p	Percentage of days when TN>90th percentile
GDD0	Growing degree days- ($T_b=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)
GDD0a	Growing degree days anomalies ($T_b=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)
GDD10	Growing degree days- ($T_b=10\text{ }^{\circ}\text{C}$)
GDD10a	Growing degree days anomalies ($T_b=10\text{ }^{\circ}\text{C}$)
LFD0	Late frost days (TN < 0°C during March and April)
LFD0a	Late frost days anomalies
HI	Huglin heliothermal index (viticulture specific)
HIa	Huglin heliothermal index anomalies
RR	Total precipitation amount
RRa	Total precipitation amount percentage anomalies
RX1day	Monthly maximum 1-day precipitation
RX5day	Monthly maximum consecutive 5-day precipitation
ETo	Reference evapotranspiration (Penman-Monteith)
EToa	Reference evapotranspiration percentage anomalies
CWB	Climatic water balance
CWBa	Climatic water balance anomalies
SPEI3	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index at 3-month scale
SPEI6	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index at 6-month scale

Tab. 2- List of agrometeorological forecasted indices

Tab. 2 – Elenco degli indici agrometeorologici in previsione

Acronym	Name
TX	Maximum daily temperature
TN	Minimum daily temperature
TX35	Number of days with TX >35 °C
LFD0	Late frost days (TN < 0°C during March and April)
DTR	Diurnal Temperature Range
RR	Daily precipitation amount (RR> 5 mm)
RRc	Accumulated RR
R20	Number of very heavy precipitation days (RR>20 mm)
ETo	Daily reference evapotranspiration (Penman-Monteith)
EToc	Accumulated ETo
CWB	Daily climatic water balance
CWBc	Accumulated CWB
VPD	Vapor pressure deficit

The entire data flow for both monitoring and forecasting indices – from the raw data acquisition, through daily preprocessing and computation, to publication as maps – is managed automatically in Python code, in the CREA cloud infrastructure.

The analyses on *weather-related risk in agriculture* derive from the SQL geodatabase “Weather-related disasters in agriculture” (WDA), which collects the main data on decrees of disaster declaration of the Italian Ministry of Agriculture, food sovereignty and forests and is managed within the the Observatory. The data on WDA are important from a scientific point of view for better understanding the impacts on agriculture of extreme weather events in different time and spatial scales and they can also be useful in the analysis of the “vulnerability” in climatic risk studies. The data can be used for further developments in risk studies matching the extreme weather events (hazards) and their impacts (disasters), also testing the ability of different agrometeorological indices (hazard indices) to better catch the potentially damaging weather extremes in different spatial and time scales (Pontrandolfi et al., 2025).

The *National Agrometeorological Network* (RAN) consists of a set of automatic agrometeorological stations located in agricultural areas which record atmospheric variables as well as soil temperature and water content at different depths plus leaf wetness. The digital infrastructure and the data flow are under construction. In fact, a data management system is being developed to ensure the integrity of the database and the continuity of the raw data flow transmitted from the station dataloggers to the data store in the CREA Azure cloud. Automatic routines for the calculation of derived agrometeorological variables will be also developed.

In the framework of the *National Statistical Program* (PSN), coordinated by the Italian National Institute of Statistics (ISTAT), the Observatory is responsible for the “ItaliaAgrometeo” research sheet, aiming to provide and disseminate official agrometeorological statistics (Parisse et al., 2025). The statistics currently derive from agrometeo-climatic indices obtained from the MADIA dataset as for the agrometeorological monitoring (see above). The indices are spatially summarized at the Italian official administrative units (at NUTS 0, 1 and 2 levels), by providing mean and range values, and are computed at a 10-days, monthly, seasonal and annual scale, based on the “agricultural year” (from the 1st of November- to the 31st of October of the following year)

The *phenological elaborations* are based on the daily minimum and maximum temperature data derived from the Global Surface Summary of the Day (GSOD) of the NCDC/NOAA (considering only the subset of weather stations that covers Italy), which are interpolated as described in Alilla et al. (2022) on the grid of the ICON-EU model. For the phenological forecast maps, the temperature data of the ICON-EU model up to +96h are used. All the maps are derived from phenological models developed for black locust (Alilla et al., 2022), olive and grape (Mariani et al. 2013, Cola et al., 2012) and from the data collected in the field by the IPHEN Network that includes more than 20 regional or national bodies/institutions, up to now, as well as several observers participating on a voluntary basis. The data processing is performed in R and in Python code.

The organization of the online resources of the Observatory is inspired by **FAIR principles**. Most of the published datasets are archived in permanent repositories (mainly on

Zenodo) and are assigned a persistent identifier (DOI). Moreover, they are annotated with detailed metadata. Their discovery (global attributes, which describe the whole dataset) and structural (variable specific attributes) metadata meet the domain relevant community standards.

The website has been created with the web content management system WordPress, and the map galleries have been developed using HTML, CSS, and JavaScript.

Results and Discussion

The website is structured in 5 parts, each accessible from the main navigation menu. Two explanatory sections describing the Observatory (*Chi siamo*) and its team (*Il Team*) are quite static, while the others include several subsections, some of them devoted to the publication of results, and are periodically updated.

The most substantial is the *Dati e analisi* (Data and analyses) section with its six subsections: *Monitoraggio Agrometeo* (Agrometeorological monitoring), *Previsioni agrometeo* (Agrometeorological forecast), *Rischio meteorologico in agricoltura* (Weather-related risk in agriculture), *Programma Statistico Nazionale* (National Statistical Program), *Fenologia delle colture* (Crop phenology) and *Banche Dati* (Databases) which is under construction.

The *Monitoraggio Agrometeo* core is the AgroMIND maps gallery (Fig. 1), which stores maps related to agrometeorological monitoring across Italy, with the aim of supporting agrometeorological services at national level.

The gallery presents several monthly maps of the last 12 months, grouped by the variable analyzed (temperature, rain, evapotranspiration, climatic water balance and agricultural drought), and is regularly updated. Some indices are only relevant in specific months; therefore, the total number of maps produced each month ranges between 20 and 24.

An analogous structure characterizes the *Previsioni agrometeo* subsection, that presents the medium-term forecasting system for agrometeorological indices with the aim to provide an overview of future agrometeorological conditions which could affect crop development across the Italian area. Its core is the AgroFIND map gallery (Fig. 2), that provides daily forecast maps, available up to 5 days, representing, on a national scale, the main agrometeorological conditions.

The *Rischio meteorologico in agricoltura* subsection presents and provide access to datasets and analyses produced by the Observatory about the weather-related risk in agriculture.

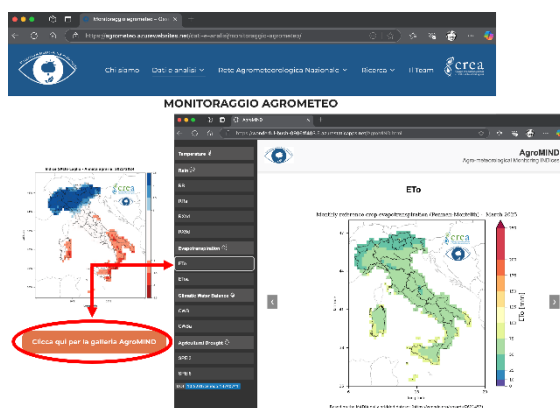


Fig. 1 – The AgroMIND map gallery

Fig. 1- La galleria AgroMIND

The gallery presents several daily maps, grouped by the variable analyzed (temperature, rain, evapotranspiration, climatic water balance and vapor pressure deficit), and is daily updated. Similarly to AgroMIND, some indices are only relevant in specific period of the year.

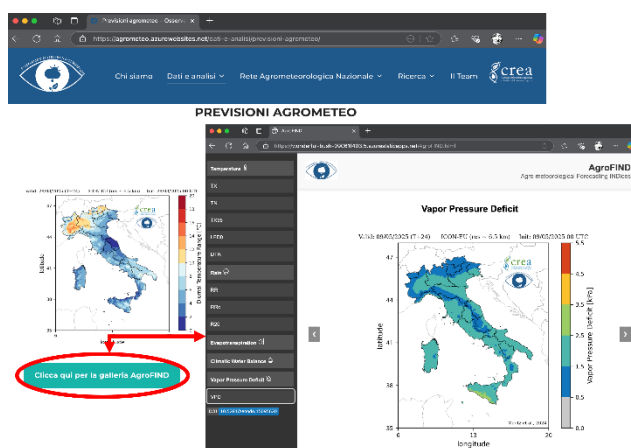


Fig. 2 – The AgroFIND map gallery

Fig. 2- La galleria AgroFIND

The *Programma Statistico Nazionale* subsection aimed at disseminating the official agrometeorological statistics produced in the framework of the “ItaliaAgrometeo” research sheet, to support the design of national and regional policies in agriculture. Therefore, it provides an overview (and an access point) of the related datasets and reports published by the Observatory. The datasets are stored in a Zenodo repository and will feed the Italian HUB of Public Statistic, according to the SDMX “Statistical Data and Metadata eXchange” (ISO IS-17369) standard.

Similarly, the *Fenologia delle colture* subsection highlights all materials published by the Observatory’s researchers in this field allowing visitors to reach them through related links. In this section, it is possible to visualize animation sequences of the phenological maps reported in the weekly IPHEN phenological bulletin published on the website of the Italian National Rural Network (<https://www.reterurale.it/bollettinofeno>). Each sequence shows the phenological development of one crop at a weekly

time step, from pre-flowering stages to the end of flowering (for melliferous species), or to the maturity stage (for some main crops), across Italy. This representation highlights seasonal and spatial variability in phenological timing and its relationship with latitudinal and elevational gradients.

The *Rete Agrometeorologica Nazionale* (national agrometeorological network) section is devoted to all documentation related to the national network of automatic and WMO (World Meteorological Organization) compliant agrometeorological stations which is managed by the CREA Research Centre for Agriculture and Environment. Currently, besides a description of the institutional context, a specific subsection shows the location and makes available detailed metadata on all the operational agrometeorology stations (Fig. 3), while the other pages are still under construction.

Finally, in the *Ricerca* section, information relating to the research activities carried out by the Observatory is available.



Fig. 3 – Geographical distribution of the operational RAN stations

Fig. 3- Distribuzione geografica delle stazioni attive della rete RAN

Conclusions

The Observatory website is both a communication tool and a gateway to its ever-evolving resources. In fact, in addition to providing an overview of all activities and their deliverables, it offers access to regularly updated materials. Among future developments, the Observatory will provide analyses of irrigation water requirements at national and sub-national levels. This is a crucial task, given the intensification of irrigated agriculture and the increase of water scarcity, also in relation to the ongoing climate change.

References

- Alilla R., De Natale F., Epifani C., Parisse B., Cola G., 2022. The flowering of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in Italy: a phenology modeling approach. *Agronomy*, 12, 1623. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071623>
- Cola G., Mariani L., Dal Monte G., Alilla R., Epifani C., Failla O., 2012. A thermal based model for vegetative and reproductive phenology of grapevine. In *Atti del XV Convegno Nazionale di Agrometeorologia*, Palermo, 5-7.
- Dal Monte G., Esposito S., Alilla R., De Natale F., Fanchini D., Pepe A.G., Scaglione M., Parisse B., 2022. La RAN - Rete Agrometeorologica Nazionale: rilancio e prospettive. In Ventura F. Cola G., Poggi, G. M. (eds): *Atti del XXIV Convegno Nazionale di Agrometeorologia. L'Agrometeorologia a supporto dei sistemi colturali e zootecnici*. Bologna: Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari - Università di Bologna, 112-116
- <https://doi.org/10.6092/unibo/amsacta/6936>
- Mariani L., Alilla R., Cola G., Dal Monte G., Epifani C., Puppi G., Failla O., 2013. IPHEN—a real-time network for phenological monitoring and modelling in Italy. *Int J Biometeorol* 57, 881–893 <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0615-x>
- Parisse B., Alilla R., Pepe A.G., De Natale F., 2023a. MADIA - Meteorological variables for agriculture: A dataset for the Italian area. *Data in Brief*, 46, art. no. 108843 <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108843>
- Parisse B., Pepe A.G., Alilla R., De Natale F., 2023b. Meteorological variables for Agriculture: daily time series for the Italian Area (MADIA daily). (v. 1.3) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7621453>
- Parisse B., De Natale F., Alilla R., Bellucci G. M., Pepe A. G., Pontrandolfi A., 2024. Agrometeorological monitoring and forecasting over the Italian area (v1.1). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15095620>
- Parisse B., Alilla R., De Natale F., Pepe A.G., Pontrandolfi A., 2025. ItaliaAgrometeo nel Programma Statistico Nazionale (v1.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14917162>
- Pontrandolfi A., Alilla R., De Natale F., Nuti R., Parisse B., Pepe A.G., 2025. Dataset on Weather-related Disasters in Agriculture (WDA) in Italy 2005–2021. *Data in Brief*. Volume 59. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111323>
- Reinert, D., Prill, F., Frank, H., Denhard, M., Baldauf, M., Schraff, C., Gebhardt, C., Marsigli, C., & Zängl, G., 2024. DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System. Version 2.3.1. Deutscher Wetterdienst. Retrieved from https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modell/documentation/nwv/icon/icon_dbbeschr_aktuell.pdf?view=nasPublication&nn=495490

MONITORING SOYBEAN EVAPOTRANSPIRATION AND PRODUCTIVITY UNDER WATER STRESS THROUGH GROUND AND SATELLITE DATA

MONITORAGGIO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE E DELLA PRODUTTIVITÀ DELLA SOIA IN CONDIZIONI DI STRESS IDRICO ATTRAVERSO DATI A TERRA E SATELLITARI

Giulia Pastacaldi*, Graziano Ghinassi, Leonardo Verdi, Anna Dalla Marta

Department of Agriculture, Food, Environmental and Forestry (DAGRI), University of Florence, Piazzale delle Cascine 18, 50144 Florence, Italy

[*giulia.pastacaldi@unifi.it](mailto:giulia.pastacaldi@unifi.it)

Abstract

Soybean (*Glycine max* L.) is a leguminous crop of significant economic importance; its productivity is closely linked to the availability of water resources. In 2024, an experimental field was established at Chianacce in Arezzo, Italy, with the objective of evaluating the impact on water productivity, agronomic yield, and quality of soybean subjected to three levels of irrigation: full irrigation, 100% of crop evapotranspiration (ET_c); regulated deficit irrigation, 70-100-70% ET_c during the vegetative, flowering, and ripening stages, respectively; and rainfed, 0% ET_c . Sensors were installed in the field to monitor the main meteorological parameters, soil moisture and matric potential to estimate the irrigation requirements of the soybean. Throughout the crop cycle, ground-based and remote sensing measurements of vegetation indices were conducted. These indices were then correlated and utilised to estimate water requirements.

Parole chiave

Coefficiente culturale, produttività idrica, telerilevamento, *Glycine max* L., irrigazione deficitaria regolata

Keywords

Crop coefficient, water productivity, remote sensing, *Glycine max* L., regulated deficit irrigation

Introduction

Soybean (*Glycine max* L.) represents one of the most significant crops worldwide, fulfilling a pivotal function in both livestock and human nutrition (Pagano et al., 2016), acting as a source of protein and fat, as well as in the biofuel industry. On a global scale, there has been a notable surge in soybean consumption, making it the fourth largest cultivated crop (FAOSTAT, 2023). As reported in literature effective irrigation management is a critical factor in achieving maximum productivity in soybean crops (Singh et al., 2023). In current agricultural practice, farmers do not explicitly assess the net irrigation water requirement, which depends on soil water content, crop development stage, and meteorological conditions. Consequently, farmers often over-irrigate, resulting in water loss and potential environmental damage, especially in the context of climate change, where there is an increasing scarcity of water resources. Therefore, it is evident that a reduction in irrigation water applied is needed. Regulated deficit irrigation (RDI) can meet this objective, involving the intentional reduction of the amount of water provided to a crop with respect to the full satisfaction of water requirements (English and Nuss, 1982), but only during specific phenological stages (Morbidini et al., 2023). Significant research has been conducted to develop reliable tools for estimating crop water requirements and net irrigation water requirements. Allen et al. (1998) proposed the most widely employed model, known as the ' $K_c \cdot ET_0$ ' approach, where evapotranspiration (ET_c) is estimated from meteorological data (ET_0) and crop coefficients (K_c), where

K_c is presented in "singular" and "dual" form, determined by conditions, e.g., by any occurrence of soil water stress. Furthermore, many researchers have attempted to estimate crop water requirements and the K_c factor formulating models based on vegetative indices (VI) with satellite and UAV-based data. For instance, Kaplan et al. (2023) estimated cotton crop coefficient by Sentinel 1 and Sentinel-2 (ESA, Copernicus programme) data. Also, Mokhtari et al. (2019) calculated wheat and barley potential evapotranspiration, and single crop coefficient based on energy balance equation using Landsat 8 (NASA) and Sentinel-2 data. Whereas Zhang et al. (2019b) estimated maize crop coefficient from UAV-measured VI formulating two models with good performance. This study applied the models proposed by Zhang et al. (2019b) in order to estimate soybean K_c under soil water stress conditions and determine soybean crop water requirements. By combining agronomic knowledge with Earth observation and/or proximity inspection, this work wants to facilitate decision-making processes for a sustainable utilization of water resources in agricultural contexts.

Materials and methods

The experimental field

The trial was conducted in 2024 at Chianacce (Cortona, Arezzo, Italy: 43° 12' 28.8" N, 11° 50' 25.1" E). An experimental field measuring 0.68 ha was cultivated with soybean var. Avril (Limagrain Italia S.p.A). Soybean was sown on June 2 and harvested on October 15 (cycle

duration: 136 days). The soil was classified as clay loam, consisting of 27.95% clay, 36.7% silt, and 35.35% sand. The field was parted into blocks according to the irrigation regime applied: full irrigation (FI), providing 100% of ET_c throughout the cycle; regulated deficit irrigation (RDI) providing 70%-100%-70% ET_c during the vegetative, flowering and ripening stages, respectively; and rainfed (0% ET_c). During the growing season, the irrigation requirement was calculated using a cumulative water balance approach, considering both rainfall and ET_c . The latter was estimated according to the method proposed by Allen et al. (1998): $ET_c = K_c \times ET_0$, where K_c is the single crop coefficient and ET_0 the reference evapotranspiration, calculated using the Penman-Monteith equation. Sprinkler irrigation was carried out with a self-propelled boom (Irriland SRL). Primary meteorological variables were recorded throughout the crop cycle using a weather station (Atmos 41, Meter Group, Pullman, Washington). Soil moisture and soil matric potential were monitored using in-field sensors (Teros 10, Teros 12, Teros 21, Meter Group, Pullman, Washington). Meteorological data are reported in Figure 1.

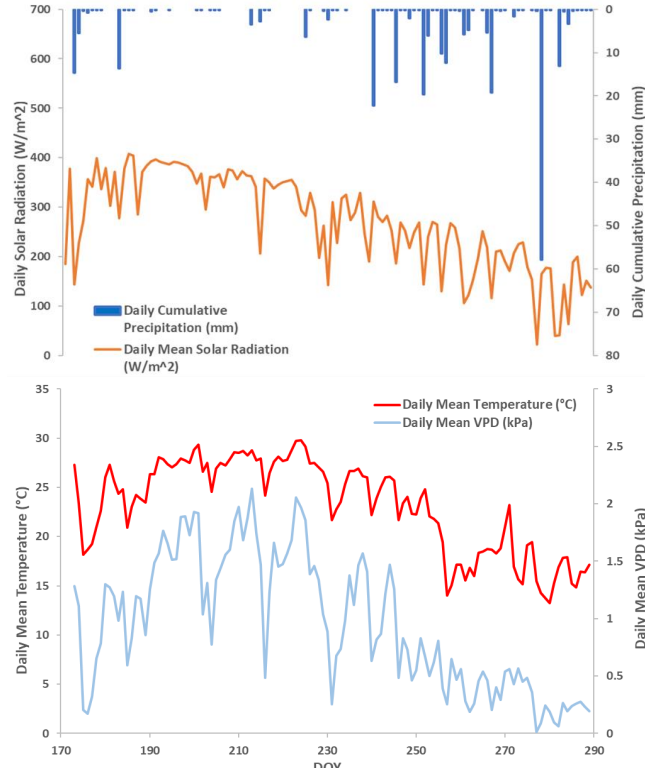


Fig.1 – Andamento giornaliero delle variabili meteorologiche durante il ciclo colturale (21.06.2024-15.10.2024).

Fig.1 – Trends of daily meteorological variables during crop cycle (21.06.2024-15.10.2024).

During the season, ten measurements were taken using hand-held sensors to assess the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, GreenSeeker, PTx Trimble Inc, California), SPAD (Spad 502 Chlorophyll, Meter Group, Pullman, Washington), canopy cover (CC, Canopeo app),

and plant height. At harvest, agronomic yield, total above-ground biomass, harvest index (HI), water productivity (WP), irrigation productivity (WP_{irr}), and grain quality (fat and protein content) were determined.

Remote sensing data

For the test, spectral data were downloaded from 12 surveys carried out by Sentinel-2, a satellite of the Copernicus mission of the European Space Agency's (ESA). Four spectral bands (Green, Red, Red Edge₇₀₅, NIR) were used to calculate four VI: NDVI, Renormalised Difference Vegetation Index (RDVI), Transformed Chlorophyll Absorption Ratio (TCARI), and Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI).

Crop evapotranspiration estimation models

In order to calculate K_c two models proposed by Zhang et al. (2019b) based on VI from satellite data and dual crop coefficient approach by Allen et al. (1998) in water stress condition were used. The VI employed in this study include NDVI, RDVI, TCARI and SAVI. K_c was calculated as the product of the water stress coefficient (K_s) and the basal crop coefficient (K_{cb}), with the addition of the soil evaporation coefficient (K_e). Following Er-Raki et al. (2007), the K_{cb} was equal to the maximum value ($K_{cb,max}$) for soybean, as reported by Allen et al. (1998). Conversely, the K_e was calculated as a function of CC, a metric closely related to NDVI and influenced by the observed frequency of irrigation and rainfall (Zhang et al., 2019b). Finally, the K_s was estimated by combining a model based on the crop water stress index (CWSI) proposed by Jackson et al. (1981) with regression models using vegetative indices, as suggested by Zhang et al. (2019a). The models diverge in the parameter ranges imposed. The results of the two models were then multiplied by ET_0 in order to obtain ET_c . The models were evaluated by calculating the coefficient of determination (R^2) and p-value (p), the latter determined by one-way analysis of variance (ANOVA).

Results e Discussion

As illustrated in Figure 2A, a correlation was found between ground-measured NDVI (NDVI_{ground}) and satellite-derived NDVI (NDVI_{sat}). The two parameters show a direct proportional relationship throughout the crop cycle, with $R^2 = 0.89$. This relationship confirms the possibility of obtaining reliable NDVI values without the need for manual field measurements.

The models used in this study (Zhang et al., 2019b) estimate K_e by determining CC as a function of NDVI. Consequently, the linear relationship between ground-measured CC and CC estimated from NDVI_{sat} was verified (Figure 2B). The results show a strong correlation between the two parameters, with an R^2 of 0.71.

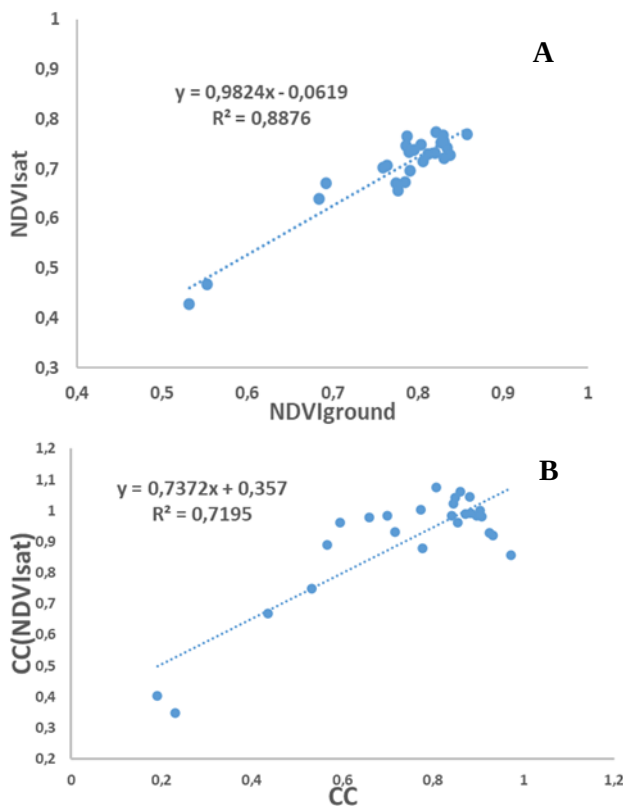


Fig.2 - (A) Correlazione tra NDVI misurato a terra (NDVI_{ground}) e NDVI calcolato sui dati satellitari (NDVI_{sat}); (B) Correlazione tra CC misurato a terra e CC calcolato sui dati satellitari CC(NDVI_{sat}).

Fig.2 - (A) Correlation between ground-based NDVI (NDVI_{ground}) and remote sensing-based NDVI (NDVI_{sat}); (B) Correlation between ground-based CC and remote sensing-based CC CC(NDVI_{sat}).

The ET_c values obtained from each model and differentiated by irrigation treatment are presented in Figure 3. It is evident that model 2 consistently underestimates ET_c compared to the single coefficient ET_c measured in the field (ET_{c_field}) across all crop stages and for both treatments. Specifically, ET_c values from model 2 (ET_{c_mod2}) are 47%, 36% and 65% lower than ET_{c_field} during vegetative, flowering and seed development/ripening stages, respectively. A similar trend is observed for the RDI values, which are 50%, 36% and 62% lower during growth, flowering and seed development/ripening stages, respectively. Likewise, the ET_c values estimated by model 1 are lower than the ET_{c_field} during the flowering stage (by 11% and 14%, for FI and RDI, respectively) and the ripening stage (by 28% and 30%, for FI and RDI, respectively), while they are overestimated during the vegetative stage (by 6% and 4%, for FI and RDI, respectively).

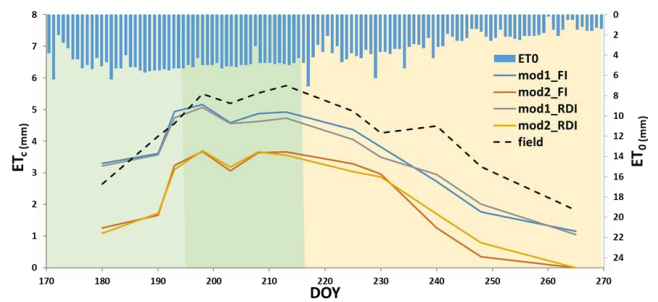


Fig.3 - ET_c ottenuta con: il modello a coefficiente di coltura singolo (field); il modello 1 per il trattamento FI (mod1_FI); il modello 1 per il trattamento RDI (mod1_RDI); il modello 2 per il trattamento FI (mod2_FI); e il modello 2 per il trattamento RDI (mod2_RDI). Gli istogrammi rappresentano l'evapotraspirazione di riferimento (ET_0). I diversi colori sullo sfondo identificano le diverse fasi fenologiche: crescita, fioritura e riempimento/maturazione dei semi, da sinistra a destra.

Fig.3 - ET_c obtained using: single crop coefficient model (field; model 1 for FI treatment (mod1_FI); model 1 for RDI treatment (mod1_RDI); model 2 for FI treatment (mod2_FI); and model 2 for RDI treatment (mod2_RDI). The histograms represent reference evapotranspiration (ET_0). Different colours in the background identify different phenological stages: growth, flowering and ripening, from the left to the right.

As shown in Table 1, the R^2 and significance values for each correlation are presented. No statistically significant differences emerge between the irrigation treatments when ET_c was calculated using the same model. However, the p-values indicate a good level of significance ($p < 0.01$) for the results obtained with model 1 compared to those of model 2. Conversely, a high level of significance ($p < 0.001$) was observed for model 2 when compared to the single crop coefficient model. The coefficient of determination confirms the reliability of the models, with most R^2 values exceeding 0.89. The results from the predictive models suggest a reduced soybean water requirement (ET_c) under water stress conditions, compared to the field-based estimation using the single crop coefficient, which does not account for stress. It is therefore suggested by the models that the irrigation volumes distributed during the crop cycle may be lower than those actually applied.

Tab.1 – Coefficiente di determinazione (R^2) e p-value per ciascuna correlazione tra modelli di ET_c .

Tab.1 – Determination coefficient (R^2) and p-values for each correlation between ET_c models.

	field	mod1_FI	mod2_FI	mod1_RDI	mod2_RDI
field	1	ns	<0,001	<0,05	<0,001
mod1_FI	0,76	1	<0,01	ns	<0,01
mod2_FI	0,80	0,93	1	<0,01	ns
mod1_RDI	0,79	0,98	0,89	1	<0,01
mod2_RDI	0,89	0,91	0,98	0,89	1

Table 2 presents soybean productivity data, including agronomic yield, above-ground biomass production, HI, and grain quality in terms of oil and protein content. For all parameters considered, differences emerged between FI and RDI treatments, although these were not statistically significant. RDI resulted in higher productivity and protein content compared to FI, whereas FI led to a higher oil content. Water productivity and irrigation water productivity, calculated by relating yield to water consumption, were also assessed, with both parameters showing higher values under RDI. Once more, the findings indicate that RDI is a more efficient irrigation strategy than FI, capable of yielding higher returns while using less water.

Tab.2 – La resa, la biomassa totale, l'indice di raccolta (HI), il contenuto di olio nei semi, il contenuto di proteine nei semi, la produttività dell'acqua (WP) e la produttività dell'acqua di irrigazione (WP_{irr}) determinati per ogni trattamento di irrigazione.

Tab.2 – Yield, above-ground total biomass, harvest index (HI), seed oil content, seed protein content, water productivity (WP) and irrigation water productivity (WP_{irr}) determined for each irrigation treatment

	Yield (kg/ha)	Biomass (kg/ha)	HI	Seed oil content (%)	Seed protein content (%)	WP (kg/m ³)	WP _{irr} (kg/m ³)
FI	2699	7745	0,3	25,6a	30,9a	5,2	10,4
RDI	3074	7915	0,4	25,4b	31,1b	7,2	17,9
Rainfed	1272	3883	0,3			4,9	

Conclusion

In conclusion, this study tested a range of irrigation treatments tailored to soybean needs and evaluated their impacts on productivity and grain quality. Furthermore, soybean water requirements under optimal and water stress conditions were estimated based on weather data and vegetation indices derived from satellite imagery. The results confirm that integrating agrometeorological monitoring with remote sensing facilitates the understanding of the complex interactions between plants, soil, and water. In addition, this research provides important insights for farmers, particularly in the context of climate change adaptation.

References

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. In: *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56, p. 300
- English M.J. and Nuss G.S. (1982) Designing for deficit irrigation. In: *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108, pp. 91–106
- Er-Raki S., Chehbouni A., Guemouria N., Duchemin B., Ezzahar J., Hadria R. (2007) Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. In: *Agricultural Water Management* 87, pp. 41–54
- FAOSTAT 2023 <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Pinter P.J. (1981) Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator. In: *Water resources research* 17, pp. 1133–1138
- Kaplan G., Fine L., Lukyanov V., Malachy N., Tanny J., Rozenstein O. (2023) Using Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery for estimating cotton crop coefficient, height, and Leaf Area Index. In: *Agricultural Water Management* 276
- Mokhtari A., Noory H., Pourshakour, F., Haghighatmehr P., Afrasiabian Y., Razavi M., Fereydooni F., Sadeghi Naeni A. (2019) Calculating potential evapotranspiration and single crop coefficient based on energy balance equation using Landsat 8 and Sentinel-2. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 154, pp. 231–245
- Morbidini F., Barrera W., Zanin G., Verdi L., Camarotto C., Ghinassi G., Maucieri C., Dalla Marta A., Borin M. (2024) The state of the art on deficit irrigation in soybean. In: *Irrigation and Drainage* 73, pp. 757–769.
- Pagano M.C., Miransari M. (2016) The importance of soybean production worldwide, in: *Abiotic and Biotic Stresses in Soybean Production*. In: Elsevier, pp. 1–26
- Singh B., Kaur G., Quintana-Ashwell N.E., Singh G., Lo T.H., Nelson K.A. (2023) Row spacing and irrigation management affect soybean yield, water use efficiency and economics. In: *Agricultural Water Management* 277
- Zhang L, Zhang H, Niu Y, Han W. (2019a) Mapping Maize Water Stress Based on UAV Multispectral Remote Sensing. In: *Remote Sensing* 11, p. 605.
- Zhang Y, Han W, Niu X, Li G. (2019b) Maize Crop Coefficient Estimated from UAV-Measured Multispectral Vegetation Indices. In: *Sensors* 19, p. 5250

OPTIMAL MAIZE SEEDING DENSITY AND SPRINKLER IRRIGATION: AN ON-FARM EXPERIMENTATION

DENSITÀ DI SEMINA OTTIMALE DEL MAIS E IRRIGAZIONE PER ASPERSIONE: UNA ON-FARM EXPERIMENTATION

Gaetano Roberto Pesce^{1*}, Luca Cestaro², Carmelo Maucieri¹

¹ Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente (DAFNAE), Università degli Studi di Padova, Agripolis, Viale dell'Università 16 - 35020 Legnaro (PD)

² Azienda Fratelli Cestaro, Via Santa Lucia 85, 45026 Lendinara (RO).

*gaetano.pesce@unipd.it

Abstract

The choice of maize seeding density is crucial for maximizing productivity. Indeed, excessively high densities can reduce yields due to competition for light, water, and nutrients. Conversely, densities that are too low fail to fully exploit the crop's productive potential. However, there is no generic optimal seeding density for maize that applies to all hybrids, is suitable for any environmental condition, and is independent of input management. For these reasons, in collaboration with a lighthouse farm in the Polesine area (Veneto – Italy), where maize is traditionally grown, a large-scale on-farm experimentation was conducted in 2024 to assess the productive response of a new maize hybrid belonging to FAO class 500 to different seeding densities and two sprinkler irrigation systems (rainger and rain gun). The results provide valuable insights for the farmers involved in the experiment.

Parole chiave

Investimento unitario, *Zea mays* L., Rotolone, Rainger

Keywords

Seeding density, *Zea mays* L., rain gun, Rainger

Introduzione

La densità di semina del mais influenza la resa, oltre alla qualità e i margini economici della sua coltivazione. In generale, a densità più elevate corrispondono rese più alte, sia in termini di granella, sia di biomassa verde (Ferreira et al., 2014). Tuttavia, la risposta produttiva del mais all'incremento dell'investimento unitario non è lineare. Essa, infatti, mostra un andamento curvilineo con un massimo a una densità ottimale (Zhai et al., 2018). Per comprendere tale andamento bisogna considerare che, se aumenta il numero di piante per unità di superficie, aumenta di conseguenza la competitività intraspecifica che si instaura per luce, acqua e nutrienti. Più precisamente, l'aumento della densità di semina, oltre una certa soglia, riduce esponenzialmente la resa in granella e la biomassa per singola pianta, mentre l'harvest index (HI) diminuisce linearmente (Zhai et al., 2018). Quelle appena descritte sono alcune delle manifestazioni macroscopiche delle risposte che le piante forniscono agli stimoli derivanti dalla competizione (Bennett et al., 2016). Quest'ultima, infatti, induce cambiamenti nei tratti funzionali e morfologici delle piante, come l'allocazione delle risorse o la dimensione degli organi. In altre parole, la gerarchia dei tratti può cambiare e in particolare, in presenza di forte competizione per le risorse, soprattutto la luce, il tratto che il mais privilegia è la crescita in altezza (DeMalach et al., 2016; Carmona et al., 2019). Si pone dunque il problema di determinare la densità di semina ottimale, che varia in base alle condizioni pedoclimatiche, alla durata del ciclo della coltura e all'obiettivo produttivo (granella o biomassa) (Assefa et al., 2016).

In questo lavoro sono presentati i primi risultati di una on-farm experimentation (OFE) su larga scala in cui sono state messe a confronto le risposte produttive a diverse densità di semina di un ibrido di mais appartenente alla classe FAO 500. Insieme alla densità di semina, è stato studiato l'effetto di due diversi impianti irrigui per asperzione. La sperimentazione è stata svolta con l'obiettivo di fornire indicazioni utili per massimizzare la produttività della maidicoltura polesana nello scenario del cambiamento climatico.

Materiali e metodi

La sperimentazione è stata condotta in un'azienda del Polesine, nella provincia di Rovigo (45°00'50"N, 11°35'55"E, 5 m sul livello del mare), dove il mais è tradizionalmente coltivato. Gli appezzamenti su cui sono stati allestiti i campi sono due, l'uno sito nel comune di San Bellino (RO) il cui terreno è classificato come franco, l'altro nel comune di Lendinara (RO), il cui terreno è classificato come franco argilloso (USDA, 2017).

Il clima locale è temperato con estati umide e la temperatura media del mese più caldo è sopra i 22 °C (subtropicale umido Cfa secondo la classificazione di Köppen).

La sperimentazione è stata condotta in un'azienda agricola reale, su larga scala e nell'ambito di interazioni reciproche tra ricercatori e agricoltori, secondo i principi OFE (Giannini e Marraccini, 2023). L'appezzamento di San Bellino si estende su una superficie di 2,6 ha, quello di Lendinara su 10 ha. Sui campi sono state individuate delle parcelle principali a diverse densità di semina di dimensioni non inferiori a 400 m².

Per il campo di Lendinara sono state considerate le parcelle con le seguenti densità di semina: 81, 82, 85, 87, 90, 94 e 99 mila semi/ha. Per il campo di San Bellino sono state considerate le parcelle con le seguenti densità di semina: 72, 82, 84, 85, 88, 97 mila semi/ha.

Un ibrido appartenente alla classe FAO 500, il Cursor della Syngenta, è stato impiegato in entrambi i campi. Per quanto riguarda la fertilizzazione, sono stati distribuiti 170 kg di N ha⁻¹, 140 kg di P₂O₅ ha⁻¹ e 100 kg di K₂O ha⁻¹ come pollina prima dell'aratura, effettuata tra novembre e dicembre. I campi sono stati arati a una profondità di circa 40 cm e il letto di semina è stato preparato con un erpice rotante equipaggiato con un rullo compattatore. La semina è stata effettuata il 13 aprile 2024, a una profondità di 5 cm e con una distanza tra le file di 75 cm. Le infestanti sono state controllate con Adengo® Xtra. In entrambi i campi l'irrigazione è stata gestita in modo da evitare, per quanto possibile, stress idrici con visite *in situ* e attraverso il monitoraggio dell'umidità del suolo con datalogger ZL6 (Meter®), i cui sensori sono stati collocati a tre profondità: 10 cm, 30 cm e 50 cm.

I due impianti irrigui utilizzati nella sperimentazione sono stati:

- un irrigatore semovente ad ala avvolgibile (rotolone), impiegato sul campo di Lendinara;
- un'ala a movimento continuo ad avanzamento frontale (rainger), impiegata a San Bellino.

I volumi irrigui forniti sono stati 175 mm con "rotolone", distribuiti in 5 interventi irrigui dal 18 giugno al 1° agosto. Mentre con rainger sono stati forniti 133 mm, distribuiti in 8 interventi dal 18 giugno al 7 agosto.

Risultati e discussione

Il campo di Lendinara, irrigato con "rotolone", ha mostrato rese mediamente più alte, a parità di densità di semina, rispetto a quello irrigato con rainger (in media +23%) (Fig. 1 e Fig. 2). Inoltre, mentre il picco di resa a Lendinara (18,6 t/ha) è stato osservato a 94.000 semi/ha (Fig. 1), a San Bellino è stato osservato a 88.000 semi/ha, con 15,3 t/ha (Fig. 2). Dal momento che le località sono a breve distanza l'una dall'altra (circa 10 km) e quindi hanno avuto lo stesso decorso termopluviometrico, la notevole superiorità delle performance ottenute a Lendinara si spiega con il maggiore volume irriguo fornito con "rotolone" e poi con la più fine tessitura del terreno, che ha consentito l'immagazzinamento di un maggiore volume di acqua.

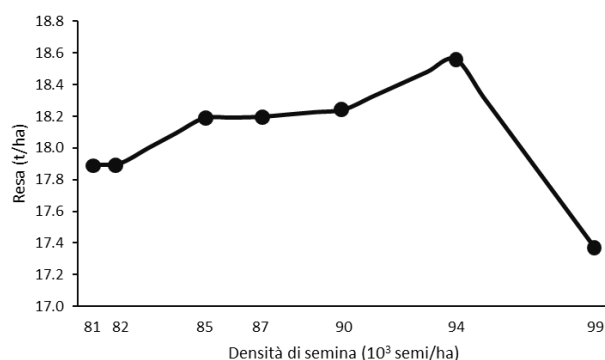


Fig. 1 – Rese in granella (esprese al 13% di umidità) ottenute in risposta alle diverse densità di semina del mais irrigato con rotolone.

Fig. 1 – Grain yields (expressed at 13% moisture) obtained in response to different seeding densities of irrigated maize under rain gun irrigation system.

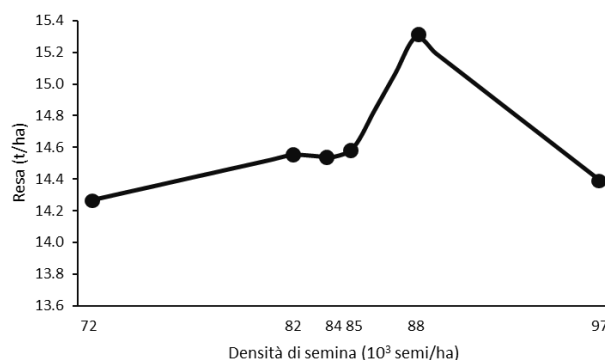


Fig. 2 – Rese in granella (esprese al 13% di umidità) ottenute in risposta alle diverse densità di semina del mais irrigato con rainger.

Fig. 2 – Grain yields (expressed at 13% moisture) obtained in response to different seeding densities of irrigated maize under rainger irrigation system.

Conclusioni

La valutazione della densità di semina del mais è fondamentale per ottimizzare la produttività e garantire una gestione sostenibile delle risorse agricole. I risultati ottenuti dallo studio evidenziano come una corretta scelta della densità di semina possa massimizzare la resa in granella, riducendo nel contempo la competizione intraspecifica per luce, acqua e nutrienti.

Le notevoli differenze registrate nelle due località dimostrano ancora una volta l'importanza di adattare la densità di semina in base alle caratteristiche del suolo e alle pratiche di irrigazione adottate.

Inoltre, i risultati di questo studio, ottenuti attraverso una OFE, possono fornire indicazioni pratiche per gli agricoltori, migliorando la loro capacità di prendere decisioni informate riguardo alla densità di semina e alla gestione delle risorse.

Ringraziamenti

Studio Finanziato dall'Unione europea - Next Generation EU, Missione 4 Componente 2 CUP C93C22002790001, Spoke 4, Work Package 4.2, Task 4.2.1 "Farm network setup (Living Labs): a network of farms representative of the different agricultural systems to apply innovative technologies for the sustainable management of crops, animals and forests".

Bibliografia

Assefa Y., Prasad P., Carter P., Hinds M., Bhalla G., Schon R., Jeschke M., Paszkiewicz S., Ciampitti I., 2016. Yield Responses to Planting Density for US Modern Corn Hybrids: A Synthesis-Analysis. *Crop Science*, 56:2802-2817.

Bennett J., Riibak K., Tamme R., Lewis R., Pärtel M., 2016. The reciprocal relationship between competition and intraspecific trait variation. *Journal of Ecology*, 104.

Carmona C., Bello F., Azcárate F., Mason N., Peco B., 2019. Trait hierarchies and intraspecific variability drive competitive interactions in Mediterranean annual plants. *Journal of Ecology*, 107:2078-2089.

DeMalach N., Zaady E., Weiner J., Kadmon R., 2016. Size asymmetry of resource competition and the structure of plant communities. *Journal of Ecology*, 104(4): 899-910.

Ferreira G., Alfonso M., Depino S., Alessandri E., 2014. Effect of planting density on nutritional quality of green-chopped corn for silage. *Journal of dairy science*, 97(9): 5918-5921.

Giannini V., Marraccini E., 2023. On-farm experimentation in agronomic research: an Italian perspective. *Italian Journal of Agronomy* 18.

USDA, 2017. Soil Survey Manual—Handbook No. 18. United States Department of Agriculture, 603 pp.

Zhai L., Xie R., Ming B., Li S., Ma D., 2018. Evaluation and analysis of intraspecific competition in maize: A case study on plant density experiment. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10):2235-2244.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR THE ESTIMATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION

IMPIEGO DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE PER LA STIMA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE DI RIFERIMENTO

Giorgia Raimondi^{1*}, Jacopo Bonato², Carmelo Maucieri¹,

¹ Department of Agronomy, Food, Natural Resources, Animals and Environment – DAFNAE, University of Padua, Agripolis Campus, Viale dell'Università 16, Legnaro, PD, Italy.

² Independent researcher, Rome, Italy.

[*giorgia.raimondi@unipd.it](mailto:giorgia.raimondi@unipd.it)

Abstract

Reference evapotranspiration (ET_0) is vital for hydrology, irrigation, and crop modeling, but difficult to estimate due to costly direct methods and data-intensive models. This study evaluates a Support Vector Regression (SVR) model using limited inputs—solar radiation (R_s), temperature, relative humidity, and precipitation—to estimate daily ET_0 across diverse spatial locations in northeastern Italy. The SVR model, with all variables, achieved high accuracy (R^2 : 0.96), comparable to the Penman-Monteith method. Removing precipitation or relative humidity had little effect, while excluding R_s or temperature reduced performance. SVR demonstrated strong robustness and generalizability, highlighting its potential as an effective tool for sustainable water management in the context of climate change.

Parole chiave

Support Vector Machine per regressioni - Evapotraspirazione di riferimento – Equazione di Penman–Monteith

Keywords

Support Vector Machine for regression - Reference evapotranspiration - Penman–Monteith equation

Introduzione

L'evapotraspirazione è una componente chiave del ciclo idrologico. Una sua stima accurata è essenziale per una corretta gestione irrigua e per la modellizzazione colturale. Esistono diversi metodi, diretti ed indiretti, per misurarla o stimarla attraverso equazioni, ciascuno con proprie limitazioni intrinseche (Anapalli et al., 2018; Martí et al., 2024). Il metodo di riferimento FAO-56 Penman–Monteith ($ET_0 \times K_c$) è considerato il più affidabile ed è ampiamente utilizzato, sebbene mostri come limitazione la necessità di disporre di dati meteorologici completi, spesso non disponibili (Fang et al., 2024). Recentemente, l'impiego dell'intelligenza artificiale ha mostrato un notevole potenziale come alternativa (Kumar et al., 2024). Tra i diversi approcci, le reti neurali si sono distinte per la loro capacità di modellare relazioni input-output senza necessità di conoscere i meccanismi fisici sottostanti (Makwana et al., 2023). Tali algoritmi richiedono tuttavia dataset ben strutturati per la calibrazione dei parametri e la stima dell' ET_0 . In tale contesto, il presente studio valuta un modello predittivo (*Supporto Vector Regression*) addressato su un numero limitato di variabili, per stimare ET_0 su dei dati provenienti da località geografiche non utilizzato durante l'addestramento, confrontandone le prestazioni con il metodo Penman-Monteith. Viene anche esaminato, l'effetto della rimozione di ciascuna variabile di input sull'accuratezza della stima.

Materiali e Metodi

Lo studio, condotto nella Regione Veneto (Italia nord-orientale), ha selezionato 16 stazioni meteorologiche come rappresentanti delle diverse zone climatiche derivanti dalla variegata morfologia regionale, caratterizzata da fattori geografici come differente altitudine, distanza dal mare e correnti costiere. I dati meteorologici utilizzati (1994-2022), forniti da ARPAV, includono temperatura (T), radiazione solare (R_s), precipitazioni (R), umidità relativa (RH) e ET_0 calcolata con l'equazione di Penman–Monteith. L'analisi include l'uso della *Mutual Information analysis* per quantificare la dipendenza delle variabili, e per quantificare la riduzione di incertezza su ET_0 associata alla conoscenza di una singola variabile meteorologica. È stato poi utilizzato il *t-distributed Stochastic Neighbor Embedding* (t-SNE) per la riduzione dimensionale e misurata la correlazione di Spearman tra variabili. Si è quindi adottato il modello SVR per prevedere ET_0 . Per testare la capacità di generalizzazione spaziale le 16 stazioni sono state suddivise in 5 gruppi indipendenti ed è stata adottata una validazione incrociata. Ad ogni iterazione, quattro gruppi sono stati usati per il training e uno per il test. I dati di test provengono sempre da stazioni meteorologiche non utilizzate per l'addestramento del SVR. I parametri gamma e sigma del kernel gaussiano applicato al SVR sono stati ottimizzati mediante grid search sui valori gamma = [0.01, 0.1, 1, 10, 100], sigma = [0.1, 1, 10, 100], usando R^2 come criterio. Gli indicatori di performance utilizzati sono R^2 e RMSE.

Risultati

Il grafico t-SNE (Fig. 1) ha evidenziato quattro cluster basati sull'altitudine delle stazioni meteorologiche, con il primo gruppo a bassa altitudine (da -3 a 49 m s.l.m.), il secondo a altitudini intermedie (da 90 a 284 m s.l.m.) e i gruppi terzo e quarto a alte altitudini (>1000 m s.l.m.).

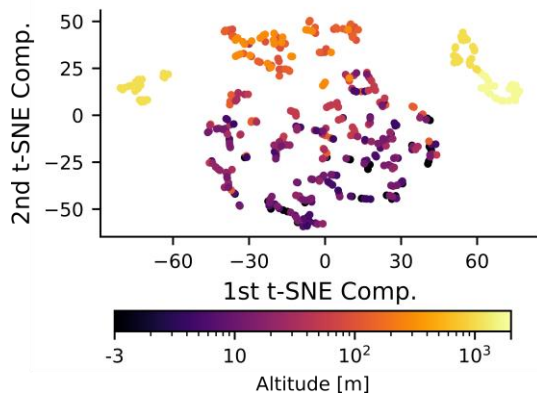


Fig.1 - grafico t-SNE delle medie annuali delle sette variabili meteorologiche (R_s , T_{max} , T_{avg} , T_{min} , P , RH_{min} , RH_{max}) per le 16 stazioni. Ogni punto rappresenta la proiezione t-SNE dei dati di un anno per stazione, codificato a colori in base all'altitudine.

Fig.1 - t-SNE plot of annual averages for seven meteorological variables (R_s , T_{max} , T_{avg} , T_{min} , P , RH_{min} , RH_{max}) across sixteen stations. Each point represents the t-SNE projection of one year's data per station, color-coded by altitude.

La correlazione tra le variabili meteorologiche (Fig. 2) ha mostrato che R_s è positivamente correlata con le temperature (T_{max} , T_{avg} , T_{min}) e negativamente con precipitazioni e umidità dell'aria. Le precipitazioni sono correlate positivamente con l'umidità e negativamente con le temperature.

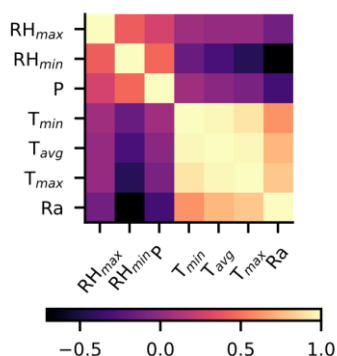


Fig.2 - Matrice di correlazione di Spearman per tutte le variabili meteorologiche monitorate (R_s , T_{max} , T_{avg} , T_{min} , P , RH_{min} , RH_{max}) nelle 16 stazioni.

Fig.2 - Mean Spearman correlation matrix of all monitored meteorological variables (R_s , T_{max} , T_{avg} , T_{min} , P , RH_{min} , RH_{max}) across the sixteen stations.

L'informazione mutua tra le variabili e ET_0 ha evidenziato che R_s è la variabile più influente, seguita dalle temperature, mentre P è la variabile meno predittiva (Fig. 3).

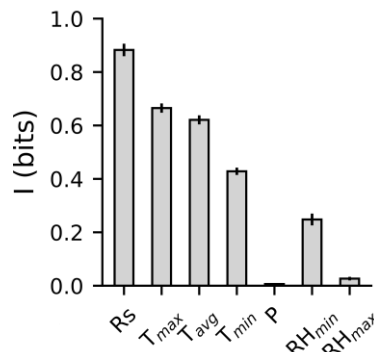


Fig.3 - Informazione mutua tra ciascuna variabile meteorologica (R_s , T_{max} , T_{avg} , T_{min} , P , RH_{min} , RH_{max}) ed ET_0 attraverso le 16 stazioni.

Fig.3 - Average mutual information between each meteorological variable (R_s , T_{max} , T_{avg} , T_{min} , P , RH_{min} , RH_{max}) and ET_0 across the 16 stations.

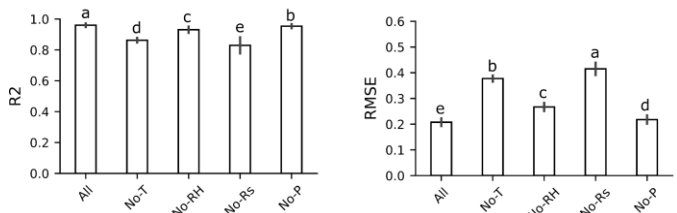


Fig.4 - Mediana ed errore standard di R^2 per le 16 stazioni utilizzando diversi set di input: 'All' (tutte le variabili); 'No-T' (senza Temperatura); 'No-RH' (senza Umidità Relativa); 'No-Rs' (senza Radiazione Solare); 'No-P' (senza Precipitazioni). I modelli hanno utilizzato la validazione incrociata a 5 blocchi. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0.05$).

Fig.4 - Median and SE of R^2 for 16 stations using different input sets: 'All' (all variables); 'No-T' (no Temperature); 'No-RH' (no Relative Humidity); 'No-Rs' (no Solar Radiation); 'No-P' (no Precipitation). Models used five-fold cross-validation. Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

Il modello SVR ha mostrato buone prestazioni predittive per ET_0 sui dati di test non visti, con un R^2 di 0.96 ± 0.01 e un RMSE di 0.21 ± 0.01 . I residui medi tra le stazioni indicano una performance simile in tutte le località dello studio.

L'eliminazione di R_s riduce l' R^2 per la stima di ET_0 del 13%, mentre l'eliminazione delle temperature comporta una riduzione del 10%. La rimozione di RH e P comporta riduzioni più piccole della performance predittiva. Nonostante ciò, il modello SVR, sviluppato con meno variabili rispetto al metodo FAO Penman-Monteith, rimane

applicabile anche con variabili mancanti, pur con una riduzione dell'accuratezza (Fig.4).

Discussione

Il modello SVR ha evidenziato un'elevata capacità di generalizzazione, stimando accuratamente l'ET₀ in aree geografiche non incluse nel dataset di addestramento. Tale risultato ne conferma il potenziale in applicazioni reali, caratterizzate da marcata eterogeneità spaziale e dove frequentemente si riscontra una copertura storica meteorologica limitata o discontinua. Un modello capace di prevedere l'ET₀ senza dati sito-specifici si dimostra, quindi, altamente adattabile e scalabile.

La sua robustezza è stata confermata anche in condizioni di input ridotto, sebbene l'esclusione delle variabili chiave, come radiazione solare (R_s) e temperatura, abbia compromesso la precisione predittiva più di altre variabili (vento, umidità, precipitazioni). Tali risultati sono coerenti con studi precedenti che riconoscono R_s (Koudahe et al., 2018) e Temperatura (Paredes and Pereira, 2019) come determinanti primarie di ET₀. Sebbene il modello non evidenzia bias specifici tali da compromettere l'accuratezza della stima dell'ET₀, questa tipologia di approcci richiede un dataset strutturato di variabili in input per l'addestramento dell'algoritmo, a differenza delle formule empiriche di stima (es. Hargreaves) che si basano su singole variabili meteorologiche giornaliere locali. Tuttavia, una volta ottimizzato, anche utilizzando un numero limitato di variabili meteorologiche, l'algoritmo è in grado di fornire stime affidabili di ET₀, rappresentando così un'alternativa valida ai metodi tradizionali, i quali spesso richiedono l'accesso a parametri ambientali complessi da misurare o stimare.

