



## Atti del XXVI Convegno Nazionale di Agrometeorologia

# Approcci innovativi a supporto delle produzioni agrarie in un contesto climatico in evoluzione

**L'AQUILA, 5 - 7 Giugno 2024**

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

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari  
Università di Bologna



**CLIMA  
e  
TERRITORIO**



REGIONE  
ABRUZZO



ISBN 9788854971509

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

## Comitato Scientifico

Francesca Ventura

Gabriele Cola

Filiberto Altobelli

Anna Dalla Marta

Chiara Epifani

Federica Rossi

Emanuele Scalcione

Danilo Tognetti

## Comitato organizzatore

Bruno Di Lena

Domenico Giuliani

Nadia Di Bucchianico

Fabio Pietrangeli

Angelo Mazzocchetti

Gabriele Curci

Ana Amarillo

Cristiano Gala

Annalina Lombardi

Barbara Tomasetti

## Segreteria Organizzativa

Simone Falzoi

Tiziana La Iacona

Irene Vercellino

Bologna, 2024



**XXVI Convegno Nazionale di Agrometeorologia**

# **Approcci innovativi a supporto delle produzioni agrarie in un contesto climatico in evoluzione**

**L'AQUILA, 5 - 7 Giugno 2024**

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

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari

Università di Bologna



# Approcci innovativi a supporto delle produzioni agrarie in un contesto climatico in evoluzione

## SESSIONE 1 - Previsione e gestione delle avversità biotiche ed abiotiche in agricoltura

- Un framework operativo per il monitoraggio e la previsione della siccità  
*Arianna Di Paola, Edmondo Di Giuseppe, Ramona Magno, Sara Quaresima, Elena Rapisardi, Leandro Rocchi, Massimiliano Pasqui..... ..1*
- Strategie basate su dati per l'agricoltura di precisione: sviluppo di modelli di machine learning per il supporto decisionale in campo  
*Matteo Cardinali, Francesco Saverio Santaga, Mauro Roscini, Alessandro Vignati, Emanuele Ranieri, Cecilia Squeri, Diego Guidotti, Sara Antognelli.. ..6*
- Ottimizzazione del pest management per l'agricoltura sostenibile con l'IA attraverso il monitoraggio da remoto e la modellistica predittiva  
*Ascolese Roberta, Nugnes Francesco, Giuliano Langella..... ..11*
- Trend di temperatura a scala locale in aree mediterranee: analisi spaziotemporale dei dati acquisiti dalla rete agrometeorologica della Basilicata dal 2000 al 2023  
*Emanuele Scalcione, Pietro Dichio, Maria Lanfredi, Rosa Coluzzi, Vito Imbrenda , Caterina Samela..... ..16*
- Valutazione dell'hazard agrometeorologico in relazione a recenti calamità naturali dichiarate per l'Abruzzo  
*Giulia Maria Bellucci, Roberta Alilla, Flora De Natale, Barbara Parisse, Antonio Gerardo Pepe, Antonella Pontrandolfi..... ..21*
- Effetto dell'alluvione in Romagna del maggio 2023 sulle emissioni di N<sub>2</sub>O  
*Famulari D., Nardino M., Fiorini L., Boniello F.M., Mari M., Chieco C.....26*
- L' App Agroambiente Abruzzo  
*Fabio Pietrangeli - Angelo Mazzocchetti..... ..30*



Valutazione della vulnerabilità ai cambiamenti climatici delle specie arboree per la forestazione urbana <i>Cristiano Gala, Gabriele Curci, Loretta Pace, Alessandro Marucci, Dina del Tosto, Federico Falasca</i> .....	32
Valutazione dei gradi-giorno per colture primaverili, considerando soglie di temperatura superiori e tecniche di cut-off <i>Giovanni Maria Poggi, Luca Armadoro, Marco Vignudelli, Francesca Di Cesare, Francesca Ventura</i> .....	36
Analisi PCA (Principal Component Analysis) applicata allo studio delle principali caratteristiche della stagione pollinica del taxon <i>Olea europaea</i> (Ulivo) nel periodo 2010 - 2023 <i>Ciarrocchi Lucia, Bartolacci Silvia, Egidi Nadaniela, Leonesi Stefano, Olivieri Filippo, Tognetti Danilo, Trobiani Nadia</i> .....	40
Analisi a lungo termine della fenologia di <i>Robinia pseudoacacia</i> : impatti della variabilità termica e prospettive per la produzione di miele <i>Fausto Carbonari, Chiara Epifani</i> .....	44

## POSTER

Effetti dello stress salino sulla crescita e produzione delle piante medicinali ed aromatiche della famiglia delle Lamiaceae <i>Laura D'Andrea</i> .....	49
Effetto della luce (qualità, quantità e fotoperiodo) nella coltivazione della canapa industriale <i>Laura D'Andrea</i> .....	54
Trend meteo e ripercussioni su conferimenti e accumulo zuccherino nelle uve di Montepulciano in un comprensorio viticolo dell'Abruzzo <i>Lucia Giordano, Bruno Di Lena, Alberto Palliotti</i> .....	59
Il Monitoraggio Aerobiologico nella Piana del Fucino (Abruzzo, Italia) a supporto delle produzioni agrarie in un contesto climatico in evoluzione <i>Pace L., Farda B., Djebaili R., Sabbi E., Torge M., Pascucci G., Paolucci F., Pellegrini M</i> .....	63

Le ondate di calore in frutticoltura: rischio e possibilità di adattamento. Il caso