L'approccio SVR si dimostra quindi promettente per applicazioni in ambito agricolo e nella gestione sostenibile delle risorse idriche, specialmente in contesti con limitata disponibilità di dati. A confronto, le tecniche di telerilevamento risultano meno operative a causa di vincoli tecnici e temporali.

Conclusioni

Lo studio dimostra che il modello SVR è affidabile e generalizzabile per la stima di ET₀, con prestazioni comparabili al metodo di Penman-Monteith. Il modello è poco sensibile all'esclusione di precipitazioni e umidità, ma fortemente dipendente da R_s e temperatura. La sua robustezza lo rende adatto a contesti con dati carenti, offrendo una soluzione efficace per una gestione irrigua sostenibile in scenari di cambiamento climatico.

Bibliografia

- Anapalli, S. S., Fisher, D. K., Reddy, K. N., Wagle, P., Gowda, P. H., & Sui, R. (2018). Quantifying soybean evapotranspiration using an eddy covariance approach. *Agricultural Water Management*, 209, 228-239.
- Barrera, W., Ferrise, R., & Dalla Marta, A. (2023). Understanding trends and gaps in global research of crop evapotranspiration: a bibliometric and thematic review. *Italian Journal of Agrometeorology*, 2023, 13-35.
- Fang, S. L., Lin, Y. S., Chang, S. C., Chang, Y. L., Tsai, B. Y., & Kuo, B. J. (2024). Using artificial intelligence algorithms to estimate and short-term forecast the daily reference evapotranspiration with limited meteorological variables. *Agriculture*, 14(4), 510.
- Fratianni, S., & Acquafredda, F. (2017). The climate of Italy. *Landscapes and landforms of Italy*, 29-38.
- Koudahe, K., Djaman, K., & Adewumi, J. K. (2018). Evaluation of the Penman-Monteith reference evapotranspiration under limited data and its sensitivity to key climatic variables under humid and semiarid conditions. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(3), 1239-1257.
- Kumar, S., Sharda, R., Goyal, P., Siag, M., & Kaur, P. (2024). Reference Evapotranspiration Modelling Using Artificial Neural Networks Under Scenarios of Limited Weather Data: A Case Study in the Malwa Region of Punjab. *Environmental Modeling & Assessment*, 29(3), 589-620.
- Makwana, J. J., Tiwari, M. K., & Deora, B. S. (2023). Development and comparison of artificial intelligence models for estimating daily reference evapotranspiration from limited input variables. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100115.
- Martel, M., Glenn, A., Wilson, H., & Kröbel, R. (2018). Simulation of actual evapotranspiration from agricultural landscapes in the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 105-118.
- Martí, P., López-Urrea, R., Mancha, L. A., González-Altozano, P., & Román, A. (2024). Seasonal assessment of the grass reference evapotranspiration estimation from limited inputs using different calibrating time windows and lysimeter benchmarks. *Agricultural Water Management*, 300, 108903.
- Paredes, P., & Pereira, L. S. (2019). Computing FAO56 reference grass evapotranspiration PM-ET₀ from temperature with focus on solar radiation. *Agricultural water management*, 215, 86-102.

PRECISION IRRIGATION IN THE TRENTINO REGION: HOW SWAB TACKLES THE WATER CHALLENGES

IRRIGAZIONE DI PRECISIONE IN TRENTINO: COME SWAB AFFRONTA LE SFIDE IDRICHE

Fabio Zottele^{1*}, Cecilia Mattedi¹, Francesco Centurioni¹, Stefano Corradini¹

¹Fondazione Edmund Mach, Centro di Trasferimento Tecnologico, Agrometeorologia e irrigazione, Via Edmondo Mach 1, 38098 San Michele all'Adige (TN)

*fabio.zottele@fmach.it

Abstract

This study presents SWAB (Soil-Water-Atmosphere Advanced Budget), an advanced model for precision irrigation of grapevine, apple, and olive orchards in alpine regions, developed to address the needs of the agricultural sector and policymakers. Based on the FAO-56 water balance methodology, SWAB enhances this approach by incorporating advanced parameterizations of the Soil-Plant-Atmosphere Continuum (SPAC), specifically adapted to the pedoclimatic variability of the Trentino region.

The region encompasses approximately 20,000 irrigated hectares of orchards and vineyards, with a Gross Production Value (GPV) of 22.7 kEUR/ha at current prices (updated 2022, source: ISPAT), highlighting the critical role of irrigation in stabilizing productive yields and supporting the local economy. Although annual precipitation is abundant, including during the growing season for apples and grapevines, decreasing snowfall is progressively eroding spring water reserves, intensifying competition among economic sectors (agriculture, tourism, and hydropower).

In the Trentino context, irrigation water is managed by Land Improvement and Irrigation Consortia without fully considering crop-specific needs. SWAB estimates irrigation requirements and, through the IRRITRE project, supports irrigation Consortia in optimizing short-term water distribution. This integrated approach promotes sustainable water resource management, thereby strengthening the resilience of Trentino's agriculture in the face of climate change.

Parole chiave

Irrigazione di precisione, SWAB, Agricoltura di montagna, FAO56, gestione irrigua

Keywords

Precision irrigation, SWAB, Alpine agriculture, FAO56, SPAC, Water management

Introduzione

Presentiamo SWAB (Soil-Water-Atmosphere Advanced Budget), un modello avanzato e altamente operativo sviluppato per l'irrigazione di precisione di vite, melo e olivo nelle regioni alpine, concepito per rispondere concretamente alle esigenze del settore agricolo e dei decisori politici. SWAB si basa sulla metodologia del bilancio idrico descritta nel documento FAO "Irrigation and Drainage Paper No. 56" (Allen et al., 2018), che fornisce una solida struttura per la stima del fabbisogno idrico delle colture.

Tuttavia, SWAB estende e migliora tale metodologia integrando parametrizzazioni avanzate del Sistema Suolo-Pianta-Atmosfera (SPAC, Kramer and Boyer 1995) adattate specificamente al contesto alpino, caratterizzato da una notevole variabilità delle proprietà dei suoli e dei microclimi, che richiede quindi un approccio flessibile e allo stesso tempo preciso. Inoltre, il modello integra parametri specifici delle colture, adattati agli obiettivi di produzione di alta qualità dell'agricoltura trentina, assicurando così il rispetto delle rigorose regole dei disciplinari di produzione di mele e uve da vino.

SWAB è stato sviluppato per il contesto trentino, in cui circa 22162 ettari di area irrigata sono dedicati quasi equamente a frutteti e vigneti. La produzione di mele è di 510010

tonnellate con un valore della produzione lorda vendibile (PLV) a prezzi correnti di circa 322 milioni di euro. I vigneti producono invece circa 113500 tonnellate di uve bianche e rosse da vino, con una PLV di circa 180 milioni di euro. Il valore medio della PLV per ettaro, pari a 22674 euro, sottolinea l'importanza economica fondamentale dell'agricoltura irrigata nella regione (Fonte: ISPAT 2022, Istituto di statistica della provincia di Trento).

L'agricoltura nell'arco alpino non conosce condizioni di aridità durante la stagione vegetativa e si registrano precipitazioni significative, variabili di anno in anno, ed anche di tipo estremo per tutto il periodo che va da fine marzo ad inizio ottobre (mediamente 5755 ± 1568 m³/ha registrati nel periodo 1984-2024). Tuttavia, è già stato osservato un calo rilevante delle nevicate durante la stagione invernale, che, in tendenza, può ridurre le riserve idriche disponibili in primavera, cruciali all'inizio della stagione vegetativa (Beniston et al. 2018). Queste risorse idriche (serbatoi, laghi, corsi d'acqua) vengono inoltre utilizzate per scopi multipli, tra cui la sostenibilità ecologica – ad esempio, garantendo il deflusso minimo vitale per gli organismi acquatici – nonché per il turismo e la produzione di energia idroelettrica, aumentando di conseguenza la competizione

per le risorse idriche, specialmente negli inverni e nelle primavere più secchi.

Nel contesto trentino di agricoltura di montagna, l'acqua irrigua è gestita dai Consorzi di Miglioramento Fondiario e Irrigui che mirano a garantire un accesso equo alla risorsa irrigua a tutti gli associati tenendo in considerazione in certa misura delle condizioni meteorologiche, ma in larga parte indipendentemente dal tipo di coltura o dalle caratteristiche del suolo. SWAB mira a stimare le esigenze irrigue locali stimando i fabbisogni idrici necessari per coprire le necessità irrigue nel contesto trentino e fornendo al tempo stesso raccomandazioni ai Consorzi Irrigui per una gestione di precisione nel breve periodo, come nel caso del progetto IRRITRE (Centurioni et al., 2025, Gattolin et al., 2024).

Questo studio si concentra sulla stima dei quantitativi idrici necessari per soddisfare le esigenze irrigue nel contesto alpino, aprendo la possibilità di analizzare tendenze di medio e lungo termine. I risultati mostrano come un approccio modellistico integrato possa supportare una gestione sostenibile delle risorse idriche nell'agricoltura montana, rafforzando la resilienza del settore di fronte ad una maggiore competizione per l'acqua e per la mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici.

Materiali e metodi

Nell'area oggetto di studio, le condizioni dei suoli vengono monitorate mediante sensori in campo, quali tensiometri e sonde per il contenuto idrico del suolo, e caratterizzate spazialmente tramite la "Carta dei Suoli Agricoli Trentini" che include 244 tipologie pedologiche distinte, suddivise in 2020 orizzonti, per una superficie complessiva di 33.445 ha. Le variabili atmosferiche sono rilevate tramite una rete di 92 stazioni agro meteorologiche distribuite sul territorio provinciale coltivato. La fenologia delle colture viene monitorata attraverso il sistema "Smart Monitoring" (Andreis et al., 2016), una piattaforma centralizzata e armonizzata per la raccolta sistematica di dati di campo da parte dei tecnici viticoli e frutticoli. Il potenziale idrico del fusto della vite è stato costantemente rilevato tramite micro tensiometri in un sito di sperimentazione (Lakso et al., 2022, Mattedi et al 2025).

La catena modellistica utilizzata nello studio si basa sul metodo descritto nel documento "FAO Irrigation and Drainage Paper n.56" (Allen et al., 1998), in cui il suolo è schematizzato come un serbatoio con capacità idrica definita dalla profondità radicale, dipendente dal portinnesto, e dalle proprietà idrauliche del suolo stesso. L'evoluzione del contenuto idrico del suolo nella zona radicale è simulata mediante una funzione di svuotamento (depletion function), dove le componenti del bilancio idrico – ingressi e uscite – sono espresse in millimetri (mm) con risoluzione temporale giornaliera. La variazione dello stato idrico è rappresentata dalla seguente equazione:

$$D_i = D_{i-1} - (P_i - RO_i) - Irr_i - CR_i + ET_i + DP_i$$

in cui la variazione del deficit idrico del suolo tra due giorni consecutivi ($D_{i-1} - D_i$) è determinata dagli ingressi (precipitazioni effettive $P_i - RO_i$, irrigazione Irr_i , risalita

capillare CR_i) e dalle uscite (evapotraspirazione effettiva ET_i , percolazione profonda DP_i).

Le precipitazioni effettive vengono stimate sottraendo il ruscellamento superficiale dalla precipitazione totale giornaliera; il ruscellamento è calcolato tramite il metodo del Curve Number (USDA-NRCS, 2004), adattato alle caratteristiche locali dei suoli e degli usi del suolo.

L'irrigazione, a seconda del contesto applicativo, può essere definita come un input misurato (Centurioni et al., 2025) ed il bilancio di massa può essere utilizzato per calcolare i fabbisogni irrigui giornalieri oppure, come nel caso qui presentato, è stata calcolata come il volume d'acqua necessario a ripristinare la capacità di campo quando viene superata una soglia predefinita di stress idrico ($D_i = RAW$, Readily Available Water, variabile a seconda del tipo di coltura e dalla meteorologia). La stima di Irr_i è interpretabile come un fabbisogno idrico per una superficie coltivata unitaria e omogenea indipendentemente dall'infrastruttura di distribuzione dell'acqua, è espresso in millimetri di "pioggia equivalente" e non è assimilabile ad un consiglio irriguo.

Per questo studio la risalita capillare è stata considerata nulla, sebbene questa componente dipenda tipicamente dal tipo di suolo e dalla presenza di falda idrica.

L'evapotraspirazione effettiva delle colture (ET_i) è ottenuta partendo dalla stima dell'evapotraspirazione di riferimento calcolata con il metodo di Penman Monteith e applicando il metodo a doppio coefficiente colturale e quindi stimando la traspirazione della coltura e l'evaporazione dal suolo, ed applicando un coefficiente di stress se l'umidità del suolo non è sufficiente a soddisfare la domanda idrica della pianta.

La percolazione profonda DP_i è calcolata per differenza, nel caso in cui il fronte di saturazione proceda oltre la zona esplorata dalla massa principale delle radici: ciò si verifica in caso di piogge abbondanti e prolungate e quando viene irrigato eccessivamente.

Per questo studio, le misure dei tensiometri nel suolo e nella pianta sono state utilizzate per calibrare alcuni moduli della catena modellistica, in particolare per quanto riguarda la ritenzione idrica dei suoli e la fisiologia della pianta.

Lo studio prende in esame due suoli rappresentativi: ALD1, un suolo franco-sabbioso con profilo Ap-Bw-BC-C, presenza frequente di scheletro grossolano e una profondità radicale massima di 90 cm; e PRA1, un suolo franco-limoso con profilo Ap-Bwg-BCg-Cg, privo di scheletro e con profondità radicale inferiore, pari a 70 cm. I due suoli mostrano comportamenti idraulici nettamente distinti. Il contenuto idrico disponibile (Available Water Content, AWC) per ALD1 è di 38 mm per il melo e di 58 mm per la vite, mentre PRA1 offre una disponibilità idrica significativamente maggiore, pari a 105 mm per il melo e 191 mm per la vite. Queste differenze sono principalmente attribuibili alla presenza di scheletro nel suolo ALD1, che ne riduce la capacità di trattenere l'acqua. In termini di conducibilità idraulica satura, ALD1 presenta una capacità di infiltrazione molto più elevata (20 mm/h) rispetto a PRA1 (4 mm/h). Di conseguenza, ALD1 risulta altamente drenante con scarsa ritenzione idrica, mentre PRA1 presenta un'elevata ritenzione idrica ma una minore capacità di infiltrazione. I valori di AWC sono stati calcolati

ricalibrando le funzioni di pedotrasfer proposte da Saxton & Rawls (2008), utilizzando le misure effettuate con la piastra di Richards su campioni di suolo disturbati (pasta satura). Il modello SWAB è stato applicato ad entrambi i tipi di suolo utilizzando dati meteorologici storici per un periodo di 40 anni (1984–2024).

Risultati e discussione

Le stime di SWAB sono state analizzate per valutare le risposte dei suoli in termini di disponibilità idrica e fabbisogno irriguo per le colture di melo e vite.

Anche se preliminare, un primo risultato chiave dello studio riguarda i suoli ben drenati, come ALD1, in cui gli eventi piovosi estivi, quando presenti, risultano generalmente sufficienti a ripristinare la riserva idrica del suolo. Al contrario, nei suoli scarsamente drenanti come PRA1, la medesima quantità di pioggia risulta spesso insufficiente a riportare il sistema a condizioni idriche ottimali. Questo aspetto è particolarmente critico per entrambe le colture su PRA1, dove le simulazioni evidenziano un'elevata variabilità dell'umidità del suolo nella fase iniziale della stagione vegetativa (Fig.1). In presenza di inverni siccitosi, ciò può tradursi in una disponibilità idrica insufficiente all'avvio del ciclo colturale, una problematica destinata a divenire sempre più rilevante, considerando le evidenze relative al progressivo declino delle riserve idriche primaverili da fusione nivale nelle regioni alpine (Beniston et al., 2018).

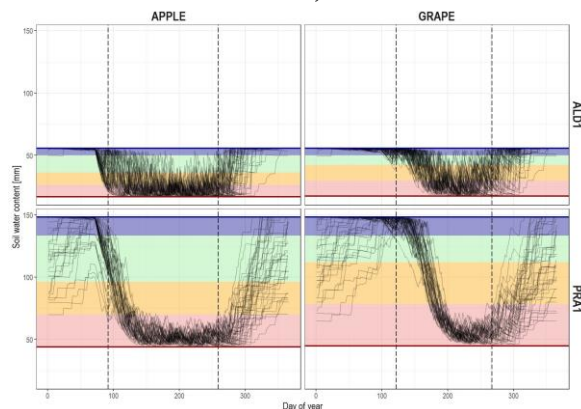


Fig.1 - Stime del contenuto idrico totale della zona di suolo esplorata dalle radici di melo e vite su terreni a differente attitudine al drenaggio dell'acqua, per 40 anni (1984–2024). Non viene ipotizzato alcun apporto irriguo, ma solo l'input atmosferico (P-RO).

Fig.1 - Estimates of total soil water content within the root-explored zone of apple and grapevine crops on soils with different drainage capacities over a 40-year period (1984–2024). No irrigation inputs are assumed; only atmospheric input (precipitation minus runoff, P-RO) is considered.

Per quanto riguarda la stima del fabbisogno stagionale complessivo, espresso in termini di “pioggia equivalente”, le differenze tra i due suoli risultano relativamente contenute. A fronte di una domanda evapotraspirativa dell'atmosfera pari a $7900 \pm 290 \text{ m}^3/\text{ha}$, SWAB stima una richiesta media

per i meleti sul terreno ALD1 di $5959 \pm 530 \text{ m}^3/\text{ha}$, mentre il terreno PRA1 richiederebbe $6622 \pm 518 \text{ m}^3/\text{ha}$, il 10% in più. Nel caso della vite, il suolo più permeabile ALD1 richiede $1886 \pm 278 \text{ m}^3/\text{ha}$, rispetto ai $2251 \pm 261 \text{ m}^3/\text{ha}$ di PRA1, che rappresentano un incremento del 16%. Tuttavia, dall'analisi dei dati, tenuto conto del contesto, emerge che le strategie irrigue dovrebbero differire sensibilmente in funzione del tipo di suolo.

Nei suoli altamente drenanti (ALD1) è necessario adottare irrigazioni più frequenti ma con volumi ridotti; viceversa, il suolo PRA1 si presta meglio a turni irrigui meno frequenti ma con volumi maggiori.

Occorre tenere in conto che i volumi ottenuti (fabbisogno idrico teorico con disponibilità illimitata della risorsa e senza vincoli nella distribuzione, espressi come pioggia equivalente) non sono indicativi delle effettive quantità d'acqua distribuibili dagli impianti di irrigazione gestiti dai Consorzi Irrigui e di Miglioramento Fondiario. Per un calcolo più realistico dei volumi è necessario tenere in conto: dell'infrastruttura agronomica (sesti di impianto e distanza dell'interfila); dell'infrastruttura di distribuzione dell'acqua (numero di emettitori per ogni metro lineare di ala gocciolante e volume erogato dal singolo emettitore); e delle politiche operative dei consorzi che devono garantire l'equa distribuzione della risorsa idrica a tutti i soci.

Le differenze di comportamento tra i vari tipi di suoli hanno implicazioni operative rilevanti per i gestori, in quanto una programmazione ad alta frequenza/bassi volumi o bassa frequenza/alti volumi può porre sfide significative dal punto di vista infrastrutturale e gestionale. Inoltre, l'approccio pragmatico di restituire per irrigazione l'evapotraspirazione colturale (senza tenere in conto della capacità di ritenzione idrica del suolo) porterebbe a dei consumi d'acqua per irrigazione pari a $8359 \pm 281 \text{ m}^3/\text{ha}$ per il melo e di $3703 \pm 144 \text{ m}^3/\text{ha}$ per la vite e perdita d'acqua per deflusso profondo.

Conclusioni

Sono state presentate delle preliminari stime climatiche di fabbisogno idrico di vite e melo su due tipologie di suoli alpini utilizzando i dati meteorologici degli ultimi 40 anni. SWAB dimostra di essere uno strumento versatile non solo per fornire consulenze irrigue tempestive (Centurioni et al., 2025), ma anche per considerazioni climatiche, in questo caso "retrospettive" utili per comprendere l'evoluzione nel tempo dei fabbisogni idrici.

Disponendo di affidabili proiezioni climatiche per la regione alpina, SWAB si dimostra uno strumento adatto alla pianificazione a lungo termine dell'approvvigionamento idrico a scopo irriguo.

L'intenzione è quella di estendere lo studio a tutti i tipi di terreno mappati nella “Carta dei suoli agricoli trentini” nei microclimi che vanno dal clima più “mediterraneo” dell'areale del Lago di Garda, fino alle zone di montagna dove, a causa del cambiamento climatico in atto, le superfici coltivate si stanno espandendo.

Un ulteriore fronte di indagine riguarda le prime fasi della ripresa vegetativa del melo nei suoli scarsamente drenanti dove può rendersi necessaria l'irrigazione nella fase iniziale della stagione vegetativa (Fig.1) in quanto gli scenari

climatici prevedono una riduzione nella disponibilità idrica primaverile a causa della riduzione delle precipitazioni nevose (Beniston, 2018). Per la vite, invece l'irrigazione controllata in suoli a bassa capacità di drenaggio può essere utilizzata strategicamente per modulare lo stress idrico della pianta dopo l'invasatura, favorendo condizioni di stress moderato con effetti positivi sulla qualità dell'uva, del mosto e, in ultima analisi, del vino (Van Leeuwen et al., 2009).

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il collega Danilo Caset per il generoso supporto fornito durante le attività di monitoraggio in campo e per il continuo scambio di competenze tecniche, che ha contribuito in modo significativo allo sviluppo del presente Lavoro.

Bibliografia

Allen, R.G., et al., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome.

Andreis D., Corradini S., Zottele F., Toller G., Zaffoni M., Margoni M., and Candioli E.: Smart Monitoring - ICT per il rilievo delle avversità, Associazione Italiana di Agrometeorologia 2016, "Nuove avversità e nuovi servizi per gli Agroecosistemi". Bologna, Italy, 14-16 June 2016.

Beniston, M., et al., 2018. The European mountain cryosphere. *The Cryosphere*, 12(2): 759–794.

Centurioni, F., et al., 2025. IRRITRE for sustainable irrigation in Trentino agriculture. EGU General Assembly 2025.

Gattolin, A., et al. (2024). IRRITRE: Infrastruttura e strumenti per l'irrigazione in Trentino. In: XXVI Convegno Nazionale di Agrometeorologia: approcci innovativi a supporto delle produzioni agrarie in un contesto climatico in evoluzione, L'Aquila, June 5-7, 2024. Bologna: Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari - Università di Bologna: 133-135. ISBN: 9788854971509

Kramer, Paul J., and John S. Boyer. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press, 1995.

Lakso, A. N., et al., 2022. Monitoring Stem Water Potential in Fruit Crops. *Horticulturae*, 8(12): 1207.

Mattedi, C., Zottele, F., Centurioni, F., and Corradini, S.: Effects of deficit irrigation practices on the Soil-Plant-Atmosphere system: a case study on *Vitis vinifera* L. (Teroldego cv.) from Trentino Alto Adige, Italy, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-10812, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-10812>, 2025.

Saxton, K. E., Rawls, W. J., 2006. Soil Water Characteristic Estimates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70(5): 1569–1578.

CALIBRATION OF PHENOLOGICAL MODELS TO PREDICT THE ONSET OF FLOWERING AND IMPROVE APIARY MANAGEMENT

CALIBRAZIONE DI MODELLI FENOLOGICI PER PREVEDERE L'INIZIO DELLA FIORITURA E MIGLIORARE LA GESTIONE DELL'APIARIO

Riccardo Rossi^{1*}, Sergi Costafreda-Aumedes², Chiara Epifani³, Fausto Carbonari³, Giacomo Trombi⁴, Luciano Massetti², Marco Mancini¹, Aldo Dal Prà², Marco Moriondo², Marco Bindi¹, Luisa Leolini¹

¹ UNIFI– Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry (DAGRI), Piazzale delle Cascine 18, 50144, Florence (FI), Italy

² CNR– Institute of BioEconomy (IBE), via Madonna del Piano 10, 50019, Sesto Fiorentino (FI), Italy

³ CREA– Research Centre for Agriculture and Environment (AA), via della Navicella 2/4, 00184 Rome (RM), Italy

⁴ AgriZapp srl, via Fibonacci 27, 50131 Florence (FI), Italy

*r.rossi@unifi.it

Abstract

In Mediterranean climates with strong seasonal changes, accurately predicting the onset of flowering (anthesis) is crucial to maximizing the production and profitability of monofloral honeys. To support adaptive farm management, we calibrated and validated four phenological models (GDD, UNIFORC, UNICHILL, and BRIN) to estimate the onset of flowering of black locust (BL) and clover spp. (CL) in Tuscany, Italy. Initially, comprehensive phenological datasets were created by collecting flowering data (BBCH: 61) through direct observations and online image archives from 2007 to 2024, while meteorological data were retrieved from the regional database (SIR). These datasets were used for models' calibration (60% of the data) and validation (40% of the data). UNICHILL provided the most accurate performances for BL flowering ($r = 0.68$, RMSE = 4.40 days, AIC = 99.81), while UNIFORC performed best for CL ($r = 0.85$, RMSE = 5.58 days, AIC = 139.50). The selected models were then applied to 15-day short-range forecasts in 2025 to predict BL (4 days error) and CL flowering. This approach, within the concept of nomadic beekeeping management, thus emerges as a valuable tool for guiding the timely relocation of hives and optimizing honey production in response to seasonal weather fluctuations.

Parole chiave

Confronto tra modelli; previsioni a breve termine; robinia; Toscana; trifoglio

Keywords

Black locust; clover; model intercomparison; short-term forecasts; Tuscany

Introduction

Beekeeping plays a vital role in global agriculture and biodiversity by ensuring essential pollination services for the majority of crops and wild plant species. Italy ranks among Europe's top honey-producing countries, renowned for its remarkable variety, with 60 monofloral honey types crafted by more than 75,000 registered beekeepers (BDN Apicoltura, 2023). In this context, nomadic or migratory beekeeping has been largely adopted for the production of monofloral honeys, helping sustain beekeepers' income by aligning hive movements with the availability of specific floral resources. However, increasing climate and weather variability in recent years has disrupted the flowering patterns of key melliferous plants and hindered nectar collection by honeybees across many regions. As a result, Italian honey production has recently experienced greater intra-annual fluctuations, leading to heightened economic uncertainty for beekeepers.

The general trend towards rising temperatures, more frequent drought periods, the increase in extreme events (e.g. heat waves, frost events) and the high annual weather variability are affecting the chilling and heat units' accumulation required for the onset of flowering of melliferous plant species, as well as seriously threatening the survival of bee colonies.

For instance, high temperatures in central Italy during early spring led to premature flowering of both forage grasses (Sofia et al., 2017) and fruit trees (Di Lena et al., 2018) due to the quick fulfilment of heat units requirement, thus potentially increasing the risk of late frost damages to flowers. Parallely, insufficient chilling units accumulation during warmer winters has been associated with delayed and/or prolonged flowering in woody species (Bartolini et al., 2019; Viti et al., 2010), potentially resulting in asynchronous plant-pollinator interactions. Therefore, seasonal variability in thermal dynamics driven by climate change and often shaped by the orographic characteristics of specific sites can advance or delay the timing and duration of plant phenological phases, as observed by Cerlini et al. (2022) for two willow species in central Italy. The condition is further exacerbated by prolonged periods of drought, which can compromise flowering and plant development and drastically reduce honeybees activity, forcing them to access their honey reserves (Remotti et al., 2024).

In response to this increasing weather variability and its impact on flowering, beekeepers have adopted adaptive strategies to ensure honey production and safeguard their economic outcomes. Nomadism itself has undergone changes, requiring considerable efforts in terms of

organising the hives' relocation to adapt to annual weather variability.

Currently, decisions regarding nomadic management are still largely based on beekeepers' prior experience and know-how, which, although valuable, may fall short in capturing the spatial and temporal variability of flowering under increasingly unpredictable climatic conditions. While direct field observations and pollen traps provide accurate, real-time data on floral presence, they are limited in spatial scope and lack forecasting capabilities (Liolios et al., 2023). Consequently, these methods do not support proactive planning of hive movements based on species-specific flowering predictions as influenced by expected seasonal weather patterns.

In this view, phenological models emerge as valuable tools, enabling beekeepers to anticipate the onset of flowering based on climatic variables, thus supporting more informed and timely decisions for hive relocation. While temperature-driven models exist for several woody species, including eucalyptus (Hudson and Keatley, 2010), black locust (Alilla et al., 2022), olive tree (Moriondo et al., 2019) and winegrape (Leolini et al., 2020), herbaceous species remain largely underrepresented despite their importance as melliferous forage crops. Furthermore, the model application to weather forecasts, generated by climate forecast models to predict the meteorological conditions (e.g. temperature, rainfall) at short-time scale (e.g. hourly, daily, monthly), is still marginal for beekeeping, limiting their use to only a few relevant species for this sector. Thus, the development of a decision support system (DSS) that can be extended to flowering forecast of more herbaceous and arboreal melliferous plant species, supported and integrated with different modelling solutions, aims to improve the strategic management of apiaries in the face of increasing climate variability.

As an example, four phenological models (GDD, UNIFORC, UNICHILL, and BRIN) have been preliminarily calibrated and validated in this study for clover spp. and black locust, selecting the best-performing one for each species and applying it to 15-day weather forecasts to generate dynamic, site-specific predictions of the flowering onset.

Materials and Methods

This study focused on phenological data of two key melliferous plant species, namely clover (*Trifolium* spp.; CL) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.; BL), collected within the Tuscany region (central Italy).

Flowering onset dates, expressed as day of the year (DOY) and defined as the stage when 10% of flowers are open (BBCH 61), were derived from a combination of expert-led field observations, including data from the Italian Phenological Network (IPHEN; Mariani et al., 2013), and imagery-based records from the Pan European Phenology (PEP; www.pep725.eu) and Global Biodiversity Information Facility (GBIF; www.gbif.org) databases. To ensure data consistency and uniformity, the dataset was revised by experts and refined through a 1 km spatial filter to eliminate duplicate entries and a temporal filter (April to July) for clover to exclude records of spontaneous plants. The final dataset comprised: **(a)** 56 surveys across 35 individual sites from 2016 to 2024 for CL; and **(b)** 42 surveys across 15 sites from 2007 to 2024 for BL.

Meteorological data, including daily minimum ($T_{\min}$, °C), maximum ($T_{\max}$, °C) and average air temperature (T_{avg} , °C), were obtained from the nearest stations for each site, sourced from the Servizio Idrologico Regionale (SIR) database (www.sir.toscana.it).

The phenological models adopted to simulate the start date of flowering in CL and BL are: Growing Degree Days (GDD; Amerine and Winkler, 1944), UNIFORC (Chuine, 2000), UNICHILL (Chuine, 2000) and BRIN (de Cortázar-Atauri et al., 2009). The forcing models (GDD and UNIFORC) were used in CL to simulate the phenological development as driven by heat units' accumulation after the end of winter. On the other hand, jointly with these models, the chilling-forcing models (UNICHILL and BRIN) were used to describe the entire dormancy period (endo- and eco-dormancy phases) in BL, as driven by chilling and forcing unit accumulation until flowering onset. The models were calibrated and validated using the Phenological Modeling Platform (PMP) software (version 5.5; Chuine et al., 2013) against 10 datasets (5 for calibration and 5 for validation) obtained by randomly splitting the observed flowering data (60% and 40% of the data in calibration and validation, respectively). During model calibration, ten repetitions of the Metropolis-Hastings simulated annealing algorithm (Hastings, 1970; Kirkpatrick et al., 1983; Metropolis et al., 1953) were performed and the average parameterization obtained from the ten repetitions for each calibration dataset was validated on the respective independent dataset. To identify the best-performing set for each plant species and model, statistical metrics (r , RMSE, AIC) computed during calibration and validation procedures were first centered by subtracting the mean value of each metric across all other sets and then combined into the following

Tab.1 - Average HP_{model} 's parameter values for each combination of species and selected MS_{set} , and statistical performances (r , RMSE, AIC and equation) derived from the comparison between observed and simulated flowering dates during the calibration.

Tab.1 - Valori medi dei parametri del migliore modello (HP_{model}) per ciascuna combinazione di specie e set selezionato (MS_{set}), e prestazioni statistiche medie (r , RMSE, AIC ed equazione) derivati dal confronto tra le date di fioritura osservate e simulate durante la fase di calibrazione.

Acronym	Set	Model	t_0	$S_{\text{star}1}$	$S_{\text{star}2}$	a	b	c	d	e	r	RMSE	AIC	Equation
CL	1	UNIFORC	97.06	24.46	-	-	-	-	-0.25	14.67	0.86	4.81	198.97	$y = 0.74x + 38.67$
BL	2	UNICHILL	-121	193.49	32.35	0.15	14.37	27.40	-0.86	11.22	0.74	4.36	130.55	$y = 0.50x + 59.48$

Set Stability Index (SSI):

$$SSI = [0.4 \cdot (1 - r)] + (0.4 \cdot RMSE) + (0.2 \cdot AIC)$$

The absolute difference between calibration and validation SSI values was subsequently calculated, and the set showing the lowest average difference and variability across models was selected as the most stable (MS_{set}). Finally, the uncentered statistical metrics for this MS_{set} were used to recalculate the SSI, and the model with the lowest average SSI across calibration and validation was selected as the highest-performing model (HP_{model}).

The HP_{model} for each species was then applied to predict the flowering onset during the 2025 season. Daily weather data, including T_{min} , T_{max} , precipitation, and wind speed, were collected from 134 SIR weather stations starting from 1st January 2023. A 15-day weather forecast (current day + 15 future days) from OpenWeatherMap was then integrated with the historical data by weather station, resulting in continuous, site-specific meteorological time series for dynamic short-term flowering predictions.

The simulations of flowering onset under weather forecasts are then compared with field observations collected in 2025 (Florence, 43.78 °N Lat; 11.22°E Long) in order to assess the accuracy of the models' application.

Results and Discussion

The results of the study highlighted the strong performance of the selected phenological models in predicting the onset of flowering for both clover (CL) and black locust (BL) across the Tuscany region. In particular, the UNIFORC model for CL and the UNICHILL model for BL showed a high accuracy between observed and simulated flowering dates, achieving average values of $r = 0.80$, $RMSE = 4.59$ days, and $AIC = 164.76$ during the calibration phase (Tab. 1). Model robustness was further supported by the validation results (Fig. 1), which yielded comparable performance, with average $r = 0.77$, $RMSE = 4.99$ days, and $AIC = 119.66$.

The results obtained in this study confirm that temperature plays a major role in the development of the main forage species, including clover (Iannucci et al., 2008; Papastylianou and Bilalis, 2015). Furthermore, the forcing unit rate (range 0-1) in the UNIFORC model shows high values at average temperatures $> \sim 23.5$ °C (FU rate > 0.90), reaching a value close to the maximum at around 32 °C (FU rate > 0.99). This result is consistent with the findings of Norris (1987), who reported that a day/night temperature regime of 30/15 °C promoted floral initiation and development in white clover (*Trifolium repens* L.), compared to colder conditions and independently of photoperiod.

The outcomes on black locust (BL) are particularly noteworthy when compared to those reported by Alilla et al. (2022), who estimated BL flowering onset in central Italy by similarly exploring temperature–phenology relationships, but obtained substantially higher prediction errors, with RMSE values of 8.50 and 9.12 days for calibration and validation, respectively. Interestingly, the performance of the UNICHILL model in our study aligns closely with results obtained by Pei-yang et al. (2020) for

BL in a warm-temperate region of China. This convergence suggests that accounting for chilling unit accumulation in phenological models might enhance prediction accuracy, especially for those species potentially subjected to dormancy mechanisms even under relatively mild winters. However, low temperatures do not consistently act as a limiting factor for BL flowering (Pei-yang et al., 2020), raising the question of how crucial chilling truly is for this species. Moreover, the results from the starting day calibration for forcing unit accumulation during the eco-dormancy period (t_{02}) indicate that this occurs, on average, at DOY 72.6 across all models. These findings are in line with those obtained by Kim et al. (2022), who calibrated t_{02} for GDD and Single Triangle Degree Days forcing models for BL in South Korea. This suggests that before the beginning of March, the accumulation of forcing units is not effective for flowering, implying the existence of a potential chilling period prior to this date. Nonetheless, further research is necessary to clarify the chilling requirements of BL, which would help determine whether chilling-forcing models like UNICHILL are more suitable than simpler, forcing-driven approaches.

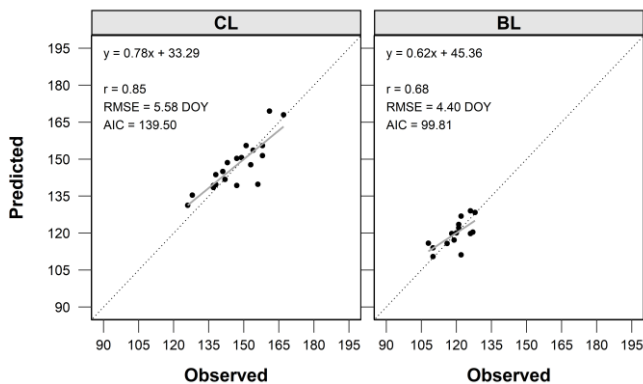


Fig.1 – Comparison between observed and simulated flowering dates (DOY) across different species using the selected MS_{set} and HP_{model} during the validation phase. The dashed line represents the 1:1 reference line, while the solid grey line corresponds to the fitted regression line.

Fig.1 – Confronto tra le date di fioritura osservate e simulate (DOY) per le diverse specie, utilizzando il set (MS_{set}) e modello selezionati (HP_{model}) durante la fase di validazione. La linea tratteggiata rappresenta la linea di riferimento 1:1, mentre la linea grigia continua corrisponde alla retta di regressione.

The results of the UNICHILL (BL) and UNIFORC (CL) models' application to 15-day weather forecasts are shown in Fig. 2. The date of beginning of forcing units' accumulation occurs at DOY 72 for BL and at DOY 97 for CL. The UNICHILL model simulates the beginning of flowering date the DOY 113 for BL, 4 days' error compared with the observation (DOY 109) for the Florence site. In contrast, the UNIFORC model has not yet reached the beginning of flowering for CL in the Florence site (last update: 29/04/2025). These results, which are still preliminary, will need to be extended to observations

collected in 2025 for both species at other locations in Tuscany to assess the effectiveness of the model during the prediction phase.

Conclusion

This study proved the reliability of phenological models in predicting the onset of flowering for both forage and tree melliferous plant species within the Tuscany region, Italy. The results highlighted that the UNIFORC model performed best for clover (CL), while the UNICHILL model was the most accurate for black locust (BL), emphasizing the importance of selecting modeling approaches that reflect the species-specific phenological development and its dependency on environmental conditions.

Building on these findings, future steps will focus on developing a web-based decision support system (DSS) tailored for beekeepers. By integrating phenological models with mid-term weather forecasts, this platform will enable more efficient and timely hive relocation. Additionally, the expected rainfall and wind (not considered in this study) which potentially limit the foraging activity of honeybees during the flowering phase could also be incorporated to enhance the system's effectiveness. Such a tool will aim to optimize apiary management by aligning beekeeping operations with site-specific flowering dynamics and weather variability, with the ultimate purpose to enhance honey production and pollination services.

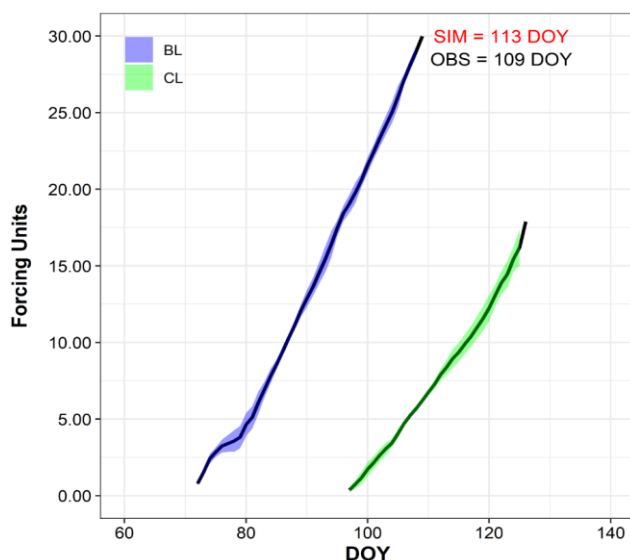


Fig.2 – Application of the best-performing models (UNICHILL for black locust and UNIFORC for clover) under the weather forecasts to predict the beginning of flowering date in Florence. The weather forecasts are calculated from the end of winter until flowering, while model uncertainty is highlighted by the shaded area.

Fig.2 – Applicazione dei modelli più performanti (UNICHILL per la robinia e UNIFORC per il trifoglio) nelle previsioni meteorologiche al fine di prevedere la data di inizio della fioritura a Firenze. Le previsioni meteorologiche sono calcolate dalla fine dell'inverno fino

alla fioritura, mentre l'incertezza del modello è evidenziata dall'area ombreggiata.

References

- Alilla, R., De Natale, F., Epifani, C., Parisse, B., Cola, G., 2022. The Flowering of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in Italy: A Phenology Modeling Approach. *Agronomy* 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071623>
- Bartolini, S., Massai, R., Iacona, C., Guerriero, R., Viti, R., 2019. Forty-year investigations on apricot blooming: Evidences of climate change effects. *Sci. Hortic. (Amsterdam)* 244, 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.070>
- BDN Apicoltura, 2023. Banca Dati Nazionale - sezione apicoltura (in Italian). <https://www.vetinfo.it/>.
- Cerlini, P.B., Saraceni, M., Orlandi, F., Silvestri, L., Fornaciari, M., 2022. Phenological response to temperature variability and orography in Central Italy. *Int. J. Biometeorol.* 66, 71–86. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02190-1>
- Chuine, I., 2000. A unified model for budburst of trees. *J. Theor. Biol.* 207, 337–347. <https://doi.org/10.1006/jtbi.2000.2178>
- Chuine, I., De Cortazar-Atauri, I.G., Kramer, K., Hänninen, H., 2013. Plant development models, in: *Phenology: An Integrative Environmental Science*. pp. 275–293. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_15
- de Cortázar-Atauri, I.G., Brisson, N., Gaudillere, J.P., 2009. Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Int. J. Biometeorol.* 53, 317–326. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0217-4>
- Di Lena, B., Farinelli, D., Palliotti, A., Poni, S., DeJong, T.M., Tombesi, S., 2018. Impact of climate change on the possible expansion of almond cultivation area pole-ward: a case study of Abruzzo, Italy. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 93, 209–215. <https://doi.org/10.1080/14620316.2017.1357433>
- Hastings, W.K., 1970. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika* 57, 97–109. <https://doi.org/10.2307/2334940>
- Hudson, I.L., Keatley, M.R., 2010. Modelling the Flowering of Four Eucalypt Species Using New Mixture Transition Distribution Models, in: *Phenological Research: Methods for Environmental and Climate Change Analysis*. pp. 1–521. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3335-2>
- Iannucci, A., Terribile, M.R., Martiniello, P., 2008. Effects of temperature and photoperiod on flowering time of forage legumes in a Mediterranean environment. *F. Crop. Res.* 106, 156–162. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.11.005>
- Kim, S., Kim, T.K., Yoon, S., Jang, K., Chun, J.H., Won, M., Lim, J.H., Kim, H.S., 2022. Quantifying the importance of day length in process-based models for the prediction of temperate spring flowering phenology. *Sci. Total Environ.* 843, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156780>
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., 1983.

- Optimization by simulated annealing. *Science* (80-.). 220, 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Leolini, L., Costafreda-Aumedes, S., Santos, J.A., Menz, C., Fraga, H., Molitor, D., Merante, P., Junk, J., Kartschall, T., Destrac-Irvine, A., van Leeuwen, C., Malheiro, A.C., Eiras-Dias, J., Silvestre, J., Dibari, C., Bindi, M., Moriondo, M., 2020. Phenological model intercomparison for estimating grapevine budbreak date (*Vitis vinifera* L.) in Europe. *Appl. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3390/app10113800>
- Liolios, V., Kanelis, D., Rodopoulou, M.A., Tananaki, C., 2023. A Comparative Study of Methods Recording Beekeeping Flora. *Forests* 14, 1–10. <https://doi.org/10.3390/f14081677>
- Mariani, L., Alilla, R., Cola, G., Monte, G.D., Epifani, C., Puppi, G., Osvaldo, F., 2013. IPHEN-a real-time network for phenological monitoring and modelling in Italy. *Int. J. Biometeorol.* 57, 881–893. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0615-x>
- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., Teller, E., 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. *J. Chem. Phys.* 21, 1087–1092. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>
- Moriondo, M., Leolini, L., Brilli, L., Dibari, C., Tognetti, R., Giovannelli, A., Rapi, B., Battista, P., Caruso, G., Gucci, R., Argenti, G., Raschi, A., Centritto, M., Cantini, C., Bindi, M., 2019. A simple model simulating development and growth of an olive grove. *Eur. J. Agron.* 105, 129–145. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.002>
- Norris, I.B., 1987. Floral Initiation of White Clover (*Trifolium repens* L.) in Response to Daylength and Temperature. *Annals* 59, 197–202.
- Papastylianou, P.T., Bilalis, D., 2015. Flowering in Sulla (*Hedysarum coronarium* L. cv. Carmen) and Persian clover (*Trifolium resupinatum* L. cv. Laser) as affected by sowing date in a mediterranean environment. *Aust. J. Crop Sci.* 5, 1298–1304.
- Pei-yang, Y.U., Xiao-juan, T., Jun, L.I., Jing-ru, Z., Pei-rong, L., 2020. Comparison of Phenological Models of *Robinia pseudoacacia* (L.) in the Warm-temperate Region of Eastern China. *Chinese J. Agrometeorol.* 41, 609–621. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6362.2020.10.001>
- Remotti, F., Mattalia, G., Porporato, M., Cevasco, R., Pieroni, A., 2024. ‘The rules of nature are changing; every year is unpredictable’: perceptions of climate change by beekeepers of Liguria, NW Italy. *Reg. Environ. Chang.* 24, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02242-3>
- Sofia, G., Emma, T., Veronica, T., Giuseppe, F., 2017. Climate change: consequences on the pollination of grasses in Perugia (Central Italy). A 33-year-long study. *Int. J. Biometeorol.* 61, 149–158. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1198-8>
- Viti, R., Andreini, L., Ruiz, D., Egea, J., Bartolini, S., Iacona, C., Campoy, J.A., 2010. Effect of climatic conditions on the overcoming of dormancy in apricot flower buds in two Mediterranean areas: Murcia (Spain) and Tuscany (Italy). *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 124, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.01.001>

FLOWERING AND NECTAR PRODUCTION IN ROBINIA PSEUDOACACIA: A FIRST ANALYSIS OF THE ROLE OF TEMPERATURE

FIORITURA E PRODUZIONE DI NETTARE IN ROBINIA PSEUDOACACIA: UNA PRIMA ANALISI DEL RUOLO DELLA TEMPERATURA

Fausto Carbonari^{1*}, Tiziana La Iacona², Federico Spanna², Irene Vercellino², Luca Allais³, Alessandro Revelli⁴, Chiara Epifani¹

¹ Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria – Centro di ricerca Agricoltura e Ambiente

² Regione Piemonte – Dir. Agricoltura e cibo Settore Fitosanitario e servizi tecnico-scientifici Sez. Agrometeorologia

³ Associazione Produttori Miele Piemonte – Aspromiele

⁴ Fralè Analitica srl

*fausto.carbonari@crea.gov.it

Abstract

Hive weight data from 2022 to 2024 in Piedmont were used to assess how daily, day-time, and night-time temperatures affect nectar flow in acacia honey production. The approach adopted integrates meteorological, production and phenological data, fundamental for the precise identification of the flowering time window. The objective is to define an innovative methodology to understand the relationships between environment and beekeeping sector productivity. Of particular interest is the correlation result between weight and night temperature ($r=0.68$, $p\text{-value}<0.001$), which suggests a relevant role of night-time thermal conditions in nectar production, often overlooked in conventional analyses. Furthermore, on the dataset analysed, optimal temperature ranges for nectar production were identified for daily (13.6-20.9 °C), day-time (14.0-24.6 °C) and night-time (11.1-18.3 °C) temperature. In perspective, other agrometeorological indices will be integrated in the analysis and the methodology will be extended to a wider territorial scale to cover Northern Italy, one of the main acacia honey production areas.

Parole chiave

Indici termometrici, fenologia vegetale, produzione di miele

Keywords

Thermometric indices, plant phenology, honey production

Introduzione

Negli ultimi anni, il settore apistico ha registrato una crescita significativa, portando l'Italia al sesto posto in Europa per numero di alveari, oltre il milione. Di questi, circa l'80% è gestito da apicoltori professionali, mentre oltre 22.000 aziende agricole sono attivamente coinvolte nell'apicoltura. Nonostante il sostanziale aumento del numero di alveari degli ultimi anni la produzione di miele subisce fluttuazioni importanti principalmente a causa di condizioni meteorologiche avverse che colpiscono soprattutto la produzione primaverile di miele, rendendola a volte quasi nulla. La produzione di miele risulta diffusa in tutto il Paese, ma sono in particolare tre regioni, Lombardia, Emilia-Romagna e Piemonte, ad avere quote superiori al 10% in termini di valore della produzione (Verrascina, 2024).

La regione Piemonte grazie a un'elevata consistenza di alveari (191.887 alveari censiti a dicembre 2024 dalla Banca Dati Apistica-BDA¹) è potenzialmente la regione più produttiva del territorio nazionale per il miele di acacia (*Robinia pseudoacacia* L.). Secondo le elaborazioni dell'Osservatorio Nazionale Miele², le medie produttive di questa tipologia di miele sino alla prima decade degli anni 2000 erano oltre i 20 kg per alveare, rappresentando una produzione importante non solo in termini quantitativi (oltre

il 60% del fatturato aziendale) ma anche qualitativi. Negli ultimi nove anni, però, la produzione del miele di acacia in Piemonte si è decisamente ridotta, attestandosi, in media, a valori poco superiori ai 7 kg ad alveare.

Gli ultimi tre anni, in particolare, hanno presentato un andamento decisamente altalenante, in linea con quanto è stato registrato sul resto del territorio italiano. Nel 2022, la produzione ha raggiunto valori medi di 18 kg/alveare, con una variabilità piuttosto ampia tra gli 8 e i 28 kg (Osservatorio Nazionale Miele, 2023). Nel 2023, le gelate tra fine marzo e inizio aprile hanno danneggiato le piante di acacia, con effetti particolarmente gravi alle quote più basse e nelle vallate più fredde. Successivamente, il brusco calo delle temperature e il maltempo di maggio hanno compromesso ulteriormente i raccolti, rendendoli scarsi e molto eterogenei. Le aziende apistiche con alveari nelle principali zone vocate hanno riportato produzioni inferiori rispetto all'anno precedente, variabili tra i 4 e gli 8 kg per alveare (Osservatorio Nazionale Miele, 2024). Una situazione primaverile analoga si è verificata nel 2024 dove tutte le province tradizionalmente vocate hanno prodotto scarse quantità di miele di acacia a causa di abbassamenti termici consistenti nella seconda metà di aprile, che hanno compromesso in modo significativo la fioritura, delle piogge persistenti e delle temperature fredde di maggio che hanno

¹ https://www.vetinfo.it/j6_statistiche/#/report-pbi/45

² <https://www.informamiele.it/report-annuali-produzione-e-mercato/>

impedito qualsiasi possibilità di recupero, anche nelle zone a fioritura più tardiva (Osservatorio Nazionale Miele, 2025). Le condizioni meteorologiche durante il periodo di fioritura possono ridurre fortemente la produzione di nettare, e quindi condizionare la produttività degli alveari, anche per quelle specie mellifere ad alto potenziale nettarifero come la robinia (500 kg/ha) (Ricciardelli d'Albore & Intoppa, 2000).

La temperatura è una delle variabili meteorologiche più frequentemente citate nell'analisi del flusso di nettare. È noto che essa influenza il tasso fotosintetico, strettamente legato alla produzione di nettare, e che aumenti moderati della temperatura possono favorire tale produzione (Pacini & Nepi, 2007). Le piante presentano generalmente un intervallo di temperatura ottimale per la secrezione di nettare, sebbene questo sia stato quantificato solo per un numero limitato di specie (Jakobsen & Kristjánsson, 1994). Alcuni studi specifici su *R. pseudoacacia* riportano indicazioni sugli intervalli termici ideali: sono state individuate temperature diurne ottimali comprese tra 20–25 °C in Ungheria (Márton, 2011) e tra 16–25 °C in Romania (Pătruică *et al.*, 2017); mentre, secondo quanto riportato da Kardos (1974), temperature notturne superiori ai 15 °C possono favorire il flusso nettarifero, un'evidenza che trova conferma anche nell'osservazione empirica degli apicoltori, i quali associano condizioni notturne miti a una maggiore secrezione di nettare.

In questo studio analizziamo le relazioni tra l'andamento delle temperature medie giornaliere, diurne e notturne e le variazioni di peso dell'alveare, utilizzate come indicatore indiretto del flusso di nettare. Sono stati inclusi nell'analisi anche dati fenologici per l'individuazione del periodo di fioritura della robinia: l'integrazione di dati meteorologici, fenologici e produttivi rappresenta un approccio innovativo per comprendere le relazioni tra ambiente e produzione.

Materiali e Metodi

L'analisi è stata condotta su un periodo di tre anni consecutivi (2022–2024) in diverse località del Piemonte. I dati meteorologici provengono dalle stazioni della Rete Agrometeorologica del Piemonte e di ARPA Piemonte, reti che garantiscono elevata accuratezza e continuità nella registrazione dei dati meteorologici (ARPA Piemonte, 2021). Le serie orarie sono state elaborate in serie di temperatura media giornaliera, temperatura media diurna (6:00-18:00) e notturna, secondo la definizione operativa adottata, tra gli altri, dal programma europeo Copernicus (Thiemig *et al.*, 2022).

I dati di peso degli alveari sono stati rilevati nell'ambito del progetto BEE-RAP dell'Associazione Apistica Aspromiele³, mediante bilance elettroniche. I dati orari sono stati sottoposti a un'elaborazione *ad hoc*, finalizzata ad escludere quelle variazioni riconducibili agli interventi di gestione dell'apiario, in modo da mantenere solo quelle dovute esclusivamente all'attività di bottinatura delle api. Successivamente, sono stati elaborati in serie giornaliere che

misurano la quantità di nettare importata e cumulata fino al giorno di riferimento.

I dati fenologici, raccolti secondo protocolli standardizzati, provengono dalla Banca Dati del Progetto IPHEN che opera nell'ambito delle attività della Rete Rurale Nazionale⁴. I dati fenologici sono stati utilizzati per definire con precisione i periodi effettivi di inizio (BBCH61) e fine fioritura (BBCH67) della robinia. Nei casi in cui la serie fenologica è risultata incompleta, i dati mancanti sono stati ricostruiti utilizzando serie fenologiche provenienti da siti nelle immediate vicinanze, mantenendo il vincolo di appartenenza alla stessa provincia.

Tra tutti gli alveari del progetto BEE-RAP, sono stati selezionati quelli che rispettavano i seguenti criteri:

- presenza, entro un raggio massimo di 3 km, coerente con il raggio medio di bottinatura delle api (*Apis mellifera*) (Beekman & Ratnieks, 2000), di almeno un sito IPHEN con dati completi di inizio e fine fioritura di *R. pseudoacacia*;
- disponibilità di una stazione meteorologica nelle immediate vicinanze, con altitudine comparabile a quella del sito di rilevamento fenologico, al fine di minimizzare l'influenza di gradienti altitudinali su temperatura e fenologia (Defila & Clot, 2001).

Sono stati, quindi, selezionati complessivamente 26 alveari (6 nel 2022, 4 nel 2023 e 16 nel 2024), 13 siti di monitoraggio fenologico e 12 stazioni meteorologiche (Fig. 1).

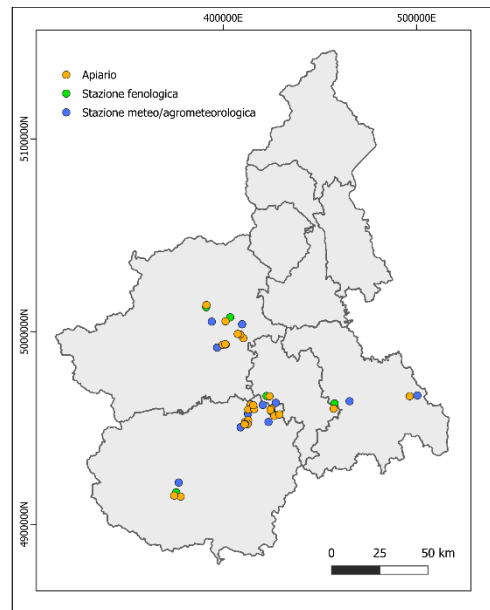


Fig.1 – Mappa degli apiari, dei siti fenologici e delle stazioni meteo e agrometeorologiche presi in considerazione per gli anni 2022, 2023 e 2024 (Sistema di riferimento WGS 84/UTM 32N; scala 1:1.500.000).

Fig.1 – Map of beehives, phenological sites and meteo and agrometeorological stations considered for the years 2022, 2023 and 2024 (Reference system WGS 84/UTM 32N; scale 1:1,500,000).

³ <https://www.aspromiele.it/>

⁴ <https://www.reterurale.it/fenologia>

Le serie di dati di peso analizzate vanno dal 21 aprile al 21 maggio di ogni anno, intervallo che, sulla base del calendario fenologico regionale elaborato a partire dai dati raccolti nella banca dati IPHEN, copre, con elevato grado di affidabilità, l'intero periodo di fioritura della robinia in Piemonte. Questa finestra temporale è stata ulteriormente perfezionata utilizzando i dati fenologici di inizio e fine fioritura osservati nel sito fenologico situato entro un raggio massimo di 3 km, migliorando la rappresentatività e la coerenza spaziale dell'analisi (Fig. 2).

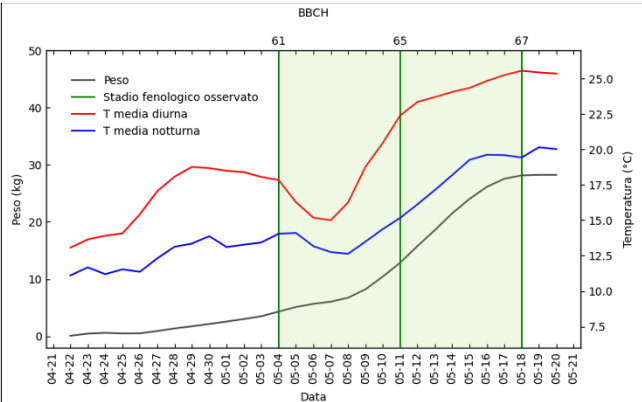


Fig.2 – Grafico dell'andamento giornaliero dei dati di peso, della temperatura media diurna e notturna (media mobile a 3 giorni) di un alveare in provincia di Torino del 2022. Evidenziata in verde la finestra di inizio e fine fioritura.
Fig.2 – Graph of the daily trend of the weight data, of the average day and night temperature (3-day moving average) of a hive in the province of Turin of 2022. Highlighted in green the window of beginning and end flowering.

Una volta definite tali finestre specifiche, il dataset finale è costituito dalle serie di peso e di temperatura misurate tra l'inizio e la fine della fioritura specifici per ciascun alveare. Su questi dati è stato calcolato il coefficiente di Pearson al fine di valutare la correlazione lineare e misurare la forza della relazione tra due grandezze. È stata condotta un'analisi supplementare con l'obiettivo di individuare le condizioni termiche associate esclusivamente ai giorni in cui si è registrato un aumento del peso dell'alveare. Per ciascun sito e per ogni giorno, compreso nella finestra fenologica di riferimento, è stata calcolata la differenza tra il peso giornaliero e quello del giorno precedente, sono stati selezionati solo i giorni in cui tale differenza è risultata positiva e su questi è stata quindi condotta un'analisi preliminare al fine di evidenziare eventuali condizioni termiche favorevoli alla produzione di nettare.

Risultati e Discussione

I risultati della correlazione sono indicativi di una forte relazione positiva tra temperatura e variazione del peso dell'alveare durante la fioritura di *R. pseudoacacia* (Fig. 3). Il coefficiente di Pearson calcolato tra peso e temperatura media giornaliera è risultato pari a 0.70, indicando una relazione lineare forte e statisticamente significativa. Un risultato particolarmente rilevante è rappresentato dalla

correlazione tra peso e temperatura notturna ($r=0.68$), che si attesta su un valore prossimo a quello ottenuto per la temperatura media giornaliera, suggerendo un ruolo potenzialmente cruciale delle condizioni termiche notturne nel favorire la produzione nettarifera.

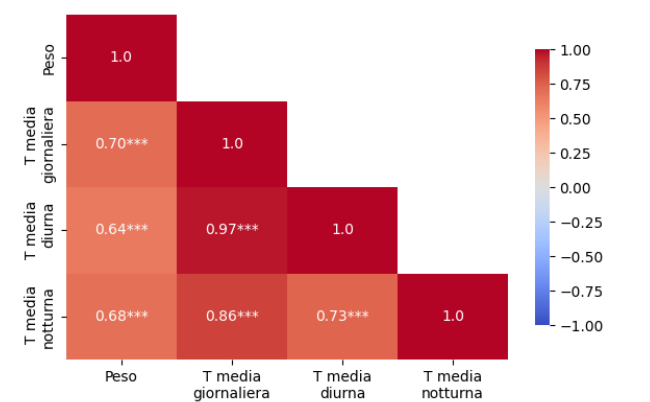


Fig.3 – Matrice di correlazione di Pearson tra peso e indici termometrici. Significatività *** $p=0.001$.
Fig.3 – Pearson correlation matrix between weight and thermometric indices. Significance *** $p=0.001$.

La temperatura diurna, pur mostrando anch'essa una correlazione robusta, presenta un coefficiente leggermente inferiore ($r=0.64$), a indicare che le sole condizioni diurne potrebbero non essere sufficienti a spiegare l'intera variabilità del fenomeno osservato. In riferimento all'analisi di caratterizzazione delle condizioni termiche associate ad incrementi di peso, sul sottogruppo di dati selezionati (291 casi su un totale di 415), sono stati calcolati i principali descrittori statistici (Tab. 1) e rappresentate le distribuzioni dei dati relative ai soli indici termici con il boxplot (Fig. 4).

Tab.1 – Statistiche descrittive delle variazioni di peso positive e degli indici termometrici associati.
Tab.1 – Descriptive statistics of positive weight changes and associated thermometric indices.

Statistica	Delta peso positivo (kg)	T media giornaliera (°C)	T media diurna (°C)	T media notturna (°C)
Media	1.1	16.9	19.1	14.6
Dev. standard	0.9	3.0	3.6	2.7
Min	0.01	8.4	8.8	7.4
10° Percentile	0.1	13.6	14.0	11.1
Q1	0.4	14.8	16.7	12.8
Mediana	0.9	16.4	18.9	14.5
Q3	1.6	18.7	21.9	16.5
90° Percentile	2.4	20.9	24.6	18.3
Max	4.9	24.1	27.4	20.9
IQR	1.2	3.9	5.2	3.7
Limite inferiore ¹	-1.3	9.0	9.0	7.3
Limite superiore ²	3.3	24.5	29.6	22.0

¹Q1-1,5*IQR
²Q3+1,5*IQR

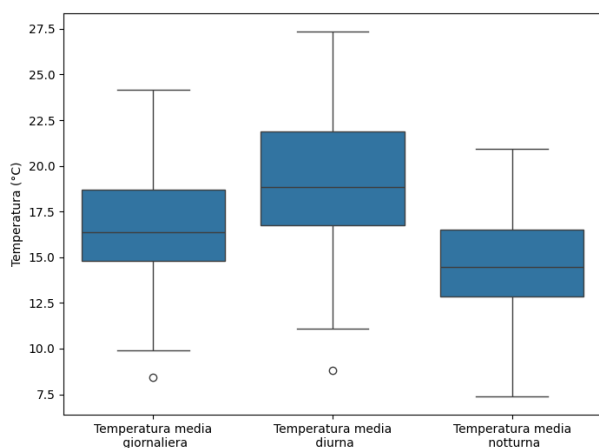


Fig.4 – Box plot degli indici termometrici associati a variazioni di peso positive.

Fig.4 – Box plot of thermometric indices associated with positive weight changes.

Per quanto riguarda la variazione di peso giornaliera, l'aumento medio è risultato pari a 1.1 ± 0.9 kg, con un valore minimo di 0.1 kg e un massimo di 4.9 kg. Si tratta di quantitativi giornalieri importanti che avvalorano la scelta di approfondire l'analisi sull'andamento termico ad essi associato.

Con lo scopo di identificare dei range di temperature ottimali rappresentativi di un'ampia quantità di dati (80%) sono stati considerati come limite inferiore e superiore, i valori degli indicatori termici individuati come 10° e 90° percentile, escludendo gli estremi più bassi e più alti.

In base a queste considerazioni, si sono identificati i seguenti intervalli di temperature ottimali:

- Temperatura media giornaliera: 13,6 °C – 20,9 °C
- Temperatura diurna: 14,0 °C – 24,6 °C
- Temperatura notturna: 11,1 °C – 18,3 °C

I range termici ottimali identificati nel presente studio risultano parzialmente coerenti con quanto riportato in letteratura per altri contesti europei, ma mostrano alcune differenze che possono essere attribuite alle specificità climatiche regionali. Rispetto ai valori indicati da studi condotti in Ungheria e Romania, i limiti superiori individuati per le temperature diurne risultano leggermente inferiori. Analogamente, anche per le temperature notturne i valori associati a una maggiore attività nettaria tendono a collocarsi su un intervallo più ampio verso il basso rispetto alle soglie indicate per contesti a clima continentale. Queste differenze sono plausibilmente riconducibili alla diversa struttura termica dei regimi climatici considerati: mentre nei contesti continentali l'escursione termica giornaliera è più ampia, nel clima temperato piemontese, con notti generalmente più miti e giornate meno calde, i meccanismi fisiologici della pianta e le risposte del sistema alveare potrebbero risultare ottimizzati per fasce termiche leggermente diverse.

Conclusioni

L'analisi condotta ha confermato, attraverso una verifica statistica, la prevedibile correlazione positiva tra l'andamento termico e la produzione nettaria della *R. pseudoacacia*. Pur trattandosi di una relazione attesa, in base alle conoscenze fisiologiche della specie, questo studio ne ha quantificato l'intensità e la significatività mediante un approccio integrato, basato sull'utilizzo dei dati meteorologici e apistici, e sulla valorizzazione dati fenologici. Infatti, l'utilizzo di finestre fenologiche definite in modo puntuale a partire dai rilievi locali ha permesso di affinare l'analisi, garantendo una maggiore coerenza spaziale e temporale tra i dati.

I risultati mostrano una correlazione positiva significativa tra le temperature e l'incremento giornaliero di peso degli alveari, con coefficienti particolarmente elevati per la temperatura media giornaliera e, in misura comparabile, per la temperatura notturna. Questo evidenzia come l'attività nettaria e l'accumulo di peso siano influenzati da condizioni termiche favorevoli e stabili, e suggerisce un ruolo fisiologicamente importante delle temperature notturne — indice termico poco considerato in letteratura — nel modulare la secrezione di nettare da parte della robinia. Sebbene il *focus* dell'analisi sia orientato a distinguere il contributo specifico delle temperature diurne e notturne, è inclusa anche la temperatura media giornaliera tra le variabili di interesse. Questo è stato fatto non solo per completezza metodologica, ma anche in un'ottica applicativa: qualora si volesse approfondire l'analisi anche con l'obiettivo di sviluppare uno strumento operativo, i dati di temperatura media giornaliera risultano generalmente più accessibili e facilmente utilizzabili. Si tratta di risultati preliminari che dovranno essere integrati includendo nell'analisi anche altre grandezze agrometeorologiche, poiché il flusso di nettare non è esclusivamente influenzato dalle condizioni termometriche.

L'identificazione di range termici ottimali, ottenuta escludendo gli estremi della distribuzione, ha permesso di individuare intervalli di temperatura favorevoli alla produzione nettaria, diversi da quelli riportati in studi precedenti condotti in altre aree geografiche. I risultati del presente studio, che evidenziano temperature ottimali lievemente inferiori (soprattutto per la componente notturna), possono essere interpretati alla luce delle differenze climatiche regionali tra il Piemonte e i paesi dell'Europa orientale.

Un ulteriore aspetto di valore è rappresentato dalla variabilità interannuale inclusa nel dataset. I tre anni analizzati (2022, 2023 e 2024) hanno mostrato condizioni meteorologiche e produttive molto diverse: il 2022 è stato caratterizzato da condizioni favorevoli e buone produzioni, mentre il 2023 ha subito gelate tardive e il 2024 è stato segnato da piogge persistenti e temperature inferiori alla norma durante la fioritura, con conseguenti produzioni scarse o nulle. Questa eterogeneità rende il dataset particolarmente rappresentativo di una realtà climatica caratterizzata da alta variabilità.

I risultati di questa analisi forniscono indicazioni utili per interpretare la variabilità della produzione di miele in funzione del clima e offrono spunti concreti per migliorare

la comprensione dei meccanismi ambientali alla base della produzione di miele e possono supportare gli apicoltori in scelte gestionali più consapevoli in un'ottica di adattamento alle nuove condizioni climatiche. Più in generale, il lavoro si inserisce nell'ambito dell'agrometeorologia applicata alla gestione dei processi produttivi, evidenziando il valore dell'integrazione tra fonti dati diverse per la comprensione e l'ottimizzazione delle attività apistiche.

La disponibilità e l'integrazione dei dati rappresentano un elemento critico. Per gli anni analizzati, è stato necessario effettuare una sovrapposizione *ex post* tra le anagrafiche dei siti di monitoraggio fenologico e quelle degli alveari dotati di bilance. In occasione della campagna di monitoraggio fenologico IPHEN dell'anno in corso, è stata introdotta un'importante innovazione metodologica: la pianificazione preventiva e coordinata delle attività di rilevamento, resa possibile grazie all'attiva collaborazione con le associazioni apistiche territoriali. In particolare, il supporto di Aspromiele e la disponibilità dei soci ha consentito di ottimizzare la distribuzione spaziale dei rilievi in Piemonte, garantendo, per il maggior numero possibile di bilance, la presenza di almeno un sito fenologico di *R. pseudoacacia* entro un raggio massimo di 3 km. La medesima strategia è stata applicata in Lombardia grazie al coinvolgimento dell'Associazione Apistica Apilombardia⁵, ciò permetterà di estendere l'analisi a una scala territoriale più ampia e di coprire uno dei principali areali italiani di produzione di miele di acacia.

Il contributo diretto delle associazioni apistiche ha rappresentato un elemento chiave per superare le criticità logistiche del monitoraggio e per costruire una rete integrata di osservazione ad alta rilevanza applicativa. Tale approccio collaborativo costituisce inoltre una base solida per lo sviluppo di un protocollo operativo condiviso, da estendere in futuro ad altri contesti territoriali e a diverse specie mellifere di interesse apistico.

Ringraziamenti

Questa ricerca è parte integrante delle attività del Progetto IPHEN – Italian Phenological Network, nell'ambito delle attività di Rete Rurale Nazionale.

Bibliografia

- ARPA Piemonte. (2021). *Relazione annuale sulla qualità dell'aria e clima*.
- Beekman, M., & Ratnieks, F. L. W. (2000). Long-range foraging by the honey-bee, *Apis mellifera* L. *Functional Ecology*, 14(4), 490–496. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2000.00443.x>
- Defila, C., & Clot, B. (2001). Phytophenological trends in Switzerland. *International Journal of Biometeorology*, 45(4), 203–207. <https://doi.org/10.1007/s004840100101>
- Jakobsen, H. B., & Kristjánsson, K. (1994). Influence of Temperature and Floret Age on Nectar Secretion in *Trifolium repens* L. *Annals of Botany*, 74(4), 327–334.
- Kardos, I. (1974). Megfigyelések az akácról. *Méhészet*, 22(4), 66–67.
- Márton, Á. (2011). *Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó. Méhészet*.
- Osservatorio Nazionale Miele. (2023). *Miele - Andamento produttivo e di mercato per la stagione 2022*. www.informamiele.it
- Osservatorio Nazionale Miele. (2024). Andamento produttivo e di mercato miele stagione 2023. *Il Valore della Terra*.
- Osservatorio Nazionale Miele. (2025). *Monitoraggio produzione e mercato del miele - STAGIONE 2024*.
- Pacini, E., & Nepi, M. (2007). Nectar Production and Presentation. In *Nectaries and Nectar* (pp. 167–214).
- Pătruică, S., Dezmirean, D. S., Bura, M., Jurcoane, R., & Sporea, A. (2017). Monitoring of Bee Colonies' Activity During the Major Gatherings in 2017. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Animal Science and Biotechnologies*, 74(2), 92. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-asb:0001>
- Ricciardelli d'Albore, G., & Intoppa, F. (2000). *Fiori e Api: La flora visitata dalle Api e dagli altri Apoidei in Europa*.
- Thiemig, V., Gomes, G. N., Skøien, J. O., Ziese, M., Rauthe-Schöch, A., Rustemeier, E., Rehfeldt, K., Walawender, J. P., Kolbe, C., Pichon, D., Schweim, C., & Salamon, P. (2022). EMO-5: a high-resolution multi-variable gridded meteorological dataset for Europe. *Earth System Science Data*, 14(7), 3249–3272. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3249-2022>
- Verrascina, M. (2024). *Api e Miele: opportunità, potenzialità e minacce per una filiera essenziale*. CREA (Accessed on 2025-04-10). <https://www.crea.gov.it/en/-/api-e-miele-opportunità-potenzialità-e-minacce-per-una-filiera-essenziale>

⁵ <https://www.apilombardia.it/>

IMPROVING THE ESTIMATION OF SOLAR RADIATION AND EVAPOTRANSPIRATION FOR CROP MODELS USING THE HARGREAVES- SAMANI METHOD AT THE EUROPEAN SCALE

MIGLIORARE LA STIMA DELLA RADIAZIONE SOLARE E DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE PER I MODELLI COLTURALI UTILIZZANDO IL METODO HARGREAVES-SAMANI A SCALA EUROPEA

Marco Perfetto^{1*}, Leonardo Vario¹, Giorgio Ragaglini¹, Gabriele Cola¹

¹ Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali, Università degli Studi di Milano, via Celoria 2, Milano

* marco.perfetto@unimi.it

Abstract

Crop models are increasingly used to assess cropping systems response under future climate scenarios. Reliable solar radiation (Rs) and evapotranspiration (ET₀) data are therefore essential to feed simulation processes of crop growth and development. Machine learning regression algorithms (MLRA) models and multiple linear regression (MLR) were trained to estimate the Rs coefficient (k_{Rs}) of the Hargreaves-Samani (HS) equation at European level, utilizing location, daily temperatures, rainfall, and extra-terrestrial Rs data from European Climate Assessment & Dataset (ECAD). The models were trained on 6.9M and validated on 2.8M daily meteorological data, respectively. Results show MLRA outperformed MLR, improving Rs and ET estimates over standard HS coefficients. In validation, MLRA reduced both the rRMSE of Rs and ET₀ by 17.4% (-0.63 MJ m⁻² d⁻¹; -0.28 mm d⁻¹). These improvements could enhance the effectiveness of models in simulating key processes of crop growth and development under different climate scenarios.

Parole chiave

Crop models; machine learning; solar radiation; reference evapotranspiration

Keywords

Modelli colturali; machine learning; radiazione solare; evapotraspirazione di riferimento

Introduzione

La possibilità di adattamento dei sistemi colturali al cambiamento climatico in atto richiede la progettazione e sviluppo di tecnologie e strategie finalizzate a migliorare la resilienza dei sistemi, la resistenza delle colture e l'efficienza d'uso dei fattori produttivi. I modelli di sistema colturale basati sui processi assumono un ruolo fondamentale per analizzare l'effetto di tattiche e strategie di gestione dei sistemi colturali in condizioni climatiche variabili. Nei modelli di sistema colturale, la crescita delle colture viene simulata secondo tre approcci principali: guidati dall'assorbimento della CO₂ (Goudriaan & Van Laar, 1994; Perego et al., 2013; van Diepen et al., 1989), dall'assorbimento della radiazione solare – Rs (Brisson et al., 1998; Keating et al., 2003; Ritchie et al., 1985; Stöckle et al., 2003) oppure dal flusso traspirativo (Steduto et al., 2009; Stöckle et al., 2003). Indipendentemente dall'architettura dei processi di crescita, Rs è una variabile chiave in quanto i parametri che regolano l'assimilazione della CO₂ per unità di Rs assorbita, ma anche l'efficienza d'uso di Rs, e della traspirazione sono determinati per la simulazione della produzione potenziale di biomassa (Confalonieri et al., 2016). Ne consegue, che l'utilizzo valori di Rs e quindi anche di ET₀ gravati da errori di misura e stima (in caso di serie sintetiche), può comportare sovrastime o sottostime non trascurabili nelle variabili di stato e di uscita da parte dei modelli.

L'utilizzo delle equazioni proposte da Hargreaves e Samani (1982) è ampiamente ricorrente a livello bibliografico e

costituisce parte integrata di molteplici modelli in quanto permette di stimare in maniera molto pratica ed economica Rs ed ET₀, a partire da variabili facilmente misurabili quali la temperatura massima e minime e la latitudine del sito. In particolare, la stima di Rs è possibile attraverso k_{Rs}, coefficiente adimensionale che spiega la relazione esistente tra il rapporto Rs/R_a (R_a: radiazione extraterrestre) e la radice quadratica dello scarto termico giornaliero. Hargreaves e Samani, nello sviluppo del metodo, hanno identificato valori costanti di k_{Rs} per zone interne e costiere pari a 0.16 e 0.19, rispettivamente. Gli stessi autori indicano però la necessità di calibrare k_{Rs} in base alle condizioni sito-specifiche. Questo studio ha avuto come obiettivo lo sviluppo e l'analisi di più metodi di calibrazione del coefficiente k_{Rs} a time-step giornaliero in funzione di variabili meteorologiche e geografiche, attraverso modelli di regressione lineare multipla (MLR) o algoritmi di Machine Learning (MLRA). L'effetto dei due approcci sulla stima di Rs ed ET₀ è stato confrontato con il metodo dei coefficienti standard proposti da Hargreaves e Samani, utilizzando come caso studio serie storiche di dati meteorologici dell'European Climate Assessment & Dataset (ECAD).

Materiali e Metodi

Per calibrare il k_{Rs} sono stati utilizzati i dati meteorologici giornalieri blended disponibili dall'European Climate Assessment & Dataset (<https://www.ecad.eu/> ultimo accesso 16/04/2025). Sono stati utilizzati i dati grezzi misurati di temperature massime (T_x) e minime (T_n), precipitazioni (P)

e radiazione solare di 710 stazioni comprese in intervallo di latitudine da 22.8° S a 81.6° N. I dati grezzi sono stati organizzati in un database relazionale e georeferenziato in ambiente PostgreSQL e filtrati per i soli dati classificati come validi e successivi al 1980. Ra giornaliera è stata calcolata applicando il metodo di Allen et al. (1998), quindi ad ogni stazione meteorologica è stato assegnato l'attributo "interno" o "costiero" in base ad un limite di distanza euclidea dalla costa di 10 km e il relativo valore default di kR_{HS} proposto da Hargreaves e Samani (1982) per la stima di Rs e l'ET0. Inoltre, è stato calcolato il valore osservato di kR_{So} giornaliero a partire dalle variabili misurate secondo il modello Hargreaves Samani, per cui:

$$kR_{So} = \frac{Rs}{Ra\sqrt{Tx - Tn}}$$

La stima e la calibrazione di kRs a passo giornaliero è stata eseguita in ambiente R (R Core Team, 2022), confrontando i seguenti approcci: i) MLR, ii) due algoritmi MLRA: random forest (RF; Wright & Ziegler, 2017) e XGBoost (XGB; Chen et al., 2025) e iii) un ensemble lineare delle predizioni tra XGB e RF. Le variabili indipendenti utilizzate come predittori sono state quindi quelle alle quali kRs si relaziona secondo l'approccio Hargreaves-Samani (Ra, Tx e Tn), P, in quanto possibile indicatore della copertura nuvolosa e dato frequentemente disponibile, e variabili geografiche quali latitudine, longitudine, altitudine. I MLRA sono stati allenati al fine di minimizzare l'errore quadratico medio (RMSE). L'intero database è stato suddiviso in modo randomico: il 70% delle stazioni meteorologiche (6.9M record giornalieri) è stato utilizzato per il training dei modelli e 30% (2.8M record giornalieri) per la validazione, garantendo due dataset spazialmente indipendenti. Le predizioni giornaliere di kRs sono state poi integrate nelle equazioni per la stima di Rs ed ET0. I valori predetti di kRs , Quindi le prestazioni dei modelli di predizione sono state valutate calcolando l'errore assoluto medio (MAE), l'errore quadratico medio relativo (rRMSE), il coefficiente di determinazione aggiustato (R^2_{adj}) rispetto a Rs misurato e ai valori kRs derivato da Rs misurato ed ET0 calcolato utilizzando Rs misurato e la riduzione percentuale (dRs e dET0) dell'rRMSE di Rs e ET0 predetti dai modelli valutati rispetto a quelli predetti tramite modello Hargreaves Samani (HS) basato sui valori di default kR_{HS} . Infine, è stato implementato un test T di Student al fine di valutare le differenze nelle stime tra il valore osservato e i valori stimati a time-step mensile.

Risultati e Discussione

L'utilizzo di tutte le soluzioni modellistiche valutate ha consentito di ottenere stime di kRs molto più vicine ai valori misurati di rispetto ai valori kR_{HS} . Infatti, in validazione (Tab. 1) l'rRMSE si riduce da 0.39 fino 0.32, ottenuto con l'ensemble delle predizioni tra XGB e RF (-17.9%). I MLRA hanno performato sempre meglio rispetto alla LMR, e l'ensemble delle predizioni MLRA è sempre migliorativo rispetto alle predizioni di singoli modelli MLRA. L'utilizzo di un coefficiente ricalibrato giornalmente per condizioni sito-specifiche ha permesso di aumentare la varianza

spiegata da 0.04 del modello HS basato su coefficienti di default a 0.32 di RF dell'ensemble MLRA.

Tab.1 - Risultati delle performance dei modelli allenati per la stima del kRs sul dataset di validazione ed effetti di riduzione dell'errore nella stima di Rs ed ET0 rispetto al benchmark (HS).

Tab.1 - Performance results of the models trained to estimate kRs on the validation dataset and error reduction effects in estimating Rs and ET0 compared with the benchmark (HS).

Modello	MAE (-)	rRMSE (-)	R^2_{adj} (-)	dRs (%)	dET0 (%)
ENS	0.035	0.32	0.32	-17.4	-17.4
RF	0.036	0.32	0.32	-17.4	-17.4
XGB	0.038	0.33	0.27	-13.4	-13.4
LM	0.044	0.37	0.09	-3.3	-2.7
HS	0.047	0.39	0.04	-	-

I risultati divisi per singola stazione meteorologica (Fig. 1) presente nel dataset di validazione (n = 304), confermano come per ciascun sito l'utilizzo dell'ENS abbia ridotto l'rRMSE del kRs in media del 20.9%, con un massimo di -78.6% e un minimo di 0.7% rispetto a kR_{HS} . Non è stato osservato un pattern spaziale della riduzione dell'errore riconducibile alla geografia delle stazioni meteorologiche, il che permette di concludere che le stime effettuate tramite i modelli siano affette da un errore casuale, non autocorrelato, evidenziando robustezza e validità della stima in ambienti caratterizzati da condizioni climatiche differenti.

È stata invece osservata una distribuzione dell'errore legata alla stagione dell'anno (Fig. 2). Infatti, così come quando vengono utilizzati i coefficienti standard di kRs , anche l'rRMSE medio mensile del kR_{SENS} tende ad essere più alto nei mesi invernali rispetto a quelli estivi. Tale bias può essere dovuto alla presenza di copertura nuvolosa che il metodo di stima non considera, se non nei giorni con $P > 0$.

La stima del kRs a time-step giornaliero e in modo sito specifico ha sempre migliorato la conseguente stima di Rs ed ET0. Infatti, l'errore di stima per Rs ed ET0 si riduce del 17.4% rispetto al metodo HS. Questo comporta che il MAE di Rs predetto utilizzando kRs stimato con ENS sia di 2.12 MJ m⁻² d⁻¹ rispetto a 2.75 MJ m⁻² d⁻¹ ottenuto con HS. In ET0 il MAE si riduce da 1.13 dell'ENS a 0.87 di HS. Sebbene si osserva come l'rRMSE delle stime giornaliere rimanga comunque importante (0.28 su Rs e 0.27 su ET0), confrontando il valore medio mensile osservato e stimato con ENS e HS su kRs , Rs ed ET0 emerge come le stime ENS non sono statisticamente diverse dai dati osservati (p-value > 0.05) mentre le stime HS sono significativamente maggiori (p-value < 0.01).

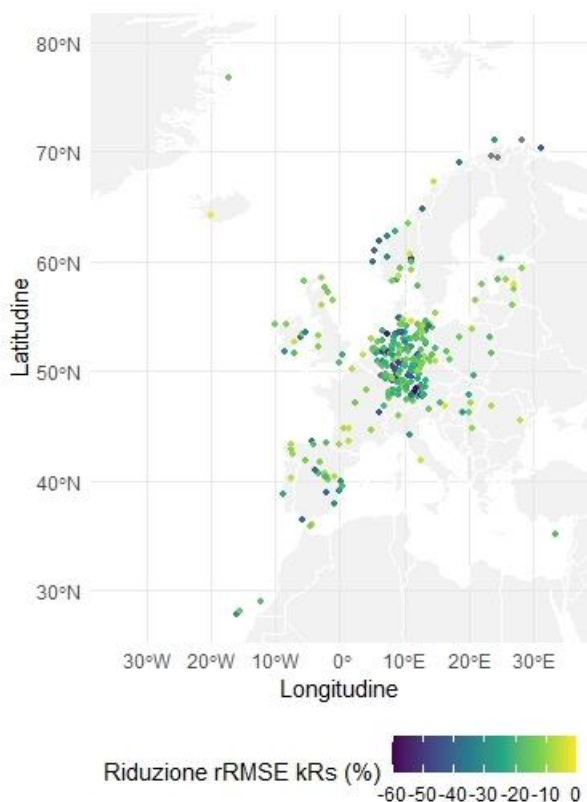


Fig.1 - Distribuzione della riduzione percentuale dell' $rRMSE$ sulla stima del kRs tra i siti di validazione applicando l'ENS rispetto ad HS.

Fig.1 - Distribution of percentage reduction of $rRMSE$ on kRs estimation among validation sites by applying ENS versus HS.

Per quanto riguarda le applicazioni dei modelli di sistemi colturali, la sovrastima di R_s ed ET_0 determina una sovrastima dei tassi giornalieri di crescita ed evapotraspirazione effettiva delle colture, portando ad alterare i bilanci di carbonio, azoto e acqua, quando non essendo disponibili misure di R_s si è costretti a ricorrere al metodo HS per la sua stima.

Inoltre, la robustezza delle stime ottenute con ENS rispetto all'approccio tradizionale HS evidenzia l'importanza di considerare la variabilità spaziale e temporale del kRs per migliorare l'affidabilità delle simulazioni agrometeorologiche. L'analisi dei risultati ha anche messo in evidenza come l'introduzione di predittori legati alla localizzazione geografica e alla precipitazione, pur con semplici metodi di MLRA, consenta un sostanziale incremento della precisione senza la necessità di misure dirette di copertura nuvolosa o radiazione. Tuttavia, la persistenza di un errore relativamente elevato nei mesi invernali suggerisce che l'inclusione di ulteriori variabili atmosferiche (come la copertura nuvolosa osservata o l'umidità relativa) o geografiche (come l'esposizione dei versanti, in caso di ambienti collinari e geografici) potrebbe ulteriormente migliorare la stima di R_s e ET_0 in condizioni climatiche più complesse che però non sono contemplati nella semplicità del metodo Hargreaves Samani (1982).

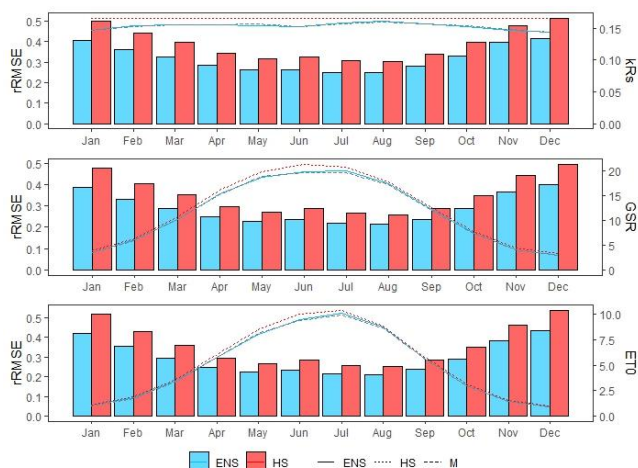


Fig.2 - Andamento dell' $rRMSE$ sulle stime giornaliere raggruppate per mese dell'anno di kRs , GSR ed ET_0 tra ENS (in azzurro) e HS (in rosso). Le linee rappresentano il valore medio mensile assunto da ciascuna variabile: in nero il valore osservato (M), in azzurro l'ENS e in rosso HS.

Fig.2 - Trend of $rRMSE$ on daily estimates grouped by month of the year of kRs , GSR and ET_0 between ENS (in light blue) and HS (in red). The lines represent the average monthly value taken by each variable: in black the observed value (M), in blue the ENS and in red HS.

Conclusioni

La calibrazione sito-specifica e dinamica del coefficiente kRs mediante tecniche di machine learning ha permesso di ridurre significativamente l'errore nella stima della radiazione solare giornaliera e dell'evapotraspirazione di riferimento rispetto al metodo tradizionalmente più diffuso di Hargreaves Samani, basato sull'utilizzo kRs standard. Il modello ensemble basato su Random Forest e XGBoost ha mostrato le migliori performance, garantendo stime più accurate e prive di bias sistematici a scala europea. Questi risultati dimostrano come un approccio data-driven possa migliorare la qualità delle stime agrometeorologiche, contribuendo ad aumentare la robustezza dei modelli di sistema colturale in scenari di cambiamento climatico.

Bibliografia

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop requirements. FAO Irrig. Drain. Report modeling and application. *J. Hydrol.*, 285, 19–40.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J. M., & Delécolle, R. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18(5–6), 311–346. <https://doi.org/10.1051/agro:19980501>
- Chen, T., He, T., Benesty, M., Khotilovich, V., Tang, Y., Cho, H., Chen, K., Mitchell, R., Cano, I., Zhou, T., Li, M., Xie, J., Lin, M., Geng, Y., Li, Y., Yuan, J., &

- implementation), Xgb. contributors (base Xgb. (2025). *xgboost: Extreme Gradient Boosting* (Version 1.7.10.1) [Software]. <https://cran.r-project.org/web/packages/xgboost/index.html>
- Confalonieri, R., Orlando, F., Paleari, L., Stella, T., Gilardelli, C., Movedi, E., Pagani, V., Cappelli, G., Vertemara, A., Alberti, L., Alberti, P., Atanassiu, S., Bonaiti, M., Cappelletti, G., Ceruti, M., Confalonieri, A., Corgatelli, G., Corti, P., Dell'Oro, M., ... Acutis, M. (2016). Uncertainty in crop model predictions: What is the role of users? *Environmental Modelling & Software*, *81*, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.009>
- Goudriaan, J., & Van Laar, H. H. (1994). *Modelling Potential Crop Growth Processes* (Vol. 2). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0750-1>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating Potential Evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *108*(3), 225–230. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001390>
- Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J. N. G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J. P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K. L., Asseng, S., ... Smith, C. J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, *18*(3), 267–288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
- Perego, A., Giussani, A., Sanna, M., Fumagalli, M., Carozzi, M., Alfieri, L., Brenna, S., & Acutis, M. (2013). The ARMOSA simulation crop model: Overall features, calibration and validation results. *Italian Journal of Agrometeorology*, *18*, 23–38.
- R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. *R Foundation for Statistical Computing* (Version 4.2.2) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ritchie, J. T., Godwin, D. C., & Otter-Nacke, S. (1985). *CERES-Wheat. A simulation model of wheat growth and development*. Texas A & M Univ. Press College Station.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, *101*(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Stöckle, C. O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, *18*(3), 289–307. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0)
- van Diepen, C. a., Wolf, J., van Keulen, H., & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, *5*(1), 16–24. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x>
- Wright, M. N., & Ziegler, A. (2017). ranger: A Fast Implementation of Random Forests for High Dimensional Data in C++ and R. *Journal of Statistical Software*, *77*, 1–17. <https://doi.org/10.18637/jss.v077.i01>

APPLICATION OF THE ARMOSA DYNAMIC SIMULATION MODEL IN PIEDMONT AT DIFFERENT SCALE

APPLICAZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE DINAMICO ARMOSA IN PIEMONTE A DIFFERENTI SCALE TERRITORIALI

Jacopo Maffia^{1*}, Stefano Barbero², Federico Spanna³, Maria Governa¹, Elena Anselmetti³, Marco Acutis⁴, Alessia Perego⁴, Marco Botta⁴

¹ Regione Piemonte - Settore Tutela e uso sostenibile delle acque, Piazza Piemonte 1, 10127 Torino (TO)

² 3A s.r.l., via Le Chiuse 68, 10144 Torino (TO)

³ Regione Piemonte - Settore Fitosanitario servizi tecnico-scientifici, Via Livorno 60, 10144 Torino (TO)

⁴ Università di Milano Dipartimento di Scienze agrarie e alimentari, Via Celoria 2, 20133 Milano (MI)

*jacopo.maffia@regione.piemonte.it

Abstract

The simulation of growth and productivity processes of agricultural crops is of great importance in the field of agrometeorology and allows to derive important information for the management of agricultural crops and for the evaluation of the best agronomic techniques. ARMOSA is a dynamic simulation model which simulate crop growth and development, water and nitrogen dynamics under different pedoclimatic conditions and cropping systems in the arable land. The model has been made applicable to the Piedmontese agricultural territory and to the different cultivation, soil and climatic realities and a first application has been carried on for the simulation of nitrogen leaching processes in areas of particular attention such as the Nitrate Vulnerable Zones.

Parole chiave

modelli di simulazione, lisciviazione dell'azoto, Zone Vulnerabili ai Nitrati, crescita colturale

Keywords

Simulation model, nitrogen leaching, Nitrate vulnerable zones, crop growth

Introduzione

La modellizzazione dei processi che avvengono all'interno di un agroecosistema costituisce uno strumento di grande importanza perché consente di derivare importanti informazioni sulla simulazione della crescita e produttività delle colture, sui contenuti idrici dei terreni e sui processi di scambio tra suolo, atmosfera e colture. Tali informazioni costituiscono una base fondamentale a livello aziendale per la razionalizzazione delle tecniche di coltivazione, ma possono costituire anche un importante supporto per applicazioni a livelli territoriali più estesi per l'orientamento delle attività di pianificazione e programmazione di interventi regionali. Da questo punto di vista in Regione Piemonte una problematica di grande rilevanza agricola ed ambientale è costituito dall'inquinamento da nitrati delle risorse idriche superficiali e sotterranee, che determina la vulnerabilità di estesi areali agricoli.

Il Piemonte è caratterizzato da un'intensa attività zootecnica, con circa il 10% delle Unità Bovine Adulte (UBA) totali allevate a livello nazionale (ISTAT, 2022), concentrata nelle zone di pianura e, in modo particolare, nelle aree del Torinese e del Cuneese. L'attività zootecnica ha storicamente contribuito ad un aumento delle concentrazioni di nitrati in falda, che ha portato alla designazione, in più fasi successive, di Zone Vulnerabili da Nitrati (ZVN), sulle quali viene applicato un Programma d'Azione ai sensi della Direttiva Nitrati (DN; 91/676/CEE). Nell'ambito dell'applicazione della DN in Piemonte, sono state individuate delle misure in particolare tese a mitigare

l'apporto di nitrati ai corpi idrici sotterranei. Considerata la natura intrinseca dei corpi idrici sotterranei, che reagiscono alle misure in maniera lenta e non uniforme nel tempo e nello spazio, risulta difficile valutare l'efficacia delle misure stesse e restituire una previsione dei tempi di rientro attesi sulla riduzione delle concentrazioni di nitrati nelle acque. Per effettuare tali valutazioni, espressamente richieste dalla Commissione Europea, è utile quindi impiegare approcci modellistici che permettano di stimare l'apporto di nitrati lisciviati a scala territoriale; tale apporto potrà poi essere impiegato come dato di input per modellazioni di natura idrogeologica.

Per questo, e per altri scopi, si è fatto ricorso al modello agrometeorologico ARMOSA (Perego et al., 2013). Lo studio in oggetto ha avuto quindi come scopo principale la realizzazione di uno strumento che permettesse di applicare il modello agrometeorologico ARMOSA sul territorio di interesse agricolo in Piemonte, raccogliendo e configurando tutti i dati di input necessari in modo automatico. Il modello ARMOSA necessita di dati meteorologici e descrizioni delle caratteristiche del suolo, e permette di simulare vari scenari di successioni culturali, tecniche di irrigazione e fertilizzazione. Il modello permette di calcolare diversi tipi di indicatori legati alla fenologia e produttività delle colture, il bilancio idrico del suolo, e stimare gli scambi di azoto e carbonio tra suolo e pianta.

Nel caso specifico il modello agro-meteorologico ARMOSA è stato applicato per stimare l'apporto di nitrati lisciviati nel periodo 2005-2023, mettendolo in relazione con il tenore di nitrati riscontrato in falda. Per ragioni di

tempistiche computazionali, questa prima valutazione si è concentrata su di un areale ridotto, di circa 1000 ha, sito in ZVN e caratterizzato da un elevato carico zootecnico.

Materiali e Metodi

Lo strumento realizzato in questo studio utilizza i dati meteo della RAM (Rete Agrometeorologica Piemontese) per la raccolta dei dati meteorologici, composta di 120 stazioni, le informazioni di Openmeteo per l'integrazione di dati meteo modellistici (modello ERA5) laddove mancano quelli della RAM, e la carta dei suoli realizzata da IPLA S.P.A. (con un livello di dettaglio 1:50.000) come fonte di dati del suolo. In particolare per la descrizione del suolo vengono utilizzati la tessitura del topsoil e del subsoil (strati 0-30cm e 30-60cm), il pH, il contenuto di carbonio organico e la bulk density.

La piattaforma informatica così realizzata, è quindi in grado di generare simulazioni del modello ARMOSA in un qualunque punto della zona di interesse coperta dalla carta dei suoli, utilizzando come dati meteo quelli della stazione meteo RAM più vicina e che abbia uno storico di almeno 20 anni. La potenzialità dello strumento è dunque quella di avviare contemporaneamente simulazioni a scale territoriali diverse utilizzando molti punti con diverse combinazioni di dati meteo e caratteristiche pedologiche per ottenere una descrizione spaziale estesa. In totale, le aree uniformi individuate a livello regionale sono oltre 27.000.

Un aspetto a cui prestare particolare attenzione è la definizione di condizioni standard di successione colturale ed operazioni come le fertilizzazioni, che ai fini della simulazione si suppongono omogenee sull'intera zona.

Il modello ARMOSA, dopo aver identificato uno o più scenari agronomici (rotazione colturale, metodo irriguo, fertilizzazioni, ecc.), può essere applicato per ciascuna area uniforme, generando uno scenario specifico. I risultati del modello possono successivamente essere aggregati costituendo uno scenario medio, ottenuto pesando i dati di output (tra cui i nitrati lisciviati al fondo del profilo di suolo, in kg/ha), relativo a ogni area in base alla superficie sottesa, rappresentativo di aree più vaste.

Ai fini di questo studio, lo scenario agronomico è stato semplificato, selezionando una sola rotazione colturale su 3 anni (Mais da insilato+Loietto → Mais da insilato+Frumento insilato → Soia+Loietto) e ipotizzando l'applicazione di irrigazione a scorrimento, con una turnazione di circa 10 giorni. Per quanto riguarda l'azoto di origine zootecnica è stato ipotizzato un apporto (in forma di liquame bovino) pari a 170 kg/ha di N (conforme con il limite previsto dalla in ZVN), integrato con fertilizzazione minerale fino al soddisfacimento del fabbisogno delle colture (in conformità alle tabelle degli apporti massimi di azoto efficiente, MAS, che possono essere apportate per ciascuna coltura secondo la normativa vigente).

Il dato di concentrazione di nitrati in falda è fornito dalle stazioni della Rete di monitoraggio Regionale delle Acque Sotterranee, che sono monitorate con frequenza semestrale.

La Fig. 1 mostra un inquadramento dell'area oggetto di studio e la posizione delle stazioni agro-meteorologiche e dei pozzi di monitoraggio delle acque sotterranee.

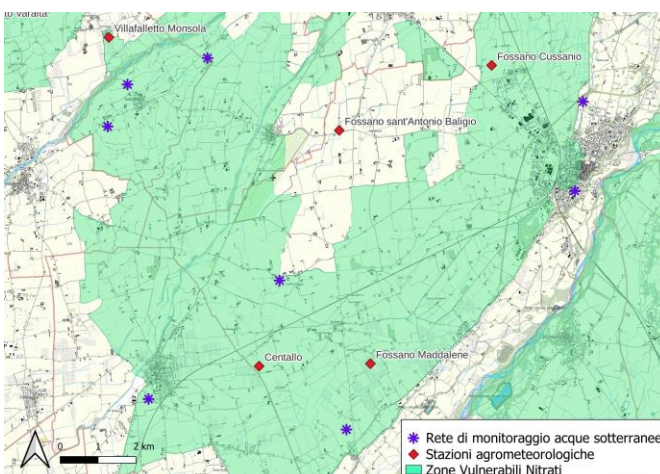


Fig.1 - Aree designate oggetto di studio e posizionamento delle stazioni della RAM e della rete di monitoraggio delle acque sotterranee.

Fig.1 - Study areas, meteorological stations (RAM) and groundwater monitoring network.

Risultati e Discussione

Gli output aggregati territorialmente delle simulazioni effettuato con il modello ARMOSA sono illustrati, su base giornaliera, nei grafici in Fig.2. Il modello ha permesso di effettuare una stima del flusso di drenaggio a 1 m di profondità e della lisciviazione complessiva di nitrati dall'area di interesse con riferimento ad uno scenario agronomico standard. Il quantitativo totale di nitrati lisciviati su base annua, stimato dal modello nel periodo compreso tra il 2005 e il 2023, varia tra i 27 e il 187 kg ha⁻¹ anno⁻¹; questi valori risultano coerenti con quelli calcolati da Perego et al. (2012) in Regione Lombardia a partire da campionamenti della concentrazione circolante del suolo effettuati con coppe porose. Per quanto verosimili in termini assoluti, i dati di lisciviazione ottenuti sono da considerarsi esclusivamente da un punto di vista delle loro variazioni relative, di confronto tra periodi, in quanto il sistema agronomico preso a riferimento non è sufficientemente rappresentativo dell'area oggetto di studio. La Fig. 3 illustra i dati di drenaggio e di lisciviazione a 1 m di profondità aggregati su base annua, in comparazione con la concentrazione di nitrati in falda, riscontrata nelle stazioni della rete di monitoraggio regionale. Gli andamenti stimati dal modello, pur ottenuti attuando un'estrema semplificazione del sistema agronomico, mostrano un andamento coerente con quello delle concentrazioni di nitrati misurate. Si osserva, infatti, che a seguito degli anni in cui il modello stima un contestuale aumento dei flussi di drenaggio e della lisciviazione di nitrati (es. nel 2008, 2010, 2014 e nel 2018), si è verificato un incremento delle concentrazioni di nitrati in falda nell'anno stesso o nell'anno successivo.

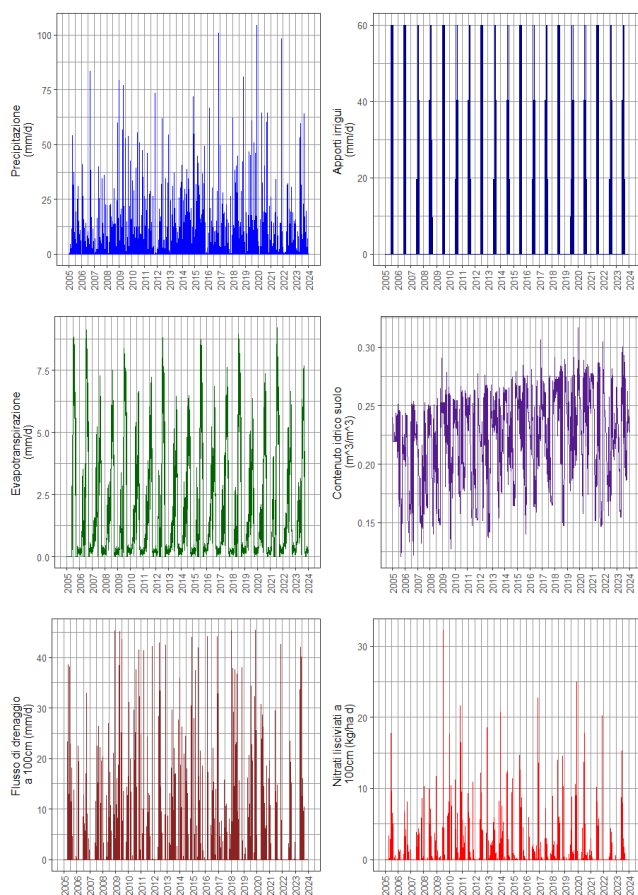


Fig.2 - Grafici degli andamenti giornalieri medi di alcune grandezze fornite come input (precipitazione e apporto irriguo) e calcolate dal modello come dato di output (evapotraspirazione; contenuto idrico del suolo, flusso di acqua di drenaggio; nitrati lisciviati).

Fig.2 - Graphs of the average daily trends of some variables provided (precipitation and irrigation supply) and calculated by the model as output data (evapotranspiration, soil water content, drainage water flow, leached nitrates).

In generale, la variabilità delle concentrazioni di nitrati in falda risulta essere inferiore rispetto alla variazione dei volumi di drenaggio e dei nitrati lisciviati, aspetto possibilmente dovuto ai lenti tempi di reazione dei corpi idrici sotterranei, dalle variazioni di soggiacenza. Peraltro, è importante ricordare il fatto che gli orizzonti di suolo considerati nella modellizzazione raggiungono solo i 100 cm di profondità, mentre in condizioni reali si osservano suoli con profondità molto maggiori.

In generale, i risultati presentati in Fig. 3 forniscono una prima indicazione positiva in merito alla possibilità di applicare il modello ARMOSA su aree vaste in Regione Piemonte, traendone indicazioni verosimili sulla lisciviazione di nitrati in falda. In prospettiva, le applicazioni della metodologia descritta in questo articolo dovrebbero essere ampliate sia territorialmente, arrivando a coprire l'intero territorio regionale, sia maggiormente

articolate per quanto riguarda il livello di dettaglio dei dati di input. In particolare, un sostanziale miglioramento può essere ottenuto dal punto di vista della descrizione del sistema agronomico, impiegando i dati disponibili nell'anagrafe agricola regionale.

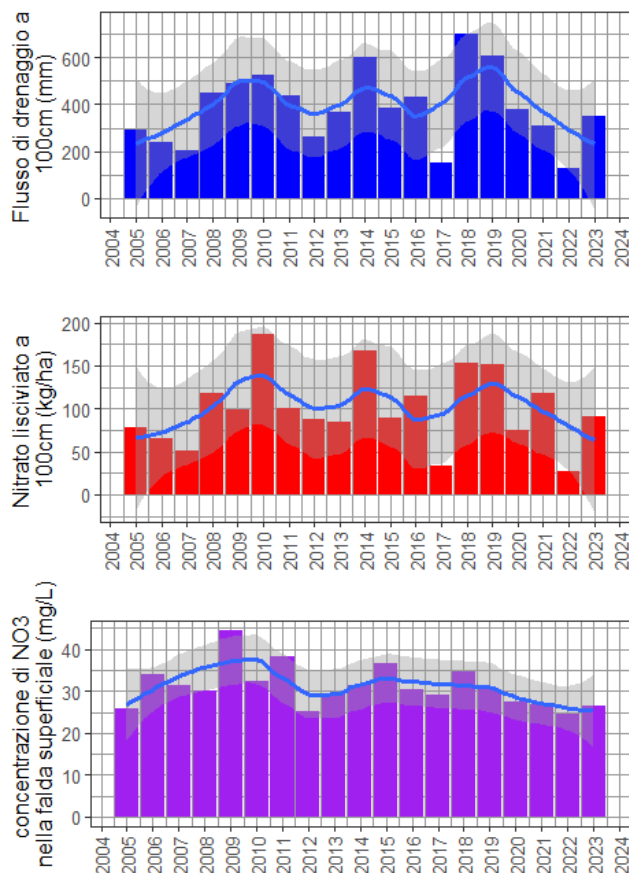


Fig.3 - Grafici degli andamenti annuali del flusso di acqua di drenaggio e dei nitrati lisciviati, stimati dal modello ARMOSA, e della concentrazione di nitrati in falda, misurata nei pozzi della rete di monitoraggio regionale. La linea blu è ottenuta con la metodologia di smoothing LOESS (locally estimated scatterplot smoothing) e l'area grigia coincide con gli intervalli di confidenza al 95%.

Fig.3 - Graphs of the annual trends of drainage water flow and leached nitrates, estimated by the ARMOSA model, and of the nitrate concentration in the groundwater, measured in the wells of the regional monitoring network. The blue line represents a LOESS smoothing path and the grey area is the 95% confidence interval.

Conclusioni

La modellizzazione effettuata ha consentito di effettuare una prima stima della lisciviazione di nitrati e di metterla in relazione con la concentrazione misurata di nitrati in falda mettendo in evidenza un andamento coerente delle due grandezze. Studi futuri dovrebbero focalizzarsi sull'affinamento della descrizione del sistema agronomico, impiegando i dati disponibili nell'anagrafe agricola regionale e utilizzando il modello per testare scenari

agronomici diversi, al fine di individuare con maggiore affidabilità strategie di mitigazione vincenti e di verificare l'efficacia di quelle messe in atto fin oggi.

Bibliografia

- Acutis M., Perego, A., Velardo, M.C., Gusberti, D., Fumagalli, M., Bechini, L., Brenna, S., Pastori, M. (2008) Valutazione del modello ARMOSA per la stima della dinamica di azoto in sistemi cerealicoli della pianura padana. *Bollettino dell'Agricoltura*, 147(3-4), 191-194.
- Acutis M., Bonfante, A., Gusberti, D., Perego, A., Velardo, M.C., Trevisiol, P., Gentile, A., Fumagalli, M. (2007) Il modello di simulazione ARMOSA. Modellizzazione della dinamica dell'acqua e dell'azoto nei suoli agricoli lombardi. *Regione Lombardia*, 47-91
- ISTAT, 2022, 7° censimento generale dell'agricoltura. <https://www.istat.it/statistiche-per-temi/censimenti/agricoltura/7-censimento-generale/>
- Perego, A., Giussani, A., Sanna, M., Fumagalli, M., Carozzi, M., Alfieri, L., ... & Acutis, M. (2013). The ARMOSA simulation crop model: overall features, calibration and validation results. *Italian Journal of Agrometeorology*, 3, 23-38.
- Perego, A., Basile, A., Bonfante, A., De Mascellis, R., Terribile, F., Brenna, S., & Acutis, M. (2012). Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy). *Agriculture, ecosystems & environment*, 147, 57-65.
- Schillaci, C., Perego, A., Valkama, E., Märker, M., Saia, S., Veronesi, F., ... & Acutis, M. (2021). New pedotransfer approaches to predict soil bulk density using WoSIS soil data and environmental covariates in Mediterranean agro-ecosystems. *Science of the total environment*, 780.
- Regione Piemonte - Carta dei Suoli 1:50.000. https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/metadata/r_piemon:37c6413b-b07f-4f4c-9344-f2e43ea52bbd
- Wickham H (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF WEATHER TRENDS ON EMMER QUALITY

VALUTAZIONE DELL'INFLUENZA DELLE TENDENZE METEOROLOGICHE SULLA QUALITÀ DEL FARRO

Leonardo Verdi^{*1}, Riccardo Rossi¹, Lorenzo Arcidiaco², Michele Moretta¹, Anna Dalla Marta¹, Simone Orlandini¹, Enrico Palchetti¹, Marco Mancini¹

¹ Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144, Firenze

² Istituto di BioEconomia, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IBE), Via Madonna Del Piano, 10, 50019 Firenze

* leonardo.verdi@unifi.it

Abstract

Vitreousness is a key determinant of emmer quality, strongly influenced by both genetic and environmental factors. In this study, we analyzed the impact of key meteorological variables on emmer quality using a machine learning approach. An additional outcome of this research is the ability to predict grain quality with reasonable accuracy based on weather trends. Our results highlight the significant effects of both precipitation and temperature. Precipitation had a positive influence on vitreousness during the early developmental stages of emmer. Up to a threshold of approximately 350 mm, vitreousness increased, but beyond this threshold, it declined. In mountain areas, precipitation was the main factor responsible for the low vitreousness. High temperatures from the tillering to grain filling stages tended to enhance vitreousness, particularly in coastal and inland regions. Our findings confirm the sensitivity of emmer to drought during the tillering and stem elongation stages, resulting in a reduction of vitreousness. In mountainous areas, higher growing degree days had a strong negative impact on vitreousness, which dropped significantly.

Parole chiave

Temperatura; Precipitazioni; Vitrosità; Cereali; PCA

Keywords

Temperature; Precipitations; Vitreousness; Cereals; PCA

Introduzione

L'interesse che viene dedicato negli ultimi anni ai frumenti antichi sta crescendo notevolmente nonostante questi vengano coltivati in quantità minore rispetto ai frumenti convenzionali (tenero e duro). Il farro monococco (*Triticum monococcum*), dicocco (*Triticum dicoccum*) e spelta (*Triticum spelta*) fanno parte dei frumenti antichi e ricoprono un ruolo principale nelle regioni del Mediterraneo e dell'Est Europa (Geisslitz and Scherf, 2020). Normalmente questi cereali vengono impiegati nella dieta umana per la produzione di alimenti tradizionali come la pasta e di prodotti da forno tramite processi produttivi specifici (Benincasa et al., 2015; de Sousa et al., 2021).

Il consumo di pasta, alimento simbolo della tradizione italiana, è ormai diffuso a livello globale. Grazie alla crescente richiesta di prodotti di qualità, salutari, a chilometro zero e con basse esigenze di input, l'impiego di varietà antiche di frumento per la sua produzione sta registrando una crescita significativa. Questo tipo di cereali sta riscuotendo un notevole interesse anche da parte degli agricoltori che riescono a spuntare prezzi migliori sul mercato e, grazie alle loro minori richieste di input e maggiore rusticità, richiedono minori spese di gestione (Fatholahi et al., 2020; Kaplan Evlice et al., 2022). Tuttavia, i prezzi dei prodotti ottenuti da questi cereali sono spesso legati alle qualità nutrizionali e tecnologiche.

Se da un lato la qualità nutrizionale dipende dalla composizione chimica della granella, quella tecnologica è il risultato dell'equilibrio fra diversi componenti quali l'amido, il profilo proteico, quello lipidico ecc. In particolare, il profilo proteico gioca un ruolo fondamentale per la determinazione della qualità tecnologica dei cereali, nonostante si assesti sul 8-20% delle componenti totali della granella (Johansson et al., 2020). Il parametro principale nella determinazione della qualità tecnologica del farro è la vitrosità che dipende dal profilo proteico e nello specifico dalla tipologia di glutine (rapporto fra gliadine e glutenine) (Mefleh et al., 2019). Tuttavia, è difficile raggiungere livelli di vitrosità paragonabili a quelli del frumento duro sono difficilmente raggiungibili e la qualità della granella ha un andamento variabile e difficilmente prevedibile (Kaplan Evlice et al., 2022).

Numerosi studi sono stati svolti per determinare i fattori responsabili del raggiungimento di specifici livelli di qualità tecnologica e fra di essi i principali risultano essere la componente genetica e quella meteorologica. In generale, il farro mostra livelli di proteine inferiori rispetto a quelli del frumento duro, con inevitabili ricadute sul grado di vitrosità della granella. Tuttavia, è stato osservato come semine primaverili possano favorire il raggiungimento di livelli di vitrosità soddisfacenti (~ +3%) rispetto alle semine autunnali. È stato osservato come andamenti stagionali caldi e asciutti tra la fase di accestimento e quella di raccolta

favoriscano l'ottenimento di livelli di vitrosità elevati (Brankovic et al., 2014). Inoltre, bassi livelli di vitrosità sono stati osservati in corrispondenza di eventi gelivi tardivi (Damania et al., 2008). Queste indicazioni suggeriscono un importante contributo dell'andamento meteorologico stagionale sulla qualità tecnologica del farro.

Nel frumento duro, il rapporto gliadina/glutenina è di circa 0,7 g/g, rispetto a 0,40 e 0,36 rispettivamente nel farro primaverile e in quello autunnale. Tuttavia, la struttura dei granuli di amido e delle proteine è simile tra il frumento tenero e il farro primaverile, in particolare nei profili elettroforetici, soprattutto per quanto riguarda le proteine LMW (De Vita et al., 2006). Nel frumento duro e nel farro primaverile, i granuli di amido sono uniformemente rivestiti da proteine, mentre nel farro autunnale le proteine non ricoprono i granuli, lasciandoli più liberi all'interno della matrice del chicco (Giacintucci et al., 2014).

Alla luce di queste considerazioni, uno studio approfondito sull'effetto delle condizioni meteorologiche e l'identificazione dei fattori chiave che influenzano la qualità del farro risultano di fondamentale importanza. Sebbene le pratiche agronomiche (es. semina primaverile) possano aumentare la probabilità di raggiungere elevati livelli di vitrosità, è ancora oggetto di dibattito l'impatto di specifici fattori pedoclimatici (es. precipitazioni, temperatura, altitudine). L'individuazione di intervalli specifici per tali fattori, come le temperature minime e massime durante le diverse fasi fenologiche, rappresenterebbe un'area di studio di grande interesse per supportare la produzione di farro, permettendo potenzialmente previsioni precoci della qualità. Gli obiettivi di questo studio sono: (i) la definizione di un metodo standard per la stima precoce della qualità della granella, basato su osservazioni e modelli; (ii) la valutazione dell'impatto delle componenti meteorologiche, come l'andamento delle temperature durante la stagione colturale, sulla qualità del farro. A tal fine, è stato analizzato un campione di 27 aziende agricole distribuite uniformemente sul territorio toscano nell'arco di tre anni (2020–2022), valutando la qualità della granella sulla base della tipologia di frattura.

Materiali e Metodi

L'analisi della qualità della granella è stata condotta su campioni di farro provenienti da 27 aziende agricole, selezionate in modo da garantire una distribuzione omogenea sul territorio della Toscana, nel triennio 2020-2022. Le aziende si trovavano a quote comprese tra i 200 e i 900 metri sul livello del mare. Le aziende sono state clusterizzate all'interno di tre zone climatiche: Costa, Interno e Montagna. La caratterizzazione climatologica è stata effettuata utilizzando i dati climatologici di rianalisi prodotti dal Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a medio raggio (ECMWF) e resi disponibili attraverso il portale Copernicus Climate Change Service (C3S). Nello specifico è stato utilizzato il dataset denominato ERA5 Land, nelle sue componenti di temperatura e precipitazione. Ciò ha permesso di derivare, per ogni zona climatica, una serie di indici bioclimatici per tutte le finestre fenologiche e

complessivamente per il periodo che va dalla semina alla raccolta. La metodologia utilizzata per la valutazione del tenore di vitrosità della granella è descritta in Verdi et al. (2024).

L'analisi dell'andamento dei parametri meteorologici quali temperatura e precipitazioni, è stata svolta suddividendo il ciclo del farro in tre macro-fasi: (F1) semina-accestimento; (F2) accestimento-fioritura; (F3) fioritura-maturazione. L'inizio e la fine di tali fasi, come la durata, sono state definite in modo specifico per i tre ambienti (costa, interno e montagna) a seguito di una campagna di monitoraggio delle fasi fenologiche. Attraverso questa classificazione è stato possibile valutare l'influenza degli andamenti meteorologici in corrispondenza di determinate fasi di sviluppo del farro e identificare i fattori maggiormente determinanti sul grado di vitrosità.

Per ciascuna combinazione di azienda e anno, è stata eseguita un'analisi basata sull'intervallo interquartile (IQR) per rimuovere gli outlier di vitrosità (%), identificati come valori inferiori a $Q1 - 1.5 \times IQR$ o superiori a $Q3 + 1.5 \times IQR$, con $Q1$ e $Q3$ rispettivamente il primo e il terzo quartile della distribuzione dei valori, e $IQR = Q3 - Q1$. La vitrosità media (VIT) è stata dunque calcolata sui dati rimanenti, garantendo così una stima rappresentativa del campione. Successivamente, sono stati risolti i casi di multicollinearità tra coppie di variabili meteorologiche altamente correlate ($r > |0.8|$), mantenendo quella con la correlazione più alta rispetto alla variabile dipendente (i.e., VIT).

Il dataset risultante è stato utilizzato per addestrare un modello di regressione basato sull'algoritmo eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), una libreria avanzata di apprendimento automatico che implementa la tecnica del gradient boosting. Questo approccio prevede la combinazione sequenziale di molteplici alberi decisionali, ciascuno dei quali corregge gli errori commessi dai modelli precedenti, con l'obiettivo di massimizzare le prestazioni predittive complessive. I dati sono stati suddivisi in un set di calibrazione (80%) e in un set di validazione (20%), garantendo una distribuzione rappresentativa delle variabili indipendenti per ciascun anno e classe orografica. Durante la fase di addestramento, sono stati ottimizzati i principali iperparametri del modello, tra cui la profondità massima degli alberi, il tasso di apprendimento e il numero di iterazioni, allo scopo di minimizzare l'errore di previsione. Per ridurre il rischio di overfitting e assicurare la capacità del modello di generalizzare su nuovi dati, è stata adottata una procedura di validazione incrociata (cross-validation). Tale procedura ha consentito di selezionare la configurazione iperparametrica che massimizzava le performance predittive, riducendo contemporaneamente bias e varianza. Al fine di migliorare ulteriormente la robustezza predittiva e contenere la complessità del modello, è stata condotta una selezione delle variabili basata sull'importanza delle variabili (feature importance). A tal fine, è stata applicata una tecnica di bootstrap per stimare la variabilità del Gain delle variabili, calcolato attraverso il modello XGBoost e rappresentante l'importanza di ciascuna variabile nel processo di previsione. Il bootstrap è stato eseguito generando 5000 campioni con

sostituzione dai valori di Gain e calcolando la media del Gain per ciascun campione (Tab. 1). Sulla distribuzione così ottenuta, è stato quindi stimato l'intervallo di confidenza secondo il metodo Bias-Corrected and Accelerated (BCa). Le variabili con intervalli di confidenza più bassi (indicativi di ridotta importanza e alta incertezza) sono state eliminate dal modello, contribuendo così a una riduzione della complessità senza penalizzare la capacità predittiva complessiva. I risultati ottenuti dal modello sono stati valutati utilizzando metriche statistiche, tra cui *r*, RMSE e AIC.

Tab.1 - Importanza delle variabili predittive selezionate dal modello XGBoost, espressa in termini di Gain, Cover e Frequency. Il Gain rappresenta il contributo relativo di ciascuna variabile alla riduzione dell'errore del modello ed è stato utilizzato come metrica principale per la selezione. Cover indica, in media, quante osservazioni sono interessate ogni volta che la variabile viene utilizzata per suddividere i dati in un albero decisionale, mentre Frequency rappresenta la frequenza relativa con cui ciascuna variabile è stata utilizzata nei nodi di decisione.

Tab.1 - Importance of the predictive variables selected by the XGBoost model, expressed in terms of Gain, Cover, and Frequency. Gain represents the relative contribution of each variable to the model's error reduction and was used as the primary metric for selection. Cover indicates the average number of observations affected each time the variable is used to split the data in a decision tree, while Frequency refers to the relative frequency with which each variable was used in decision nodes.

Variable	Gain	Cover	Frequency
F1_Pr	0.35	0.33	0.40
F2_SPEI	0.20	0.20	0.18
F3_HW	0.19	0.74	0.09
Ftot_ST	0.18	0.14	0.17
Tot	0.92	0.75	0.84

Risultati e Discussione

Il modello ha evidenziato che i parametri maggiormente influenti sulla vitrosità del farro sono stati le precipitazioni (Pr) in F1, lo Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) in F2 e le ondate di calore (HW) in F3. Infine, la cumulata delle somme termiche con soglia minima di 4°C (ST) ha evidenziato un'influenza generalizzata su tutto il ciclo. Le analisi delle performance del modello hanno fornito risultati soddisfacenti soprattutto relativamente al fattore Gain che, cumulativamente ha raggiunto valori di 0.92 (Tab. 1).

Le precipitazioni sembrano favorire il tratto della vitrosità evidenziando un potenziale di incremento di questo carattere fino al 10% fino a valori di precipitazioni di circa 350 mm in F1. Una volta superata questa soglia, le precipitazioni evidenziano un'influenza negativa sulla vitrosità che viene pesantemente ridotta fino a valori del 25% (Fig. 2). Probabilmente, questo è legato a condizioni di asfissia che si possono originare in concomitanza con prolungati eventi piovosi che possono avere ripercussioni negative sulla

fisiologia della coltura che si trova ancora negli stadi giovanili. Infatti, il maggiore effetto negativo delle precipitazioni sulla vitrosità è stato osservato nelle aziende situate nell'areale "Montagna" il quale ha evidenziato precipitazioni significativamente superiori rispetto agli altri areali. Queste osservazioni sono in linea con Brankovic et al. (2014) che riporta una marcata influenza dei regimi pluviometrici, soprattutto nelle fasi giovanili della coltura, sulla qualità della granella di farro.

Dall'analisi dell'indice SPEI emerge come condizioni di siccità in F2 determinano un calo della vitrosità di oltre il 10%. Questo andamento si ipotizza essere legato a squilibri fisiologici della coltura che, in corrispondenza delle fasi di accrescimento vegetativo e di fioritura, determinano una drastica riduzione della qualità tecnologica. La valutazione dei risultati legati ai fattori Pr e SPEI fornisce specifiche indicazioni sulle esigenze ambientali del farro corrispondenti a condizioni di moderata umidità nelle prime fasi del ciclo della coltura.

Le ondate di calore, contestualizzate nelle fasi finali del ciclo vegetativo del farro (F3), mostrano un effetto chiaro sulla qualità della granella. In particolare, fino al raggiungimento di un numero di eventi pari a 10, questo fattore favorisce sensibilmente il carattere della vitrosità che raggiunge valori massimi prossimi al 60% (Fig. 2). Tuttavia, un eccesso nel numero di questi eventi (>10) determinano una riduzione della percentuale di vitrosità, che comunque si attesta su valori soddisfacenti (~50%). Dall'analisi dei risultati distinti in base agli areali, è emerso che la maggior incidenza del carattere della vitrosità in "Costa" era principalmente dovuto al fattore HW, il quale ha avuto una maggiore incidenza in questo areale rispetto agli altri due. Da queste osservazioni è possibile concludere che l'influenza delle ondate di calore sulla qualità della granella di farro ha un generale effetto positivo, anche in condizioni estreme. Risultati analoghi sono stati riscontrati in varie colture cerealicole, sebbene sussistano incertezze riguardo all'influenza delle condizioni meteorologiche e il dibattito rimanga aperto (Pereira et al., 2024).

L'analisi del parametro ST ha evidenziato un effetto positivo sulla vitrosità fino ad una soglia di circa 1900 °Cd. Al di sopra di questo valore, la vitrosità diminuisce sensibilmente (>25%). Questo aspetto sembra legato ad un elevato accumulo di gradi giorno con conseguente allungamento del ciclo vegetativo. L'estensione del ciclo vegetativo rischia di far coincidere le fasi fenologiche più sensibili con periodi di elevate temperature e basse precipitazioni con profondi squilibri fisiologici della coltura. Analogamente ad altri fattori analizzati, squilibrio fisiologici sembrano essere strettamente legati ad una diminuzione della qualità tecnologica del farro con granelle caratterizzate da frattura farinosa.

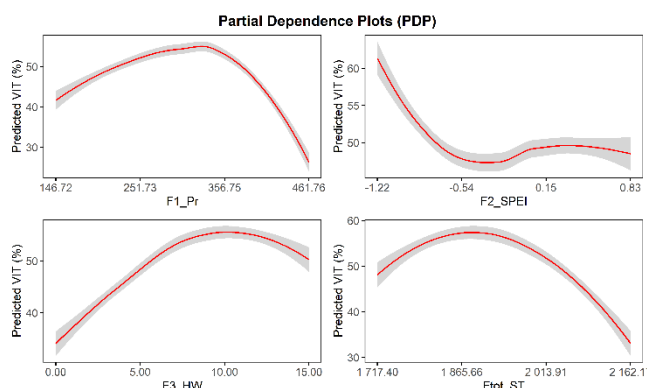


Fig.1 - Partial Dependence Plots (PDP) che mostrano l'effetto delle variabili indipendenti selezionate (F1_Pr, F2_SPEI, F3_HW e Ftot_ST) sulla variabile dipendente (VIT). Ogni grafico mostra la relazione tra una singola variabile indipendente e la previsione del modello, rappresentata attraverso una curva di regressione smussata (loess).

Fig.1 - Partial Dependence Plots (PDPs) illustrating the effect of the selected independent variables (F1_Pr, F2_SPEI, F3_HW, and Ftot_ST) on the dependent variable (VIT). Each plot displays the relationship between a single independent variable and the model's prediction, represented by a smoothed regression curve (loess).

Conclusioni

Alla luce delle alterazioni dei trend di temperatura e precipitazioni che caratterizzano l'epoca contemporanea, disporre di strumenti capaci di informare gli attori coinvolti nella produzione di cibo sulle caratteristiche che un determinato prodotto assumerà rappresenta una notevole innovazione a supporto del settore agroalimentare. Lo sviluppo di tali strumenti, supportato da una crescente disponibilità di dati produttivi e meteorologici, potrebbe contribuire in modo significativo alla sicurezza alimentare a livello nazionale e globale. Il modello sviluppato all'interno di questo studio mostra prestazioni soddisfacenti che permettono di svolgere la stima anticipata della vitrosità della granella di farro con un discreto livello di accuratezza. L'effetto della temperatura e delle precipitazioni, nelle fasi giovanili, e quello delle ondate di calore, nella fase di maturazione, mostrano gli effetti principali per la determinazione della qualità tecnologica del farro. Gli sviluppi futuri di questo lavoro saranno dedicati allo studio puntuale dell'effetto dei singoli parametri meteorologici, e delle loro interazioni, per la definizione di uno strumento affidabile e di facile utilizzo per tutti gli attori della filiera di produzione del farro.

Bibliografia

- Benincasa P., Galieni A., Manetta A. C., Pace R., Guiducci M., Pisante M., Stagnari F., 2015. Phenolic compounds in grains, sprouts and wheatgrass of hulled and non-hulled wheat species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 1795–1803.
- Brankovic G. R., Dodig D., Zoric M. Z., Surlan-Momirovic G. G., Dragicevic V., & Duric N., 2014. Effects of climatic factors on grain vitreousness stability and heritability in durum wheat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 38(4). <https://doi.org/10.3906/tar-1308-51>
- Damania A.B., Hakim S., & Moualla M.Y., 2008. Evaluation of variation in Triticum dicoccum for wheat improvement in stress environments. *Hereditas*, 116, 163-166.
- de Sousa T., Ribeiro M., Sabeñca C., & Igrejas G., 2021. The 10,000-year success story of wheat! *Foods*, 10(9), 2124. <https://doi.org/10.3390/foods10092124>
- De Vita P., Riefole C., Codianni P., Cattivelli L., & Fares C., 2006. Agronomic and qualitative traits of T. turgidum ssp. dicoccum genotypes cultivated in Italy. *Euphytica*, 150, 195-205.
- Fathollahi S., Ehsanzadeh P., Karimmojeni H., 2020. Ancient and improved wheats are discrepant in nitrogen uptake, remobilization, and use efficiency yet comparable in nitrogen assimilating enzymes capabilities. *Field Crops Res.* 249, 107761 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107761>.
- Geisslitz S., & Scherf, K. A., 2020. Rediscovering ancient wheats. *Cereal Foods World*, 65(2), 9. <https://doi.org/10.1094/CFW-65-2-0013>
- Giacintucci V., Guardado L., Puig A., Hernando I., Sacchetti, G., Pittia P., 2014. Composition, protein contents and microstructural characterisation of grains and flours of emmer wheats (Triticum turgidum ssp dicoccum) of the central Italy type. *Czech Journal of Food Sciences*, 32(2), 115-121.
- Johansson E., Branlard G., Cuniberti M., Flagella Z., Hüsken A., Nurit E., Peña R. J., Sissons M., Vasquez D., 2020. Genotypic and environmental effects on wheat technological and nutritional quality. In Igrejas et al. (Eds.), *Wheat quality for improving processing and human health* (pp. 171–204). Springer.
- Kaplan Evlice A. Pehlivan A., Keçeli A., Şanal T., Karabak S., Zencirci N., Yaman H. M., 2022. Nutritional and Technological Aspects of Ancient Wheat. In: Zencirci, N., Ulukan, H., Baloch, F.S., Mansoor, S., Rasheed, A. (eds) *Ancient Wheats*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07285-7_7
- Mefleh M., Conte P., Fadda C., Giunta F., Motzo R., 2019. From seed to bread: Variation in quality in a set of old durum wheat cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9745>
- Pereira R., Tomás D., Silva M., 2024. Deciphering heat wave effects on wheat grain: focusing on the starch fraction. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1459283.
- Verdi L., Rossi R., Moretta M., Armanasco P., Dalla Marta A., Orlandini S., Palchetti E., Mancini M., 2024. Preliminary insights on the impact of thermopluviometric trends on emmer quality: a Tuscany case study. XXVI AIAM National Congress 2024, L'Aquila

SIMULATIONS OF MAIZE YIELDS IN VENETO AT FIELD AND MESOSCALE LEVEL

SIMULAZIONI DI RESE DI MAIS IN VENETO IN PIENO CAMPO E A MESOSCALA

Gaetano Roberto Pesce^{1*}, Ramin Ataieidoost², Carmelo Maucieri¹, Luigi Mariani²

¹Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente (DAFNAE), Università degli Studi di Padova, Agripolis, Viale dell'Università 16 - 35020 Legnaro (PD)

²Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM), via Branze 43 - 25123 Brescia (BS)

*gaetano.pesce@unipd.it

Abstract

Models in agriculture assist in managing crop operations and optimizing inputs, balancing productivity with sustainability. They provide insights into yields in response to environmental factors, helping researchers test hypotheses and understand the processes underlying the growth and development of crops. In this study, maize yields were simulated using the SIM_PP model (Simulation of Primary Production) to compare them with observed data. The model was calibrated using 20 years of production data from a farm in Treviso, while validation utilized annual statistics from the provinces of Veneto provided by ISTAT, which were homogenized for a discontinuity noted in 2013 due to a significant reduction in productive area. The model operated with daily or hourly meteorological data. Performance indices indicated good results during validation. This approach may prove useful in the future for validating yield and production estimates released by ISTAT.

Parole chiave

Modelli di simulazione delle colture, SIM_PP; Istat; *Zea mays* L.; Avversità abiotiche.

Keywords

Crop simulation models, SIM_PP; Istat; *Zea mays* L.; Abiotic stresses.

Introduzione

Da millenni gli umani indagano le cause della produttività in agricoltura per migliorare le rese. Già dall'antichità si è fatto ricorso a modelli empirici, come quello predittivo delle rese del grano descritto da Virgilio nelle Georgiche (libro I) che usa come predittore la quantità dei fiori del noce. Bisogna però aspettare il 1735 per avere il primo modello empirico basato sulle somme termiche, grazie a René-Antoine Ferchault de Réaumur (Puppi, 2007).

Negli ultimi decenni grazie a scienziati come Howard Latimer Penman (1909-1984), che operava presso il centro di ricerca di Rothamsted in gran Bretagna, e Cornelis Teunis de Wit (1924-1993), che operava presso il centro di Wageningen (Paesi Bassi), sono stati messi a punto modelli matematici meccanicistici di simulazione dinamica delle colture (Mechanistic Crop growth simulation models – MCGSM) che, con equazioni biofisiche, simulano crescita e sviluppo delle colture dalla germinazione alla maturazione, tenendo conto degli effetti e delle interazioni reciproche fra diversi fattori come variabili meteorologiche, idrologiche, nutrizionali e avversità biotiche e abiotiche (van Keulen and Wolf; 1986). MCGSM come Wofost (De Wit et al., 2019), Apsim (Holzworth et al., 2014), Ceres (Basso et al., 2016) e SIM_PP (Parisi et al., 2018) hanno trovato applicazione in agricoltura non solo in ambito sperimentale, ma anche nel contesto reale delle aziende agricole, permettendo a queste ultime di stimare le rese potenziali medie e la loro variabilità, orientandone le scelte riguardo a colture e tecniche di coltivazione. Ad esempio la rete Yen (Yield enhancement

network) attiva in Gran Bretagna con lo scopo di incrementare le rese di colture come frumento, orzo e colza, basa la stima del potenziale produttivo perseguibile in una data azienda su un MCGSM. Inoltre i MCGSM contribuiscono ai sistemi di supporto alle decisioni (SSD) come l'Integrated Farm System Model (IFSM), che, simulando l'intero spettro tecnico ed economico di un'azienda agricola mista con coltivazioni e allevamento bovino, offre indicazioni per migliorare la sostenibilità economica e ambientale (Rotz et al., 2013).

Nel presente lavoro, dati di produzione osservati (reali) sono confrontati con i dati simulati dal modello meccanicistico SIM_PP. A differenza dei modelli empirici, che semplicemente correlano quantità fisiche per prevedere risultati senza spiegarli, SIM_PP simula l'intercettazione della luce, la fotosintesi, la respirazione e la distribuzione della biomassa tra i diversi organi vegetali in base alla fase fenologica. Esso inoltre tiene conto delle limitazioni alla crescita dovute a stress termici, idrici, nutrizionali, biotici e abiotici.

Lo scopo del lavoro è valutare le prestazioni del modello nella simulazione della produzione del mais da granella in Veneto.

Materiali e Metodi

I dati produttivi di 25 anni (2000-2024) utilizzati per calibrare il modello provengono dall'azienda Liasora, che si estende su 390 ettari suddivisi in due appezzamenti principali situati nei comuni di Ponte di Piave e Cessalto in

provincia di Treviso. L'azienda adotta sistemi di coltivazione tipici della Pianura Veneta Orientale, integrando drenaggio tubolare e affossature per gestire efficientemente l'acqua in campo. La validazione è stata effettuata utilizzando le statistiche produttive provinciali dell'ISTAT dal 2006 al 2024 (ISTAT, 2025). Dalla validazione, tuttavia, sono escluse le province di Belluno e Vicenza. La prima per la sua poco rilevante produzione di mais da granella, dovuta in gran parte alle sue caratteristiche pedoclimatiche, molto diverse da quelle che definiscono il resto della regione. La seconda è stata esclusa perché, a giudizio degli autori, i suoi dati non sembrano essere stati influenzati dalle condizioni stagionali, che nelle altre province hanno, secondo il caso, o represso o sostenuto le rese.

Il modello di simulazione dinamica SIM_PP (Simulation of Primary Productivity) (Cola et al., 2014; Mariani, 2017) è stato utilizzato per simulare la crescita e lo sviluppo del mais come funzioni di alcune variabili meteorologiche. I dati meteorologici orari necessari per l'esecuzione di SIM_PP sono stati ottenuti direttamente dalle stazioni meteorologiche o ricostruiti utilizzando il pre-processore meteorologico del modello Alfalfa (Denison and Loomis, 1989). Il modello simula l'assorbimento fogliare dell'energia solare utilizzata per alimentare il processo di fotosintesi, che converte CO₂ e H₂O in materia organica (gross assimilation - GASS). La GASS è soggetta a una serie di limitazioni che determinano la quantità finale di materia organica suddivisa tra i diversi organi della coltura.

Il modello SIM_PP è strutturato in diversi moduli distinti:

1) Modulo Fenologico: simula le fasi fenologiche sulla base delle risorse termiche espresse come gradi giorno. Le fasi sono espresse secondo la scala BBCH (Meier, 2001).

2) Modulo di Limitazione Idrica: stima il contenuto d'acqua del suolo utilizzando un bilancio idrico monostrato parametrizzato a passo orario, tenendo conto dei dati sulla tessitura del suolo da cui si ottengono le costanti idrologiche (capacità idrica massima, capacità di campo, punto di appassimento permanente) utilizzando le equazioni di Saxton e Rawls (2006). Il limite della riserva facilmente utilizzabile è il quarto dato utilizzato per parametrizzare la curva di risposta all'acqua del suolo, il cui output è il fattore di limitazione idrica (FLI) il cui valore varia tra 0 (massima limitazione, zero produzione) e 1 (produzione non limitata).

3) Modulo di Limitazione Termica: stima il fattore di limitazione termica oraria (FLT) utilizzando una curva di risposta parametrizzata con le quattro temperature cardinali di ciascuna specie (minima, ottimale inferiore, ottimale superiore e massima), producendo un fattore di limitazione termica con valori compresi tra 0 (massima limitazione, zero produzione) e 1 (produzione non limitata).

4) Modulo di Limitazione Nutrizionale: stima i fattori di limitazione nutrizionale (FLN) orari per azoto (FLN-N), anidride fosforica (FLN-P₂O₅) e ossido di potassio (FLN-K₂O) utilizzando un approccio basato sui moduli del modello Daisy (Abrahamsen 2012). La limitazione per i tre elementi varia tra 0 (massima limitazione, zero produzione) e 1 (produzione non limitata).

5) Modulo Principale: utilizza i dati meteorologici e gli output dei moduli precedenti (fase fenologica, FLI, FLT, NLF-N, FLN-P₂O₅, FLN-K₂O) per stimare la produzione della coltura. Elabora i dati sulla radiazione solare per calcolare la radiazione fotosinteticamente attiva (PAR), che viene trasformata in PAR assorbita (APAR) applicando un coefficiente di estinzione della luce ottenuto con la legge di Lambert-Beer. La conversione della luce assorbita in biomassa si ottiene moltiplicando l'APAR per l'efficienza d'uso della radiazione (RUE).

Il modello è stato alimentato da serie storiche di dati meteorologici giornalieri e orari provenienti dalla stazione meteorologica regionale di Ponte di Piave, gestita da ARPA Veneto (Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto). L'accumulo di biomassa e le rese simulati tengono conto delle limitazioni termiche e idriche. I dati meteorologici necessari per simulare le rese delle province del Veneto sono stati ottenuti dal dataset GSOD, che offre dati giornalieri su temperature massime e minime, precipitazioni totali e umidità relativa massima e minima. Il clima dell'Azienda Liasora è stato descritto utilizzando il climogramma di Bagnouls-Gausson, generato utilizzando il modulo Climatol in R, basato su valori mensili di temperatura media e precipitazioni (Fig. 1).

Le performance del modello sono state analizzate utilizzando un insieme di diversi indici di adattamento: coefficiente di determinazione (R²), errore quadratico medio (RMSE), errore assoluto medio (MAE), indici di efficienza di Nash Sutcliffe (EF) e Wilmott (EFW), coefficiente di massa residua (CRM) e il test t di Student (t).

I prezzi medi del mais all'origine dal 2010 al 2022 per il Veneto forniti dall'Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare (ISMEA, 2025) sono stati confrontati con i costi di produzione forniti sempre da ISMEA per lo stesso periodo. Per il calcolo, sono stati seguiti i seguenti passaggi:

$$PLV/SAU = RP \text{ (t/ha)} \times PMO \text{ (€/t)} \quad (\text{€/ha})$$

Dove: PLV/SAU = produzione lorda vendibile per ettaro; RP = resa media provinciale secondo ISTAT; PMO = prezzo medio all'origine.

$$ML = PLV/SAU \text{ (€/ha)} - CUV \text{ (€/ha)} \quad (\text{€/ha})$$

Dove: ML = margine lordo; CUV = costo unitario variabile.

Risultati e Discussione

Nel complesso, il clima della zona del Veneto in cui si coltiva il mais appartiene al tipo Cfa secondo la classificazione di Köppen-Geiger (clima subtropicale umido con estate calda e senza una stagione secca ben definita). Il climogramma di Bagnouls-Gausson di Treviso rivela che l'area di studio è caratterizzata da una temperatura media annuale di 15,1 °C e una precipitazione media annuale di 975 mm (Fig. 1). Gennaio è il mese più freddo, con temperatura minima giornaliera media pari a 1,5 °C, e luglio è il più caldo, con temperatura massima giornaliera media di 29,9 °C. Il regime precipitativo è caratterizzato da due minimi (il principale in inverno e il secondario in estate) e due massimi (il principale in autunno e uno secondario in primavera). Il periodo da ottobre ad aprile è esposto al rischio di gelate, mentre il

pattern idrologico risulta relativamente equilibrato, senza periodi pronunciati di siccità o eccesso di acqua nel suolo durante l’anno.

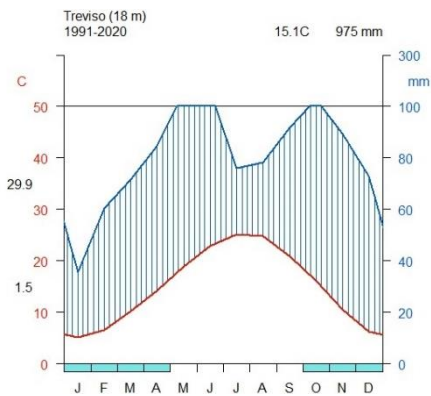


Fig.1 – Climogramma di Bagnouls-Gausson per Treviso nel trentennio 1991-2020, basato sulle temperature medie mensili (linea rossa) e le precipitazioni (linea blu) per Treviso. L’area ombreggiata indica il periodo umido. Le precipitazioni mensili superiori a 100 mm sono state escluse. I numeri vicini all’asse verticale sinistro corrispondono alla temperatura massima giornaliera media del mese più caldo e alla temperatura minima giornaliera media del mese più freddo. Le barre blu sotto l’asse orizzontale indicano la possibilità di gelata. L’altitudine è di 18 m sopra il livello del mare; la temperatura media annuale è di 15,1 °C; e le precipitazioni medie annuali sono di 975 mm.

Fig.1 – Bagnouls-Gausson climogram based on monthly average temperatures (red line) and rainfall (blue line) for Treviso, covering a period of thirty years (1991-2020). The shaded area indicates the moist period. Monthly precipitation exceeding 100 mm has been excluded. The numbers near the vertical left axis correspond to the average daily maximum temperature of the warmest month and the average daily minimum temperature of the coldest month. Blue bars below the horizontal axis indicate the possibility of frost. The altitude is 18 m above sea level; the annual average temperature is 15.1 °C; and the annual average precipitation is 975 mm.

Il modello, opportunamente calibrato sui dati del mais dell’azienda Liasora per il periodo 2000-2023, rappresenta accuratamente l’intero periodo tranne il biennio 2017-18, in cui non descrive adeguatamente i picchi negativi (Fig. 2). L’indice R^2 indica che il modello spiega il 46% della variabilità nella serie di Liasora (Tab. 1). Questo valore non appare particolarmente alto, ma bisogna considerare che nel suo calcolo, così come nel calcolo degli altri indici, gli outlier sono stati inclusi. I valori degli indici di efficienza (EF positivo e EFW piuttosto vicino a 1) confermano l’affidabilità delle stime rispetto alla media delle osservazioni (Tab. 1). Il valore di CRM (0.04), piuttosto vicino a zero, suggerisce che il modello è efficace nel catturare la variabilità dei dati e che la maggior parte delle differenze tra le osservazioni e le simulazioni sono spiegate dal modello (Tab. 1). Il test di t di Student indica che le

differenze tra la serie dei dati osservati e quella dei dati simulati non è significativa ($t=0.52$). La media dei valori osservati nei 24 anni è inferiore solo del 3.6% rispetto alla media dei valori simulati da SIM_PP (Tab. 1). Gli indici migliorano considerevolmente se si rimuovono gli outlier (Tab. 1).

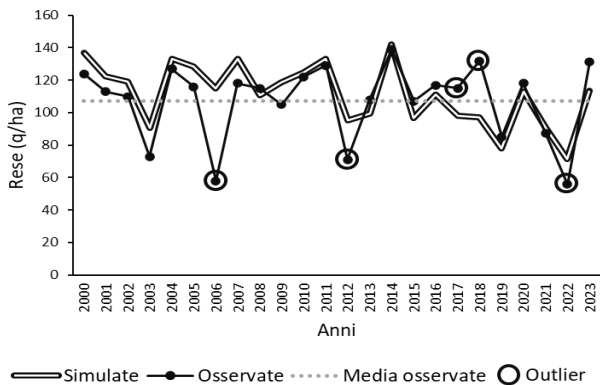


Fig.2 – Andamento delle rese di mais osservate presso l’azienda Liasora nel periodo 2000-2023 a confronto con l’andamento delle rese simulate con SIM_PP.

Fig.2 – Trend in maize yields observed at the Liasora farm from 2000 to 2023 compared to the trend in yields simulated with SIM_PP.

Tab. 1 – Indici di performance di SIM_PP nella simulazione delle rese dopo la calibrazione sui dati dell’azienda Liasora. R^2 =coefficiente di determinazione, RMSE = errore quadratico medio; MAE = errore assoluto medio, EF = indice di efficienza di Nash Sutcliffe; EFW = indice di efficienza di Wilmott; CRM = coefficiente di massa residua; t = il test t di Student; Media oss = media dei dati osservati; Media sim = media dei dati simulati.

Tab. 1 – Performance indices of SIM_PP in simulating yields after calibration using data from the Liasora farm. R^2 = coefficient of determination; RMSE = root mean square error; MAE = mean absolute error; EF = Nash-Sutcliffe efficiency index; EFW = Wilmott's efficiency index; CRM = coefficient of residual mass; t = Student's t-test; Media oss = average of observed data; Media sim = average of simulated data.

Indice	Valore	
	Con outlier	Senza outlier
R^2	0,46	0,81
MAE	13,2	8,7
RMSE	17,6	9,9
EF	0,41	0,76
EFW	0,62	0,74
CRM	0,04	0,04
t	0,52	0,51
Media oss (q/ha)	107,4	108,9
Media stim (q/ha)	111,4	113,4

Il confronto tra le rese stimate dal modello nelle province del Veneto e quelle fornite dall’ISTAT negli anni dal 2006 ha prodotto degli indici poco soddisfacenti. A partire dal 2013,

infatti, è stata osservata una sistematica sottostima da parte del modello rispetto ai dati ISTAT (2025); pertanto, è stata condotta un'indagine per comprenderne le ragioni. I dati ISTAT indicano una chiara tendenza alla diminuzione delle superfici maidicole (nelle province considerate) dal 2012 al 2015 (-37%) (Fig. 3). Anche la produzione totale è diminuita, ma a un ritmo inferiore (Fig. 3), di conseguenza le rese medie per ettaro sono aumentate (Fig. 4). Infatti, la resa media nel sessennio 2006-2011 (9,1 t/ha) è inferiore di quasi il 9% rispetto a quella del sessennio 2013-2018 (10,1 t/ha). Lo spartiacque è il 2012, anno in cui le avverse condizioni meteorologiche hanno portato a un calo delle rese in tutte le province del Veneto considerate (Fig. 4). Tale flessione è stata in linea con le tendenze osservate a livello globale. Nel 2012, infatti, la produzione di mais è stata gravemente influenzata da siccità e temperature elevate, in particolare negli Stati Uniti e in Europa (Berry et al., 2014). Per comprendere gli effetti che l'annata sfavorevole potrebbe avere avuto sulle aziende, sono stati confrontati i prezzi medi all'origine per il Veneto (ISMEA, 2025) con i costi di produzione a partire dal 2010, anno in cui tali dati sono diventati disponibili sulla piattaforma ISMEA.

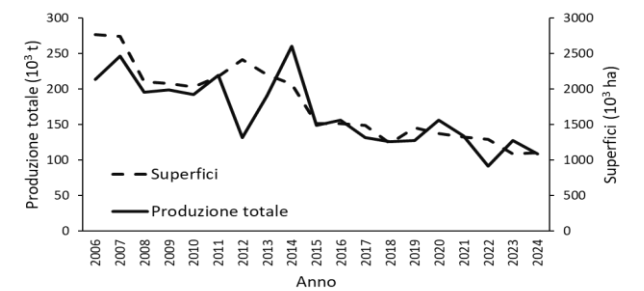


Fig. 3 – Andamento delle superfici coltivate a mais in Veneto (escluse province di Belluno e Vicenza) e relative produzioni dal 2006 al 2024 (fonte: ISTAT).
Fig. 3 – Trend of maize cultivated areas in Veneto (excluding the provinces of Belluno and Vicenza) and their respective productions from 2006 to 2024 (source: ISTAT).

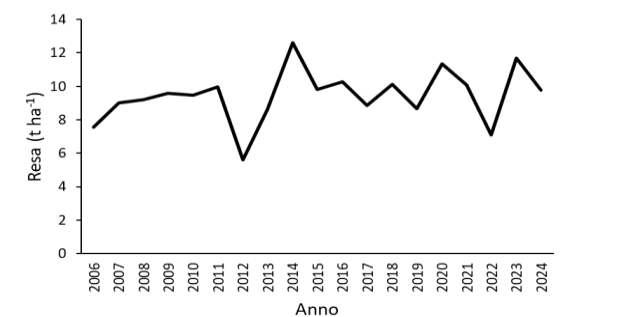


Fig. 4 – Andamento delle rese di mais in Veneto (escluse province di Belluno e Vicenza) dal 2006 al 2024 (fonte: ISTAT).
Fig. 4 – Trend of maize yields in Veneto (excluding the provinces of Belluno and Vicenza) from 2006 to 2024 (source: ISTAT).

Nel 2012 si è registrato un ML medio di 125 €/ha, il valore più basso del periodo considerato (Tab. 2). Se ai ML si sottraggono i costi fissi, allora si ottengono redditi operativi negativi. Ciò non deve sorprendere poiché la maggior parte delle aziende agricole presenta una redditività negativa in assenza di pagamenti diretti; pertanto, la coltivazione del mais è fortemente legata ai contributi della Politica Agricola Comune (PAC) (ISMEA, 2020).

Tab. 2 – Margine lordo (ML) (€ ha⁻¹) derivante dalla coltivazione del mais in Veneto (sono escluse le province di Belluno e Vicenza) negli anni dal 2010 al 2022.
Tab. 2 – Average contribution margin (€/ha) from maize cultivation in Veneto (excluding the provinces of Belluno and Vicenza) from 2010 to 2022.

Anno	ML* (€/ha)
2010	593
2011	1285
2012	125
2013	715
2014	1133
2015	432
2016	702
2017	439
2018	681
2019	1060
2020	1104
2021	1507
2022	746

*al netto dei contributi della PAC

Da quanto sopra, è evidente che il 2012 segna un punto di svolta per il mais in Veneto. Le riduzioni delle superfici maidicole negli anni successivi a nostro avviso indicano che annate particolarmente sfavorevoli hanno spinto una parte consistente dei coltivatori di mais (quelli con redditività più bassa) ad abbandonare la coltivazione o a convertirsi ad altre colture. Sembra quindi che il mercato abbia selezionato i produttori di mais, lasciando solo i più abili o quelli con risorse adeguate a resistere alle condizioni avverse, compresi quelli più in grado di competere nei bandi per il rinnovo dei mezzi di produzione e il sostegno al reddito. Di conseguenza, sono rimasti attivi solo gli agricoltori più produttivi, il che può spiegare le rese più elevate negli anni successivi al 2012 (Fig. 4). Infine, nel corso degli anni i mezzi di produzione sono migliorati e gli agromeccanici (contoterzisti) hanno diffuso tecnologie avanzate, anche tra le aziende agricole che non possono acquistare e gestire macchinari innovativi ma possono acquistare i servizi da questi forniti (CREA, 2024). Alla luce della discontinuità descritta sopra, il modello per ciascuna provincia è stato omogeneizzato moltiplicando le rese simulate dal 2013 per opportuni coefficienti correttivi (Tab. 3), ottenuti calcolando il rapporto tra la media delle rese osservate per ciascuna provincia nel periodo 2013-2024 e la media delle rese osservate nel periodo 2006-2011. Dopo l'omogeneizzazione, gli indici di performance sono diventati generalmente soddisfacenti per tutte le province, tranne Venezia e soprattutto Padova (Tab. 3). Ciò richiede ulteriori approfondimenti per capire il perché di queste discrepanze.

Tab. 3 – Indici di performance di SIM_PP nella simulazione delle rese dopo la validazione sui dati produttivi provinciali ISTAT. R^2 =coefficiente di determinazione, RMSE = errore quadratico medio; MAE = errore assoluto medio, EF = indice di efficienza di Nash Sutcliffe; EFW = indice di efficienza di Wilmott; CRM = coefficiente di massa residua; t = il test t di Student; Media oss = media dei dati osservati; Media sim = media dei dati simulati.

Tab. 3 – Performance indices of SIM_PP in simulating yields after validation using production data from provinces provided by ISTAT. R^2 = coefficient of determination; RMSE = root mean square error; MAE = mean absolute error; EF = Nash-Sutcliffe efficiency index; EFW = Wilmott's efficiency index; CRM = coefficient of residual mass; t = Student's t-test; Media oss = average of observed data; Media sim = average of simulated data.

Indice	Province				
	Verona	Venezia	Treviso	Rovigo	Padova
R^2	0,57	0,39	0,67	0,30	0,07
MAE	10,20	16,28	8,49	10,70	19,55
RMSE	12,1	18,3	10,7	14,3	24,3
EF	0,53	-0,38	0,65	0,12	-1,06
EFW	0,61	0,46	0,65	0,53	0,30
CRM	-0,02	-0,08	-0,01	-0,05	-0,15
t	0,70	0,25	0,81	0,29	0,01
Coefficiente correttivo (2013-24)	1,147	1,078	1,170	1,045	1,021
Media Oss (q/ha)	93,2	96,2	101,0	91,2	93,4
Media Sim (q/ha)	91,0	88,9	99,7	86,3	79,2

Conclusioni

Questo studio dimostra il potenziale del modello SIM_PP per effettuare stime di resa del mais in Veneto. I futuri miglioramenti potrebbero concentrarsi sul perfezionamento della modellazione delle avversità biotiche e abiotiche e sull'integrazione di variabili economiche aggiuntive.

Lo studio ha confrontato gli output del modello SIM_PP, ottenuti a partire da dati meteorologici, con i dati osservativi provenienti dall'azienda Liasora e con i dati produttivi forniti dall'ISTAT.

La ricerca conferma il valore dei modelli di simulazione nel colmare il divario tra studi agricoli teorici e gestione pratica delle aziende agricole. Continuando a rifinire questi modelli attraverso test rigorosi e adattamenti, è possibile contribuire in modo significativo a pratiche agricole sostenibili e a una maggiore sicurezza alimentare.

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano l'Azienda Liasora di Ponte di Piave (TV) per i dati necessari alla realizzazione di questo lavoro. Studio Finanziato dall'Unione europea - Next Generation EU, Missione 4 Componente 2 CUP C93C22002790001, Spoke 4, Work Package 4.2, Task 4.2.1 "Farm network setup (Living Labs): a network of farms representative of the different agricultural systems to apply innovative technologies for the sustainable management of crops, animals and forests".

Bibliografia

- Abrahamsen P., 2012. Daisy program reference manual. The Royal Veterinary and Agricultural Univ., Copenhagen.
- ARPAV (2025). Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto. <https://www.arpa.veneto.it/>
- Basso B., Liu L., Ritchie J.T., 2016. A Comprehensive Review of the CERES-Wheat, -Maize and -Rice Models' Performances. *Advances in Agronomy*, 136: 27-132.
- Berry S. T., Roberts M. J., Schlenker W., 2014. Corn production shocks in 2012 and beyond. *The Economics of Food Price Volatility*, 59.
- Cola G., Mariani L., Salinari F., Civardi S., Bernizzoni M., Gatti M., Poni S., 2014. Description and testing of a weather-based model for predicting phenology, canopy development and source-sink balance in vitis vinifera L. cv. Barbera. *Agric. For. Meteorol.*, 184 117-136.
- CREA (2024). *Annuario dell'agricoltura italiana vol. LXXVII. Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria*, Roma.
- de Wit A., Boogaard H., Fumagalli D., Janssen S., Knapen R. van Kraalingen D., Supit I., van der Wijngaart R., van Diepen K., 2019. 25 years of the WOFOST cropping systems model. *Agric. Syst.*, 168:154-167
- Denison R.F., Loomis R.S., 1989. An integrative physiological model of alfalfa growth and development. *Univ. Calif. Div. Agric. Nat. Res.*, Publ. 1926, 73 pp.
- Holzworth, D.P., Huth, N.I., deVoil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., et al., 2014. APSIM-Evolution towards a New Generation of Agricultural Systems Simulation. *Environ. Model. Softw.*, 62: 327-350.
- ISMEA, 2020. I costi di produzione del mais e i costi dei centri di essiccazione e stoccaggio.
- ISMEA, 2025. Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare. <https://www.ismeamercati.it/analisi-e-studio-filiere-agroalimentari>.
- ISTAT, 2025. Istituto Nazionale di Statistica. <http://dati.istat.it/>
- Mariani L., 2017. Carbon plants nutrition and global food security. *Eur. Phys. J. Plus*, 132:69
- Meier U., 2001. Growth stages of mono-and dicotyledonous plants. *BBCH Monograph*. 2nd Edition. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, 158 pp.
- Parisi S.G., Cola G., Gilioli G., Mariani L., 2018. Modeling and improving Ethiopian pasture systems. *Int J Biometeorol*, 62: 883-895.
- Puppi G., 2007. Origin and development of Phenology as a science. *IJAm*, 3, 24-29.
- Rotz C.A., Corson M.S., Chianese D.S., Montes F., Hafner S.D., Coirner C.U., 2013. The Integrated Farm System Model Reference Manual, Version 4.0, 249 pp.
- Saxton K.E. and Rawls W.J., 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70:1569-1578.
- van Keulen H., Wolf J., 1986. Modelling of agricultural production, weather, soils and crops. *Pudoc, Wageningen*, 479 pp.

REGIONAL CLIMATE IN BASILICATA: RESULTS FROM THE ALSIA AGROCLIMATIC REPORT 2000–2023

CLIMA REGIONALE IN BASILICATA: RISULTATI DEL REPORT AGROCLIMATICO DELL'ALSIA 2000–2023

Emanuele Scalcione^{2*}, Pietro Dichio^{2*}, Maria Lanfredi¹, Rosa Coluzzi¹, Vito Imbrenda¹

¹ Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale – Consiglio Nazionale delle Ricerche (IMAA-CNR) c.da S. Loja - 85050 Tito Scalo (PZ)

² Agenzia Lucana di Sviluppo e di Innovazione in Agricoltura (ALSIA) Via Annunziatella 64 - 75100 Matera

*emanuele.scalcione@alsia.it

Abstract

This paper presents the findings of the agro-climatic report on Basilicata (southern Italy) for the period 2000-2023, which was commissioned by ALSIA (Agenzia Lucana di Sviluppo e di Innovazione in Agricoltura) and produced in collaboration with CNR (Italian National Research Council). Primary agro-climatic parameters were analysed using data from the ALSIA network, which has been operational since 2000. The studied parameters include temperature, rainfall, potential evapotranspiration (Hargreaves and Samani method, 1985), relative humidity and the hydroclimatic balance ($BIC = P - ET$). Spatialization methods were employed to generate high-resolution regional maps of these key agrometeorological parameters, using a 10m Digital Elevation Model and GIS (QGIS) for mapping and visualization. The study also includes trend analysis of annual data and statistics of daily data relevant to agrometeorology, along with a brief discussion of the statistical methods employed. A section devoted to the elaboration of climate maps includes thirty-five summary plates illustrating the results of the spatialization of the annual and seasonal means in the observational period and the trends with relative estimates of statistical significance. A section devoted to summary tables reports the results of the analyses for each station of the network with sufficient valid data. In this paper we show annual maps and interannual trends for temperature, rainfall, potential evapotranspiration, and BIC extracted from the report. Though slightly shorter than the WMO's 30-year standard, the observation period reveals a highly significant increase in mean annual temperature, supporting evidence of climate change.

Parole chiave

Climatologia, Territorio, Tecniche di spazializzazione, GIS, Indici agro-climatici,

Keywords

Climatology, Territory, Spatialization techniques, GIS, Agro-climatic indices

Introduzione

Le peculiarità climatiche e l'andamento meteorologico stagionale condizionano la distribuzione delle colture sul territorio per il raggiungimento di elevati livelli di qualità e produttivi, questo perché il clima è uno dei principali fattori da cui dipende la produzione agricola.

In questa ottica, la conoscenza del territorio e del clima, delle sue potenzialità e dei fattori limitanti assumono un ruolo di primo piano per un'attività agricola sostenibile, duratura e tecnologicamente avanzata. La caratterizzazione agroclimatica su base regionale fornisce pertanto uno strumento a supporto delle decisioni di pianificazione non solo a livello aziendale, ma anche di strategia politica regionale. Esigenza questa, ancor più palese a causa della fitta sequenza di anomalie climatiche e della modifica dei regimi termici e pluviometrici in Basilicata e nell'area del Mediterraneo (Scalcione et al, 2024).

In bibliografia sono presenti numerosi lavori sperimentali che studiano le interazioni fra la fisiologia delle piante e le variabili climatiche con impatti sulla quantità e qualità delle produzioni agricole (Montanaro et al., 2023), sull'uso razionale delle risorse idriche (Dichio et al., 2024), incidenza dei danni in agricoltura e alle infrastrutture del territorio (Bentivenga et al. 2020).

La caratterizzazione agroclimatica della Basilicata, secondo le intenzioni dell'Agenzia Lucana di Sviluppo e di Innovazione in Agricoltura (ALSIA), nasce come un progetto scientifico con forte valenza operativa atta a suggerire le modalità di comportamento consapevoli e razionali, frutto di un approccio multidisciplinare alle tematiche agronomiche e ambientali. I principali parametri meteorologici e climatici sono stati analizzati utilizzando i dati della rete agrometeorologica ALSIA, relativi al periodo 2000–2023. L'analisi ha riguardato

la temperatura, le precipitazioni, l'umidità relativa, l'evapotraspirazione potenziale (calcolata con il metodo di Hargreaves e Samani, 1985) e il bilancio idroclimatico ($BIC = P - ET$). I dati sono stati spazializzati in ambiente MATLAB e successivamente importati in GIS (QGIS) per la creazione di mappe di facile consultazione che offrono l'opportunità di disporre dei dati secondo oggettive esigenze di informazione e dettaglio spaziale.

Le mappe prodotte riguardano valori medi annuali e stagionali ed i trend interannuali stimati su tutto il periodo osservativo. Inoltre, vengono anche fornite tabelle riassuntive di parametri agrometeorologici giornalieri per ciascuna stazione con sufficiente numero di dati. Il rapporto, disponibile sul sito dell'ALSIA (Scalcione et al., 2024), costituisce un primo contributo destinato a essere

ampliato e aggiornato negli anni futuri, con l'obiettivo di diventare un punto di riferimento per quanti operano nel settore agricolo e intendano approfondire la conoscenza del proprio territorio in relazione al rischio climatico, al fine di mitigare gli impatti negativi del cambiamento climatico e, al contempo, individuare nuove opportunità di investimento.

Al fine di presentare il report, in questo lavoro, vengono mostrate le mappe annuali di temperatura, pioggia, evapotraspirazione potenziale (Hargreaves and Samani method, 1985) e bilancio idroclimatico (BIC = P-ET) con i relativi trend interannuali.

Materiali e Metodi

Dati

Per questo lavoro sono stati utilizzati dati di temperatura media, minima e massima su base mensile, umidità relativa media minima e massima su base mensile, di pioggia cumulata mensile ed evapotraspirazione potenziale cumulata mensile acquisiti dalla rete agrometeorologica dell'ALSIA nel periodo 2000-2023 (fig. 1). L'analisi si basa sulle ventisette stazioni della rete per le quali le serie disponibili sono complete.

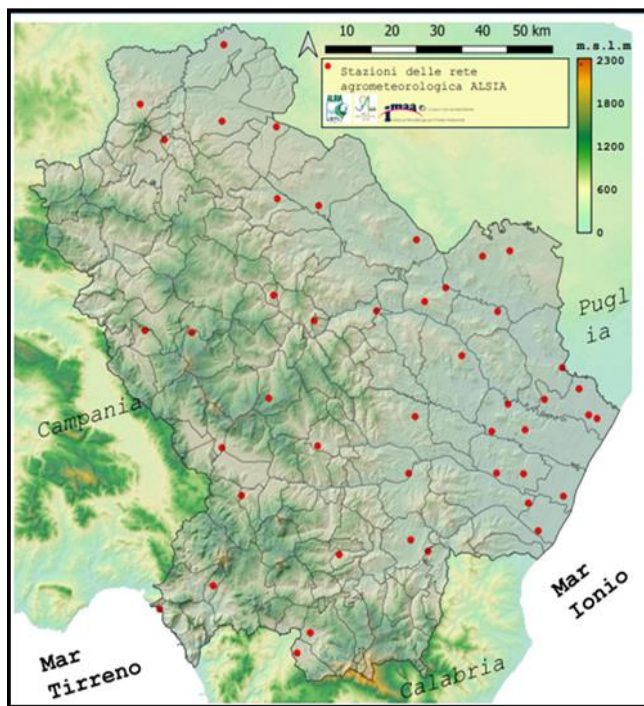


Fig.1 - Modello digitale del terreno e rete agrometeorologica della Basilicata.

Fig.1 - Digital Elevation Model of Basilicata and the ALSIA's agrometeorological network.

Spazializzazione dei dati

Relativamente all'elaborazione dei dati, l'ALSIA si è avvalsa della collaborazione di ricercatori dell'Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale del CNR, che da anni si occupano della modellazione spaziale e dell'analisi di serie temporali di variabili meteo-climatiche.

La spazializzazione dei parametri agrometeorologici adottata si basa su un approccio deterministico-stocastico (Lanfredi et al., 2015) che separa la variabilità spaziale in una componente deterministica ed una stocastica (probabilistica). La componente deterministica rappresenta la dipendenza della variabile da modellizzare in funzione di una o più variabili indipendenti selezionate sulla base di conoscenze fisiche del clima. La componente stocastica riassume la variabilità residua e viene solitamente modellizzata con tecniche di tipo geostatistico. Nella prima fase della modellizzazione, si assume che parte della variabilità spaziale di $T(\mathbf{r})$, da stimare nel punto $\mathbf{r}$, possa essere espressa come combinazione lineare di parametri geografici p_i (latitudine, longitudine, altitudine, etc.):

$$T(\mathbf{r}) = a_1 p_1(\mathbf{r}) + a_2 p_2(\mathbf{r}) + \dots + a_n p_n(\mathbf{r}) + R(\mathbf{r}) \quad (1)$$

Dove a_i ($i=1 \dots n$) sono coefficienti da stimare con tecniche di regressione lineare sulla base dei dati raccolti dalla rete ed $R(\mathbf{r})$ riassume tutta la variabilità non spiegata dai parametri indipendenti. Nel caso della Basilicata, l'unica variabile indipendente significativa nel determinare la variabilità climatica a scala regionale è l'altitudine poiché latitudine e longitudine non variano significativamente e la rete non è sufficientemente densa da evidenziare effetti orografici dovuti a pendenza, esposizione, distanza dal mare etc., che sono fortemente locali. Relativamente alla forma funzionale, la letteratura mostra che la dipendenza lineare fornisce una rappresentazione soddisfacente della decrescita osservata (Lanfredi et al, 2015). Quindi, se $h(\mathbf{r})$ è l'altitudine, si tratta di stimare i parametri dell'equazione (2) che approssimano l'equazione (1) nei punti della rete minimizzando la varianza di $R(\mathbf{r})$:

$$T^d_j(\mathbf{r}) = a_j h(\mathbf{r}) + b_j \quad (2)$$

Data la rilevante variabilità orografica della regione, questo modello cattura larga parte della variabilità spaziale. Le analisi effettuate sui dati della rete evidenziano che la varianza residua $var(R(\mathbf{r}))$ non spiegata dall'altitudine è molto incoerente spazialmente con correlazioni che decadono su distanze minori della distanza media tra le stazioni.

In questo caso, non è raccomandabile inserire una componente stocastica per evitare la creazione di curve iso-livello spurie, determinate dalla distribuzione geografica delle stazioni e non da reali variazioni spaziali di T . Gli errori ottenuti (0.5 °C per la temperatura media annuale) sono in linea con quelli presentati in letteratura (Lanfredi et al., 2015).

Analisi degli andamenti temporali

L'analisi dei trend dei valori mensili dal 2000 al 2023 è stata effettuata con il test non parametrico di Mann-Kendall (Mann 1945, Kendall 1975), con ipotesi nulla H_0 (nessun trend), ipotesi H_1 (presenza di trend monotono). Trattandosi di un test non parametrico, la stima è pressoché indipendente dalla distribuzione della

popolazione ed è meno influenzata dalla presenza di eventuali outliers nelle serie storiche. La statistica test è stata calcolata con la seguente espressione:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sign}(T_j - T_i) \quad (3)$$

dove T è la variabile al tempo t_i e al tempo t_j , N è la lunghezza della serie, mentre la funzione segno è definita come segue: $\text{Sign}(\cdot) = 1$ se l'argomento è >0 , $\text{Sign}(\cdot) = 0$ se l'argomento è $=0$ e $\text{Sign}(\cdot) = -1$ se l'argomento è <0 .

La statistica del test τ , che può essere calcolata come $\tau = 2S / (n(n-1))$, ha un intervallo da -1 a $+1$ ed è analoga al coefficiente di correlazione nell'analisi di regressione. L'ipotesi nulla H_0 viene respinta quando S e τ sono significativamente diversi da zero.

Nel lavoro presentato sono stati considerati significativi i trend con probabilità <0.01 . Il test molto rigoroso risponde anche all'esigenza di evitare conclusioni spurie sull'andamento del clima dovute al periodo di osservazione relativamente breve (24 anni).

Il test di Mann-Kendall consente di individuare l'esistenza di un trend monotono ma non la sua misurazione e per questo motivo è stato impiegato lo stimatore non parametrico Theil-Sen (Gilbert, 1987) per valutare la pendenza. Tale stimatore è definito come la mediana dei valori di pendenza determinati da tutte le possibili rette passanti per tutte le coppie di punti del campione. La stima fornita da questo metodo risulta molto più robusta di quella che si otterrebbe applicando al campione una regressione lineare semplice (OLS Ordinary Least Squares regression) in quanto risulta essere meno sensibile alla presenza di outliers.

Risultati e Discussione

I risultati delle analisi contenute nel Report (Scalcione et al., 2024) riguardano valori mediati su base annua e stagionale con le stagioni così definite: inverno (dicembre-gennaio-febbraio), primavera (marzo-aprile-maggio), estate (giugno-luglio-agosto), autunno (settembre-ottobre-novembre). Per la temperatura sono considerati i valori minimi, medi e massimi giornalieri.

I dati spazializzati di temperatura media e precipitazioni annuali (fig. 2a ed 2b) rendono conto della struttura orografica della regione con valori minimi di temperatura e massimi di pioggia nelle aree di alta quota dell'Appennino Lucano. Le aree agricole di maggiore pregio sono localizzate nelle pianure costiere affacciate sul mar Ionio, caratterizzate da un clima che varia dal sub-umido nelle zone occidentali al semi-arido in quelle orientali, che appaiono le più calde e le più asciutte della regione nelle mappe elaborate. Tendenze all'aumento si stimano per entrambe le variabili (fig. 2c e 2d). La tendenza crescente stimata nei valori di temperatura media annuale $v = 0.03$ °C/anno è significativa entro i limiti stabiliti nell'analisi (significatività <0.01) e consiste in un aumento di circa 1 °C nell'arco di trent'anni. Il trend nelle piogge non appare statisticamente significativo per l'alta variabilità

interannuale e richiede un periodo osservativo più lungo per valutarne la confidenza.

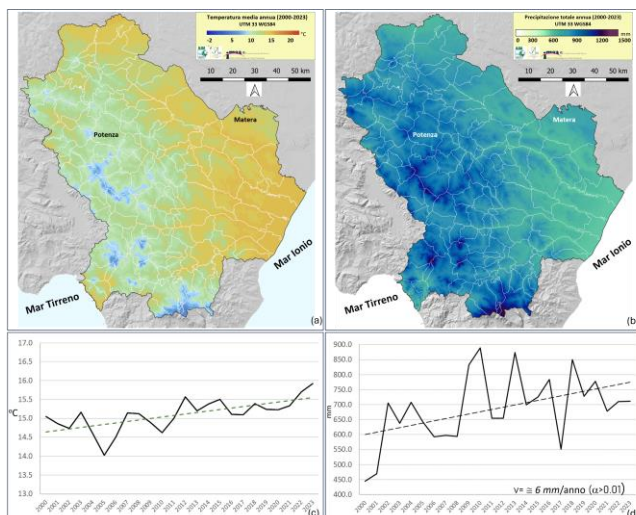


Fig.2 - (a) Mappa della tempera media annuale; (b) mappa delle precipitazioni annuali; (c) andamento della temperatura media annuale e (d) delle precipitazioni dal 2000 al 2023.

Fig.2 - a) Map of average annual temperature; (b) map of annual precipitation; (c) trend of average annual temperature and (d) of precipitation from 2000 to 2023.

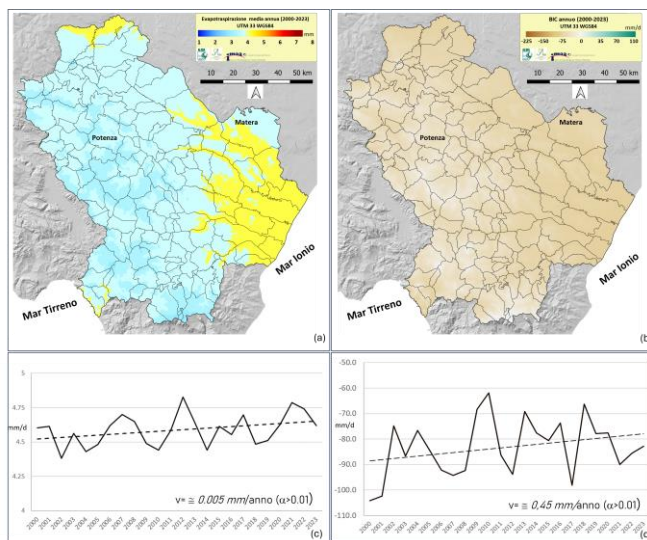


Fig.3 - (a) Mappa della evapotraspirazione media annuale; (b) mappa del bilancio idroclimatico (BIC) annuali; (c) andamento della evapotraspirazione media annuale e (d) del BIC dal 2000 al 2023.

Fig.3 - (a) Map of average annual evapotranspiration; (b) map of annual hydroclimatic balance (BIC); (c) trend of average annual evapotranspiration and (d) of BIC from 2000 to 2023.

Sebbene meno evidenti, differenze tra la zona montana e quella di pianura emergono nella mappa relativa all'evapotraspirazione (fig. 3a) mentre il BIC (fig. 3b)

appare più uniforme. Valori negativi del bilancio idroclimatico su tutta la regione indicano un deficit idrico, in cui le precipitazioni non coprono la domanda evaporativa del clima, segnalando condizioni di potenziale stress idrico per l'agricoltura. Le tendenze crescenti per evapotraspirazione e BIC, non sono statisticamente significative e per tutti i parametri legati alla pioggia un periodo osservativo più lungo appare indispensabile.

Conclusioni

La caratterizzazione agroclimatica della Basilicata nel periodo 2000-2023 ha evidenziato innanzitutto un trend crescente della temperatura media annuale, stimato in 0.03 °C/anno: ciò significa un aumento di circa 1 °C in un periodo di 30 anni.

Del resto un recente studio ha evidenziato che in Basilicata si registrano trend crescenti significativi della temperatura media annuale, particolarmente evidenti nell'ultimo decennio.

Pertanto, il cambiamento climatico avrebbe effetti diretti sull'agricoltura regionale, in quanto ci potrebbero essere minori accumuli di ore in freddo nel periodo novembre-marzo, oltre all'aumento della possibilità di gelate tardive. Si prevede inoltre, un maggiore consumo evapotraspirativo da parte delle colture, oltre al minore accumulo di acqua negli invasi regionali, con conseguente restrizioni nell'erogazione di acqua durante la stagione irrigua.

Tuttavia, l'aumento generalizzato della temperatura ha un aspetto positivo per la frutticoltura del Metapontino, in quanto potrebbe determinare un anticipo della data di maturazione delle primizie, drupacee in particolare, ma nello stesso tempo suggerisce la necessità di adottare strategie di difesa con l'applicazione di reti ombreggianti o altri mezzi che riducono il carico termo-radiativo del frutteto (Lacertosa et al, 2011).

Infine, la modifica del regime pluviometrico annuo, consiglia l'adozione di sistemi irrigui ad elevata tecnologia che si avvalgono dell'uso dei DSS e di sensori in campo per meglio utilizzare le risorse idriche disponibili. Per la gestione di eventi piovosi di elevata intensità è importante la sistemazione idraulica dei suoli con baulature, ma soprattutto la regimentazione extra e intra aziendale con una rete di canali di scolo correttamente dimensionati e in buono stato di manutenzione.

Per quanto riguarda le altre variabili di interesse in ambito agricolo ed analizzati nel report (Scalcione et al, 2024) (dati non inclusi per brevità) i trend non sono significativi entro i limiti stabiliti nell'analisi (significatività <0.01). Un periodo osservativo più lungo sarà necessario per produrre una nuova analisi nel futuro e dirimere la questione. Ulteriori analisi permetteranno, inoltre, di studiare i cambiamenti climatici nel periodo primaverile in cui i risultati attuali sembrano suggerire una possibile diminuzione della temperatura con possibili forti impatti sulle colture.

Bibliografia

- Mann, H.B. 1945. Non-parametric tests against trend, *Econometrica* 13:163-171.
- Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Methods, 4th edition, Charles Griffin, London.
- Hargreaves, George H., and Zohrab A. Samani. "Reference crop evapotranspiration from temperature." *Applied engineering in agriculture* 1.2 (1985): 96-99.
- Gilbert, R. O., "6.5 Sen's Nonparametric Estimator of Slope", *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*, John Wiley and Sons, (1987). 217-219, ISBN 978-0-471-28878-7.
- Lacertosa G., Scalcione E., Mennone C., Quinto G. R., Cardinale N., Montemurro F.. Influenza delle risorse termiche sulla precocità e livello produttivo della fragola del metapontino. *Italian Journal of Agrometeorology*, pag. 87-88. Atti del XIV convegno nazionale di agrometeorologia, Bologna 7-9 giugno 2011.
- Lanfredi, M., Coppola, R., D'Emilio, M., Imbrenda, V., Macchiato, M., & Simoniello, T. "A geostatistics-assisted approach to the deterministic approximation of climate data." *Environmental Modelling & Software* 66 (2015): 69-77.
- Montanaro G., Scalcione E., Carlomagno, A., Nuzzo V.. Analisi di alcune variabili climatiche nel periodo 1951-2022 in ambiente mediterraneo ed implicazioni per le coltivazioni arboree. *Italian Journal of Agrometeorology (Rivista Italiana di Agrometeorologia)*. Atti del XXV convegno nazionale di agrometeorologia, Matera 14-16 giugno 2023, pag. 1-4
- Scalcione E., Dichio P., Lanfredi M., Coluzzi R., Imbrenda V., Samela C.. Trend di temperatura a scala locale in aree Mediterranee: analisi spazio temporale dei dati acquisiti dalla rete agrometeorologica della Basilicata dal 2000 al 2023. *Italian Journal of Agrometeorology (Rivista Italiana di Agrometeorologia)*. Atti del XXVI convegno nazionale di agrometeorologia, L'Aquila 5-7 giugno 2024, pag. 16-19.
- Dichio B., Di Biase R., Tuzio A.C., Mastroleo M., Xylogiannis E., Mininni A.N. Precision irrigation strategies applied to different irrigation systems in kiwifruit orchard in Mediterranean region (2024) *Acta Horticulturae*, 1 (1409), pp. 257 - 266, DOI: 10.17660/ActaHortic.2024.1409.34
- Scalcione E., Dichio P., Lanfredi M., Coluzzi R., Imbrenda V. Caratterizzazione agroclimatologica della Basilicata (2000-2023). (https://www.alsia.it/opencms/export/sites/alsia/allegati/Report_Climatici/Caratterizzazione-agroclimatologica-della-Basilicata-2020_2023.pdf)

ANALYSIS OF PEDOCLIMATIC FACTORS FOR THE CULTIVATION OF INDUSTRIAL PEA: TOWARDS A COMPATIBILITY INDEX

ANALISI DEI FATTORI PEDOCLIMATICI PER LA COLTIVAZIONE DEL PISELLO DA INDUSTRIA: VERSO UN INDICE DI COMPATIBILITÀ.

Elisabetta Baldassarri¹, Katia D'Ercoli¹, Francesca Mancini², Angela Sanchioni³, Ugo Testa², Danilo Tognetti^{3*}, Michele Tonnini³

¹ Regione Marche - Settore Controllo di gestione e Sistemi statistici

² AMAP Sistema della conoscenza e dell'innovazione: networking, progettazione UE, demo-farm e sperimentazione

³ AMAP Agrometeo, PAN, sostenibilità ambientale e cambiamenti climatici

tognetti_danilo@amap.marche.it

Abstract

The Field Compatibility Index project aims to find a cultivation index that allows for the evaluation of the characteristics of the soil and climate, in order to be used for the cultivation of industrial peas (*Pisum sativum*). The purpose of this index is to determine whether a certain soil, on the basis of the chosen environmental variables, has the right characteristics for the cultivation of the species and whether it can potentially guarantee the achievement of the minimum expected yield. The project will last seven years and involves the collaboration of OP Covalm, the AMAP and the Marche Region.

In this work are described the methods used and the results achieved during the first year of the project. The basic data of the companies involved were selected and the soil and climatic variables from which to start to determine the index were identified. The series of data obtained were processed by the Statistics Office of the Marche Region, with the aim of determining the statistically significant variables on the yield and the presence of any correlations between the predictive factors useful for defining the yield index. A PCA (Principal Component Analysis) analysis was also applied to reduce the number of predictor variables.

Parole chiave

Indice di previsione, caratteristiche suolo, caratteristiche climatiche, pisello da industria, Regione Marche.

Keywords

Field Compatibility Index, soil characteristics, climate characteristics, industrial peas (*Pisum sativum*), Marche Region.

Introduzione

Il progetto Field Compatibility Index in collaborazione con la OP C.O.VAL.M., ha come obiettivo quello di creare un sistema di valutazione delle caratteristiche del terreno degli appezzamenti in cui si vuole effettuare la semina di pisello da industria (*Pisum sativum*); il sistema potrà permettere di determinare se le condizioni di quel terreno sono ideali per la semina o meno della specie e se esso può potenzialmente garantire il raggiungimento della resa minima prevista dall'OP (4 t/ha). La redazione del progetto e tutte le fasi di raccolta ed elaborazione dei dati si basano sul rispetto delle caratteristiche pedoclimatiche di cui la specie necessita per avere un buon sviluppo e produzione, caratteristiche che si possono suddividere in base alle esigenze pedologiche e climatiche.

Le esigenze pedologiche sono rappresentate dalle proprietà ideali che il terreno deve avere per poter accogliere la coltura: tessitura media, buon drenaggio, presenza di calcare attivo non superiore a 10%, salinità (mS/cm) inferiore a 3, presenza di una buona dotazione in sostanza organica.

Per quanto riguarda invece l'aspetto climatico, le esigenze della coltura prevedono climi temperato-caldi con estate umida e non eccessivamente calda (Allegato A della DGR).

Per la coltivazione è necessario che la temperatura minima del terreno sia di almeno 4°C così da permettere la sua germinazione; l'optimum di temperatura per la sua crescita va dai 15°C ai 18°C (ISMEA, 2021). Piogge vicine alla fioritura o nella fase di maturazione del baccello possono influire negativamente sulla qualità e la resa del raccolto a causa delle malattie che possono attaccare la coltura. Il ciclo colturale del pisello è quindi ben definito dalle unità di calore (UC) accumulate con soglia minima a 4,5°C calcolate dal giorno della semina a quella della raccolta. Il periodo migliore di coltivazione è collocato tra fine febbraio inizio giugno (Ferrante, 2017).

Il pisello è una specie miglioratrice del terreno; essendo una leguminosa presenta la caratteristica di avere un apparato radicale che entra in simbiosi con dei batteri definiti azotofissatori del genere *Rhizobium*; essi riescono a fissare una parte di azoto nel terreno permettendo a questo di arricchirsi con tale elemento e di lasciarlo a disposizione per la coltura successiva che potrà necessitare di minori apporti di azoto tramite le concimazioni. Un elemento importante di cui la coltura necessita è il fosforo che è essenziale per lo sviluppo dell'apparato radicale e durante la fase di fioritura. La crescita delle piantine di pisello non necessita di particolari condizioni del terreno, ma alcuni suoi fattori possono incidere sulla velocità di crescita delle piante, come

la presenza di carbonio organico, che possono incidere in particolare sullo sviluppo dell'apparato radicale delle piante (J. Pabin et. al, 1998). Un suolo con un buon contenuto di sostanza organica presenta una migliore struttura e questo permette di ridurre la possibilità di avere dei ristagni e mantenendo una biodiversità microbica che garantisce numerosi benefici alle piante.

Materiali e Metodi

In questo primo anno di programmazione si è iniziata una raccolta dati riguardanti la specie del pisello e in particolare si è scelto una cultivar di riferimento, *Stampede*, che mostra la caratteristica di mantenere una qualità del prodotto costante indipendentemente dalla resa produttiva in campo. I dati sono stati forniti dalla OP C.O.VAL.M. e riguardano: le analisi effettuate sui terreni in coltivazione (pH, tessitura, struttura, Calcare totale e attivo, C/N, Fosforo Assimilabile, N totale, Mg/K e Sostanza Organica); le rese ottenute (t/Ha); la geolocalizzazione dei vari appezzamenti; altri parametri agronomici come superficie degli appezzamenti, le date di semina e di raccolta, la lunghezza del ciclo colturale, le precessioni colturali e il tipo di sistema di coltivazione. I dati fanno riferimento a dei parametri scelti in accordo fra AMAP e OP come riferimento per la progettazione.

Le caratteristiche climatiche sono state espressi in appositi indici calcolati e forniti dal Servizio Agrometeo dell'AMAP. I parametri pedologici presi in analisi sono: pH, tessitura, struttura, calcare totale, calcare attivo, rapporto C/N; azoto totale.

I dati agronomici presi in analisi sono: la superficie degli appezzamenti (Ha), le date di semina e di raccolta espresse anche in giorni giuliani, precessioni colturali, tipo di sistema di coltivazione.

Per quanto riguarda i dati climatici il punto di partenza è stato quello di trovare, per ogni appezzamento in coltivazione, sulla base delle coordinate geografiche fornite dalla Cooperativa, le stazioni della rete agrometeo, gestita dal Servizio Agrometeo AMAP, più vicine; in modo tale da poter risalire a dei dati climatici attendibili per quell'area geografica. Sono stati considerati le seguenti grandezze: gradi giorno (°C) con base 4,5°C, precipitazione totale (mm) ed eliofania (ore) tutte calcolate durante tutto il ciclo colturale di ogni appezzamento.

I dati raccolti sono stati poi elaborati dall'Ufficio di Statistica della Regione Marche con il fine di individuare eventuali dipendenze statisticamente significative tra la resa (espressa in TON/Ha) degli appezzamenti di riferimento, vista come variabile dipendente, ed i parametri elencati sopra. Le procedure di analisi utilizzate sono: analisi descrittiva delle variabili indipendenti (predittive) e della variabile dipendente (TON/HA effettiva) attraverso il calcolo delle medie e deviazioni standard; calcolo delle correlazioni parziali due a due tra le variabili predittive; applicazione del modello di regressione lineare multipla delle variabili standardizzate; utilizzo dell'analisi fattoriale,

creando un insieme di variabili indipendenti non correlate adattate alla variabile dipendente e alle variabili indipendenti originali.

Per l'elaborazione dei dati statistici è stato utilizzato un apposito software denominato SPSS.

Risultati e Discussione

I parametri presi in considerazione per questo primo anno di attività mostrano degli sviluppi interessanti che potrebbero essere approfonditi negli anni a venire del progetto; ad esempio i dati climatici relativi alle precipitazioni mostrano come nelle varie zone di coltivazione il periodo di maggiori piogge non sia diversificato a seconda dell'area geografica.

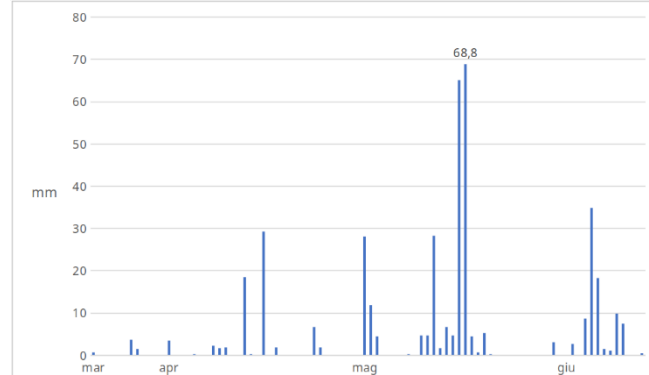


Fig.1 - Andamento delle precipitazioni giornaliere dalla stazione agrometeo di Tolentino (marzo-giugno 2023). Notare come nel mese di maggio vi sia stata una precipitazione davvero intensa pari a 68,8 mm in un periodo in cui la coltura è a fine fioritura-inizio allegagione dei baccelli quindi una fase delicata in cui piogge così importanti potrebbero compromettere la potenziale resa produttiva.

Fig.1 - Daily rainfall trend from the Tolentino agrometeorologic station (March-June 2023). Note how in the month of May there was a really intense rainfall equal to 68.8 mm in a period in which the crop is at the end of flowering-beginning of the pod setting therefore a delicate phase in which such important rains could compromise the potential production yield.

Le analisi statistiche effettuate dall'Ufficio di Statistica della Regione Marche hanno evidenziato la criticità dovuta al ridotto numero di aziende (19) se associato al numero di variabili (16).

E' stata fatta in via preliminare un'analisi esplorativa della base dati; per evitare l'effetto delle diverse scale di misura, le variabili sono state standardizzate e prima di applicare i modelli di regressione è stata costruita la matrice delle correlazioni bivariate tra tutte le variabili, alcune delle quali sono risultate statisticamente significative.

In una prima fase, sono stati applicati alle variabili standardizzate diversi metodi di regressione; i modelli non risultano statisticamente significativi, sebbene alcuni singoli predittori evidenziano un valore significativo nel "predire" la resa. Solo il modello Backward è statisticamente significativo, ma a causa del basso numero di osservazioni non è ritenuto abbastanza robusto. La motivazione per questa

mancata significatività può essere legata all'esiguo numero di unità rilevate e al fatto che esiste collinearità tra i predittori, evidenziata da valori di tolleranza prossimi allo zero nelle tabelle di output dei regressori: vista la presenza di una correlazione tra le variabili indipendenti questo implica che non si riesce a verificare l'effetto delle singole variabili sulla resa a causa.

Prima di proseguire con l'utilizzo di modelli di regressione lineare finalizzati a spiegare gli "effetti" delle variabili indipendenti sulla resa è stata effettuata un'analisi fattoriale su tutte le variabili indipendenti standardizzate, al fine di ridurre il numero di variabili iniziali e individuare nuovi "fattori" (combinazioni delle variabili iniziali) indipendenti. L'analisi fattoriale consente di effettuare una ricerca dei "fattori latenti" che riassumono le informazioni delle variabili originali. Successivamente sono stati selezionati solo i fattori che spiegano la maggior parte della varianza (cioè dell'informazione contenuta nei dati), che nel nostro caso viene spiegata dai primi 6 fattori (essi spiegano quasi l'87% della varianza).

Successivamente è stata effettuata una regressione sui fattori risultato dell'analisi, tra di loro indipendenti, ma il modello non risulta statisticamente significativo.

Considerando il numero ridotto di osservazioni rispetto alle variabili predittive e della presenza di collinearità tra le variabili, il numero dei predittori è stato ridotto; anche in questo caso i modelli di regressione sono risultati non significativi.

Attraverso l'applicazione di un nuovo modello di analisi fattoriale sull'insieme ridotto di variabili standardizzate, si sono individuate cinque componenti che spiegano l'87% della varianza totale.

Tab.1 – Tabella di riepilogo della varianza totale spiegata dell'analisi fattoriale.

Tab.1 – Summary table of total variance explained by factor analysis.

Varianza totale spiegata						
Componente	Totale	Autovalori iniziali		Caricamenti somme dei quadrati di estrazione		
		% di varianza	% cumulativa	Totale	% di varianza	% cumulativa
1	2,443	30,542	30,542	2,443	30,542	30,542
2	1,747	21,832	52,375	1,747	21,832	52,375
3	1,169	14,607	66,981	1,169	14,607	66,981
4	,858	10,722	77,704	,858	10,722	77,704
5	,755	9,437	87,141	,755	9,437	87,141
6	,503	6,283	93,424	,503	6,283	93,424
7	,406	5,075	98,499	,406	5,075	98,499
8	,120	1,501	100,000	,120	1,501	100,000

In particolare la prima componente, che da sola spiega oltre il 30% della varianza è riconducibile per la quasi totalità al calcare attivo; la seconda componente, circa il 22% della varianza, è invece attribuibile in gran parte alla precipitazione totale.

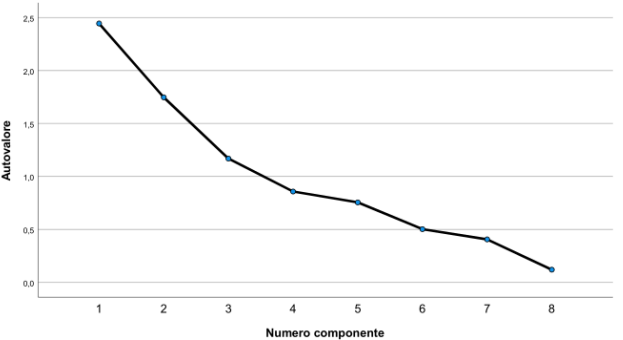


Fig.3 – Grafico della varianza cumulata ottenuta dell'analisi fattoriale delle variabili standardizzate.

Fig.3 - Graph of the cumulative variance obtained from the factor analysis of the standardized variables.

Dunque, in base a questi risultati possiamo affermare che oltre la metà della variazione della produzione sono in qualche modo condizionati dal calcare attivo (fattore chimico) e dalle precipitazioni nel periodo colturale (fattore ambientale). E' necessario aggiungere che anche in questo caso, cioè considerando le sole 5 componenti di maggior peso, non si sono ottenuti andamenti statisticamente significativi applicando i modelli regressivi considerati nella prima fase.

Tab.2 – Tabella di riepilogo delle componenti dell'analisi fattoriale ognuna spiegata dalle variabili standardizzate.

Tab. 2 - Summary table of the components of the factor analysis, each explained by the standardized variables.

	Matrice dei componenti ruotati ^a						
	Componente						
	1	2	3	4	5	6	7
Punteggio Z: Calcare attivo	,973	-,071	-,048	,011	,001	-,066	-,149
Punteggio Z: C/N	-,076	-,182	,217	,193	,056	,923	,133
Punteggio Z: Sostanza/Organica	,011	-,033	,069	,982	-,001	,160	-,015
Punteggio Z: Sodio scambiabile	-,047	,002	,976	,070	-,043	,182	-,025
Punteggio Z: CICLO CULTURALE IN GIORNI GIULIANI	-,009	-,237	-,049	,005	,901	,056	,134
Punteggio Z: Gradi giorno (T base 4,5°C)	-,194	-,280	-,030	-,020	,141	,142	,896
Punteggio Z: Precipitazione totale	-,088	,919	,000	-,040	-,215	-,183	-,256
Punteggio Z(Eliofania)	,190	,020	-,079	-,092	,358	,068	,204

Conclusioni
Dall'osservazione delle precipitazioni registrate dalle stazioni Agrometeo presenti sul territorio per le annate 2023 e 2024, marzo risulta essere il mese maggiormente piovoso in tutte le località prese in considerazione, durante questo mese la coltura risulta ancora nella fase di crescita, quindi piogge in quel periodo possono essere positive per la coltura permettendogli di accrescersi al meglio. Le piogge più problematiche risultano quelle a ridosso della raccolta, che possono impedire l'ingresso in campo delle macchine, una raccolta ritardata può andare ad influire sulla qualità del prodotto abbassandola. Altro fattore che può incidere molto sulla coltura sono lunghi periodi siccitosi con temperature alte, che soprattutto a ridosso della fioritura possono causare la cascola dei fiori, fortunatamente gli anni presi in considerazione non sono stati caratterizzati da questo fenomeno.

Per quanto riguarda la tessitura dei terreni in analisi, si può definire che la componente limosa tra le tre è quella maggiormente prevalente in tutti i terreni, seguita subito dall'argilla, mentre la sabbia è sempre presente in quantità modeste. In generale l'elevata quantità di limo e argilla fa sì che le tipologie di terreno si aggirino sempre intorno al franco limoso argilloso, al limoso argilloso e al franco.

Nei riguardi dell'analisi statistica ciò che è scaturito dalle elaborazioni del dall'Ufficio di Statistica della Regione Marche è stato prima di tutto il fatto di ridurre il numero delle variabili predittive o di aumentare il numero di osservazioni. La scelta di ridurre il numero di variabili non ha comunque migliorato i risultati dei test eseguiti molto probabilmente a causa del ridotto numero dei siti del campione.

Nonostante la non significatività dei vari modelli testati, dall'osservazione dell'analisi statistica risulta che il suolo per quanto riguarda la tessitura e la composizione chimica va a spiegare, a livello di analisi fattoriale basata sulla varianza, un 50% della resa con la variabile di maggior peso rappresentata dal calcare attivo. Per quanto riguarda i dati climatici valutati, un buon contributo sembra averlo la precipitazione totale ma, ricordiamo, non sono stati ottenuti regressioni lineari statisticamente soddisfacenti neanche considerando le 5 componenti principali dell'analisi fattoriale. Potrebbe essere utile modificare questa tipologia di parametri o integrarla con altri (ad esempio creando dei cluster).

Concludendo si può dire che su determinati parametri l'agricoltore e il tecnico possono incidere con la tecnica colturale, ad esempio effettuando una corretta preparazione del terreno, scegliendo l'appezzamento più adatto, apportando elementi nutritivi se necessario, mentre su altri non può incidere in nessun modo come ad esempio sulla tessitura del terreno, sull'andamento climatico, ma può comunque provare ad adattarsi a quello che trova. Sulle analisi statistiche sarà molto proficuo ottenere nuovi punti di rilevamento o prolungare gli anni di sperimentazione così da aumentare la numerosità del campione. Ed è questo ciò che si tenterà di fare nei prossimi anni del progetto Field Compatibility Index.

Bibliografia

Allegato A della DGR n° 936 del 25 luglio 2022 Disciplinare di Produzione Integrata Regione Marche.

ISMEA, Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare, 2021. Standardizzazione delle procedure per la valutazione dei danni alle colture vegetali. Pisello da Industria.

A. Ferrante, 2017. Legumes as vegetables for the industry- A. Ferrante.

J. Pabin et. al, 1998. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors.

INNOVATION AND COOPERATION IN THE PROJECT “WHEAT”

INNOVAZIONE E COOPERAZIONE NEL PROGETTO WHEAT

Eva Lorrain^{1*}, Vittorio Addis², Carlino Casari¹, Stefania Gaviano², Fabio Porcu², Mauro Salis³, Carlo Milesi¹

¹ CRS4 – Centro Ricerca Sviluppo e Studi Superiori in Sardegna, Ed. 1 Loc. Piscina Manna, 09010, Pula (Ca)

² SPIVA - Soluzioni e Tecnologie per il territorio, via della Pineta 235, 09126, Cagliari (Ca)

³ SGM Processing Srl – Via Roma, 144 B, 07100, Sassari (SS)

[*eva@crs4.it](mailto:eva@crs4.it)

Abstract

With regard to cereal crop production, Sardinia primarily cultivates, in descending order of quantity: durum wheat, oats, barley, and rice.

However, agricultural practices in the region are significantly constrained by the complex pedoclimatic conditions of the Sardinian territory, by the extended periods of drought, by the absence of coordinated action among producers, and by the limited adoption of technological tools by the majority of small-scale local farmers.

In response to the latter issue, one of the main objectives of the *WHeat prEcision fArming innovaTion* (WHEAT) project is the development of a Decision Support System (DSS) aimed at assisting farmers in optimizing production inputs associated with land capital. Still currently under development, the DSS integrates remote sensing data with farm-level information collected from the selected Sardinian cereal producers, with the goal of enhancing cultivation planning and improving the efficiency of fertilizer application.

Parole chiave

DSS, Remote Sensing, GIS, Agricoltura, Mappe di prescrizione

Keywords

DSS, Remote Sensing, GIS, Agriculture, Prescription maps

Introduzione

Secondo l'European Parliamentary Research Service, in Europa, il settore cerealicolo occupa il terzo posto per valore di produzione agricola: la sua gestione sostenibile è cruciale per affrontare le sfide legate al cambiamento climatico e alla crescente domanda alimentare.

L'Italia è il sesto paese europeo per la produzione di grano e il primo per quella di riso (fonte AtlasBig, 2023): nel 2023 la produzione di frumento duro è stata di 3.690.000 t con un totale di 1.270.000 ha di superficie coltivata e quella di frumento tenero 3.040.000 t con 598.280 ha di superficie coltivata (fonte ISTAT); la produzione di riso è stata di 1.383.000 t con 210.239 ha di superficie coltivata (fonte Agrigiornale).

In Sardegna, la produzione di grano duro nel 2023 è stata di 693.000 q con una superficie coltivata di 29.200 ha e quella del riso risulta intorno ai 280.000 q su una superficie di circa 3800 ha.

I criteri di sistemazione dei terreni destinati ai cereali hanno subito un radicale mutamento nel corso degli ultimi decenni, in conseguenza dell'avvento e della diffusione della meccanizzazione e, più in generale, dell'agricoltura di precisione.

In questo contesto, l'esigenza di operare su adeguate dimensioni di superficie per poter convenientemente impiegare i macchinari nelle diverse operazioni colturali e ottimizzarne gli spazi rende significativo l'utilizzo di dati con componente geografica.

Al fine di favorire la omogeneità quantitativa e qualitativa dei raccolti in Sardegna, il progetto WHeat prEcision

fArming innovaTion (WHEAT), finanziato dall'Agenzia regionale sarda per il sostegno all'agricoltura (ARGEA) attraverso il Programma di Sviluppo Rurale PSR 2014/2020, mira a migliorare la competitività dei produttori primari attraverso l'introduzione di tecniche innovative nelle aziende cerealicole coinvolte. Tra sistemi di innovazione previsti dal progetto, una piattaforma di supporto alle decisioni, tuttora in fase di completamento e composta da un set di strumenti integrati che utilizza immagini satellitari e dati raccolti sul campo, supporterà le aziende nelle scelte finalizzate al miglioramento delle proprie performance. Pur essendo la piattaforma finalizzata alla coltura del grano duro, in questa sede si considerano i dataset delle aziende coinvolte nel progetto che includono anche le informazioni sul riso.

Materiali e Metodi

Area di studio e aziende coinvolte

I siti delle aree di studio (vd. Fig.1) si trovano nei comuni di Oristano, Simaxis (OR) e Siamanna (OR) e, da punto di vista pedoclimatico, presentano le seguenti caratteristiche:

Caratteristiche pedologiche

Si tratta di substrati alluvionali e arenarie eoliche cementate del Pleistocene. Il terreno ha giacitura variabile da subpianeggiante a pianeggiante. Le aree con prevalente utilizzazione agricola. Data la giacitura pressoché pianeggiante non si ha un'esposizione prevalente. Si tratta di suoli a profilo A-Bt-C, A-Btg-Cg e subordinatamente A-C, profondi, da FS a FSA in superficie, da FSA ad A in

profondità', da permeabili a poco permeabili, da subacidi ad acidi, da saturi a desaturati. I suoli predominanti, secondo la U.S.D.A. Soil Taxonomy (1988) sono: *Typic, Aquic, Ultic Palexeralfs*, subordinatamente *Xerofluvent, Ochraqualfs*.

Caratteristiche climatiche

Il clima della zona, si può definire temperato-caldo, con una stagione caldo-arida estiva e una stagione piovosa più o meno fredda.

I dati climatici riportati sono stati ricavati da osservazioni trentennali della stazione meteorologica più vicina al sito.

Il valore medio annuo di temperatura registrato nella zona è di circa 15,7 °C. I valori medi delle temperature minime e massime sono rispettivamente di 11,6 °C e 19,8 °C. Gennaio è il mese con la temperatura più bassa di tutto l'anno, con una temperatura media di 8,4 °C, mentre agosto è il mese più caldo, con una temperatura media di 27,3 °C e una temperatura massima di 34,6 °C.

Le precipitazioni medie annue oscillano tra i 500 e i 600 mm e si concentrano nei mesi di novembre, dicembre, gennaio e febbraio: tale valore è inferiore alla media isolana. La media annuale di piovosità è di circa 558 mm. Si osserva che circa la metà del cumulo di precipitazione dell'intero anno si ha fra ottobre e febbraio.

La vicinanza al mare e la presenza di ampie zone agricole fanno sì che l'umidità relativa sia mediamente elevata. Le variazioni stagionali sono modeste, ma la presenza di umidità alta è una caratteristica costante della zona.

Dall'analisi delle condizioni anemometriche, ricavate dai dati delle stazioni meteorologiche più vicine, si nota una netta prevalenza dei venti di direzione occidentale e sud-occidentale. In particolare, il vento di Ponente (O e O-S-O) è il predominante, seguito dal vento di Scirocco, che soffia da sud-est durante i mesi estivi. Anche il Maestrale, vento di nord-ovest, può essere presente, soprattutto nei periodi di cambio stagionale.

Delle aziende che hanno partecipato al progetto, si sono considerate due unità produttive, dotate di documentazione sulle lavorazioni eseguite nell'annata 2022/23, sulle unità produttive gestite dalle aziende agricole SA PERDAIA e PASSIU S.S.A. I dati di tale documentazione evidenziano la complessa gestione agronomica e fitosanitaria delle coltivazioni di grano e riso nel contesto delle unità produttive.

Dati

Quaderni di campagna

Dall'analisi dei quaderni di campagna si desume quanto segue:

- per quanto riguarda il frumento duro, le varietà coltivate sono state “MAESTA” su 14.45 ettari dell'azienda Passiu, con impianto a gennaio 2023 e raccolto a luglio 2023, “ANTALIS” (25.62 ha), “GIULIO” (12.41 ha) e “MARCO AURELIO” (11.04 ha) nell'azienda Sa Perdaia, con impianto a dicembre 2022 e raccolto a luglio 2023;

- per quanto riguarda il riso, le superfici destinate alla coltivazione nelle due unità produttive interessano rispettivamente 23,85 e 12,43 ettari e le varietà coltivate sono state “Selenio” e “CL 007”, impiantate tra maggio e giugno 2023; la fioritura è iniziata a partire da agosto e la raccolta è stata completata entro ottobre 2023.



Fig.1 – Localizzazione delle aziende considerate

Fig.1- Geographical distribution of the considered farms

Ogni unità produttiva è stata gestita seguendo pratiche specifiche di lavorazione del terreno, con particolare attenzione alla preparazione del letto di semina e alla gestione idrica.

I dati includono anche i trattamenti fitosanitari eseguiti e i piani di fertilizzazione, descrivendo le quantità e la distribuzione temporale dei nutrienti (N, P, K) ad ettaro, nonché le dosi dei fitofarmaci impiegati. I trattamenti fitosanitari sono stati effettuati seguendo criteri di soglia d'intervento basati sul monitoraggio delle popolazioni infestanti, al fine di minimizzare l'uso di prodotti chimici e preservare la biodiversità nell'ecosistema agricolo. Ogni trattamento è stato registrato con indicazioni sulle dosi utilizzate, sui mq delle superfici trattate e le modalità operative, garantendo una tracciabilità completa delle operazioni eseguite. Tuttavia, non è possibile desumere geograficamente a quali parti delle parcelle si riferiscano le diverse lavorazioni.

Il processo di digitalizzazione dei quaderni di campagna forniti dalle aziende agricole ha seguito un approccio metodico volto alla conversione dei dati PDF originali in formato digitale CSV. Tale processo ha previsto la georeferenziazione e la categorizzazione delle informazioni in funzione dell'unità produttiva di riferimento, del tipo di operazione e della data di intervento.

Dati satellitari

L'uso della tecnologia satellitare permette una valutazione accurata e non invasiva delle condizioni fisiologiche delle colture, offrendo una prospettiva globale e continua delle dinamiche di crescita.

Per quanto riguarda la sensoristica remota, 55 immagini satellitari Sentinel 2A o 2B, a seconda della disponibilità e per le date corrispondenti o più prossime a quelle delle lavorazioni registrate nei quaderni di campagna, sono state

scaricate dal portale Copernicus (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>).

Per ricampionare i valori del Red Edge da pixel di 20 m a pixel di 10 m è stato utilizzato l'algoritmo "bilinear" del software SNAP dell'ESA. Quindi, con immagini dal 19/12/2022 al 25/09/2023, si sono ricavati gli indici NDRE (Normalized Difference Red Edge Index) e NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) sia per individuare criticità in determinate zone dal calcolo di media, varianza e deviazione standard, sia per valutare i cambiamenti nelle unità produttive in seguito ai trattamenti eseguiti e presenti nei quaderni di campagna.

Entrambi gli indici possono variare da -1 a +1, con valori più elevati che indicano una maggiore densità vegetale e un'attività fotosintetica più intensa. Nel monitoraggio delle colture, l'incremento dei valori NDVI è indicativo di una crescita vigorosa e di una buona condizione vegetativa, mentre una diminuzione può segnalare la presenza di stress abiotici, come carenze idriche o nutrizionali, o l'insorgenza di patologie. L'indice NDRE, invece, sfrutta la riflettanza nelle bande del vicino infrarosso (NIR) e del Red Edge, particolarmente sensibile alla concentrazione di clorofilla nelle foglie e quindi utile per fornire informazioni dettagliate sullo stato fisiologico delle piante, soprattutto nelle fasi avanzate di crescita. L'NDRE si dimostra particolarmente utile nel monitoraggio durante le fasi di piena crescita e maturazione delle colture, grazie alla sua maggiore sensibilità ai cambiamenti nella concentrazione di clorofilla rispetto all'NDVI. Questa sensibilità aggiuntiva rende l'NDRE uno strumento indispensabile per la valutazione dello stato di salute delle piante quando l'indice NDVI può saturare, quindi durante i periodi di elevata biomassa, nonché l'indice più accurato per quanto riguarda la correlazione con i parametri vegetativi e nutrizionali (Yuhao *et al.*, 2020; Orsini *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2019). Oltre al calcolo dei due indici per i 55 raster presi in considerazione, elaborazioni di valori statistici (media, varianza, deviazione standard, max e min) dell'NDVI su dati dal 29 dicembre 2022 al 29 dicembre 2023, e per le sole unità produttive selezionate, sono state richieste direttamente al Sentinel hub, al fine di osservare l'andamento dell'indice nel tempo o di riscontrarne valori anomali.

Architettura del sistema

Il progetto gestisce e pubblica i dati tramite il DSS (Decision Support System). Il sistema è sviluppato utilizzando un'architettura a microservizi, centrata sul framework Kubernetes (<https://kubernetes.io/>), e si basa sia su software open source che su codice personalizzato sviluppato dal CRS4. L'architettura del sistema è suddivisa in due livelli:

1) il *frontend* che consiste in un'applicazione GIS accessibile via browser per la visualizzazione dei dati. La piattaforma utilizza la libreria Map Wall (versione 0.6), sviluppata dal CRS4. I dati geografici sono forniti al frontend tramite GeoServer (versione 2.5).

2) il *backend* le cui funzioni principali riguardano il preprocessing dei dati tramite script ETL (Extract, Transform, Load) scritti in Python, il loro salvataggio su database Postgres con estensione geografica PostGIS e l'invio delle informazioni al frontend tramite una serie di API, scritte in Node.js.

Risultati

Per poter realizzare la prima versione del DSS, una consistente fase di preprocessing dei dati si è resa necessaria: con le funzioni del backend sopra descritto, un processo ETL scarica i file raster disponibili e precedentemente trattati, li ritaglia, riscalda e li carica sia nel database che nel GeoServer; in modo simile, i quaderni di campagna vengono elaborati tramite un altro processo ETL che converte i dati dal formato CSV traducendoli in una struttura relazionale.

I dati numerici, che includono sia serie temporali sia informazioni geo-referenziate, possono essere memorizzati in formato relazionale o, in alternativa, in formato JSON. Questi dati sono salvati su un database Postgres con estensione geografica PostGIS, mentre i file raster e vettoriali possono essere archiviati sia su file system che nel database.

La prima versione della piattaforma sviluppata ha tre caratteristiche:

1) permette all'utente di rappresentare graficamente l'area geografica di interesse e di visualizzare l'insieme delle unità produttive sul territorio preso in considerazione. Le informazioni relative alle stesse parcelle e ai quaderni di campagna possono essere recuperate dal database e visualizzate in un popup selezionando un punto o un'area specifica.

Dalla piattaforma si eseguono query sui dati presenti nel database, visualizzabili come serie numeriche, grafici, dati vettoriali e raster e si e interrogano i layer geografici caricati su geoserver.

La piattaforma consente di visualizzare le informazioni presenti nei quaderni di campagna direttamente su mappe georeferenziate, fornendo una rappresentazione spaziale accurata degli eventi agronomici, quali semine, trattamenti, raccolte e altre operazioni rilevanti.

Una volta selezionata la zona di interesse, il sistema permette la creazione di tabelle, grafici e serie numeriche (vd. Fig.2).

2) consente la definizione di mappe di prescrizione per quanto riguarda la somministrazione di fertilizzanti. La base di partenza è la mappa dell'indice vegetazionale: la semplificazione utilizzata nel progetto WHEAT è quella di utilizzare l'indice NDVI nelle prime fasi di crescita della pianta e l'indice NDRE a maturazione avvenuta. Ulteriore semplificazione è stata quella di attribuire ai valori più bassi dell'indice problemi nello sviluppo vegetativo dovuti a stress nutrizionali e di rispondere agli stress con mappe di prescrizione legate unicamente alla somministrazione di azoto (Brinkhoff *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2022).

Nell'attuale versione del DSS, l'utente ha due possibilità: la prima è quella di disegnare sul raster visualizzato le zone che intende trattare e, per ogni zona individuata, associare automaticamente i quantitativi di azoto provenienti da tabelle preimpostate a seconda della coltura e che derivano dalle dosi standard dei piani di fertilizzazione regionali; la seconda è una procedura automatica che associa quantitativi di azoto preimpostati alle diverse classi individuate per i valori assunti dall'indice vegetazionale.

3) permette di evidenziare situazioni critiche nel tempo attraverso la visualizzazione degli indici vegetazionali: l'utente effettua la selezione dell'immagine a una certa data e, successivamente, richiede il calcolo della media del valore dell'indice prescelto in ogni pixel del raster, selezionando un periodo di riferimento. Effettuando la media in periodi diversi, è possibile evidenziare comportamenti anomali che possono richiedere analisi più approfondite su determinate porzioni dei terreni considerati.

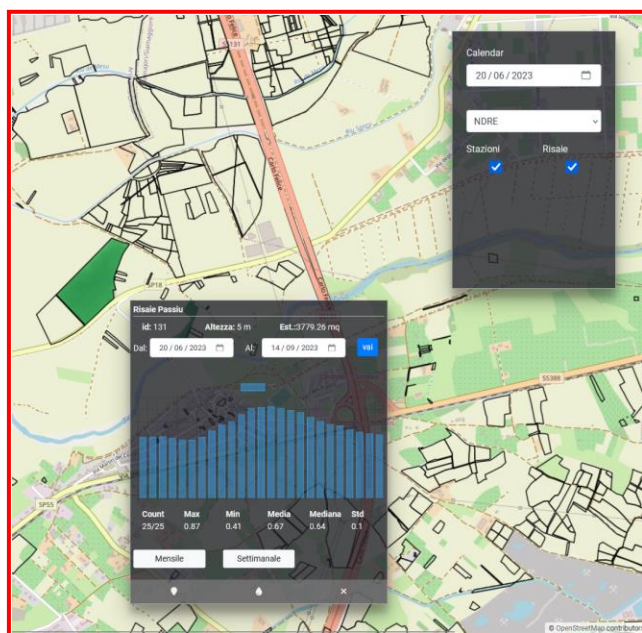


Fig.2 - Selezione di una delle parcelle prese in esame, con l'andamento storico dell'indice NDRE.

Fig.2- Selection of one of the agricultural parcels examined, and trend of the NDRE index.

Conclusioni

Con la progettazione del DSS si è cercato di rispondere a una delle sfide del progetto: l'inserimento di strumenti tecnologici all'interno di un sistema aziendale caratterizzato da esigenze tecnico-logistiche radicate.

I quaderni di campagna, compilati dalle aziende, comprendono descrizioni dettagliate degli eventi agronomici (preparazione dei terreni, semine, fertilizzazioni, trattamenti fitosanitari, irrigazioni, raccolte, etc.). Tuttavia, pur essendoci indicate le superfici totali trattate rispetto all'intera area coltivata, non vengono

distinte quelle direttamente interessate dai singoli trattamenti. Con gli strumenti messi a disposizione dal DSS, è possibile circoscrivere le suddette aree proponendo fertilizzazioni a rateo variabile attraverso la realizzazione di mappe di prescrizione semplificate, sia in modo automatico che manuale.

Negli sviluppi futuri sono previste nuove funzionalità per tenere conto della risposta ad altri fertilizzanti oltre l'azoto, dell'impatto di attacchi parassitari o di specifiche situazioni meteorologiche. L'interpretazione di ulteriori indici, come per esempio l'NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*), per la valutazione dello stress idrico, sarà di supporto alla predisposizione dei piani di irrigazione.

La prevista integrazione nella piattaforma di dati meteorologici provenienti da stazioni meteo locali porterà un ulteriore miglioramento nell'accuratezza del calcolo degli indici vegetazionali di riferimento.

Bibliografia

- Yuhao A., Che'Ya N.N., Roslin N.A., Ismail M.R., 2020. Rice Chlorophyll Content Monitoring using Vegetation Indices from Multispectral Aerial Imagery. *Pertanika Journal of Science and Technology* : 779 – 795
- Brinkhoff J., Dunn B., Robson A., 2021. Rice nitrogen status detection using commercial-scale imagery. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102627>
- Yang M., Xu X., Li Z., Meng Y., Yang X., Song X., Yang G., Xu S., Zhu Q., Xue H., 2022. Remote Sensing Prescription for Rice Nitrogen Fertilizer Recommendation Based on Improved NFOA Model. *Agronomy* (Vol. 12, Issue 8): <https://doi.org/10.3390/agronomy12081804>
- Orsini R., Fiorentini M., Zenobi S., 2020. Evaluation of Soil Management Effect on Crop Productivity and Vegetation Indices Accuracy in Mediterranean Cereal-Based Cropping Systems. *Sensors* (Vol. 20, Issue 12): <https://doi.org/10.3390/s20123383>
- Wang K., Huggins D. R., Tao H., 2019. Rapid mapping of winter wheat yield, protein, and nitrogen uptake using remote and proximal sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101921>

RECENT CLIMATOLOGY OF SIMULATED PHENO-PHYSIOLOGICAL PARAMETERS IN PIEDMONTESE VINEYARDS

CLIMATOLOGIA RECENTE DEI PARAMETRI FENO-FISIOLOGICI SIMULATI NEI VIGNETI PIEMONTESI

Alessandra Ciriotti¹, Valentina Andreoli¹, Claudio Cassardo¹

¹ Dipartimento di Fisica, Università di Torino, via Pietro Giuria 1, 10125, Torino (To)

*claudio.cassardo@unito.it

Abstract

This study shows the results of some simulations over a 20-years period on some vineyards located in the Langhe and Roero wine-growing regions of Piedmont with the crop model IVINE (Italian Vineyard Integrated Numerical model for Estimating physiological values). The required meteorological data were obtained from a database created by integrating the existing datasets (regional agrometeorological network - RAM - and regional meteorological-hydrological network ARPA) and interpolating the missing data on the sites in question. The data related to soil variables were obtained from the outputs of simulations conducted using the UTOPIA model (University of TORino land surface Process Interaction model in Atmosphere), while the parameters related to soil texture and organic content were deduced from the international database SoilGrids. The results show the interannual variability and trends of some variables related to the phases and physiology of the vine in this twenty-year period.

Parole chiave

Modello di crescita; Ivine; Vigneti; Fasi fenologiche; Fisiologia

Keywords

Crop growth model; Ivine; Vineyards; Phenological phases; Physiology

Introduzione

L'uso di modelli di crescita delle colture è aumentato nel corso dell'ultimo secolo, partendo dalle osservazioni di campo e arrivando alla simulazione di processi fisiologici chiave che influenzano la crescita delle colture, come la fotosintesi, la respirazione, l'assorbimento dei nutrienti e l'uso dell'acqua. Inoltre, la determinazione delle principali fasi fenologiche è importante perché consente di monitorare lo svolgimento dei vari processi. In questi modelli, è essenziale includere l'influenza di fattori ambientali variabili, come le grandezze meteorologiche (temperatura, umidità, vento, pressione e precipitazioni) e quelle relative allo strato superficiale e allo strato radicale nel sottosuolo (disponibilità idrica e contenuto energetico), nonché le proprietà del suolo (tessitura e caratteristiche fisiche) e della vegetazione (proprietà fisiche e tipologia di colture). Il passo successivo è rappresentato dai test di validazione di questi modelli per una determinata cultivar, effettuando esperimenti di validazione in determinate regioni e territori e di confronto con le misure svolte in campo. Una volta superati questi test, i modelli in questione possono essere considerati affidabili e possono essere utilizzati come strumenti di laboratorio per condurre simulazioni di vario tipo.

Nella fattispecie, lo studio presentato analizza i risultati di alcune simulazioni ventennali condotte su alcuni vigneti situati nelle regioni vitivinicole piemontesi di Langhe e Roero, utilizzando il modello culturale IVINE (Italian Vineyard Integrated Numerical Model for Estimating Physical Values), sviluppato da due degli autori presso il Dipartimento di Fisica (Andreoli et al., 2019). I dati

meteorologici richiesti sono stati ricavati da un database creato integrando i dataset esistenti (rete agrometeorologica regionale, RAM, e rete meteorologico-idrologica regionale, ARPA) e interpolando i dati mancanti sui siti in esame. I dati relativi alle variabili nel suolo sono stati ricavati dagli output di simulazioni condotte utilizzando il modello UTOPIA (University of Torino land surface Process Interaction Model in Atmosphere), mentre i parametri relativi alla tessitura e al contenuto organico del suolo sono stati dedotti dal database internazionale SoilGrids.

Materiali e metodi

Il modello UTOPIA

Il modello UTOPIA, sviluppato in Fortran presso il nostro Dipartimento dal 1990 e costantemente migliorato e testato (Cassardo e Andreoli, 2019), è un modello diagnostico monodimensionale (lavora su un singolo punto, in cui l'unica direzione considerata è quella verticale) che studia le interazioni all'interfaccia tra lo strato superficiale atmosferico e il terreno. Esso analizza i processi fisici tra atmosfera, superficie terrestre e vegetazione, e rientra nella categoria dei modelli a grande foglia, in cui l'indice di area fogliare LAI rappresenta la complessità della vegetazione. UTOPIA, a partire dai dati meteorologici, descrive gli scambi di energia, quantità di moto e vapore acqueo tra l'atmosfera e il suolo, vegetato o meno. Viene inoltre considerata la presenza di uno strato nevoso sopra il suolo o di vegetazione (Cassardo e Andreoli, 2019), nonché il congelamento dell'acqua nel suolo.

I parametri relativi alla vegetazione e al suolo (temperatura e contenuto idrico) vengono valutati utilizzando equazioni di bilancio applicate a uno schema di suolo multistrato. Le caratteristiche del suolo e della vegetazione sono codificate rispettivamente in 34 tipi di vegetazione o uso del suolo e 14 tipi di tessitura del suolo. In questo studio è stato utilizzato il codice relativo ai vigneti. I parametri di input richiesti, con frequenza oraria o semioraria, sono: temperatura e umidità dell'aria, pressione, precipitazioni, velocità e direzione del vento, radiazione solare globale e, se disponibile, anche la radiazione a onda lunga incidente.

Il modello IVINE

Il modello IVINE (Andreoli et al., 2019) è un modello numerico progettato e sviluppato in Fortran presso il nostro Dipartimento per simulare le principali condizioni fenologiche e fisiologiche della vite durante la sua crescita. Richiede i seguenti parametri meteorologici come dati di contorno, a cadenza oraria: temperatura e umidità relativa dell'aria, radiazione solare globale, radiazione fotosinteticamente attiva (PAR), direzione e velocità del vento, pressione atmosferica, temperatura e contenuto volumetrico di acqua in due strati del sottosuolo (rispettivamente a profondità di 34 e 106 cm). IVINE richiede, come ulteriori dati iniziali, le informazioni geografiche (latitudine, longitudine), tessitura del suolo, informazioni sul vigneto (densità di impianto e dati di gestione del vigneto: numero e date di cimatura e diradamento, e altri parametri specificamente correlati alla varietà considerata (soglie termiche per le fasi fenologiche, valore del contenuto zuccherino per inizio maturazione, invaiatura e vendemmia, numero medio di grappoli per pianta e di acini per grappolo). Gli output di IVINE sono: le date in cui vengono raggiunte le principali fasi fenologiche (uscita dalla dormienza, germogliamento, fioritura, allegagione, inizio della maturazione, invaiatura e vendemmia), la resa delle piante (valutata in base alla sostanza secca e alla densità d'impianto), il contenuto zuccherino degli acini (calcolato a partire dall'inizio della fase di fioritura utilizzando una curva a doppia sigmoide), il peso degli acini, la massa di sostanza secca e umida, il potenziale idrico fogliare e il LAI (che rende conto del vigore vegetativo).

Le località studiate

L'elenco delle otto località analizzate, con le loro coordinate, è riportato in Tab. 1, e la loro dislocazione geografica in Piemonte in Fig. 1. Si sottolinea che, qui e nel seguito, si preferisce parlare di località piuttosto che di vigneti in quanto i dati meteorologici usati come valori di ingresso per i modelli sono stati raccolti a partire da quelli delle reti RAM e ARPA più vicine ai vigneti, interpolandone i dati mancanti con un doppio criterio: la vicinanza territoriale e il coefficiente di correlazione.

Tab.1 – Coordinate e quote delle località studiate.

Tab.1 - Coordinates and elevations of the studied locations.

Stazione	Latitudine [°N]	Longitudine [°E]	Quota [m s.l.m.]
Alba	44.690	8.032	183
Barbaresco	44.724	8.083	329
Barolo	44.618	7.949	272
Canale	44.806	7.995	260
Castiglione Falletto	44.629	7.977	309
La Morra	44.623	7.939	314
Monforte d'Alba	44.586	7.954	471
Serralunga d'Alba	44.594	8.000	405

Al termine, per ogni località è stato creato un file di input per il modello UTOPIA su base oraria, relativo al periodo dalle ore 00:00 del 01/01/2004 alle 23:50 del 31/12/2024, per complessivi 21 anni di dati.



Fig.1 – Posizionamento sul territorio delle località analizzate (mappa del terreno estratta da @Google Earth).

Fig.1 - Position on the territory of the analyzed locations (terrain map extracted from @Google Earth).

Risultati e Discussione

Le tessiture del suolo sono state dedotte dal database SoilGrids (Poggio et al., 2021; vedi anche il sito <https://www.isric.org/explore/soilgrids>), scegliendo il punto griglia più vicino, e interpolando i valori dai sei strati di suolo disponibili in questo database (tra 0 e 2 metri di profondità) ai nove strati di suolo usati nelle simulazioni di UTOPIA (per complessivi 13 m di spessore).

In questo studio, gli unici output di UTOPIA presi in considerazione per IVINE sono stati quelli relativi a due variabili del sottosuolo: la temperatura e il contenuto idrico volumetrico del suolo, nella zona radicale dei vigneti. Le simulazioni con IVINE sono state effettuate per i seguenti vitigni (non in tutte le località): Chardonnay, Barbera e Nebbiolo.

Purtroppo, l'unica misura disponibile era un terzetto di misure del grado zuccherino in alcuni vigneti, relativamente al solo anno 2024. Per questo motivo, non sono stati riportati grafici o tabelle, ma verranno riassunti i confronti. A seguire una selezione dei principali risultati ottenuti.

Le uscite del modello UTOPIA

Dal momento che alcune uscite del modello UTOPIA costituiscono degli input per il modello IVINE, risulta interessante analizzarne gli andamenti sul periodo considerato. La Fig. 2 mostra la temperatura media annua dello strato delle radici in alcune località studiate. I valori evidenziano come, in generale, il primo e l'ultimo anno risultino anche il più freddo ed il più caldo della serie, rispettivamente, e come il rateo di riscaldamento nel periodo vari tra 3 e 4 °C (risultando quindi superiore ai circa 2,5 °C della temperatura dell'aria), risultando statisticamente significativo.

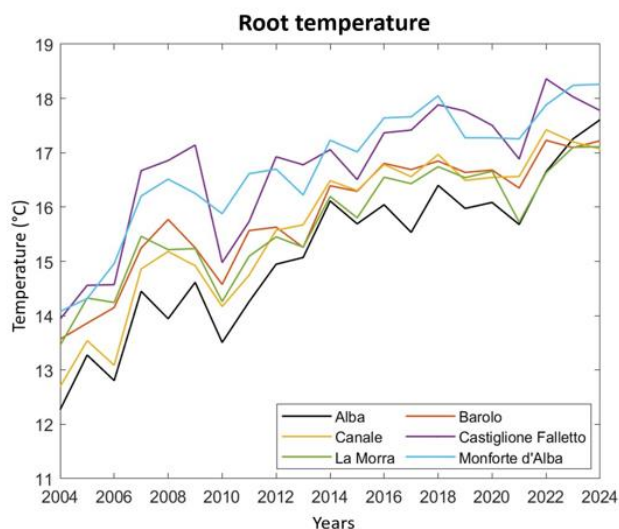


Fig. 2 – andamento delle medie annue della temperatura nello strato delle radici in alcune località studiate.

Fig. 2 – time trend of annual mean temperatures in the root layer zone in some studied locations.

È anche significativo che le località più calde risultino Castiglione Falletto (309 m a.s.l.) e Monforte d'Alba (471

m a.s.l.), mentre la più fresca risulti Alba (183 m a.s.l.), segno che, probabilmente, le caratteristiche locali e la presenza di inversioni termiche non soltanto nella stagione fredda influenzino di più l'andamento termico rispetto all'altitudine.

La Fig. 3 evidenzia invece il flusso medio annuo di evapotraspirazione (ETR), in cui la dipendenza dal bilancio idrologico si associa a quella dalla temperatura. I valori minimi di ETR sono stati registrati ovunque nel 2022 (l'anno più siccitoso del periodo), e in una buona parte delle località si è registrato un minimo secondario anche nel 2006. Gli anni con i flussi di ETR maggiori sono stati il 2014, il 2004 e il triennio 2018-2020. Questo flusso non mostra trend significativi, ma evidenzia una ciclicità irregolare di 4-5 anni, potenzialmente correlabile ai cicli della NAO (North Atlantic Oscillation). Tra le località, Monforte d'Alba mostra i valori inferiori (soprattutto nell'ultimo periodo), mentre Barolo e Canale mostrano i valori maggiori.

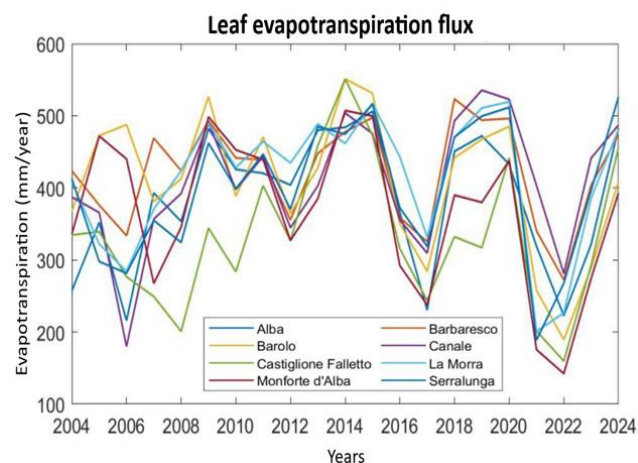


Fig. 3 – andamento delle medie annue del flusso di evapotraspirazione nelle località studiate.

Fig. 3 – time trend of annual mean values of evapotranspiration flux zone in some studied locations.

Le uscite del modello IVINE

Per quanto riguarda le *fasi fenologiche* (valori non riportati in dettaglio), la variabilità nel periodo in esame, intesa come differenza tra il giorno dell'anno più tardivo e quello più precoce, è risultata pari a circa 17 ± 3 giorni per quanto riguarda la fioritura, ampliandosi per le fasi successive fino a superare le tre settimane per la maturazione. In quasi tutte le località e per tutti i vitigni esaminati, l'anno con il maggiore ritardo è risultato il 2010, mentre l'anno col maggiore anticipo è risultato il 2022. L'esame dell'andamento delle fasi nel corso dei singoli anni mostra un'evidente correlazione con le temperature primaverili (il che non stupisce, visto che vengono calcolate sulla base di somme termiche) per quanto riguarda le prime fasi (dal germogliamento all'allegagione), e una lieve dipendenza dal bilancio idrologico (e quindi non soltanto dalla precipitazione) per le altre fasi. Il diverso andamento termico e pluviometrico delle varie annate spiega quindi gli anticipi o i ritardi evidenziati nel corso dei diversi anni.

Per quanto riguarda i parametri fisiologici, si vogliono qui sottolineare alcuni fattori caratteristici. Per quanto riguarda il *grado zuccherino degli acini*, in Fig. 4 si nota come il valore massimo di tale parametro venga raggiunto in quasi tutte le località ogni anno, ad eccezione delle località di Barbaresco e Castiglione Falletto (e in alcuni anni anche a Serralunga), dove i valori del contenuto zuccherino rimangono inferiori rispetto alle altre località.

Per quanto riguarda il confronto con le misure, limitato al Nebbiolo e all'annata 2024 (l'unica con misure in campo in alcune località), si trova una buona concordanza tra i valori previsti dal modello e quelli osservati, con discrepanze nel valore inferiori a 0,5 °Bx, a parità di giorno dell'anno.

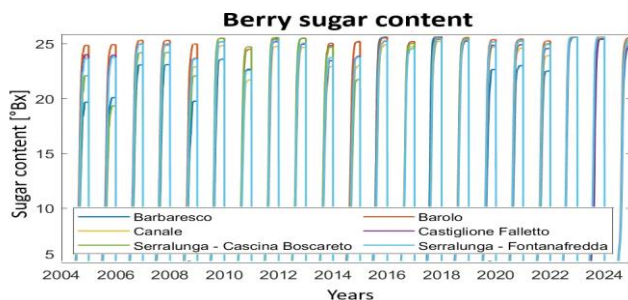


Fig. 4 – andamento dei valori del grado zuccherino degli acini per la cv. Nebbiolo in alcune località studiate.

Fig. 4 – time trend of berry sugar content values for Nebbiolo cv. in some studied locations.

Per quanto riguarda, invece, il *Leaf Area Index (LAI)*, l'analisi dei risultati mostra un andamento discontinuo di questa variabile, che riflette le tre cimature annuali prescritte in modalità standard, in assenza dei valori reali, rispettivamente nelle giornate del 30 maggio, del 19 luglio e del 8 agosto di ogni anno, per un valore tra il 20 e il 30%. Esaminando i singoli anni, si nota, nella Fig. 5, come, nel siccitoso 2022, manchi quasi del tutto la parte iniziale dello sviluppo (il che fece evitare la prima cimatura). I valori estivi maggiori si riscontrano negli anni 2009 e 2011.

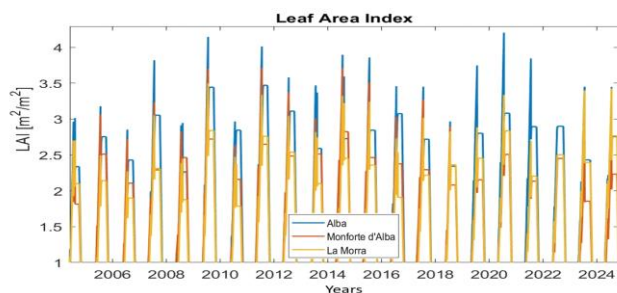


Fig. 5 – andamento dei valori del Leaf Area Index (LAI) per la cv. Barbera in alcune località studiate.

Fig. 5 – time trend of Leaf Area Index (LAI) values for Barbera cv. in some studied locations.

In generale, esaminando le tre località coltivate a Barbera, si nota come il sito più fresco (Alba) mostri i valori superiori di LAI, mentre quello più caldo (Monforte d'Alba) mostri quelli inferiori.

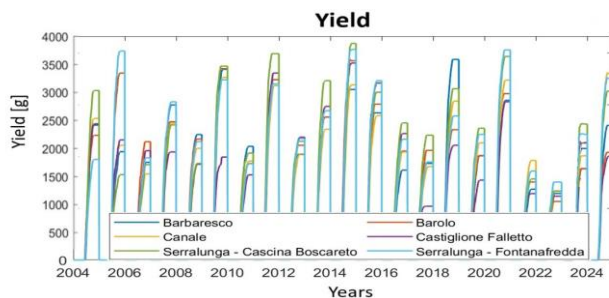


Fig. 6 – andamento dei valori del raccolto per la cv.

Nebbiolo in alcune località studiate.

Fig. 6 – time trend of yield values for Nebbiolo cv. in some studied locations.

Un altro parametro fisiologico di interesse è l'ammontare del *raccolto* (Fig. 6), espresso in grammi per pianta. Questa grandezza risulta fortemente variabile nelle varie annate del periodo, con un fattore pari a circa 4 tra il minimo di poco più di 1 kg nel 2022 ed il picco di quasi 4 kg nel 2014. In particolare, si nota come i valori minimi siano riferiti, in quasi tutti i siti, all'anno più siccitoso, ovvero il 2022, ma come risultino anche modesti i valori degli anni 2021 e 2023 (anch'essi abbastanza siccitosi), e quelli del 2010 (che invece fu un anno fresco). Gli altri massimi, oltre che nel 2014, sono stati registrati anche nel 2005, 2011 e 2020, tutti anni relativamente piovosi. Esaminando singolarmente le postazioni, si evince che in nessuna località risulti presente un trend statisticamente significativo, in quanto prevale nettamente la forte variabilità interannuale del raccolto.

Conclusioni

Sono state condotte delle simulazioni in otto località dislocate nelle regioni vitivinicole piemontesi delle Langhe e del Roero. Il modello di crescita delle viti utilizzato è stato IVINE. I dati orari al contorno richiesti dal modello sono stati raccolti da un database creato interpolando accuratamente le misure provenienti dalle stazioni limitrofe delle reti di ARPA Piemonte e del network agrometeorologico regionale, mentre i valori di temperatura e umidità dei livelli nel sottosuolo sono stati presi da simulazioni preliminari effettuate con il modello di land-surface UTOPIA.

I risultati delle simulazioni hanno mostrato alcune caratteristiche di rilievo:

- la variazione della temperatura media annua non dipende solo dall'altitudine, ma soprattutto dalle caratteristiche del sito, tanto è vero che la stazione più elevata risulta la più calda, e quella più bassa la più fredda, anche nel sottosuolo;
- tutti i valori di temperatura, riferiti all'aria, alla vegetazione e al suolo, mostrano una tendenza generale all'aumento, con trend maggiori nel sottosuolo;
- per quanto riguarda i parametri fisiologici, si nota una tendenza generale all'aumento del contenuto zuccherino degli acini, più evidente nelle località con temperature più basse; inoltre, limitatamente

al nebbiolo e all'annata 2024 (l'unica con misure in campo in alcune località), si ha una buona concordanza tra i valori previsti dal modello e quelli osservati, con discrepanze inferiori a 0,5 °Bx;

- i valori del raccolto e del LAI evidenziano una marcata variabilità interannuale, e la loro dipendenza dai valori di temperatura e bilancio idrico non risulta univocamente determinata;
- per quanto riguarda le fasi fenologiche, nel periodo studiato si nota una differenza di circa 17 ± 3 giorni per quanto riguarda la fioritura tra gli anni più precoci e quelli più tardivi, valore che cresce fino a superare le tre settimane per la maturazione.

Bibliografia

- Andreoli V.; Cassardo C.; La Iacona T.; Spanna F., 2019. Description and Preliminary Simulations with the Italian Vineyard Integrated Numerical Model for Estimating Physiological Values (IVINE). *Agronomy*, 9, 94, 21 pp.
- Cassardo C.; Andreoli V., 2019. On the Representativeness of UTOPIA Land Surface Model for Creating a Database of Surface Layer, Vegetation and Soil Variables in Piedmont Vineyards, Italy. *Appl. Sci.*, 9, 3880, 21 pp.
- Poggio L., de Sousa L. M., Batjes N. H., Heuvelink G. B. M., Kempen B., Ribeiro E., and Rossiter D.: SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty, *SOIL*, 7, 217–240, 2021.

COMPARISON OF EXTREME WEATHER INDICATORS ELABORATED FROM HETEROGENEOUS AGROMETEOROLOGICAL SOURCES

CONFRONTO DI INDICATORI DI CONDIZIONI METEOROLOGICHE ESTREME ELABORATI DA FONTI DI DATI AGROMETEOROLOGICI ETEROGENEE

Giovanni Paolo Colucci¹, Irene Salotti², Elena Filipescu¹, Daniele Trincherò¹, Paola Battilani²

¹ iXem Labs, Department of Electronics and Telecommunications (DET), Politecnico di Torino, 10129 Torino, Italy

² Department of Sustainable Crop Production, Università Cattolica del Sacro Cuore, 29122 Piacenza, Italy

Abstract

In the current study, the sensitivity of extreme weather indicators related to temperature and rainfall has been assessed in relation to different sources of agrometeorological data: the weather stations that belong to the Piedmont Regional service (RAM) and the proximity sensors deployed in the production area of Moscato d'Asti (SISAV). Indicators assessment has been conducted between 2021 and 2023 in five locations with twin stations for RAM and SISAV (<2 km distance). Results show varying sensitivity of the indicators to data sources, depending on the considered weather factor, the location, and year. For instance, the yearly number of frozen days (ID0, i.e., days without thaw) is similar for both the sources, while the yearly number of tropical nights (TR20, i.e., days with minimum temperature >20°C) varies among sensor, with about 4 to 6 days of difference between the two sources of data. Discrepancies in indicators highlight the key role of the data provider to understand climate changes and trends over time.

Keywords:

Internet of Things, wireless sensor networks, agrometeorological platforms, proximal monitoring, public agrometeorological networks

Parole chiave:

Internet of Things, reti di sensori senza fili, piattaforme agrometeorologiche, monitoraggio di prossimità, reti pubbliche di sensori agrometeorologici

Introduction

Meteorological data are fundamental to numerous purposes, including the study of climate change (CC). The knowledge on current and past weather is mandatory when trying to identify and estimate CC impacts. While simulation models help to project future climate scenarios, the monitoring of weather variables and their application to meteorological indicators allows the understanding of CC in last decades and ongoing trends.

Recently, several meteorological indicators have been proposed based on mean data on different time scale and distributions of temporal series of weather data. However, indicators based on extreme values seem to better depict the magnitude of CC and are particularly relevant also in relation to the impact of extreme events on the environment and human health.

Particularly, extreme temperature and rainfall events play a key role in agriculture due to their influence on hydro-geological aspects, availability of water resources, yield and harvest quality, as well as the occurrence of plant diseases and contamination of productions.

The study of extreme events and the application of extreme weather indicators is more difficult than studying average distributions. In fact, extreme events are often unpredictable, with a point or patchy distribution over a geographical area. It therefore becomes essential to have a complete series of weather data with a high temporal and spatial resolution.

These characteristics often depend on weather data providers, which may have networks of stations differently deployed on a territory, mounting diverse sensor types, and operating with distinctive timesteps. In this context, variability in extreme indicator values, result interpretation, and CC effect estimation may be found in relation to the choice of weather data provider.

The aim of the current work is therefore to assess the sensitivity of extreme weather indicators related to temperature and rainfall in relation to different sources of agrometeorological data. For this purpose, the production area of Moscato d'Asti has been selected as a case study, and the weather stations that belong to the Piedmont Regional service (RAM) and the SISAV network of proximity sensors provided by iXemWine were considered. Thus, indicators assessment has been conducted using weather data between 2021 and 2023 from five locations with twin stations (i.e., close stations belonging to the two networks).

Materials e Methods

Weather stations

In this paper two different agrometeorological networks have been exploited: the Piedmont agrometeorological network (RAM) and iXemWine. These two networks are different both in technology and deployment strategy.

[illegible]

Fig. 1 – Posizione delle stazioni RAM e delle stazioni SISAV nell'area di studio

Fig. 2 - PCB che include microcontrollore e radio LoRa

Tab.1 – Technical characteristics of the proximal sensors
Tab.1 – Caratteristiche tecniche dei sensori di prossimità

Sensor	Resolution	Accuracy
Sensirion SHT31	T: 0.1 °C RH: 0.1%	T: ±0.3 °C RH: ±2%
iXem Leaf Wetness	1%	±5%
Pronamic Tower Rain Gauge	1 mm	±5%

Differently from the RAM network, the weather stations have been installed within the crops, as shown in Figure 3, in locations to be as more representative as possible of the entire vineyard.

- Regarding the locations, this study has been conducted in the region of Piedmont where the Moscato grape is cultivated: a large area that includes the provinces of Asti, Alessandria and Cuneo. All these locations have different features for

129

altitude, exposure to the sun and slope inclination. Consequently, in the area climate conditions are not uniform, therefore neither is the vegetative development. To provide an idea of the size of the Moscato area, table 2 reports the vineyard surface and the number of municipalities for each province.



Fig. 3 - Weather stations were installed inside the vineyard
Fig. 3 - Stazione meteo installata all'interno del vigneto

Tab.2 - Details of the Moscato area in Piedmont

Tab. 2 - Informazioni relative all'area di coltivazione del Moscato in Piemonte

Province	Vineyard surface (ha)	Number of municipalities
Alessandria	1.540	9
Asti	4.116	28
Cuneo	4.210	15

Finally, devices have been programmed to take one measurement per sensor at 10-minute intervals, providing 144 daily updates. The transmitted data has been received by LoRaWAN gateways deployed in strategic locations from the perspective of the electromagnetic coverage, with easy accessibility for maintenance operations.

Extreme weather indicators

A total of 13 extreme weather indicators have been selected, based on their relevance and significance, according to Fioravanti et al. (2013). Eight of them are related to temperature and calculated based on minimum and maximum daily temperature (in °C). The other five indicators are related to rainfall and calculated using daily rain data (in mm). The list of selected indicators and their description is listed in Table 3. Calculation of extreme weather indicators have been performed using the R software (R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing 2023; available at <https://www.r-project.org/>). Daily data have been obtained from the hourly

weather data provided by the stations. Then, each indicator has been calculated as defined in Table 1 for five locations hosting twin weather stations by RAM and SISAV networks between 2021 and 2023. Weather stations from the two networks have been considered as twins when their distance is within 2 km. The twin stations are fairly distributed in the production area of Moscato d'Asti (Table 4). Indicators have been compared for their consistency among different years and locations and for their sensitivity to the source of weather data.

Tab.3 - List of extreme weather indicators related to temperature and rainfall, their acronym, and description. Tmin=minimum daily temperature; Tmax=maximum daily temperature; R=daily rainfall.

Tab.3 - Lista degli indicatori meteorologici estremi in relazione a temperatura e pioggia, loro acronimi e descrizione. Tmin= temperatura minima giornaliera; Tmax=temperatura massima giornaliera; R=pioggia giornaliera.

Code	Indicator	Description
FD0	Frozen days	N. of days in a year with Tmin < 0 °C
SU25	Summer days	N. of days in a year with Tmax > 25 °C
ID0	Days without thaw	N. of days in a year with Tmax < 0 °C
TR20	Tropical nights	N. of days in a year with Tmin > 20 °C
TN10p	Cool nights	% of days with Tmin < 10th percentile
TX10p	Cool days	% of days with Tmax < 10th percentile
TN90p	Warm nights	% of days with Tmin > 90th percentile
TX90p	Warm days	% of days with Tmax > 90th percentile
SDII	Daily rainfall intensity	Ratio between the total R in a year and the N. days with R ≥ 1 mm)
R10	Number of days with intense rainfall	N. of days with R ≥ 10mm in a year
R20	Number of days with very intense rainfall	N. days with R ≥ 20mm in a year
R95p	Rainfall in intense rainy days	Sum of R > 95th percentile in a year
R99p	Rainfall in very intense rainy days	Sum of R > 99th percentile in a year

Results and Discussion

Varying sensitivity of the indicators to data sources, depending on the considered weather factor, the location, and year has been analyzed. Particularly, indicators as FD0, SU25, TR20, and R10 show great differences in their values depending on the weather station network (Figure 4). For instance, the yearly number of tropical nights (TR20, i.e., days with minimum temperature >20°C) varies among sensor locations, with about 4 to 6 days of difference in the mean value between the two sources of data, but the range of variation is significantly wider for SISAV data source. High variance has been also observed for the yearly number of frozen days (FD0, i.e., days with minimum temperature <

0 °C), which shows an average of 17 more days when based on RAM data sources.

Tab.4 - List of RAM and corresponding twin SISAV weather stations selected for the calculation of extreme weather indicators between 2021 and 2023, their geographical coordinates (latitude; longitude), and altitude.

Tab. 4 - Elenco delle stazioni meteorologiche RAM e delle corrispondenti stazioni gemelle SISAV selezionate per il calcolo degli indicatori meteorologici estremi tra il 2021 e il 2023, le relative coordinate geografiche (latitudine; longitudine) e altitudine.

Twins	Weather station	Location	Altitude
1	RAM Alice Bel Colle	44°43'31.2"N 8°26'26.6"E	257 m
	proximal Sisav 3	44°43'25.2"N 8°26'08.5"E	285 m
2	RAM Bistagno	44°40'16.2"N 8°22'44.2"E	275 m
	proximal Sisav 15	44°39'44.2"N 8°23'22.1"E	211m
3	RAM Loazzolo	44°40'00.1"N 8°15'08.6"E	403 m
	proximal Sisav 11	44°40'09.0"N 8°16'03.8"E	382 m
4	RAM Canelli	44°44'14.6"N 8°15'59.6"E	281 m
	proximal Sisav 4	44°43'43.1"N 8°15'30.2"E	299 m
5	RAM Mango	44°40'41.6"N 8°08'44.8"E	468 m
	proximal Sisav 5	44°40'22.2"N 8°09'25.2"E	504 m

On the other hand, some indicators seem to be less affected by the data source. For example, the yearly number of days without thaw (ID0, i.e., days with maximum temperature < 0 °C) is similar for both the sources. Similarly, indicators related to very intense rainfall events such as R20 (i.e., days with daily rainfall ≥ 20 mm) or R99p (i.e., the sum of daily rain higher than the 99th percentile in a year) poorly varies among weather stations. For daily rainfall intensity (SDII, i.e., the ratio between precipitation amounts and rainy days), instead, a tendency towards underestimation has been observed for RAM compared to SISAV.

Trends could also be identified for some indicators in relation to the year, although different values have been obtained for the two sources of weather data. For instance, TR20 increases over the three years in all the locations, while FD0 values decreases, indicating a tendency in the increase of minimum temperature from 2021 to 2023. However, values differ depending on the weather station network. For example, at Alice Bel Colle, calculations using RAM data result in TR20 equal to 2, 10, 18 days from 2021 to 2023; however, values for the corresponding SISAV3 station are lower (i.e., TR20 was 0, 4, and 16 in 2021, 2022, and 2023, respectively). On the contrary, FD0 decreases over time in all the locations.

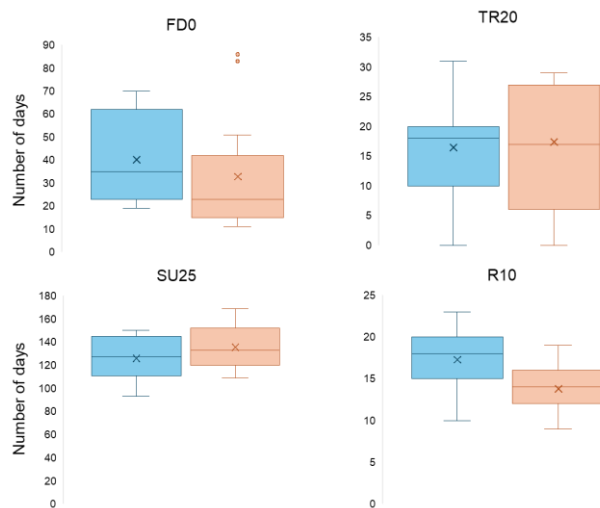


Fig.4 - Boxplot showing the variation of the following indicators: yearly number of frozen days (FD0, i.e., days with minimum temperature < 0 °C); yearly number of summer days (SU25, i.e., days with maximum temperature > 25 °C); yearly number of tropical nights (TR20, i.e., days with minimum temperature >20°C); and yearly number of days with intense rainfall (R10, i.e., days with daily rainfall ≥ 10 mm). Boxes represent values calculated based on data provided by RAM (blue) and SISAV (orange) weather stations; the line in the boxes is the median; the x is the average value; the lowest value in each box represents the 1st quartile (25th percentile); the top part of each box represents the 3rd quartile (75th percentile); whiskers extend from minimum to maximum.

Fig. 4 - Boxplot che mostrano la variazione dei seguenti indicatori: numero annuo di giorni di gelo (FD0, ovvero giorni con temperatura minima < 0 °C); numero annuo di giorni estivi (SU25, ovvero giorni con temperatura massima > 25 °C); numero annuo di notti tropicali (TR20, ovvero giorni con temperatura minima > 20 °C); e numero annuo di giorni con precipitazioni intense (R10, ovvero giorni con precipitazioni giornaliere ≥ 10 mm). I riquadri rappresentano i valori calcolati sulla base dei dati forniti dalle stazioni meteorologiche RAM (blu) e SISAV (arancione); la linea nei riquadri è la mediana; la x è il valore medio; il valore più basso in ciascun riquadro rappresenta il 1° quartile (25° percentile); la parte superiore di ciascun riquadro rappresenta il 3° quartile (75° percentile); i baffi si estendono dal minimo al massimo.

Although only three years have been considered, indicators for temperature show a tendency towards warmer weather from 2012 to 2023, with more evident trends observed for indicators related to an increase in warm extremes than those associated to a reduction of cool conditions. This agrees with broader observations on temperature trends made by Fioravanti et al. (2013) in Italy between 1961 and 1981. They have also pointed out a lower consistency in rain trends, also related to spatial variability. According to their results, only R95 e SDII indicate a slight increase for intense precipitation.

However, similar trends have not been observed in the current study, likely due to the lower number of weather stations and years considered.

It is worth noting that indicators often show different values between the two weather station networks, despite the closeness of weather stations compared. These discrepancies highlight the key role of the data provider, the technology implemented on weather stations, and deployment strategy.

Conclusions

Climate is changing quickly, leading to the need for indicators to evaluate past and current weather, especially for extreme temperature and rainfall events that strongly affect viticulture. The study of extreme weather, however, is difficult because it requires weather data series with good resolution at spatial and temporal level. A packed weather station network providing accurate and reliable data becomes fundamental to depict weather conditions and to understand weather changes and trends over time.

Acknowledgments

The authors thank the Phytosanitary Sector of Regione Piemonte, in particular Dr. Federico Spanna, for the fruitful collaboration, granting access to the data collected by the RAM network.

The work was supported by the European Union under the Italian National Recovery and Resilience Plan (NRRP) of Next-GenerationEU, partnership on the AgriTech National Research Center (NRRP–Mission 4 Component 2, Investment 1.4–D.D. 1032 17/06/2022, CN00000022). This manuscript reflects only the authors’ views and opinions; neither the European Union nor the European Commission can be considered responsible for them. Authors from Politecnico di Torino partially worked in the framework of the project “Sistemi Integrati per la Sostenibilità Ambientale del Vigneto (SISAV)” (20201144522) finanziato dal PSR 2014-2020, Regione Piemonte, Operazione 16.1.1 “2018 – FEASR PSR 2014 - 2020 - SOSTEGNO ALLA GESTIONE DEI GO E ATTUAZIONE DEI PROGETTI (16.1.1, AZIONE 2) -AGRICOLTURA E AREE RURALI”

References

- Filipescu, E., Colucci, G. P., and Trincherro, D. 2024. Design and Implementation of a Capacitive Leaf Wetness Sensor Based on Capacitance-to-Digital Conversion. IEEE Transactions on AgriFood Electronics: vol. 2, no. 2, pp. 244-251.
- Fioravanti G., Piervitali E., Desiato F., Perconti W., and Frascchetti P., 2013. Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia. ISPRA. Stato dell'Ambiente 37/2013.
- “Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia” - Available Online: www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/stato-dellambiente/variazioni-e-tendenze-degli-estremi-di-temperatura-e-precipitazione-in-italia (Accessed on: 05/05/2025)

WIRELESS METEOROLOGICAL SENSORS IN THE SULCIS TERRITORY TO RUN PREDICTIVE MODELS OF VINE DISEASES

SENSORI METEOROLOGICI WIRELESS NEL TERRITORIO DEL SULCIS PER ALIMENTARE MODELLI PER LA PREVISIONE DELLE MALATTIE DELLA VITE

Irene Salotti¹, Giovanni Paolo Colucci², Elena Filipescu², Paola Battilani^{1*}, Daniele Trincherò²

¹ Department of Sustainable Crop Production, Università Cattolica del Sacro Cuore, 29122 Piacenza, Italy

² iXem Labs, Department of Electronics and Telecommunications (DET), Politecnico di Torino, 10129 Torino, Italy

* paola.battilani@unicatt.it

Abstract

In the last forty years, several plant disease models have been developed for the main fungal and oomycete diseases of grapevine. The current study aims to structure a platform for wireless collection of meteorological data to feed the joint use of predictive models. To this purpose, the territory of Sulcis, in South-West Sardinia, has been selected, where 14 agrometeorological stations have been operational since 2018 in locations exposed to various weather conditions, inhomogeneous altitudes and different soil textures. Based on literature search, models with different characteristics, available for four grape diseases (downy and powdery mildews, grey mould, and black rot) have been selected and translated in R to be connected to the meteorological data source. Models' evaluation has been performed highlighting differences and similarities in data input and output. In perspective, model output consistency will be evaluated with data collected by Cantina Santadi, a relevant grape producer in the territory to define model performances and suitability to support farmers and technicians in crop protection decision making.

Keywords

Plant disease modelling, crop protection, agrometeorological platforms, Internet of Things, LoRaWAN

Parole chiave

Modelli previsionali, difesa integrata, piattaforme agrometeorologiche, Internet of Things, LoRAWAN

Introduction

The sustainable management of grape diseases caused by oomycetes and fungi represents a major challenge of modern viticulture. The use of plant protection products, in fact, impacts on farms' economic and environmental sustainability.

On average, 12 to 15 fungicide applications are performed every year, mainly for the control of downy mildew and powdery mildew, caused by *Plasmopara viticola* and *Erysiphe necator*, respectively. Since their first occurrence in the XIX century, the control of these pathogens has strongly relied on chemical applications during the entire growing season to protect both leaves and bunches. Management of mildews is particularly difficult due to their polycyclic nature, especially when primary infections lack timely control. Furthermore, occasional or emerging diseases such as grey mould (caused by *Botrytis cinerea*) or black-rot (caused by *Phyllosticta ampellicida*, syn. *Guignardia bidwellii*) may develop into severe epidemics, leading to quantity and quality yield losses.

To uptake rational disease control and reduce negative impacts of chemicals on human health and the environment, mathematical models have been developed starting from the 1980s. Their adoption, however, is still limited due to social and economic barriers, as well as technological constraints for accessing reliable weather data and forecasts. Nevertheless, the use of models for monitoring plant diseases is a pillar of Integrated Pest Management (Directive

EC/1128/2009) and recommended in organic agriculture, where the list of available products is further limited (Rawat et al. 2021). The use of plant disease models to address tactical decisions and reduce the application of chemicals has been reported in several research studies. For instance, Rossi et al. (2014) reported that the consultation of models integrated in a decision support system reduced the amount of copper applied for disease control by 37% in 21 grape-growing, organic farms in Italy.

Therefore, plant disease models have the potential to boost the transition of viticulture towards a sustainable, low-input regime. However, the awareness in the use of models should increase to guarantee a reliable support for tactical decision-making in crop protection. The aim of the current work is to develop a platform for wireless collection of meteorological data, to feed the joint use of predictive models with different characteristics, available for four grape diseases of concern. Models' evaluation has been performed highlighting differences and similarities in data input and output. To this purpose, a territory in South-West Sardinia has been selected, because of the presence of a well-structured and widely deployed proximal agrometeorological network, with 14 stations operating since 2018 in locations exposed to various pedoclimatic features and inhomogeneous altitudes and distance from the sea.

The case of study

Tab.1 - Vineyards location

Vineyard	Latitude	Longitude	Municipality
Is Marroccus	39.108136	8.712621	Santadi
Crabi	39.074941	8.727271	Santadi
Barrua Carignano	39.070076	8.697767	Santadi
Perdaxius	39.142353	8.622524	Perdaxius
Tratalias Triangolo	39.102805	8.588734	Tratalias
Fronte Stagno	38.983613	8.592139	Sant'Anna Arresi
Su Portu de Su Trigu	38.987353	8.577439	Sant'Anna Arresi
Is Cuccus	39.038523	8.610768	Masainas
Paniesu	39.023279	8.620082	Sant'Anna Arresi
Agto Villarios	39.059625	8.602707	Giba
Canigonis	39.031427	8.593404	Masainas
Villaperuccio	39.118124	8.676418	Villaperuccio
Is Muras	39.063481	8.639228	Giba
Bidacioni	39.1546394	8.6587635	Narcao

The iXemWine platform has been exploited to retrieve the required agrometeorological data for testing the different selected models. The platform has been developed by the iXemLabs at Politecnico di Torino. Regarding the transmission technology, a Low Power-Wide Area Network (LP-WAN) system has been adopted, which uses LoRa radios in the Physical Layer and the LoRaWAN protocol in the MAC Sublayer. As Network Servers, the ones available on the open platform released by The Things Network (TTN) have been selected. The iXemWine application server has been used to gather, memorize, visualize and share the measured data.

collecting and transmitting data from the sensors, using a Murata module (type 1SJ) that integrates a microcontroller from the STM32L0 family (by STMicroelectronics) and the SX1262 radio chip (by Semtech) into a single component, powered by 2 AA alkaline batteries in series. This choice has allowed for a miniaturized and optimized device suitable for field installations. A boost converter has been inserted for compatibility with both 3.3V sensors and 5V sensors. An external dipole antenna has been connected through an RF pigtail to the PCB.

- Air temperature (T) and relative humidity (RH), air sensor (Sensirion SHT31), protected by a Stevenson shelter in plastic;
- Rain gauge (Pronamic Tower Rain Gauge 1 mm);
- Double-sided capacitive electronic leaf wetness sensor, specifically designed for this project to be low power and low cost (Filipescu *et al.*, 2024), exploiting a capacitance-to-digital converter (FDC2112);
- Soil temperature and moisture sensor (Delta Ohm HD3910.1.A.5)
- Anemometer (Navis WSS100/REED)

All the weather stations have been installed directly inside the vineyards, as shown in Figure 3. The devices have been mounted in the selected field to be as representative as possible of the entire vineyard. Finally, devices have been programmed to take one measurement per sensor at 10-minute intervals, providing 144 daily updates. The transmitted data have been received by LoRaWAN gateways installed in places that have been selected considering the territory characteristics, such as the area dedicated to crops, the altimetric data and exposure characteristic. All locations are strategic from the perspective of electromagnetic propagation but also remain easily accessible for maintenance operations.

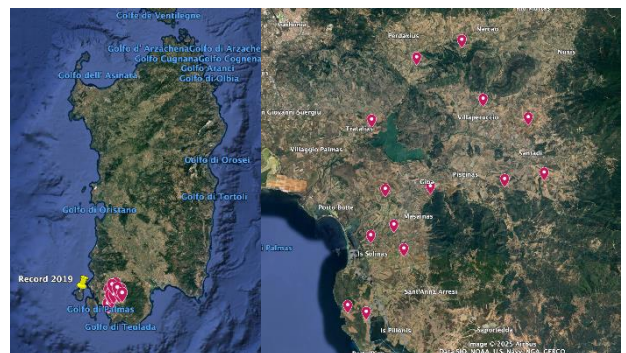


Fig.1- Ubicazione dell'area oggetto di studio in Sud Sardegna (sinistra); mappa dei sensori con le posizioni dei vigneti interessati dallo studio (destra)

Tab. 2 - Sensors detail as reported in each datasheet

Tab.2 - Caratteristiche dei sensori utilizzati

Sensor	Resolution	Accuracy
Sensirion SHT31	temperature: 0.1 °C RH: 0.1%	temperature: ± 0.3 °C RH: $\pm 2\%$
Leaf Wetness	1%	$\pm 5\%$
Pronamic Tower Rain Gauge	1 mm	$\pm 5\%$
Navis WSS100/REED	1 m/s	$\pm 2.5\%$
Delta Ohm HD3910.1.A.5	temperature: 1 °C moisture: 1%	temperature: ± 0.5 °C moisture: $\pm 3\%$



Fig. 3 - Weather stations installed inside the vineyards
Fig.3 - Stazione meteo installata all'interno del vigneto

Plant disease models

Major fungal and oomycete diseases of grapevine have been considered, including well-established as downy mildew and powdery mildew, as well as occasional and emerging diseases such as grey mould and black-rot. For each disease, a systematic literature search focused on the identification of available models has been carried out in Scopus and Web of Science databases. Keywords and search queries have been selected and developed to retrieve predictive models focused on the following criteria: (i) primary infections of downy mildew at the beginning of the season, (ii) ascospore release

and primary (ascosporic) infections of powdery mildew at the beginning of the season, (iii) grey mould infections during the season, and (iv) black-rot infections during the season.

Selected models have been translated in R to be connected to meteorological data for model running. Models run on hourly or daily timestep (depending on their requirements) and they provide outputs on a daily basis. Grape growth stage, needed for model running, has been estimated using the IPHEN model (Mariani et al., 2013) fed by weather data collected by the abovementioned network.

Results and Discussion

For each disease, two to four models have been selected among those available in literature (Tab. 3); the choice has been based on their widespread use in major grape-producing regions worldwide.

Concerning the prediction of downy mildew primary infections, models by Orlandini et al. (1993) and Rossi et al. (2008) have been selected. They both provide predictions for primary infection events, with the latter also simulates the dynamic of primary inoculum sources (oospores).

Four models have been selected to predict ascospore release and ascosporic infections of powdery mildew, i.e., the University of California Davis risk index (Gubler et al., 1999) and models by Gadoury and Pearson (1990), Moyer et al. (2014), and Caffi et al. (2011). These models show different degrees of complexity, from simple rules to a mechanistic framework based on *E. necator* life cycle.

Selected models for grey mould include the empirical approach proposed by Broome et al. (1995), which rely on a quadratic equation for infection risk, and two mechanistic models that consider *B. cinerea* life cycle entirely (González-Domínguez et al., 2015) or partially (González-Fernández et al., 2020).

Only two models are available in literature for black-rot, which were therefore selected (Molitor et al., 2016; Rossi et al., 2015). Both have been developed with a mechanistic approach and incorporated key elements in the development of black-rot epidemics as pathogen life cycle and grape susceptibility.

Overall, selected models depict a summary of the different approaches used in model development for grape diseases, as well as different output types, from binary to quantitative, dynamic outputs. This variability in model characteristics allows their comparison under several points of view, mainly differences and similarities in data input and output. In fact, the number of inputs depends on the complexity of the model, with empiric models generally requiring fewer inputs. All selected models require air temperature among inputs, while rainfall, relative humidity, and duration of wetness are differently considered, depending on the approach and the pathogen of interest. It is worth noting that the grape growth stage is considered only in mechanistic models, which embrace a higher level of complexity in the elements of the disease triangle, i.e., pathogen, environment, and host plant.

Tab.3 - Selected models, their developmental approach, working timestep, required inputs, and output type.

Tab. 3 - Modelli selezionati, approccio utilizzato per il loro sviluppo, input richiesti, e tipo di output. Gli acronimi utilizzati per gli input

Name and Reference	Approach	Timestep	Input	Output
Downy mildew (<i>Plasmopara viticola</i>)				
PLASMO (Orlandini et al. 1993)	Mechanistic	Hour	T, R, RH, WD, GS	Binary
DM-UCSC (Rossi et al. 2008)	Mechanistic	Hour	T, R, RH, WD, GS	Binary/ Numeric
Powdery mildew (<i>Erysiphe necator</i>)				
University of California Davis risk index (Gubler et al. 1999)	Empirical	Hour	T, WD	Categoric
Gadoury-Pearson (Gadoury and Pearson 1990)	Empirical	Day	T, R	Binary
Moyer (Moyer et al. 2014)	Empirical	Day	T, R	Binary/ Numeric
PM-UCSC (Caffi et al. 2011)	Mechanistic	Hour	T, R, WD	Numeric
Grey mould (<i>Botrytis cinerea</i>)				
Broome (Broome et al. 1995)	Empirical	Hour	T, WD	Categoric
González-Fernández (González-Fernández et al. 2020)	Mechanistic	Hour	T, RH, WD, GS	Numeric
BBR-UCSC (González-Domínguez et al. 2015)	Mechanistic	Hour/Day	T, R, RH, WD, GS	Numeric
Back rot (<i>Phyllosticta ampellicida</i>)				
VitiMeteo (Molitor et al. 2016)	Mechanistic	Hour	T, WD, GS	Numeric
BR-UCSC (Rossi et al. 2015)	Mechanistic	Hour	T, R, WD, GS	Numeric

T=temperature (in °C), R= rainfall (in mm), RH= relative humidity (in %), WD = wetness duration (in hours), and GS = grapevine growth stage.

T=temperatura (in °C), R= pioggia (in mm), RH= umidità relativa (in %), WD = durata della bagnatura fogliare (in ore), e GS = fase fenologica della vite.

All selected models work on a daily or hourly basis, to consider a timeframe suitable for biological processes in the development of epidemics. Nevertheless, the hourly time step has been selected to better consider the fluctuations of weather variables during the day, especially when the model included the duration of wetness. In fact, such a variable is often a limiting factor for the development of infections and its correct implementation ensures a higher accuracy in model predictions. In some cases, such as the model for grey mould by González-Domínguez et al. (2015), the model works at two different timesteps (hourly or daily), depending on the considered biological process.

Considering model outputs, empiric models based on rules or simple equations provide results on a binary basis (i.e., yes/no risk of infection) or categorical (i.e., low to high risk). On the other hand, mechanistic or more complex empirical models provide numeric outputs (i.e., scalable values that represent the magnitude of infection occurrence). These outputs provide a more nuanced representation of the reality and may increase the awareness of the user in relation to disease occurrence.

The integration of different models would therefore enable an easier consultation of model output, while comparing their characteristics and, in the future, their performances with real disease occurrence in the field.

Conclusions

Models under comparison are different for the developing approach (empirical vs. mechanistic), the degree of complexity they embed, the number and types of inputs required for their functioning, computational timestep (hourly vs. daily), and produced outputs. Nevertheless, the consultation of several predictive models for main grape diseases, integrated with a well-structured network of weather stations, may cover a key role in the transition towards sustainable viticulture.

Acknowledgments

The authors thank Cantina Santadi sca, in particular Dr. Gianni Poeta, for the fruitful collaboration, granting access to the vineyards and allowing sensors data collection.

This work was supported by the European Union under the Italian National Recovery and Resilience Plan (NRRP) of Next-GenerationEU, partnership on the AgriTech National Research Center (NRRP–Mission 4 Component 2, Investment 1.4–D.D. 1032 17/06/2022, CN00000022). This manuscript reflects only the authors' views and opinions; neither the European Union nor the European Commission can be considered responsible for them.

References

- Broome J. C., English J. T., Marois J. J., Latorre B. A., Aviles J. C., 1995. Development of an infection model for *Botrytis* bunch rot of grapes based on wetness duration and temperature. *Phytopathology*, 85(1), 97-102.
- Caffi T., Rossi V., Legler S. E., Bugiani R., 2011. A mechanistic model simulating ascospore infections by *Erysiphe necator*, the powdery mildew fungus of grapevine. *Plant Pathology*, 60(3), 522-531
- González-Domínguez E., Caffi T., Ciliberti N., Rossi V., 2015. A mechanistic model of *Botrytis cinerea* on grapevines that includes weather, vine growth stage, and the main infection pathways. *PloS one*, 10(10), e0140444
- González-Fernández E., Piña-Rey A., Fernández-González M., Aira M. J., Rodríguez-Rajo F. J., 2020. Identification and evaluation of the main risk periods of *Botrytis cinerea* infection on grapevine based on phenology, weather conditions and airborne conidia. *The Journal of Agricultural Science*, 158(1-2), 88-98
- Gadoury D. M., Pearson R. C., 1990. Ascocarp dehiscence and ascospore discharge in *Uncinula necator*. *Phytopathology*, 80(4), 393-401
- Gubler W. D., Rademacher M. R., Vasquez S. J., Thomas C. S., 1999. Control of powdery mildew using the UC Davis powdery mildew risk index. *APSnet Feature*.
- Mariani L., Alilla R., Cola G., Monte G. D., Epifani C., Puppi G., Osvaldo F., 2013. IPHEN—a real-time network for phenological monitoring and modelling in Italy. *International journal of biometeorology*, 57, 881-893.
- Molitor D., Augenstein B., Mugnai L., Rinaldi P. A., Sofia, J., Hed B., Beyer M. (2016). Composition and evaluation of a novel web-based decision support system for grape black rot control. *European Journal of Plant Pathology*, 144, 785-798
- Moyer M. M., Gadoury D. M., Wilcox, W. F., Seem R. C., 2014. Release of *Erysiphe necator* ascospores and impact of early season disease pressure on *Vitis vinifera* fruit infection. *American Journal of Enology and Viticulture*, 65(3), 315-324
- Orlandini S., Gozzini B., Rosa M., Egger E., Storchi P., Maracchi G., Miglietta F., 1993. PLASMO: a simulation model for control of *Plasmopara viticola* on grapevine. *EPP0 Bulletin*, 23(4), 619-626
- Rossi V., Onesti G., Legler S. E., Caffi T. 2015. Use of systems analysis to develop plant disease models based on literature data: grape black-rot as a case-study. *European Journal of Plant Pathology*, 141, 427-444.
- Rossi V., Caffi T., Giosuè S., Bugiani R., 2008. A mechanistic model simulating primary infections of downy mildew in grapevine. *Ecological modelling*, 212(3-4), 480-491

CLIMATE CHANGE AND WILD POLLINATORS: CAN THEY COEXIST?

CAMBIAMENTI CLIMATICI E IMPOLLINATORI SELVATICI: UNA POSSIBILE COESISTENZA?

Marina Baldi^{1*}, Dino Biancolini¹

¹ Istituto per la BioEconomia, CNR-IBE

* marina.baldi@ibe.cnr.it

Abstract

Among wild pollinators, diurnal butterflies are important in natural ecosystems and contribute significantly to agricultural productivity. Worryingly, a growing body of literature suggests that CC (CC) may result in the extinction and decline of many butterfly species. Understanding which species and areas are most vulnerable to CC is essential for planning conservation and mitigation efforts. In this work we present the main results obtained during LIFE project BEEadapt (LIFE21-CCA-IT-LIFE BEEadapt/101074591) about the effects of CC on the distribution of wild pollinators in four areas in Central Italy, including protected areas, natural and agro-ecosystems. These results represent the basis necessary to support climate adaptation capacities of wild pollinators through the implementation of study actions in specific study areas in the Country, combined with the definition of governance strategies and the involvement of key actors at different spatial levels.

Parole chiave

Cambiamenti climatici, impollinatori selvatici, eventi estremi, resilienza

Keywords

Climate change, wild pollinators, extreme events, resilience

Introduction

The climate change (CC) we observe is largely driven by human activities (IPCC, 2021) and poses a serious threat to global biodiversity (IPCC, 2022), which is suffering from range contractions, fragmentation and habitat shifts (Cowie et al., 2022; Pecl et al., 2017). From the late nineteenth century to today, these rapid changes contrast sharply with the slow environmental shifts of the past (Pecl et al., 2017; Cowie et al., 2022). The Mediterranean, home to many locally adapted species, is especially vulnerable (Di Nuzzo et al., 2021; Diaz et al., 2003); their future climatic suitability could change drastically, while their ability to track or adapt to new conditions remains uncertain (Elsen & Tingley, 2015).

Diurnal butterflies, crucial pollinators for many ecosystems and numerous global crops, are particularly threatened by CC (Hill et al., 2021). Populations have declined sharply in recent years, with CC as the primary driver, raising concerns about these species and the services they provide (Nath et al., 2023). Effective conservation must be proactive and rest on reliable estimates of climate impacts (Arneth et al., 2020; Guisan et al., 2017).

Species distribution models (SDMs) have become essential for projecting climate-change effects on biodiversity. They use statistical algorithms to link species' occurrences with their climatic requirements (Guisan et al., 2017). By modelling species' climate niche, SDMs project present and future suitability under various scenarios, producing reliable estimations of distributional shifts (Santini et al., 2021). To build SDMs, occurrence data come from expert fieldwork (Guisan et al., 2017) and online repositories like GBIF, which harmonize records from universities,

museums and citizen-science platforms. After careful validation, these data underpin SDMs (Johnston et al., 2022). However, they often carry sampling bias: records are denser where effort is greater, especially in protected areas, which receive more monitoring than unprotected lands (Barber et al., 2022; Beck et al., 2014).

Protected areas are vital for conserving biodiversity, buffering species against habitat loss and degradation, even as CC intensifies these threats (Hole et al., 2009). Yet static boundaries may become ineffective if species' ranges shift to more favorable climates (Araujo et al., 2011). Thus, sustainable practices must extend beyond reserves (Dicks et al., 2016): species confined to isolated refuges amid hostile landscapes face inevitable decline (Carroll et al., 2004). Effective planning should encompass diverse ecosystems, management regimes, topographies, microclimates and environments to secure "climate refuges," where favorable conditions persist (Ackerly et al., 2010; Hole et al., 2009).

These principles guided selection of four study areas in the LIFE "BEEadapt" project, which examines and mitigates climate impacts on pollinators (<https://www.lifebeeadapt.eu/en/>). The sites span urban to natural settings, protected and unprotected lands, and mountain, hill and coastal plain landscapes. Central Italy's rich biodiversity faces escalating climate and extreme-event pressures, threatening pollinators and pollination services. Using bias-corrected SDMs built from online-database records, we estimated the 2050 impacts on 130 diurnal butterfly species under two contrasting scenarios: one emphasizing sustainability, the other continued fossil-fuel development.

Materials and Methods

Pilot areas

The BEEadapt project focuses on four Central-Italy regions (Fig.1): the Appennino Tosco-Emiliano National Park (PNATE), the Torricchio Natural Reserve (TNR), the Roma Natura Authority (RNPA) and the Pontine Plain including Aprilia Municipality (PP). PNATE and TNR represent, respectively, national and regional protected areas; RNPA combines natural reserves with peri-urban zones; PP spans both urban and rural landscapes. By encompassing different protection levels, degrees of urbanization and agricultural land types, these sites enable the team to evaluate how land use and conservation status shape pollinator communities and guide climate-adaptation measures.

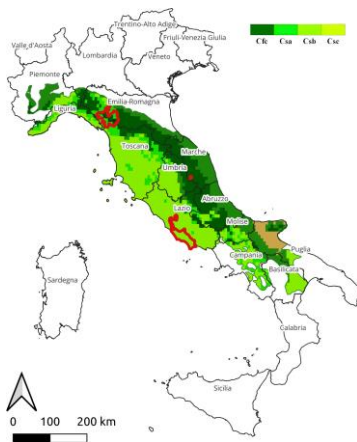


Fig.1 - The four pilot areas in the BEEadapt Project
Fig.1 - Le aree pilota del Progetto BEEadapt

Species distribution

Data on the species occurrences in the four study areas have been obtained from the online platform Global Biodiversity Information Facility (GBIF) in two steps: 1) creation of a checklist using a polygon corresponding to the four areas plus a 5 km buffer and 2) downloading the available occurrences for the species thus identified within a background area composed by two ecoregions: “Mediterranean forests, woodlands, and scrub” and “Temperate broadleaf and mixed forests” (Dinerstein et al., 2017). In total, 138 butterflies were identified (www.gbif.org/occurrence/download/0060342-231002084531237)

Climate information

Climate data for current and future conditions from publicly available databases have been used. Historical records were extracted from the Copernicus Data Store, ISPRA-SCIA and CMCC DDS, providing a general overview of present-day climate in our study areas. WorldClim 2.1 (Fick & Hijmans, 2017), at 30" (~1 km²) resolution, then supplied 19 bioclimatic variables commonly used in SDMs. Because butterflies are ectotherms whose physiology, and the vegetation they depend on, is directly influenced by

climate, we focused on four variables that capture extremes: temperature seasonality (Bio4), maximum temperature of the warmest month (Bio5), precipitation of the driest month (Bio14) and precipitation seasonality (Bio15). We checked for multicollinearity via variance-inflation analysis using the `vstest` function of the R package `usdm` (Naimi, 2023).

For projections to 2050 (2041–2060), we selected two CMIP6 scenarios (Eyring et al., 2016) from WorldClim (Fick et al. 2017) under the Shared Socioeconomic Pathways: SSP1-2.6 (“sustainable development”) and SSP5-8.5 (“fossil fuel-based development”) (O’Neill et al., 2017). To capture model uncertainty, we used three GCMs, EC-Earth3-Veg, CNRM-CM6-1 and IPSL-CM6A-LR (Thuiller et al., 2019) and computed their ensemble with the `calc` function in R’s raster package (Hijmans et al., 2022) to project our SDMs into future climates.

Species distribution model

We developed SDM using the R package `biomod2` version 3.4.1 (Thuiller et al., 2023) and the Maxent algorithm (Phillips et al., 2023), which is among the best available algorithms for modeling species distribution (Valavi et al., 2022). Maxent contrasts presence records with “background points” (PB), which we sampled following the species’ presence–density via a 2D kernel-density surface to correct sampling bias. For each species, we drew twice as many PB as presences and generated three PB sets. Presence and PB data were split 70% for calibration and 30% for validation. We ran 5-fold cross-validation on each PB set (25 replicates/species), retaining only those with AUC > 0.6 for final models. We also calculated the Boyce Index (–1 to +1) using `biomod2` and `Ecospat` (Di Cola et al., 2017) to assess model reliability under presence-only data. Continuous raster outputs (0–1000) were binarized (0/1) by applying the maximum sensitivity + specificity threshold (R package `PresenceAbsence`), ensuring optimal discrimination of suitable vs. unsuitable climates. We quantified per-species climate-suitability change by subtracting the count of suitable grid cells today from those under each future scenario. Binarized projections were summed to produce species-richness maps for present and future, then differenced (future – present). All spatial analyses used R’s raster package; plots were made with `ggplot2` (Wickham et al., 2024), and maps with `rasterVis` (Lamigueiro et al., 2023).

Results and discussion

The historical climate analysis over the period 1979–2023 (base period 1991–2020) show a positive trend for the temperature anomalies since year 2000 in central Italy of $+0.41 \pm 0.05$ °C/decade, with some differences between the different study areas, as reported in Fig. 2

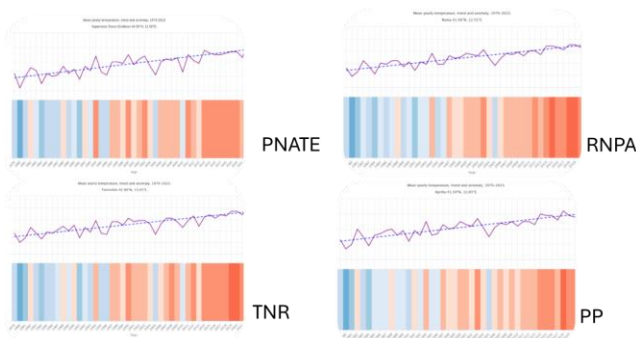


Fig.2 - 1979-2023 Temperature trend (Base 1991-2020) in the pilot areas.

Fig.2 - 1979-2023 Andamento delle anomalie di temperatura nelle aree pilota (Periodo di riferimento 1991-2020)

Moreover, all the study areas show, in the long period, similar values of maximum temperature extremes all reached in the same years, while the extreme minimum temperatures occurred in 1980, probably due to an important advection of cold air from NE (Table 1).

Tab.1 – Minimum and maximum temperature anomalies in the pilot areas (year of extreme in bracket)

Tab.1 – Minima e massima anomalia di temperatura in ciascuna area pilota (anni degli estremi in parentesi)

Temperature - Anomaly 1979-2023 Base period (1980-2010)		
Pilot area	Min anomaly	Max anomaly
Appennino Tosco-Emiliano National Park	-1.4°C (1980)	+1.8°C (2022, 2023)
State Natural Reserve "Montagna di Torricchio"	-1.3°C (1980)	+2.0°C (2022)
Pontine Plain and Aprilia Municipality	-1.3°C (1980)	+1.7°C (2022)
Roma Natura Authority	-1.4°C (1980)	+2.0°C (2022)

Analysis of summer days ($T > 25^{\circ}\text{C}$), very hot days ($T > 35^{\circ}\text{C}$), the warm-spell duration index and TX90p (daily $T_{\text{max}} > 90\text{th}$ percentile) for central Italy over 1961–2023 (base period 1991–2020) reveals consistent upward trends. Annual cumulative precipitation shows negative anomalies, peaking at -22% in 2022, while severe and extreme droughts have become more frequent (though unevenly distributed), and flash floods (e.g. Emilia-Romagna, May 2023) have grown both more common and disastrous.

All SDMs performed strongly (median AUC = 0.699 ± 0.163 ; Boyce = 0.944 ± 0.122), likely reflecting the abundance and quality of butterfly occurrence data. Of the selected projectors, BIO5 (temperature of the hottest month) proved most important, an expected result, since this period challenges heat tolerance in butterflies and their host plants. Elevated temperatures then can push species beyond their thermal limits, leading to local extinctions during heat waves.

Climate suitability

Climate suitability for butterflies, measured as the number of suitable cells, followed a clear pattern across the four

study areas and both scenarios. Under both SSP1-2.6 and SSP5-8.5, most species lost suitable cells, with serious declines in SSP5-8.5 (Fig. 3). This holds in all regions, though orography drives local differences: in the Pontine Plain and Roma Natura peri-urban sites, many species actually gained suitability, especially in hilly zones, whereas in the mountainous PNATE and TNR, only a minority did (Fig. 3).

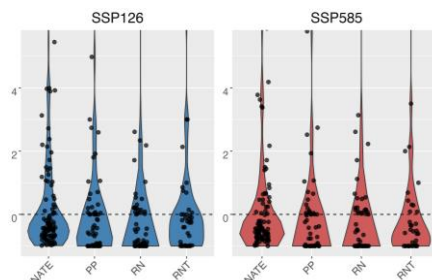


Fig.3 - Proportional change in climatic suitability for butterflies in the two scenarios.

Fig.3 - Variazione percentuale della idoneità climatica per le farfalle per due scenari climatici

Species richness

With regard to the richness of species and its spatial patterns, the differences between plains, hills and mountains are even more evident (Fig. 4-6). A clear pattern of species loss can be identified in coastal areas, followed by an increase in specific richness in the more inland and hilly lowlands, which is replaced by a decrease in diversity in mountainous areas.

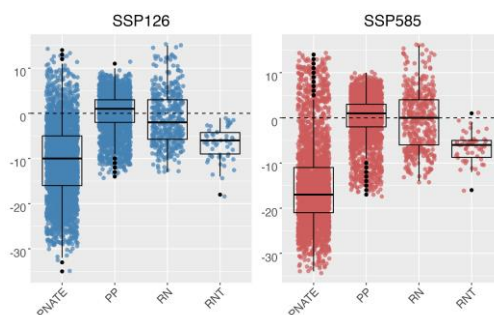


Fig.4 - Variation in species richness per cell for butterflies in the two scenarios.

Fig.4 - Variazione nella ricchezza delle specie per le farfalle per due scenari climatici

This pattern can be explained by a shift in the climatic suitability of lowland species towards the hills and hill species towards the mountains, while mountain species unfortunately no longer find their suitable climate because there are no areas of higher elevation in which they could take refuge. This is evident considering the projected response of butterflies to CC in the PNATE and the RNMT, where the median of the species-difference between scenarios and present is negative. On the other hand, a more varied response is noted for PP and RN, where a considerable portion of cells that lose species, oriented

towards the coast, is associated with a portion that gains species, oriented towards the interior (Fig. 4-6).

Any change in species numbers, whether a decline or increase, requires movements to track suitable habitat, which may not always be possible. CC will likely alter butterfly communities, forcing interactions among species that formerly did not coexist, with unpredictable ecological consequences. In cells with net species loss, reduced richness can diminish ecosystem resistance and resilience, impairing function and pollination services.

Areas projected to suffer severe species declines under CC should therefore become conservation priorities for the BEEadapt project. Mitigation must both prevent local extinctions and facilitate dispersal toward regions projected to gain or retain climatic suitability.

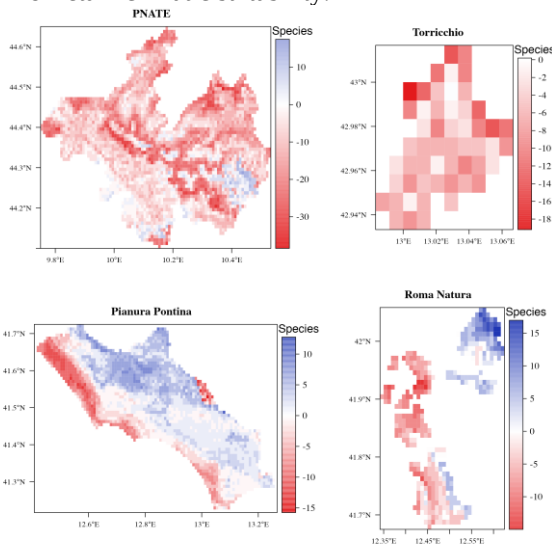


Fig.5 - Change in butterfly richness in the pilot areas under the SSP1-2.6 scenario.

Fig.5 - Variazione della ricchezza di farfalle nelle aree pilota nello scenario SSP1-2.6.

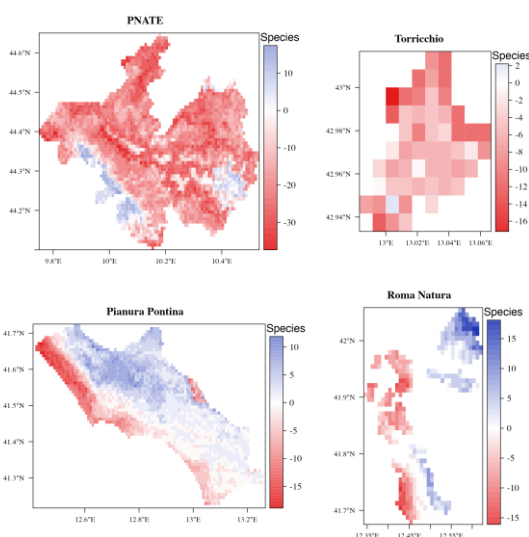


Fig.6 - Change in butterfly richness in the pilot areas under the SSP5-8.5 scenario.

Fig.6 - Variazione della ricchezza di farfalle nelle aree pilota nello scenario SSP5-8.5.

Conclusion

Our analysis confirms a pronounced warming trend in Central Italy since 2000 ($+0.41 \pm 0.05$ °C per decade; Fig. 2), coupled with rising frequency of heat extremes, droughts and flash floods. Despite a shared baseline of extreme temperature years, peak warming has intensified in recent seasons (Table 1), while minimum extremes date back to 1980.

Species distribution models for 130 butterflies performed robustly, with the hottest-month temperature emerging as the key driver, underscoring the vulnerability of both butterflies and their host-plants during thermal peaks. Under both SSP1-2.6 and SSP5-8.5, most species lose climatically suitable conditions, particularly under high-emissions SSP5-8.5 (Fig. 3). Lowland and hilly areas (PP, RNPA) show mixed gains and losses, coastal declines offset by inland increases, whereas mountainous PNATE and TNR see predominantly negative shifts in suitability.

These upslope shifts concentrate richness in hills at the expense of mountain specialists, generating novel community assemblages and raising concerns over dispersal limitations. Cells experiencing net species losses risk reduced ecosystem resilience and compromised pollination services. Accordingly, regions project to suffer the steepest declines should be prioritized for and facilitating dispersal to future climate refugia.

Acknowledgement

Authors acknowledge the support of LIFE21-CCA-IT-LIFE BEEadapt/101074591.

References

- Araujo, M. B., Alagador, D., Cabeza, M., Nogués-Bravo, D., & Thuiller, W. 2011. Climate change threatens European conservation areas. *Ecol Let*, 14(5), 484–492.
- Ackerly, D. D., Loarie, S. R., Cornwell, W. K., Weiss, S. B., Hamilton, H., Branciforte, R., & Kraft, N. J. B. 2010. The geography of climate change: Implications for conservation biogeography. *Diversity and Distributions*, 16(3), 476–487.
- Arneth, A., Shin, Y. J., Leadley, P., Rondinini, C., Bukvareva, E., Kolb, M., Midgley, G. F., Oberdorff, T., Palomo, I., & Saito, O. 2020. Post-2020 biodiversity targets need to embrace climate change. *Proceedings of the NAS of the USA*, 117(49), 30882–30891.
- Barber, R. A., Ball, S. G., Morris, R. K. A., & Gilbert, F. 2022. Target-group backgrounds prove effective at correcting sampling bias in Maxent models. *Diversity and Distributions*, 28(1), 128–141.
- Beck, J., Böller, M., Erhardt, A., & Schwanghart, W. 2014. Spatial bias in the GBIF database and its effect on modeling species distributions. *Ecological Informatics*, 19, 10–15.
- Carroll, C., Noss, R. F., Paquet, P. C., & Schumaker, N. H. 2004. Extinction Debt of Protected Areas in Developing Landscapes. *Conservation Biology*, 18(4), 1110–1120.

- Cowie, R. H., Bouchet, P., & Fontaine, B. 2022. The Sixth Mass Extinction: Fact, fiction or speculation? *Biological Reviews*, 97(2), 640–663.
- Di Nuzzo, L., Vallese, C., Benesperi, R., Giordani, P., Chiarucci, A., Di Cecco, V., Di Martino, L., Di Musciano, M., Gheza, G., Lelli, C., Spitale, D., & Nascimbene, J. 2021. Contrasting multitaxon responses to climate change in Mediterranean mountains. *Scientific Reports*, 11(1), 1–12.
- Diaz, H. F., Grosjean, M., & Graumlich, L. 2003. Climate Variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present and Future. *Climatic Change*, 59(1), 1–4.
- Dicks, L. V., Viana, B., Bommarco, R., Brosi, B., Arizmendi, M. del C., Cunningham, S. A., Galetto, L., Hill, R., Lopes, A. V., Pires, C., Taki, H., & Potts, S. G. 2016. Ten policies for pollinators. *Science*, 354(6315), 975–976.
- Elsen, P. R., & Tingley, M. W. 2015. Global mountain topography and the fate of montane species under climate change. *Nature Climate Change*, 5(8), Article 8.
- Fick, S. E., Hijmans R. J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. of Climatol* 37:4302–4315.
- Guisan, A., Tingley, R., Baumgartner, J. B., Naujokaitis-Lewis, I., Sutcliffe, P. R., ... Buckley, Y. M. 2013. Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters*, 16(12), 1424–1435.
- Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. 2017. Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R. In *Habitat Suitability and Distribution Models*. Cambridge University Press.
- Hill, G. M., Kawahara, A. Y., Daniels, J. C., Bateman, C. C., & Scheffers, B. R. 2021. Climate change effects on animal ecology: Butterflies and moths as a case study. *Biological Reviews*, 96(5), 2113–2126.
- Hijmans, R. J., Etten, J. van, Sumner, M., Cheng, J., Baston, D., Bevan, A., Bivand, R., Busetto, L., Canty, M., Fasoli, B., Forrest, D., ... Wueest, R. 2022. raster: Geographic Data Analysis and Modeling (3.6-11). <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- Hole, D. G., Willis, S. G., Pain, D. J., Fishpool, L. D., Butchart, S. H. M., Collingham, Y. C., Rahbek, C., & Huntley, B. 2009. Projected impacts of climate change on a continent-wide protected area network. *Ecology Letters*, 12(5), 420–431.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. WG-I Contribution to IPCC AR6.
- IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. WG-II Contribution to IPCC AR6
- Johnston A, Matechou E, Dennis EB. 2023 Outstanding challenges and future directions for biodiversity monitoring using citizen science data. *Methods in Ecology and Evolution*. 14(1):103-16.
- Lake, T. A., Briscoe Runquist, R. D., & Moeller, D. A. 2020. Predicting range expansion of invasive species: Pitfalls and best practices for obtaining biologically realistic projections. *Diversity and Distributions*, 26, 1767–1779.
- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., ... Williams, S. E. 2017. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332), 1–9.
- Naimi, B. 2023. usdm: Uncertainty Analysis for Species Distribution Models. <https://cran.r-project.org/web/packages/usdm/index.html>
- Nath, R., Singh, H., & Mukherjee, S. 2023. Insect pollinators decline: An emerging concern of Anthropocene epoch. *Journal of Apicultural Research*, 62(1), 23–38.
- Nelson, G., & Ellis, S. 2019. The history and impact of digitization and digital data mobilization on biodiversity research. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1763).
- Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O. and Kunin, W.E., 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in ecology & evolution*, 25(6), pp.345-353.
- O'Neill, B. C., Kriegl, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180.
- Sillero, N., Arenas-Castro, S., Enriquez-Urzelai, U., Vale, C.G., Sousa-Guedes, D., Martínez-Freiría, F., Real, R. and Barbosa, A.M., 2021. Want to model a species niche? A step-by-step guideline on correlative ecological niche modelling. *Ecological Modelling*, 456, p.109671.
- Thuiller W, Georges D, Gueguen M, Engler R, Breiner F, Lafourcade B, Patin R 2023. biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling. R package version 4.2-5
- Valavi, R., Guillera-Aroita, G., Lahoz-Monfort, J. J., & Elith, J. 2022. Predictive performance of presence-only species distribution models: A benchmark study with reproducible code. *Ecological Monographs*, 92(1), e01486.

DIFFERENT APPROACHES FOR MODELLING SUNFLOWER PHENOLOGY UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

APPROCCI MODELLISTICI PER LA SIMULAZIONE DELLA FENOLOGIA DEL GIRASOLE (*HELIANTHUS ANNUUS L.*) IN SCENARI DI CAMBIAMENTO CLIMATICO

Francesca Di Cesare¹, Giovanni Maria Poggi^{2*}, Marco Vignudelli³, Francesca Ventura³

¹Department of Biological, Geological and Environmental Sciences (BiGeA), Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Bologna, Italy

²CREA - Council for Agricultural Research and Economics, Research Centre for Agriculture and Environment, Bologna, Italy

³Department of Agricultural and Food Sciences (DISTAL), Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Bologna, Italy

*Corresponding author email: giovannimaria.poggi@crea.gov.it

Abstract

Temperature variations related to climate change are profoundly affecting crop phenological development, highlighting the need to reassess commonly used predictive models. The calculation of Growing Degree Days (GDD) is a key tool for estimating phenological dynamics, but models that do not account for the impact of high temperatures are becoming increasingly inadequate in the face of more frequent heatwaves.

This study compares six GDD calculation models to evaluate their effectiveness under current climate conditions in Northern Italy, focusing on the spring-summer crop cycle of sunflower. The models analyzed include the average method, the single triangle method (with three different upper threshold cut-off techniques: horizontal, vertical, and intermediate), and the physiologically based beta-distribution function method.

The analysis, conducted using a 22-year historical dataset of phenological and meteorological data from the Cadriano station (Bologna, Italy), showed that traditional models maintain good accuracy in estimating full flowering, but tend to underestimate full maturity in warm years. The beta-distribution method proved to be the most accurate, although it is also the most complex to implement. Conversely, the intermediate cut-off technique offered a good balance between accuracy and ease of application. These findings emphasize the importance of adopting predictive models that are more responsive to thermal stress, in order to support effective agronomic decision-making and promote climate-resilient agriculture

Parole chiave

Calcolo dei GDD, fenologia, cambiamento climatico, tecniche di cut-off, soglie termiche

Keywords

GDDs calculation, phenology, climate change, cut-off techniques, thermal thresholds

Introduzione

Il cambiamento climatico e le conseguenti variazioni nel trend delle temperature hanno un impatto significativo sullo sviluppo fenologico delle piante, poiché la temperatura è il principale fattore determinante di questo processo.

Questa connessione tra temperatura dell'aria e fenologia delle piante, è espressa attraverso i Growing Degree Days (GDD), definiti come "unità termiche" o "tempo termico" accumulato durante un periodo di tempo, generalmente un giorno (24 ore) (Mcmaster e Wilhelm 1997)

Esistono diversi approcci modellistici per simulare lo sviluppo fenologico attraverso il calcolo dei GDD. La maggior parte di questi modelli condivide l'assunzione che una pianta inizi a cumulare il tempo termico una volta che le temperature superano una soglia minima (temperatura base - T_{base}), necessaria per passare da una fase fenologica all'altra, e cessi di accumularlo quando la temperatura supera una soglia superiore (T_{up}) (Mcmaster e Wilhelm 1997; Chuine e Régnière 2017; Piao et al. 2019).

Il metodo più semplice per calcolare i GDD è rappresentato dal cosiddetto *average method* (Arnold 1960). Si tratta di un metodo che calcola i GDD a partire dalla temperatura massima e minima giornaliera dell'aria. Questo modello presuppone che le unità di calore cumulate nelle 24 ore possano essere approssimate alla differenza tra la

temperatura media giornaliera e la temperatura di base della coltura.

Tuttavia, questo approccio presenta diverse debolezze a causa della sua eccessiva semplificazione, poiché assume una relazione lineare tra temperatura e GDD, contrariamente alla risposta non lineare degli organismi biologici (Maiorano 2012), e non considera le fluttuazioni giornaliere della temperatura.

Un approccio non lineare invece considera che il tasso di sviluppo delle piante aumenta linearmente con la temperatura solo tra la temperatura di base e la temperatura ottimale per lo sviluppo della coltura. Una volta che la temperatura supera quella ottimale, il tasso di sviluppo inizia a diminuire, fino a diventare nullo quando la temperatura raggiunge la cosiddetta "temperatura massima cardinale".

Per superare le limitazioni dell'*average method*, si possono utilizzare modelli più sofisticati basati su funzioni non lineari, come il *beta distribution function*, metodo che, impiegando dati di temperatura orari come input, considera le fluttuazioni giornaliere della temperatura (Zhou e Wang 2018).

Questo approccio permette di rappresentare in modo più realistico la risposta termica delle piante, incorporando tre parametri: la temperatura base (T_{base}), la temperatura ottimale (T_{opt}) e la temperatura massima (T_{up}). In questo

modello, il tasso di sviluppo è nullo quando la temperatura è inferiore a T_{base} o superiore a T_{max} , mentre raggiunge il valore massimo a T_{opt} . Tale equazione consente di descrivere in maniera più accurata la dinamica fenologica, tenendo in conto sia la non linearità della risposta biologica sia le variazioni termiche giornaliere, ma necessita di dati di temperatura orari come input

Ad un livello intermedio di complessità, troviamo il *single triangle method* (Snyder et al. 1999) frequentemente impiegato in contesti operativi di campo, che utilizza come input le temperature minime e massime giornaliere ma introduce una migliore approssimazione dell'andamento nelle 24 ore rispetto al metodo della media. Questo metodo presuppone che la variazione di temperatura giornaliera possa essere approssimata rappresentando il profilo di temperatura di 24 ore come un triangolo. I GDD cumulativi sono stimati in base all'area del triangolo, che serve come approssimazione dell'integrale della curva di temperatura giornaliera. Inoltre, per tenere conto degli effetti negativi delle temperature superiori alla T_{opt} , il metodo del triangolo singolo può essere affinato utilizzando diverse tecniche di “cut-off” (*horizontal, vertical, intermediate*).

In questi metodi, l'area di calcolo dei gradi-giorno viene modificata in relazione a una temperatura soglia superiore (T_{up}), al di sopra della quale il tasso di sviluppo inizia a diminuire o si ferma, a seconda della strategia di cut-off utilizzata (University of California Davis, www.ipm.ucdavis.edu/WEATHER/ddconcepts.html).

Alla luce di queste considerazioni, i metodi di calcolo dei GDD che non considerano una soglia superiore di temperatura - e quindi non tengono conto degli effetti negativi delle alte temperature sullo sviluppo fenologico - risultano adeguati in condizioni climatiche “standard”, ma possono rivelarsi inadatti nel contesto del cambiamento climatico, in particolare in area mediterranea. L'aumento della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore potrebbe infatti condurre a stime distorte dello sviluppo fenologico, non rappresentative della reale risposta delle colture alle condizioni termiche estreme.

Il cambiamento climatico ha infatti spostato notevolmente i tempi dei principali eventi fenologici, con forti impatti sullo sviluppo delle colture, sulla resa e sulla qualità (Piao et al. 2019; Poggi et al. 2022; Fornaciari et al. 2023), aprendo la strada a numerosi studi di confronto dei modelli fenologici (Chuine e Régnière 2017).

In questo contesto, l'obiettivo del presente lavoro è quello di confrontare i vari modelli di calcolo, dal più semplice al più raffinato, con particolare attenzione alle tecniche di cut-off che considerano la soglia di temperatura superiore (T_{up}), applicate al *single triangle method*, per valutare quale di esse fornisca i migliori risultati nel calcolo dei GDD e nella simulazione fenologica, per la coltura primaverile-estiva *Helianthus annuus* L. nel Nord Italia alla luce del cambiamento climatico.

A tal fine, è stata utilizzata una serie storica di dati fenologici e meteorologici, confrontando “anni standard” e “anni caldi” (anni in cui sono state registrate condizioni di alta temperatura).

Materiali e Metodi

In questo studio sono stati utilizzati ventidue anni di dati fenologici (2003 - 2024), ricavati dal bollettino fenologico, pubblicato settimanalmente dal Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari (DISTAL) dell'Università di Bologna. Il bollettino diffonde i dati dei rilievi fenologici effettuati secondo il protocollo Phenagri (Pasquini 2006), presso le parcelle sperimentali della stazione agro-fenologica di Cadriano (BO) (44° 33' 0300" N, 11° 24' 3600" E).

La fenologia è stata analizzata secondo la scala BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt, and Chemical industry), riconosciuta a livello internazionale, che codifica gli stadi di sviluppo delle piante con un codice a due cifre, che va dalla semina (00) alla raccolta (99), consiste quindi in 10 stadi principali (0-9), con 10 stadi secondari (0-9) per ogni principale (Meier 1997).

Per il calcolo dei GDD, da associare ai dati fenologici, sono stati utilizzati i dati meteorologici (temperature massime e minime giornaliere e temperature orarie) forniti dalla stazione agrometeorologica DISTAL, situata in prossimità della stazione agro-fenologica. Per valutare gli effetti dei regimi di alta temperatura sul calcolo dei GDD per il girasole, i 22 anni considerati sono stati suddivisi in “anni standard” e “anni caldi”, seguendo la procedura descritta da Fornaciari et al. (2023); gli “anni standard” e gli “anni caldi” sono stati definiti rispettivamente come gli anni in cui, rispettivamente, la temperatura media del trimestre giugno–agosto era inferiore o superiore al valore mediano del periodo di 22 anni.

L'analisi si è articolata in due fasi: nella prima, i modelli sono stati calibrati utilizzando dati climatici relativi ad anni “standard”. Per ciascun modello, sono stati calcolati i Gradi Giorno Accumulati (CGDD) necessari al raggiungimento delle fasi fenologiche BBCH 65 e BBCH 89, al fine di definire i requisiti termici per il raggiungimento di tali fasi fenologiche negli anni standard, ricavando così una soglia sperimentale.

Nella seconda fase, i modelli sono stati validati su anni “caldi”, simulando i Giorni Dalla Semina (DAS) in cui si raggiungevano le stesse fenofasi, utilizzando i CGDD precedentemente calibrati, al fine di valutarne le prestazioni in uno scenario di temperature elevate. Le simulazioni sono state confrontate con i dati osservati in campo, riportati nei bollettini fenologici settimanali, tramite l'Errore Quadratico Medio (RMSE).

Per verificare se i modelli presentassero capacità predittive significativamente diverse, è stato condotto il test di Diebold-Mariano (valore di $p = 0,05$)

Tutte le analisi statistiche sono state eseguite in R (R Development Core Team 2021), utilizzando i pacchetti *rstatis* (Alboukadel Kassambara 2023) e *forecast* (Hyndman and Khandakar 2008).

Modelli di calcolo GDD

Nel presente lavoro sono stati confrontati sei modelli di calcolo dei gradi giorno.

Il primo è l'*average method*, proposto da Arnold (1960):

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

dove

$$T_{min} = T_{base} \quad \text{se} \quad T_{min} < T_{base}$$

GDD rappresenta i gradi giorno accumulati giornalmente, T_{min} e T_{max} sono rispettivamente le temperature minima e massima giornaliera ($^{\circ}\text{C}$), e T_{base} è la temperatura cardinale minima della coltura ($^{\circ}\text{C}$).

Questo studio ha inoltre considerato i cosiddetti metodi geometrici, in particolare sono stati testati il *single triangle method*, con e senza tecniche di *cut-off*, illustrate nella Figura 1. In breve, il metodo standard, quindi il *single triangle method* senza *cut-off*, non prevede alcuna soglia superiore, per cui l'accumulo dei GDD prosegue fino alla T_{max} giornaliera (Figura 1a). La tecnica dell'*horizontal cut-off* considera che lo sviluppo prosegua a un ritmo costante quando la temperatura supera la soglia superiore (Figura 1b). L'*intermediate cut-off* assume che lo sviluppo rallenti (senza arrestarsi completamente) a temperature superiori alla soglia (Figura 1c). Il *vertical cut-off* prevede che lo sviluppo si arresti completamente oltre la soglia superiore (Figura 1d).

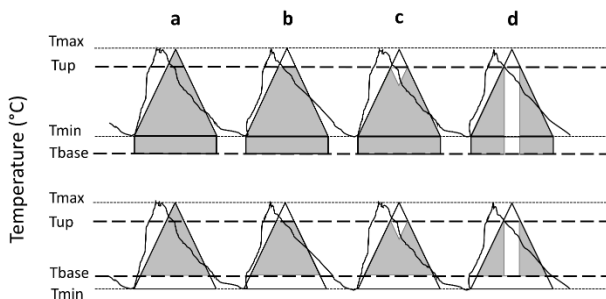


Fig.1 – Modelli GDD basati su approssimazioni geometriche: (a) triangolo singolo (senza *cut-off*); (b) *cut-off* orizzontale; (c) *cut-off* intermedio; (d) *cut-off* verticale. T_{base} = temperatura basale della coltura, T_{up} = soglia termica superiore della coltura, T_{max} = temperatura massima giornaliera, T_{min} = temperatura minima giornaliera. La linea continua rappresenta l'andamento giornaliero della temperatura.

Fig.1 - Degree-days models based on geometrical approximations: (a) single triangle (with no *cut-off*); (b) horizontal *cut-off*; (c) intermediate *cut-off*, (d) vertical *cut-off*. T_{base} = crop base temperature. T_{up} = crop upper threshold temperature, T_{max} = maximum daily temperature, T_{min} = minimum daily temperature. Solid line represents daily temperature dynamic.

In base alla concettualizzazione delle diverse tecniche di *cut-off*, la soglia superiore è stata impostata uguale a T_{opt} della coltura per le strategie *horizontal* e *intermediate*, e uguale a T_{up} per il *vertical cut-off*. I valori di T_{base} , T_{opt} e T_{up}

adottati per il girasole sono rispettivamente 4°C , 30°C e 40°C (Singh et al. 2017; Zhou e Wang 2018; Raes et al. 2018; FAO 2023).

L'approccio più avanzato considerato nel presente studio è il modello dei gradi giorno a base fisiologica, che impiega la *beta distribution function* e utilizza come input i dati della temperatura oraria. Questo modello è stato originariamente sviluppato da Yin et al. (1995) e successivamente riformulato da Zhou e Wang (2018):

$$GDD = \left(\sum_{i=1}^{24} HTT \right) / 24$$

Dove:

$$HTT = \begin{cases} 0 & \text{if } T_h < T_{base} \\ \left(\frac{T_h - T_{base}}{T_{opt} - T_{base}} \right) \left(\frac{T_{up} - T_h}{T_{up} - T_{opt}} \right)^{\frac{T_{up} - T_{opt}}{T_{opt} - T_{base}}} (T_{opt} - T_{base}) & \text{if } T_{base} \leq T_h \leq T_{up} \\ 0 & \text{if } T_h > T_{up} \end{cases}$$

HTT rappresenta il Tempo Termico Orario e T_h la temperatura dell'aria oraria.

Risultati e Discussione

Le medie di temperature dei due gruppi “anni standard” e “anni caldi” sono rappresentati nella Tabella 1. Il valore mediano del dataset è 24.4°C .

Tab.1 - Anni standard e anni caldi nel periodo 2003-2024, in base alla temperatura media nel trimestre giugno – agosto. Il valore mediano di riferimento, calcolato sull'intero dataset, è 24.4°C .

Tab.1 - Standard and warm years in the period 2003-2024, based on average temperature in the trimester June – August. The reference median value, calculated on the whole dataset, is 24.4°C .

standard years	average T in June - August	warm years	average T in June - August
2004	23.5 $^{\circ}\text{C}$	2003	26.8 $^{\circ}\text{C}$
2005	22.8 $^{\circ}\text{C}$	2009	24.5 $^{\circ}\text{C}$
2006	22.4 $^{\circ}\text{C}$	2012	25.9 $^{\circ}\text{C}$
2007	23.7 $^{\circ}\text{C}$	2015	25.1 $^{\circ}\text{C}$
2008	24.0 $^{\circ}\text{C}$	2017	26.1 $^{\circ}\text{C}$
2010	24.0 $^{\circ}\text{C}$	2018	24.9 $^{\circ}\text{C}$
2011	24.4 $^{\circ}\text{C}$	2019	26.0 $^{\circ}\text{C}$
2013	23.8 $^{\circ}\text{C}$	2021	24.9 $^{\circ}\text{C}$
2014	23.0 $^{\circ}\text{C}$	2022	25.6 $^{\circ}\text{C}$
2016	23.9 $^{\circ}\text{C}$	2023	24.9 $^{\circ}\text{C}$
2020	24.2 $^{\circ}\text{C}$	2024	26.0 $^{\circ}\text{C}$

I CGDD necessari per raggiungere le fasi BBCH 65 e 89 negli anni “standard” sono riportati per ciascun modello nella Tabella 2.

Per quanto riguarda la fase di fioritura (BBCH 65), sulla base dei valori di RMSE e dei risultati del test di Diebold-Mariano (Fig. 2A), non sono emerse differenze significative tra i modelli testati nella capacità di prevedere il raggiungimento

dello stadio BBCH 65. Negli “anni caldi”, la fioritura completa è stata raggiunta, in media, il 4 luglio, quindi, questo stadio fenologico è stato raggiunto prima dell’insorgere delle alte temperature estive, il che spiega le ridotte differenze nei CGDD tra i modelli, anche senza considerare una soglia termica superiore.

Tab.2 - Soglie termiche calibrate (CGDD) per il raggiungimento degli stadi BBCH 65 e BBCH 89 negli anni “standard”, per ciascun modello

Tab.2 - Calibrated thermal threshold (CGDD) to reach BBCH 65 and BBCH 89 in “standard” years for each degree-day model

Modelli GDD	CGDD per BBCH 65	CGDD per BBCH 89
Average method	1213	2390
Single triangle (ST)	1215	2392
(ST) vertical cut-off	1215	2392
(ST) horizontal cut-off	1212	2373
(ST) intermediate cut-off	1210	2354
Beta-distribution function	1569	2897

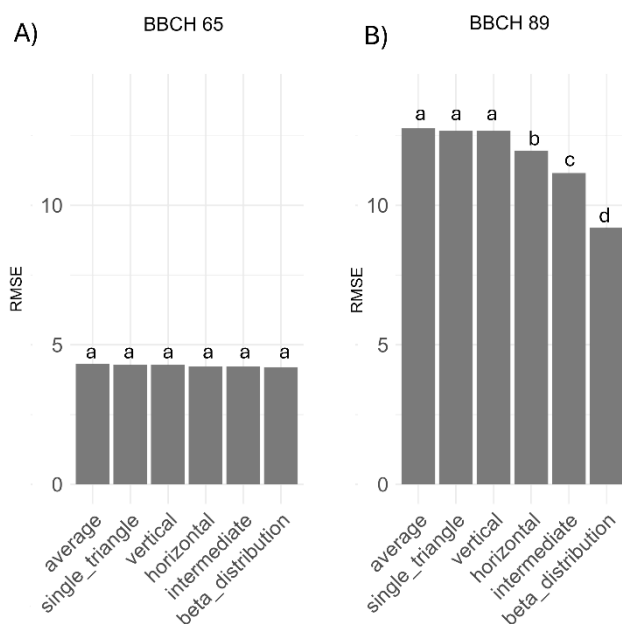


Fig.2 - Confronto delle prestazioni dei modelli di gradi giorno nel simulare gli stadi BBCH 65 (A) e BBCH 89 (B). Gli istogrammi rappresentano i valori di RMSE calcolati tra i giorni dopo la semina (DAS) osservati in campo e quelli simulati dai diversi modelli.

Fig.2 - Comparison of the performance of the tested degree-day models in simulating BBCH stages 65 and 89. Histograms represent RMSE values calculated between observed and simulated Days After Sowing (DAS).

Si segnala che i valori di RMSE sono espressi in DAS, indicando che le differenze nella previsione di BBCH 65 sono al massimo di 5 giorni. La frequenza delle osservazioni fenologiche effettuate nella stazione agrofenologica è

settimanale, e quindi questo RMSE risulta inferiore alla frequenza di campionamento. In pratica, l’errore è inferiore alla risoluzione delle misurazioni.

Risultati differenti sono emersi per BBCH 89 (Fig. 2B). La previsione dei DAS per il raggiungimento della piena maturazione con i metodi *average*, *single triangle* e *vertical cut-off* ha mostrato valori di RMSE simili. Tali risultati non sorprendono, infatti, sia i metodi *average* che *single triangle* non considerano soglie superiori, e il *vertical cut-off* non prevede alcun rallentamento nell’accumulo dei GDD al di sopra di T_{opt} , fino al raggiungimento di T_{up} (40°C-raggiunti raramente nel periodo di riferimento).

Al contrario, il metodo *horizontal cut-off* ha mostrato un miglioramento significativo rispetto ai metodi suddetti, poiché considera che, al di sopra di T_{opt} , la relazione lineare tra incremento della temperatura e accumulo di GDD si interrompe.

Inoltre, il metodo *horizontal cut-off* si è rivelato meno preciso rispetto al metodo *intermediate cut-off*. Infatti, il primo assume che lo sviluppo continui a un tasso costante oltre la soglia superiore, senza considerare l’effetto negativo delle T eccessive sullo sviluppo della pianta. Pertanto, il metodo *intermediate cut-off* può essere considerato una migliore approssimazione della risposta fisiologica della coltura, in quanto tiene conto del rallentamento dello sviluppo vegetativo a temperature superiori alla soglia superiore (fissata pari a T_{opt}).

Tali considerazioni sono state confermate dai nostri risultati, poiché quest’ultima tecnica di *cut-off* ha mostrato valori di RMSE più bassi (11.2 giorni) e prestazioni predittive significativamente migliori, secondo il test di Diebold-Mariano, anche rispetto al metodo *horizontal cut-off*.

Infine, la *beta-distribution function*, che considera la variazione giornaliera della temperatura (utilizzando dati orari in ingresso) e che è basata su principi fisiologici, si è dimostrata più precisa di qualsiasi altro metodo analizzato, come già riportato in precedenti studi fenologici (Maiorano 2012; Zhou e Wang 2018). In particolare, ha mostrato i migliori risultati con valori di RMSE pari a 9.2 giorni, e prestazioni predittive significativamente superiori rispetto a tutti gli altri modelli analizzati.

Pertanto, considerando i risultati complessivi, il metodo *intermediate cut-off* è risultato il migliore tra le tecniche geometriche di *cut-off*, mentre la *beta-distribution function* ha mostrato le migliori prestazioni in assoluto.

Conclusioni

Questo studio ha confrontato diversi modelli alternativi per il calcolo dei gradi giorno (GDDs) al fine di individuare il più accurato per il girasole in condizioni di cambiamento climatico al Nord Italia, utilizzando un dataset di lungo periodo contenente dati fenologici e meteorologici, utilizzati per la calibrazione e la validazione. Sono stati presi in considerazione sia modelli semplificati per il calcolo dei GDDs (come il metodo delle medie), in quanto ancora ampiamente utilizzati in contesti operativi di campo, sia metodi a base fisiologica come la funzione di distribuzione beta, e le tecniche di *cut-off* applicate al *single triangle*

method, al fine di includere gli effetti negativi dei regimi termici elevati associati al cambiamento climatico. I risultati hanno evidenziato che, nell'area del Nord Italia e nel contesto dei cambiamenti climatici, per il girasole, i modelli comunemente utilizzati, come l' *average* e il *single triangle method*, non generano ancora errori significativi nella stima della piena fioritura (BBCH65), ma risultano inadeguati nella previsione della piena maturazione (BBCH89). Il modello basato sulla *beta-distribution function* ha mostrato le migliori prestazioni. Tuttavia, anche le tecniche di *cut-off* geometrico, più semplici rispetto alla *beta-distribution*, hanno evidenziato un miglioramento significativo; in particolare, il metodo *intermediate cut-off* si è rivelato, tra i modelli geometrici, la migliore approssimazione della risposta fisiologica delle colture. Questo approccio potrebbe favorire l'integrazione di soluzioni modellistiche avanzate nei contesti operativi e nei Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS), offrendo il vantaggio di una maggiore semplicità applicativa, in quanto basato sull'impiego delle temperature minime e massime giornaliere anziché su dati orari.

Bibliografia

- Alboukadel Kassambara. 2023. "Rstatix R Package."
- Arnold, C. Y. 1960. "Maximum-Minimum Temperatures as a Basis for Computing Heat Units." *Proceedings. American Society for Horticultural Science* 76.
- Chuine, Isabelle, and Jacques Régnière. 2017. "Process-Based Models of Phenology for Plants and Animals." *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 48:159–82. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316>.
- "Food and Agriculture Organization (FAO). AquaCrop Version 7.1. Reference Manual: Annexes. Available Online." 2023).
- Fornaciari, Marco, Silvia Marrapodi, Luigia Ruga, Chiara Proietti, and Fabio Orlandi. 2023. "Tree Responses and Temperature Requirements in Two Central Italy Phenological Gardens." *International Journal of Biometeorology* 67 (10): 1607–17. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02522-3>.
- Hyndman and Khandakar. 2008. "Forecast: Forecasting Functions for Time Series and Linear Models. R Package Version 8.23.0."
- Mcmaster, Gregory S, and W W Wilhelm. 1997. "AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY Growing Degree-Days: One Equation, Two Interpretations." *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 87.
- Maiorano, Andrea. 2012. "A Physiologically Based Approach for Degree-Day Calculation in Pest Phenology Models: The Case of the European Corn Borer (*Ostrinia Nubilalis* Hbn.) in Northern Italy." *International Journal of Biometeorology* 56 (4): 653–59. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0464-z>.
- Maiorano, Andrea, Simone Bregaglio, Marcello Donatelli, Davide Fumagalli, and Antonio Zucchini. 2012. "Comparison of Modelling Approaches to Simulate the Phenology of the European Corn Borer under Future Climate Scenarios." *Ecological Modelling* 245: 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.03.034>.
- Meier, U. 1997. *Growth Stages of Mono-and Dicotyledonous Plants*. Edited by Blackwell Wissenschafts-Verlag. Berlin.
- Pasquini, Alessandra. 2006. *Il Rilevamento Agrofenologico: Dall'osservazione in Campo Alla Registrazione Dei Dati*. Edited by alimentari e forestali. CRA Ufficio centrale di ecologia agraria. Ministero delle politiche agricole.
- Piao, Shilong, Qiang Liu, Anping Chen, Ivan A. Janssens, Yongshuo Fu, Junhu Dai, Lingli Liu, Xu Lian, Miaogen Shen, and Xiaolin Zhu. 2019. "Plant Phenology and Global Climate Change: Current Progresses and Challenges." *Global Change Biology*. Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>.
- Poggi, Giovanni Maria, Iris Aloisi, Simona Corneti, Erika Esposito, Marina Naldi, Jessica Fiori, Stefano Piana, and Francesca Ventura. 2022. "Climate Change Effects on Bread Wheat Phenology and Grain Quality: A Case Study in the North of Italy." *Frontiers in Plant Science* 13 (August). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.936991>.
- Raes, Dirk, Pasquale Steduto, Theodore C. Hsiao, and Elias Fereres. 2018. Reference Manual for AquaCrop, Version 6.0/6.1. Fao. AquaCrop Website <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>. <http://www.fao.org/3/a-br244e.pdf>.
- Singh, Vijaya, Chuc T. Nguyen, Greg McLean, Scott C. Chapman, Bangyou Zheng, Erik J. van Oosterom, and Graeme L. Hammer. 2017. "Quantifying High Temperature Risks and Their Potential Effects on Sorghum Production in Australia." *Field Crops Research* 211 (June): 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.012>.
- Snyder, Richard L., Donatella Spano, Carla Cesaraccio, and Pierpaolo Duce. 1999. "Determining Degree-Day Thresholds from Field Observations." *International Journal of Biometeorology* 42 (4): 177–82. <https://doi.org/10.1007/s004840050102>.
- Yin, Xinyou, Martin J Kropff, Graham McLaren, and Romeo M Visperas. 1995. "AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY A Nonlinear Model for Crop Development as a Function of Temperature." *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 77.
- Zhou, Guanglin, and Qianjiu Wang. 2018. "A New Nonlinear Method for Calculating Growing Degree Days." *Scientific Reports* 8 (1): 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28392-z>.

WHEATZARD (WHEAT ZEROING IN ON ADAPTIVE RESPONSE TO DROUGHT): A STUDY TO EVALUATE WATER STRESS IMPACT ON WHEAT PHENOLOGY SIMULATIONS

WHEATZARD (WHEAT ZEROING IN ON ADAPTIVE RESPONSE TO DROUGHT): UNO STUDIO PER LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DELLO STRESS IDRICO SULLE SIMULAZIONI FENOLOGICHE DEL FRUMENTO

Giovanni Maria Poggi^{1*}, Simone Bregaglio¹, Francesca Ventura²

¹CREA - Council for Agricultural Research and Economics, Research Centre for Agriculture and Environment, Bologna, Italy

²Department of Agricultural and Food Sciences, Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Bologna, Italy

*Corresponding author email: giovannimaria.poggi@crea.gov.it

Abstract

Plants' phenological development depends on air temperature as major driving cue. The relationship between air temperature and plants phenology has been formalized via the Growing Degree Days (GDDs) concept, defined as the thermal time accumulated during a time step, generally one day (24 hours). Traditional GDD models do not take into account other constraining factors than temperature as vernalization, photoperiod and water stress (WS). Despite several experimental evidences have demonstrated that phenology can be hastened or slowed down by WS, its representation in plant phenology model is still debated. One potential approach is to modulate the accumulation of GDDs using a "water stress factor," analogous to existing adjustments for vernalization and photoperiod. This is particularly relevant given that the occurrence of WS, considering its timing, duration, frequency, and severity throughout the crop life cycle, varies markedly across environments and agricultural seasons, thereby complicating the identification of consistent phenological patterns. The objectives of this study were to evaluate the phenological responses of wheat to WS using a 20-year dataset (2003–2023) of field observations collected in a long-term experiment located in Bologna (Emilia-Romagna). A hourly time step phenological model was calibrated and validated to account for temperature, vernalization, and photoperiod effects. Then, a simplified WS model has been used to study the dynamic correlation of WS during the growing season in order to understand its influence on the timing of key developmental stages. The results showed that the correlation between WS and wheat phenology strongly varied during the crop cycle, both in terms of direction and intensity. Overall, results showed the tendency of the crop to alternate an initial phases of drought avoidance, in which phenology was slowed down, with a phase of drought escape, in which the opposite behavior, i.e., accelerating phenology, was implemented. Incorporating a WS factor could enhance the model's responsiveness to water-limited conditions and potentially reduce prediction errors.

Parole chiave

Calcolo dei GDD, fenologia, stress idrico, modellistica colturale

Keywords

GDDs calculation, phenology, drought stress, crop modeling

Introduction

Plants' phenological development, referring to the periodically recurring events throughout their life cycle (Lieth 1974) primarily depends on air temperature, which is recognized as its major driving force (Schwartz 2003). The connection between air temperature and plants phenology has been translated into the Growing Degree Days (GDDs) concept, defined as the thermal time accumulated during a period of time, generally a day (24 hours) (Mcmaster and Wilhelm 1997). Various modeling approaches have been developed to simulate plants phenology through GDDs accumulation, most of these sharing the assumption that a plant starts cumulating thermal time once temperatures rise above a minimum threshold required to transition between phenological stages, and ceases accumulation when temperature exceeds an upper threshold (Chuine and Régnière 2017). However, thermal models do not take into consideration other constraining factors to plants development. For example, when modeling winter cereals phenology, vernalization and photoperiod have to be

considered. Specifically, wheat has been proven to be sensitive to vernalization and photoperiod from emergence to heading (Slafer 1994). Thus, several modelling approaches modulate wheat development by vernalization and photoperiod effects, reducing thermal-time (GDDs) accumulation using empirical factors (McMaster et al. 2008; Herndl et al. 2008). Moreover, other environmental factors affect wheat phenological development, and should be considered to improve simulation models. This is a crucial aspect nowadays, considering that an accurate representation of phenology is essential to explore the effects of climate change or the impact of alternative management practices. For example, being phenology a plastic and flexible trait, several experimental evidences have demonstrated that it can be hastened or slowed down by water stress (WS). Although it is uniformly recognized that terminal drought reduces grain filling duration, as a consequence of accelerated leaf senescence, reduced photosynthesis, downregulation of enzyme activities, and sink limitation (Farooq et al. 2014), at the same time, several experiments over the years have

obtained results that are only partially superimposable in the relationship between phenology and WS. Simane et al. (1993) found that early WS (at tillering) increases the time necessary for wheat to reach both anthesis and maturity. They also found that mid (flowering) and late (grain filling) WS did not affect time to flowering, but significantly shortened grain filling duration. Ihsan et al. (2016), imposing WS immediately after crop establishment (2 weeks after sowing), observed that WS accelerated wheat phenological development already from tillering, pushing it to early maturity. In particular, days to complete 50% heading and crop physiological maturity were greatly reduced compared to other phenological stages, suggesting that booting and grain filling can be significantly accelerated by early drought. Qaseem et al. (2019) found that water stress imposed from heading reduces the number of days to anthesis and to maturity. These apparently contradicting results are ascribable to differences in WS intensity, duration, and timing in different experimental conditions. In fact WS occurrence, in terms of time of appearance, duration, frequency, and severity, along the wheat life cycle varies significantly among different environments and years, making it difficult to identify reliable phenological patterns, which is further complicated by the presence of confounding factors, e.g., other concomitant abiotic stresses in an operational context. Consequently, despite some evidence in the literature proved that wheat phenology simulations improve when adding responses to WS (McMaster et al. 2019), it is still not unequivocally clear how to take it into account in wheat phenological simulation models, i.e. altering GDDs accumulation using a “water stress factor”, similarly to what is operationally done for vernalization and photoperiod. The objectives of this study were to evaluate the phenological responses of wheat to WS using a 20-year dataset (2003–2023) of field observations collected in Cadriano, Bologna (IT). Firstly, a phenological model was calibrated and validated to account for temperature, vernalization, and photoperiod effects. Then, the potential of incorporating WS into the existing model to improve the simulation accuracy of wheat phenology was assessed, investigating how WS influenced the timing of key developmental stages.

Materials and Methods

Phenological data

The observation dataset used in this study has been collected over 2003 – 2023, and has been derived from the phenological bulletins weekly released by the Department of Agricultural and Food Sciences (DISTAL), the University of Bologna. The bulletin publishes data derived from phenological surveys carried out on the cultivar Mieti, in accordance with the Phenagri protocol (Pasquini 2006), at the agro-phenological station of Cadriano (44° 33' 0300" N, 11° 24' 03600" E). Mieti is the wheat variety currently used for the bulletin, as it is representative of most varieties used in the area. Phenology was analyzed according to the BBCH scale (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt, and CHemical industry), which encodes plants' development

stages using a double-digit code from sowing (00) to harvest (99), thus consisting of 10 principal stages (0– 9), with 10 secondary stages (0–9) for each principal one (Meier 1997). In each agronomic season, the chronological time expressed as days after sowing (DAS) to reach each BBCH phase was used for the calibration and validation of a phenological model and for analysing the relationship between the duration of phenological phases and WS.

Phenological model

A phenological model based on GDD accumulation was used to simulate BBCH stage progression in wheat. The model accounted for thermal time accumulation, vernalization, and photoperiod sensitivity, with daily inputs of temperature and photoperiod. Weather data (daily maximum and minimum temperatures and daily precipitation) were provided by DISTAL agrometeorological station. Calibration was performed using observed phenological data extracted from weekly phenology bulletins, setting model parameters as cycle length, vernalization hours and photoperiod effect, as well as stage-specific thresholds: BBCH 10, BBCH 20, BBCH 30, BBCH 45, BBCH 55, BBCH 65, BBCH 75, and BBCH 85. These parameters defined the thermal thresholds required to reach those specific BBCH stages. In particular, BBCH 10, 20, 30, 45 and 55 were expressed as percentages of the vegetative phase duration; BBCH 65 as the percentage of the total life cycle when the vegetative phases occur; BBCH 75 and 85 as a percentage completion of the ripening phase. Model calibration was performed using an optimization algorithm, the multi-start downhill simplex (Acutis 2006; Nelder 1965), which generates a simplex (a geometrical figure with N+1 vertexes, with N as the parameter number under calibration). Average Root Mean Square Error (RMSE), between simulated and observed phenological data was set as objective function evaluated after each simulation run. The automatic optimization ended when the difference of RMSE between consecutive simulations felt below a tolerance threshold; 3 simplexes of 333 iterations each were set. Phenological model was validated on the same set of field experiments, covering the 20-year period. Model performance was assessed by comparing DAS to reach simulated and observed BBCH stages, via RMSE.

Water stress calculation

The calculation of Relative Soil Water Content (RSWC) on day *i* for each experiment was carried out according to the formula reported by (Gardin et al. 2021), as follows:

$$RSWC_i = VC_i \times (0.5 + 0.5 \times AW_i) + (1 - VC_i) \times AW_i$$

Where VC_i and AW_i are respectively the Vegetation Cover and the Available Water at day *i*. VC was determined by modeling a Light Interception (LI) curve, as a function of wheat phenological development (BBCH scale). LI bi-phasic logistic model curve was constructed by combining data from published green LAI dynamics curves, visual phenological archives, also through application of the Beer-Lambert law (fixed reference points were established for key

BBCH stages, based on phenological observations and literature synthesis) (Graf et al. 2023; Rivas et al. 2024; Goh et al. 2022; 2024). From potential LI curve thus obtained, a LI curve limited by WS was calculated, by multiplying potential LI by the RSWC on the previous day. LI curve limited by WS was directly used as VC. AW was determined by dividing the rolling sum (15 days) of precipitation by the sum of ET0. Water Stress (WS) at day *i* was computed as follow:

$$WS_i = 1 - RSWC_i$$

Water stress and phenology relationship assessment

Sliding windows of Pearson’s correlation coefficients were calculated between WS experienced during each phenological phase and the corresponding phase duration across all years. This analysis aimed to assess the impact of WS on the duration of phenological phases and to derive a phase-specific sensitivity index quantifying the potential influence of WS on developmental timing. Specifically, wheat life cycle was divided into four periods, based on the BBCH scale: early (BBCH 00–20), tillering (BBCH 20–30), middle (BBCH 30–55), and late (BBCH 55–89). Starting from observed phenological data we calculated the Pearson correlation coefficient (*r*) between the weekly rolling mean of water stress (waterStressRollmean) and the duration of that period, at each 5% interval of period completion (expressed in chronological time). Finally, to represent the entire crop cycle on 0–100% scale, these four periods were merged by aligning their individual completion percentages according to the average DAS at which transitions between periods occurred, preserving the chronological structure of the phenological development.

Results and Discussion

Phenological model

Calibrated parameters are reported in table 1. Weekly observed and simulated phenology was compared computing RMSE between observed and simulated Days After Sowing (DAS) necessary to reach the various BBCH stages (Figure 1). The phenology model incorporating temperature, vernalization, and photoperiod cues yielded a mean RMSE of 13.2 ± 3.8 days across all experiments. It is important to contextualize this result within the scope and complexity of the modeling task, as this model simulates the entire phenological development from BBCH 00 (sowing) to BBCH 89 (full maturity). Consequently, RMSE reflects the cumulative deviation across multiple developmental stages, each with its own variability and sensitivity to environmental drivers, inherently increasing the difficulty of the simulation, as the model must accurately track the timing of numerous transitions rather than optimizing for single events. Moreover, observed phenological data used for model evaluation were collected on a weekly basis, introducing a temporal resolution of approximately $\pm 3\text{--}4$ days.

Tab.1 – Calibrazione dei parametri del modello fenologico.

Tab.1 – Calibrated model parameters.

Parameter	Value
Cycle length (GDD)	1469
Vernalization hours (n. of hours)	108
Photoperiod effect (%)	55
BBCH 10 (% of vegetative phase)	13
BBCH 20 (% of vegetative phase)	18
BBCH 30 (% of vegetative phase)	41
BBCH 45 (% of vegetative phase)	62
BBCH 55 (% of vegetative phase)	65
BBCH 65 (% of total life cycle)	75
BBCH 75 (% of reproductive phase)	24
BBCH 85 (% of reproductive phase)	47

In summary, despite the model showed a good level of accuracy, there’s potential for improvement in capturing the full range of phenological plasticity given by environmental factors. Incorporating a water stress factor could enhance the model’s responsiveness to water-limited conditions and potentially reduce prediction errors. As a first step toward this goal, the punctual 20-year dataset available in this study offered a unique opportunity to investigate and quantify the relationship between WS and the duration of phenological phases across the crop life cycle.

Water stress calculation

Daily WS for each year was estimated by integrating precipitation and ET₀ data with VC dynamics, the latter derived from LI curve, which in turn was inferred from the simulated BBCH stage. As examples, obtained results for three agronomic seasons, showing contrasting dynamics in terms of WS, and thus highlighting the experimental variability in the dataset, are reported in Figure 2. In 2003-2004, WS levels were mostly reduced along the life cycle, except for some transient and rapid bursts (as reflected by a close alignment between the potential and stressed LI curves) , at least until BBCH 70, after which stress increased in frequency. 2006-2007 agronomic season, in addition to terminal drought, showed pronounced and prolonged WS from the beginning till the end of tillering. Potential and limited LI curves significantly diverged, suggesting a strong physiological response. The 2019-2020 season presented an early-onset of intense WS, already from crop emergence (BBCH 10), continuously till booting stage (BBCH 40), resulting in a sharp drop in light interception. Then, WS progressively reduced to zero during ripening phase. These contrasting patterns across the three seasons demonstrated the informative variability of the 20-year dataset, essential for evaluating the impact of WS on phenology. The presence of both mild and severe stress scenarios across different crop stages provided a robust basis for quantifying WS–phenology relations and for defining a “water stress factor” to be incorporated as a dynamic driver of crop phenological development.

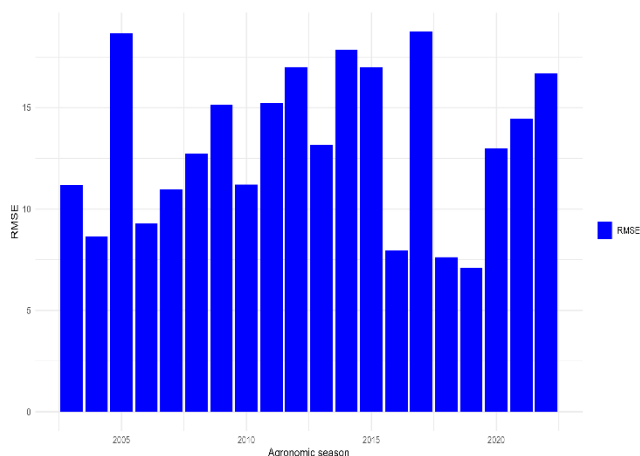


Fig.1 – RMSE calcolato tra i dati osservati dal bollettino fenologico settimanale e quelli simulati dal modello, espresso come Days After Sowing (DAS) necessari al raggiungimento delle varie fasi BBCH. Fig.1 - RMSE between Days After Sowing (DAS, necessary to reach the various BBCH stages) observed in the weekly phenological bulletin and simulated by the phenological model.

Water stress and phenology relationship

Wheat life cycle was divided into early (BBCH 00–20), tillering (BBCH 20–30), middle (BBCH 30–55), and late (BBCH 55–89) period. Combining agronomic seasons in the 20-year dataset, for each period, Pearson correlation coefficient (r) between the weekly rolling mean of water stress (waterStressRollmean) and the duration of the period itself was calculated, at each 5% interval of period completion (expressed in chronological time). Finally, to represent the entire crop cycle on a unified 0–100% scale, these four periods were merged by aligning their individual completion percentages according to the average DAS at which transitions between periods occurred, preserving the chronological structure of the phenological development. Results are presented in Figure 3. The results obtained by combining 20 years of data in the same experimental site showed that the correlation between WS and phenology varied along the crop cycle, both in terms of direction and intensity. Specifically, a strong positive correlation between WS and phenophase duration was observed in the initial phases, immediately after emergence (probably attributable to a difficulty for the crop to produce new leaves and vegetation cover in conditions of water scarcity), followed by a reversal of the trend as the beginning of tillering approached. A new shift of r values towards a positive sign was observed, at first, immediately after heading followed, subsequently, by the progressive intensification of negative r values, as the maturation phase approached (a typical condition of terminal drought in the Mediterranean basin, characterized by a well-known tendency of pushing wheat towards early maturity). Overall, results showed the tendency of the crop to alternate an initial phases of drought avoidance, in which phenology was slowed down, with a phase of drought escape, in which the opposite behavior of accelerating phenology was implemented.

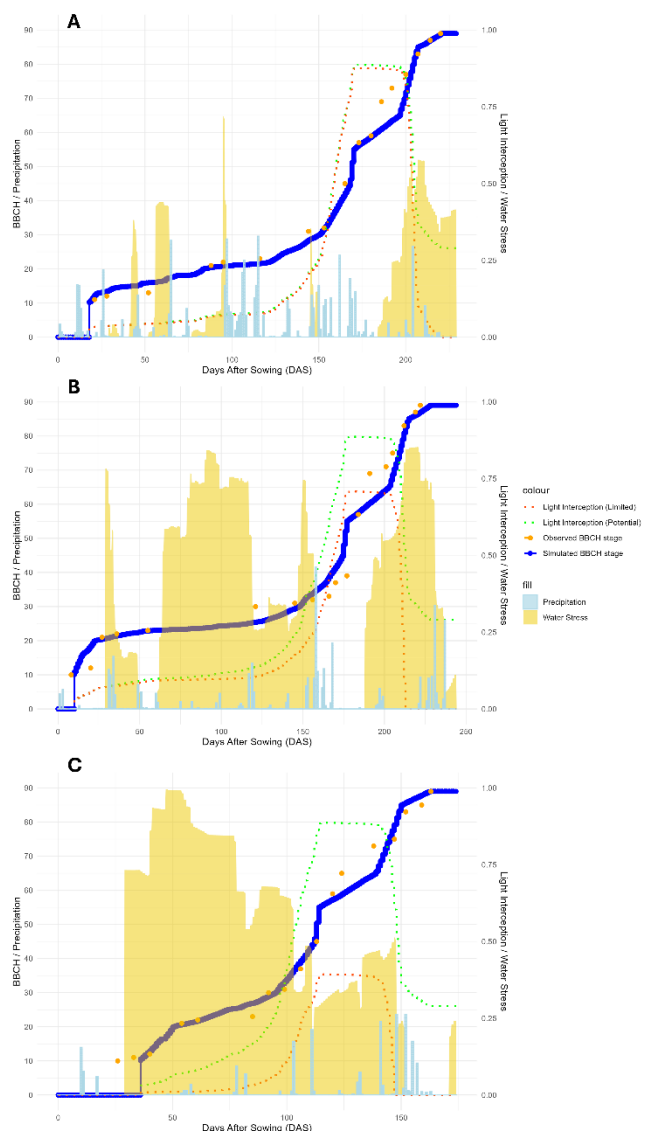


Fig.2 – Water stress calculated for each day along the crop cycle. In parallelo, sono riportati: la progressione fenologica simulata (linea blu), i dati fenologici osservati (punti arancioni), la curva di intercettazione della luce potenziale (linea tratteggiata verde) e limitata da water stress (linea tratteggiata arancione), e le piogge durante il ciclo (istogrammi azzurri). Tre stagioni agronomiche sono riportate come esempio: 2003-2004 (A), 2006-2007 (B), 2019-2020 (C).

Fig.2 - Water stress calculated for each day along the crop cycle. In parallel, the following are shown: simulated phenological progression (blue line), observed phenological data (orange dots), potential light interception curve (green dashed line), light interception curve limited by water stress (orange dashed line), and daily precipitation during the cycle (light blue bars). Three growing seasons are presented as examples: 2003–2004 (A), 2006–2007 (B), and 2019–2020 (C).

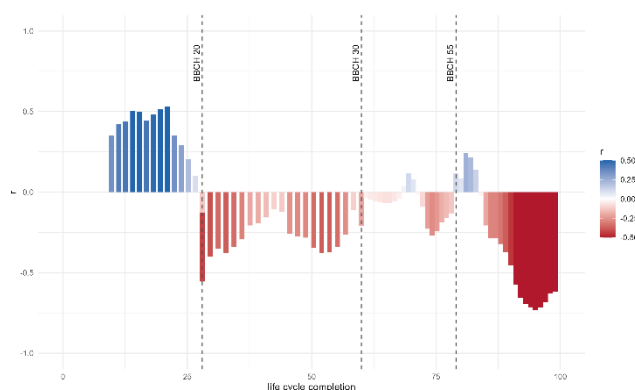


Fig.3 – media mobile settimanale della correlazione (r di Pearson) tra water stress e durata della fase fenologica considerata

Fig.3 - weekly moving average of the correlation (Pearson's r) between water stress and duration of the considered phenological phase

Conclusions

Incorporating a “water stress factor” could enhance the phenological model’s responsiveness to water-limited conditions and potentially reduce prediction errors. As a first step toward this goal, the punctual 20-year dataset available in this study offered a unique opportunity to investigate and quantify the relationship between WS and the duration of phenological phases across wheat life cycle. This analysis will be essential to inform the development of a more physiologically realistic model capable of capturing the effects of WS on phenological dynamics.

References

- Acutis, M., Confalonieri, R., 2006. “Optimization Algorithms for Calibrating Cropping Systems Simulation Models. A Case Study with Simplex-Derived Methods Integrated in the WARM Simulation Environment.” *Ital. J. Agrometeorol.* 11:26–34.
- Chuine, Isabelle, and Jacques Régnière. 2017. “Process-Based Models of Phenology for Plants and Animals.” *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 48:159–82. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316>.
- Farooq, Muhammad, Mubshar Hussain, Kadambot H M Siddique, Muhammad Farooq, Mubshar Hussain, and Kadambot H M Siddique. 2014. “Drought Stress in Wheat during Flowering and Grain-Filling Periods Drought Stress in Wheat during Flowering and Grain-Filling.” *Critical Reviews in Plant Sciences* 33 (4): 331–49. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291>.
- Gardin, L., M. Chiesi, L. Fibbi, L. Angeli, B. Rapi, P. Battista, and F. Maselli. 2021. “Simulation of Soil Water Content through the Combination of Meteorological and Satellite Data.” *Geoderma* 393 (July). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115003>.
- Goh, Bing Bing, Peter King, Rebecca L. Whetton, Sheida Z. Sattari, and Nicholas M. Holden. 2022. “Monitoring Winter Wheat Growth Performance at Sub-Field Scale Using Multitemporal Sentinel-2 Imagery.” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 115 (December). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103124>.
- Goh, Bing Bing, Sheida Z. Sattari, Chris J. Bleakley, and Nicholas M. Holden. 2024. “Mapping Winter Wheat Crop Traits Dynamic Change and Growth Performance for Variable Rate Application Using Sentinel-1 and Sentinel-2.” *Geomatica* 76 (2). <https://doi.org/10.1016/j.geomat.2024.100018>.
- Graf, Lukas Valentin, Quirina Noëmi Merz, Achim Walter, and Helge Aasen. 2023. “Insights from Field Phenotyping Improve Satellite Remote Sensing Based In-Season Estimation of Winter Wheat Growth and Phenology.” *Remote Sensing of Environment* 299 (December). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113860>.
- Herndl, Markus, Jeffrey W. White, L. A. Hunt, Simone Graeff, and Wilhelm Claupein. 2008. “Field-Based Evaluation of Vernalization Requirement, Photoperiod Response and Earliness per Se in Bread Wheat (*Triticum Aestivum* L.).” *Field Crops Research* 105 (3): 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.10.002>.
- Ihsan, Muhammad Z., Fathy S. El-Nakhlawy, Saleh M. Ismail, Shah Fahad, and Ihsanullah Daur. 2016. “Wheat Phenological Development and Growth Studies as Affected by Drought and Late Season High Temperature Stress under Arid Environment.” *Frontiers in Plant Science* 7 (June 2016): 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00795>.
- Lieth, H. 1974. “Purposes of a Phenology Book.” In *Phenology and Seasonality Modeling*, edited by Springer. Berlin.
- McMaster, Gregory S., Debora A. Edmunds, Roger Marquez, Scott Haley, Gerald Buchleiter, Patrick Byrne, Timothy R. Green, et al. 2019. “Winter Wheat Phenology Simulations Improve When Adding Responses to Water Stress.” *Agronomy Journal* 111 (5): 2350–60. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.09.0615>.
- McMaster, Gregory S., Jeffrey W. White, L. A. Hunt, P. D. Jamieson, S. S. Dhillon, and J. I. Ortiz-Monasterio. 2008. “Simulating the Influence of Vernalization, Photoperiod and Optimum Temperature on Wheat Developmental Rates.” *Annals of Botany* 102 (4): 561–69. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn115>.
- McMaster, Gregory S., and W. W. Wilhelm. 1997. “AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY Growing Degree-Days: One Equation, Two Interpretations.” *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 87.
- Meier, U. 1997. *Growth Stages of Mono- and Dicotyledonous Plants*. Edited by Blackwell Wissenschafts-Verlag. Berlin.
- Nelder, J.A., Mead, R. 1965. “A Simplex Method for Function Minimization Comput.” *The Computer Journal* 7 (4): 308–13.
- Pasquini, Alessandra. 2006. *Il Rilevamento Agrofienologico: Dall'osservazione in Campo Alla Registrazione Dei Dati*. Edited by alimentari e forestali. CRA Ufficio centrale di ecologia agraria. Ministero delle politiche agricole.
- Qaseem, Mirza Faisal, Rahmatullah Qureshi, and Humaira Shaheen. 2019. “Effects of Pre-Anthesis Drought, Heat and Their Combination on the Growth, Yield and Physiology of Diverse Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Genotypes Varying in Sensitivity to Heat and Drought Stress.” *Scientific Reports* 9 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43477-z>.
- Rivas, Henry, Nicolas Delbart, Fabienne Maignan, Emmanuelle Vaudour, and Catherine Ottlé. 2024. “Country-Scale Crop-Specific Phenology from Disaggregated PROBA-V.” *Remote Sensing* 16 (23). <https://doi.org/10.3390/rs16234521>.
- Schwartz, M. D. 2003. *Phenology: An Integrative Environmental Science*. 3rd ed. Vol. 132. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Simane, B., J. M. Peacock, and P. C. Struik. 1993. “Differences in Developmental Plasticity and Growth Rate among Drought-Resistant and Susceptible Cultivars of Durum Wheat (*Triticum Turgidum* L. Var. Durum).” *Plant and Soil* 157:155–66.
- Slafer, Gustavo A. 1994. “Sensitivity of Wheat Phasic Development to Major Environmental Factors: A Re-Examination of Some Assumptions Made by Physiologists and Modellers.” *Aust. J. Plant Physiol.* Vol. 21.

INTEGRATING ECONOMIC OPTIMIZATION AND LIFE CYCLE ASSESSMENT IN ITALIAN WHEAT FARMING: A WEB-BASED INTERFACE

INTERFACCIA WEB PER LE AZIENDE AGRICOLE ITALIANE CHE PRODUCONO GRANO: SOSTENIBILITÀ ECONOMICA E AMBIENTALE

Marco Simonetti¹, Alessandro Manna¹, Edmondo Di Giuseppe^{1*}, Concetta Cardillo², Antonella Del Signore³, Arianna Di Paola¹, Antonio Gattone³, Massimiliano Pasqui¹, Sara Quaresima¹, Ilaria Zappitelli¹, Piero Toscano⁴, Piera Cascioli³, Alessandro Ceccarelli³, Gianfranco Giulioni³

¹ Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Bioeconomia, Roma

² Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA), Roma

³ Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara

⁴ Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Bioeconomia, Firenze

* edmondo.digiuseppe@cnr.it

Abstract

This work presents a freely accessible web interface designed to enhance awareness among local stakeholders regarding the environmental footprint of wheat production. Users input key parameters, including province, altimetry, expected wheat selling price, and fertilizer, herbicide, and insecticide unit costs. Upon submission, the system calculates the expected yield per hectare and the required input levels that maximize profit under three distinct climatic conditions: favorable, normal, and unfavorable. The computations are based on an economic maximization framework. The parameters are estimated at the province-altimetry level using approximately 20,000 observations of durum wheat-producing farms from 2008 to 2022 taken from the Rete di Informazione Contabile Agricola (RICA). Finally, the computed input levels are integrated into a Life Cycle Assessment (LCA) to quantify key environmental sustainability indicators.

Parole chiave

Valutazione del ciclo di vita, massimizzazione vincolata, stima dei minimi quadrati, gestione dell'azienda agricola

Keywords

Life cycle assessment, constrained optimization, least square estimation, farm management

Introduction

Sustainable agriculture has gained increasing importance because of climate change, environmental degradation, and food security challenges. Adopting green agricultural practices involves methods that reduce environmental impact while maintaining productivity. However, a fundamental question arises: are farmers motivated by sustainability concerns, or do they adopt green practices primarily due to economic incentives and government policies?

Various policies have been adopted in many parts of the world to promote sustainable agriculture. Financial incentives, regulatory frameworks, and technical assistance are commonly used tools. For example, the United States Department of Agriculture (USDA) provides financial grants and research funding to encourage sustainable practices (USDA 2024). Similarly, the European Union's Common Agricultural Policy (CAP) supports agri-environmental measures by incentivizing farmers who adopt green methods. In India, the National Innovations in Climate Resilient Agriculture (NICRA) initiative supports farmers in adapting to climate change by providing knowledge and technologies for resilient agriculture (NICRA 2022).

However, while government policies play an important role, farmers' decisions are often driven by economic rationality. Studies indicate that farmers conduct a cost-benefit analysis before adopting green practices. Farmers are more likely to implement sustainability measures if they offer long-term

economic benefits such as soil health, higher yields, or cost savings (Vapa Tankosic et al. 2023).

Behavioural factors also play a role in the adoption of green practices. Dessart et al. (2019) surveyed the behavioral factors affecting the choice of sustainable agriculture practices. The authors reviewed two decades of literature, providing taxonomy and reporting policy options to increase the adoption of each item.

Creemers et al. (2019) reported an example in this direction concerning Belgian sugar beet farmers, who tend to maintain green practices voluntarily because they perceive their supply chain as sustainable.

The first step in fostering the self-adoption of green practices is increasing farmers' awareness of the environmental impacts of their current practices.

To this aim, we describe a Graphical User Interface (GUI) showing such impacts for profit-maximizing farms operating in Italian provinces and at a given altimetric zone.

Materials and methods

The main idea behind the GUI is to provide a benchmark given by a farm whose objective is exclusively profit maximization.

The model is formulated considering the profit per hectare. It outputs the level of production inputs per hectare to be used to achieve the best economic result.

We start by considering that the produced quantity per hectare (the yield) can be affected by several stress factors,

such as the shortage of nutrients, weeds, insects, water availability, and so on. In the absence of stress factors, the yield is maximum. The difference between maximum yield and the realized yield is known as the yield gap (ClimaTalk, 2024; van Ittersum et al. 2013; Devkota, 2024).

The lower script i indexes stress factors. In our model, each stress factor is tamed by a specific production input: herbicide vs weeds, insecticide vs insect, and so on.

We define the conditional yield as the yield obtained when only stress factor i is binding. The conditional yield is formulated as follows:

$$y_i(x_i) = \bar{y}[(1 - s_i) + s_i(1 - e^{-\lambda_i x_i})]$$

Where $\bar{y}$ is the highest attainable yield, x_i is the quantity of input against stress factor i , s_i is the yield lost if $x_i = 0$, and λ_i is the effectiveness of x_i in increasing the yield.

The calculations are based on the following formulation of the profit function:

$$\pi = p_w \min_i y_i(x_i) - \sum_i p_{x_i} x_i$$

Where π is profit, p_w is the wheat price, $y_i(x_i)$ is the conditional yield defined above, and p_{x_i} is the price of a unit of input x_i .

The parameters $\bar{y}$, s_i , and λ_i are estimated at the provincial-altimetric level using data from the Agricultural Accounting Information Network (RICA), a statistical survey conducted annually by the Council for Agricultural Research and Analysis of Agricultural Economics (CREA). Our analysis focuses on durum wheat producing farms from 2008 to 2022, pooling approximately 20000 observations after data quality checks. We estimate for each Italian province-altimetric zone the maximum yield ($\bar{y}$), and the yield-fertilizer (s_1 and λ_1), the yield-herbicide (s_2 and λ_2), and the yield-insecticide (s_3 and λ_3) relationships, which are then recorded in a table. The table is queried by the GUI to obtain the parameters for the profit maximization function.

Fig. 1 shows the GUI web page faced by the user at the beginning.

The GUI, developed using HTML and PHP, allows the user to input geographic and economic parameters such as:

- province;
- terrain position (plain, hill, or mountain);
- prices for wheat, fertilizer, herbicide, and insecticide.

See Fig. 2.

Fig.1 – The Graphical User Interface (GUI) before being filled by the user

Fig.1 – L'interfaccia grafica (GUI) prima di essere compilata dall'utilizzatore

Fig.2 – The filled Graphical User Interface (GUI)

Fig.2 – L'interfaccia grafica (GUI) compilata

The PHP form retrieves the user's inputs. The geographic parameters serve to query the previously mentioned table to obtain the $\bar{y}$, s_i , and λ_i of the specified zone. These parameters, together with the prices, are sent to a backend Python script that performs the optimization. All the data

submitted through the forms is stored in an SQL database for statistical purposes.

The optimization process returns the estimated yield and profit, as well as the level of production inputs needed to achieve the results. All these outputs are displayed in a new PHP page (see Fig. 3). As mentioned above, this informs the user on how to optimize production inputs in a standard profit-maximizing farm growing its durum wheat in the specified area.

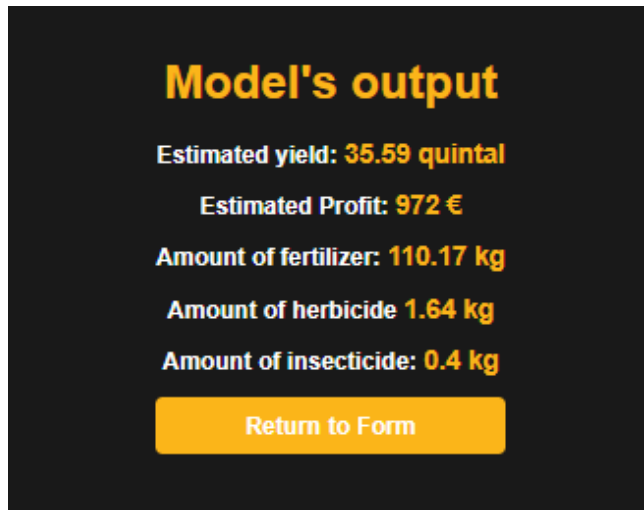


Fig. 3 – The filled Graphical User Interface (GUI)

Fig. 3 – L'interfaccia grafica (GUI) compilata

Results and discussion

The result page will be enriched with the output of a second backend Python script performing the Life Cycle Assessment (LCA) analysis. This script takes the production inputs delivered by the optimization procedure.

We use the ReCiPe 2016 methodology (Huijbregts *et al.*, 2016 and 2017) to achieve the result.

ReCiPe provides impact factors both at the Midpoint and at the Endpoint. At the midpoint level, each method delivers a physical quantity that is generally the most damaging substance for the considered category. At the Endpoint level, each method is associated with one of three considered areas of protection: human health, ecosystem quality, and resource scarcity.

The damage to each of these three areas are measured as follows:

- Damages to human health are measured by an indicator called “Disability Adjusted Life Years” (DALY) that gives the time (in years) that are lost or that a person is disabled due to a disease or accident.
- Damages to ecosystem quality are measured by the number of local species lost yearly.

- Damages to resource scarcity are computed as the extra costs for future mineral and fossil resource extraction. It is expressed in Dollars.

In Endpoint analysis, each ReCiPe method delivers a result expressed in one of these three units of measure.

This allows a nested aggregation process that identifies the damages to some identified subsystems.

Although the ReCiPe method provides tens of sustainability indicators, we decided to include the damage to humans and ecosystems in addition to the result already displayed in Fig. 3. We aim to keep the GUI understandable and straightforward to non-expert final users.

Fig. 4 reports the framework we built to perform LCA.

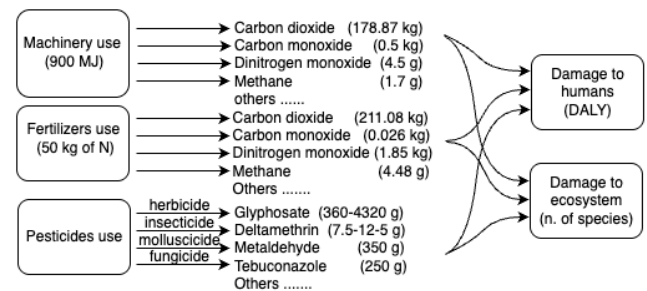


Fig. 4 – The LCA framework implemented for including results in the GUI

Fig. 4 – Analisi del Ciclo di Vita e risultati da includere nell'interfaccia grafica

In the case of Fig. 4, for example, the GUI user will be informed that his/her activity, when performed with the goal of maximizing profit, will cause the following damages:

- DALY=0.0008821667 (about 7:30 hours)
- Species lost per year = 0.000004391925.

This information will hopefully increase farmers' awareness of sustainability and draw a greater interest in sustainable production practices.

Acknowledgment

This research was conducted as part of the project “ECOWHEATALY: Evaluation of policies for enhancing sustainable wheat production in Italy” funded by the European Union-Next Generation EU under the call issued by the Minister of University and Research for the funding of research projects of relevant national interest (PRIN) - Project code: PRIN 202288L9YN.

References

- ClimaTalk 2024. What is the yield gap? URL <https://climataalk.org/2024/09/09/yield-gap/>
- Creemers, S., S. V. Passel, M. Vigani, and G. Vlahos (2019). Relationship between farmers' perception of sustainability and future farming strategies: A commodity-level comparison. *AIMS Agriculture and Food* 4(3), 613–642. <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/agrfood.2019.3.613>.
- Dessart, F. J., J. Barreiro-Hurlé, and R. van Bavel (2019, 06). Behavioural factors affecting the adoption of sustainable farming practices: a policy-oriented review. *European Review of Agricultural Economics* 46(3), 417–471. <https://doi.org/10.1093/erae/jbz019>.
- Devkota, Krishna Prasad, Abdelkrim Bouasria, Mina Devkota, and Vinay Nangia. 2024. "Predicting wheat yield gap and its determinants combining remote sensing, machine learning, and survey approaches in rainfed Mediterranean regions of Morocco." *European Journal of Agronomy* 158:127195. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030124001163>.
- Huijbregts, Mark A. J., Zoran J. N. Steinmann, Pieter M. F. Elshout, Gea Stam, Francesca Verones, Marisa Vieira, Michiel Zijp, Anne Hollander, and Rosalie van Zelm. 2016. ReCiPe (2016). A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization. Technical report RIVM 2016-0104. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>. Bilthoven, The Netherlands: Dutch National Institute for Public Health and the Environment.
- Huijbregts, Mark A. J., Zoran J. N. Steinmann, Pieter M. F. Elshout, Gea Stam, Francesca Verones, Marisa Vieira, Michiel Zijp, Anne Hollander, and Rosalie van Zelm (2017). "ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22, no. 2 (February): 138–147.
- NICRA. 2022. National Initiative on Climate Resilient Agriculture. <http://www.nicra-icar.in>. Indian Council of Agricultural Research. <http://www.nicra-icar.in>
- USDA. 2024. Sustainable Agriculture Programs. <https://www.nifa.usda.gov/grants/programs/sustainable-agriculture-programs>. USDA National Institute of Food and Agriculture.
- van Ittersum, Martin K., Kenneth G. Cassman, Patricio Grassini, Joost Wolf, Pablo Tittonell, and Zvi Hochman. 2013. "Yield gap analysis with local to global relevance A review." *Crop Yield Gap Analysis – Rationale, Methods and Applications, Field Crops Research* 143:4–17. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037842901200295X>.
- Vapa Tankosic, Jelena, Svetlana Ignjatijević, Nemanja Lekić, Nataša Kljajić, Miloš Ivaniš, Slobodan Andžić, and Dejan Ristić. 2023. "The Role of Environmental Attitudes and Risk for Adoption with Respect to Farmers' Participation in the Agri-Environmental Practices." *https://www.mdpi.com/2077-0472/13/12/2248*, *Agriculture* 13 (12). <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/12/2248>.

EFFICIENCY OF WATER USE FOR IRRIGATION IN A HAZELNUT ORCHARD WITH DIFFERENT PLANTING DENSITIES AND TWO IRRIGATION REGIMES

EFFICIENZA DELL'USO DELL'ACQUA PER L'IRRIGAZIONE IN UN NOCCIOLETO CON DIVERSE DENSITÀ DI PIANTAGIONE E DUE REGIMI DI IRRIGAZIONE

Chiara Traini ¹, Simona Lucia Facchin ¹, Bruno di Lena², Daniela Farinelli ¹

1. Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali, Università degli studi di Perugia. chiara.traini@dottorandi.unipg.it, daniela.farinelli@unipg.it, simonalucia.facchin@studenti.unipg.it

2 Regione Abruzzo – Dipartimento Agricoltura. Ufficio direttiva qualità dei suoli e servizi agrometeo. bruno.dilena@regione.abruzzo.it

Abstract

This study examines irrigation management in a super-intensive hazelnut (*Corylus avellana* L.) orchard in its seventh year after planting. The study aims to determine the orchard's water requirements using hydrological balance and a soil moisture monitoring system integrated with the irrigation system. Additionally, Water Use Efficiency (WUE) was evaluated as a key indicator of irrigation efficiency, considering different planting densities and irrigation regimes for the 2023 and 2024 seasons. The research focuses on Tonda Franciscana® hazelnut trees, comparing two planting densities (1250 and 625 trees per hectare) and two irrigation rates (1.6 l/h and 2.4 l/h) for each density.

Parole chiave

Alta densità, irrigazione di precisione

Keywords

High density, precision irrigation

Introduzione

Il nocciolo (*Corylus avellana* L.) è una delle specie più importanti al mondo nell'ambito del settore della frutta secca, per l'ampio utilizzo del suo frutto a livello nutrizionale, non che farmaceutico e cosmetico (Ortega-Farias *et al.*, 2020). Per la produzione di nocciole, la disponibilità idrica è uno degli aspetti più importanti da considerare in quanto regola la relazione tra l'attività vegetativa e produttiva della pianta, condizionando la qualità e quantità della produzione (Bignami *et al.*, 2000). Lo sviluppo di una corilicoltura intensiva, con l'aumento del numero di piante per ettaro (Portarena *et al.*, 2024), e la minore disponibilità di acqua per uso irriguo, assieme alla diminuzione delle piogge durante il ciclo vegeto – produttivo del nocciolo (Di Lena *et al.*, 2022; Vinci *et al.*, 2023), hanno reso necessaria l'applicazione di tecnologie per l'irrigazione di precisione.

Materiali e Metodi

Il nocciolo è situato nel Comune di Deruta (PG); in Umbria. La superficie totale è di circa 2300 m² e si compone di 6 filari distanti 4 metri l'uno dall'altro, ciascuno contenente 43 piante, suddivise in tre tesi di densità differenti: 4mx1m (2500 piante/ha), 4mx2m (1250 piante/ha), definito sesto di 4mx4m (625 piante/ha) (Fig.2). Nel presente lavoro si riportano i risultati inerenti alla densità 1250 piante/ha e 623 piante/ha. Ciascuna tesi di densità a sua volta è suddivisa in due tesi irrigue, che si differenziano per

la portata degli erogatori, rispettivamente di 1.6 L/h e 2,4 L/h (Fig.1). Il sistema irriguo adottato è la subirrigazione. Per il calcolo della Water Use Efficiency (WUE), sono stati considerati i seguenti parametri: produzione (Kg), acqua distribuita e acqua effettivamente utilizzata per entrambe le portate e per ciascuna tesi. Il volume irriguo è stato somministrato sulla base del fabbisogno idrico della coltura, per cui è stato calcolato il bilancio idrologico secondo il metodo FAO56, impostato per avere sempre almeno il 67% di umidità del suolo. Il parametro di umidità del suolo è stato monitorato dal sistema di monitoraggio "TORO ® Tempus Air". I dati sono stati sottoposti ad ANOVA e le medie confrontate con il test di Duncan, utilizzando il programma "InfoStat 2019 software" (Gruppo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina). Lo studio si riferisce a due annualità 2023 e 2024.

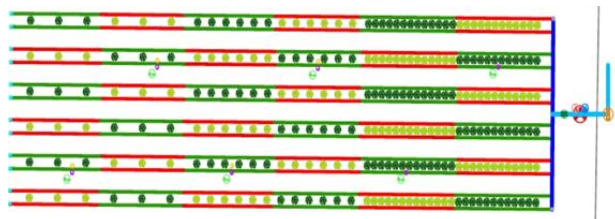


Fig.1 - Rappresentazione grafica dell'impianto irriguo nel nocciolo sperimentale. Le sezioni di ala evidenziate in rosso presentano gocciolatori con portata di 1,6 l/h, mentre quelli in verde una portata di 2,4 l/h. (Fonte: Università degli studi di Perugia).

Fig. 1 - Graphical representation of the irrigation system in the experimental hazel grove. The sections of the wing marked in red have drippers with a flow rate of 1.6 l/h, while those in green have a flow rate of 2.4 l/h. (Source: University of Perugia).



Fig.2 - Immagine satellitare dell'appezzamento nel quale è situato l'impianto sperimentale di noccioli dell'unità di ricerca "Colture Arboree" del DSA3 (Fonte:elaborazione propria in QGIS)..

Fig.2 - Satellite image of the orchard in which the plant is located experimental of hazelnut from the DSA3 research unit "Tree Crops" (Source: own development in QGIS).

Risultati e Discussione

Le due annualità in studio hanno mostrato un andamento climatico diverso che ha condizionato l'inizio della stagione irrigua. In particolare, nel 2023 le piogge si sono concentrate nel mese di maggio e nei primi giorni di luglio, mentre nel 2024 i mesi primaverili sono risultati caratterizzati da una piovosità costante (Fig. 3). I mesi di luglio e agosto 2024 sono risultati essere molto più caldi (con una temperatura massima media di 36-37° C) rispetto a quelli del 2023 (34° C in media). Di conseguenza, l'evapotraspirazione massima ET m è stata pari, mediamente in luglio e agosto, a 4,5 mm/giorno nel 2023 e a 5 mm/giorno nel 2024 (Fig. 3). Le piogge utili sono state pari a 99 mm nel 2023 e a 22 mm nel 2024.

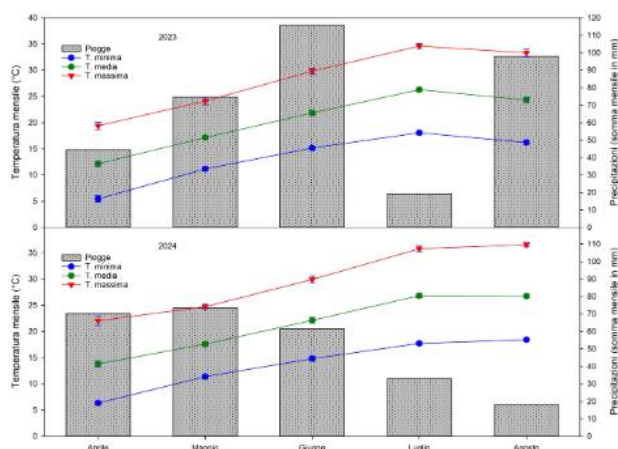


Fig.3 - Andamento delle temperature e delle piogge durante la stagione vegeto-produttiva nel 2023 (in alto) e 2024 (in basso).

Fig.3 - Trend of temperatures and rainfall during the vegeto-productive season in 2023 (top) and 2024 (bottom).

L'inizio della stagione irrigua si ha in corrispondenza del momento in cui il contenuto di acqua del terreno, monitorato, tramite i sensori di umidità, a 30 cm di profondità, aveva quasi raggiunto il 67%.

Il bilancio idrologico per la coltura irrigata, calcolato secondo il modello FAO56 (Allen et al., 1998) e impostato per avere sempre almeno il 67% dell'acqua disponibile nel terreno agrario, ha indicato, nel 2023, un fabbisogno irriguo stagionale pari a 2737 m³ d'acqua, con 99 mm di piogge utili (Fig.4-5); mentre, nel 2024, i valori ottenuti sono rispettivamente 3808 m³ d'acqua per la densità 1250 piante/ha e 3663 m³ per la densità 625 piante/ha (Fig. 6-7). Invece, considerando l'acqua effettivamente distribuita, in base al monitoraggio con i sensori al suolo, alle piante appartenenti nella densità di 1250 piante/ha è stata somministrata una quota d'acqua pari a 1495 m³ nel 2023 e 1887 m³ nel 2024, mentre per le piante con densità 625 piante/ha i valori relativi sono di 1329 m³ per il 2023 e 994m³ per il 2024. La differenza di volumi determinati con il bilancio idrologico e con il monitoraggio dell'umidità del suolo con i sensori appare importante.

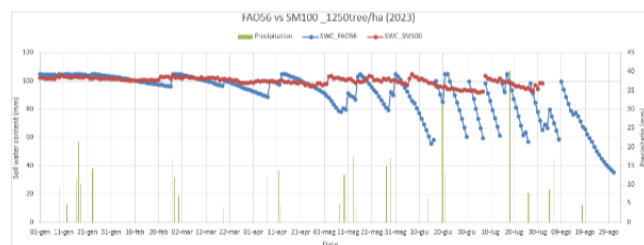


Fig.4 - Fabbisogno irriguo stagionale calcolato nel 2023 per la densità di 1250 piante/ha (in rosso l'acqua disponibile monitorata con i sensori; in blu quella calcolata con il metodo FAO, e in verde le precipitazioni)

Fig.4 - Seasonal irrigation needs calculated in 2023 for the density of 1250 plants/ha (in red the available water monitored with sensors; in blue that calculated with the FAO method, and in green the precipitation)

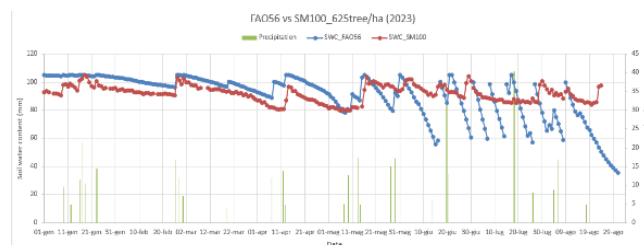


Fig.5 - Fabbisogno irriguo stagionale calcolato nel 2023 per la densità di 625 piante/ha (in rosso l'acqua disponibile monitorata con i sensori; in blu quella calcolata con il metodo FAO, e in verde le precipitazioni)

Fig.5 - Seasonal irrigation needs calculated in 2023 for the density of 625 plants/ha (in red the available water monitored with sensors; in blue that calculated with the FAO method, and in green the precipitation)

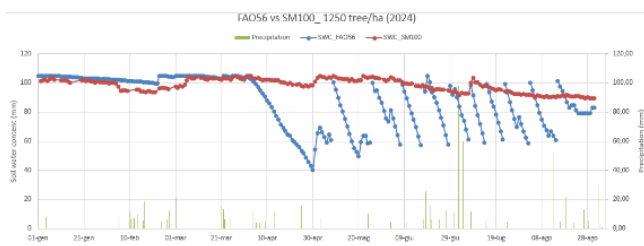


Fig.6 - Fabbisogno irriguo stagionale calcolato nel 2024 per la densità di 1250 piante/ha (in rosso l'acqua disponibile monitorata con i sensori; in blu quella calcolata con il metodo FAO, e in verde le precipitazioni)

Fig.6 - Seasonal irrigation needs calculated in 2024 for the density of 1250 plants/ha (in red the available water monitored with sensors; in blue that calculated with the FAO method, and in green the precipitation)

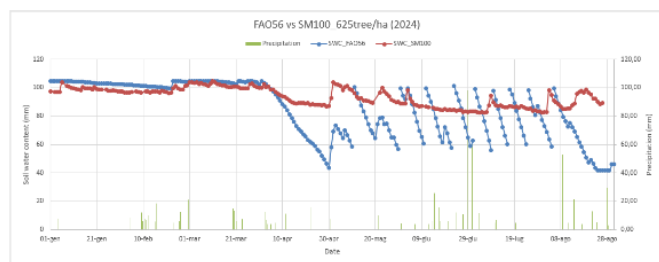


Fig.7 - Fabbisogno irriguo stagionale calcolato nel 2024 per la densità di 625 piante/ha (in rosso l'acqua disponibile monitorata con i sensori; in blu quella calcolata con il metodo FAO, e in verde le precipitazioni)

Fig.7 - Seasonal irrigation needs calculated in 2024 for the density of 625 plants/ha (in red the available water monitored with sensors; in blue that calculated with the FAO method, and in green the precipitation)

Analizzando la stagione irrigua 2023, si osserva che il contenuto idrico del terreno si è mantenuto sempre superiore al 50%, anche grazie agli apporti idrici naturali (precipitazioni) di fine giugno/inizio luglio. Quindi, nel 2023 l'impiego della sensoristica ha permesso un risparmio idrico del 45,4% per la densità di piantagione di 1250 piante/ha e del 50,4% per la densità di piantagione di 625 piante/ha; mentre nel 2024 ha permesso un risparmio idrico del 50,4% per la densità di piantagione di 1250 piante/ha e del 73% per la densità di piantagione di 625 piante/ha, grazie anche alla minore durata della stagione irrigua, iniziata solo al superamento della soglia di intervento.

Per calcolare quanta acqua è stata effettivamente utilizzata dalla pianta di nocciolo, è stata considerata l'area di suolo, espressa in m², realmente occupata dalla stessa, pari a 2,95 m² per il sesto d'impianto 4 m x 2 m e 3,58 m² per il sesto d'impianto 4 m x 4 m. Quindi è stato determinato il volume irriguo utilizzato con le due portate applicate di 1,6 l/h e 2,4 l/h, pari rispettivamente a 472 m³ /ha e 709 m³ /ha per la densità di piantagione di 625 piante/ha, e a 858 m³ /ha e 1287 m³ /ha per la densità di piantagione di 1250 piante/ha.

Tab.1 - Produzione di nocciole e WUE. le medie accompagnate da lettere diverse sono significativamente differenti per $p < 0.05$.

Tab.1 - Hazelnut production and WUE. the averages with different letters are significantly different for $P < 0.05$

Densità di piantagione (n. piante/ha)	Portata irrigua	Produzione di nocciole (kg/ha)	WUE (litri acqua/kg nocciole)
625	1,6 l/h	505 b	1007 a
	2,4 l/h	842 a	857 a
Media densità 625 piante/ha		674 B	932 A
1250	1,6 l/h	1349 a	643 b
	2,4 l/h	1506 a	864 a
Media densità 1250 piante/ha		1427 A	754 A
Media portata 1,6 l/h		927 B	825 A
Media portata 2,4 l/h		1174 A	861 A

La WUE è risultata, indipendentemente dalla portata irrigua adottata, pari a 932 litri di acqua per chilogrammo di nocciole nella densità di 625 piante/ha contro i 754 litri di acqua per chilogrammo di nocciole nella densità di 1250 piante/ha, senza differenze statisticamente significative tra le due tesi di densità. Emerge, dunque, che la tesi con 1250 piante/ha, permette un incremento produttivo senza che ci sia un peggioramento dell'efficienza d'uso dell'acqua.

Il diverso volume irriguo utilizzato dalle piante ha determinato incrementi significativi di produzione nella tesi con più bassa densità di piantagione (da 505 kg/ha a 842 kg/ha), dimostrando che una quota maggiore di acqua permette una maggiore produzione, senza variazioni nella WUE. Nella tesi ad alta densità invece, si osserva un incremento, statisticamente non significativo, accompagnato però da un aumento dei litri consumati per produrre un chilogrammo di nocciole (da 643 litri di acqua/chilogrammo di nocciole a 864 l/kg). Nella tesi con più alta densità di piantagione (1250 piante/ha), la maggiore portata irrigua ha determinato un incremento, non statisticamente significativo, della produzione dell'12% circa (da 1349 kg a 1506 kg), con un incremento dei litri di acqua necessari per produrre 1 kg di nocciole del 26% circa (da 643 l/kg a 864 l/kg) (Tab. 1).

Invece, nella tesi con più bassa densità di piantagione (625 piante/ha), l'effetto dell'incremento dei volumi irrigui, come detto, ha determinato un forte incremento di produzione, indicando che le esigenze irrigue sono soddisfatte con i volumi maggiori.

Conclusioni

Alla luce dei risultati ottenuti dal presente lavoro di tesi si può concludere che l'irrigazione di precisione, dotata di un sistema di monitoraggio del contenuto in acqua del suolo collegato al sistema di irrigazione, determina molteplici vantaggi. Tra questi, i principali sono il mantenimento dell'umidità del suolo entro range ottimali per evitare stress idrici al nocciolo, con pronta risposta alla domanda evapotraspirativa della pianta e un uso sostenibile della risorsa irrigua attraverso la distribuzione dell'acqua solamente quando si verificano condizioni idriche critiche per la coltura e in una quantità strettamente necessaria, riducendo al massimo le perdite per percolazione profonda.

Bibliografia

- Bignami, C., Cammilli, C., Moretti, G. e Romoli, F., (2000). "Irrigation of *Corylus avellana* L.: development and production of young plants". Acta Hort 537, ISHS2000.
- Di Lena, B., Curci, G., Vergni, L., Farinelli, D., (2022). "Climatic suitability of different areas in Abruzzo, central Italy, for the cultivation of hazelnut". Horticulturæ, vol. 8, ISSN: 2311-7524.
- Ortega-Farias, S., Villalobos-Soublett, E., Riveros-Burgosa, C., Zúñigac, M., Ahumada-Orellanad, L.E. (2020). "Effect of irrigation cut-off strategies on yield, waterproductivity and gas exchange in a drip-irrigated hazelnut (*Corylus avellana* L. cv.Tonda di Giffoni) orchard under semiarid conditions". Agricultural Water Management, 238, 106173.
- Portarena, S., Proietti, S., Moscatello, S., Zadra, C., Cinosi, N., Traini, C., Farinelli, D.(2024). "Effect of Tree Density on Yield and Fruit Quality of the Grafted Hazelnut Cultivar 'Tonda Francescana®'". Foods 2024, 13, 3307.
- Vinci, A., Traini, C., Portarena, S., Farinelli, D., (2023). "Assessment of the mid -season crop coefficient for the evaluation of water demand of young, grafted hazelnut trees in a high-density orchard". Water, special issue Model-Based Irrigation Management. Volume 15, Issue 9, 1683.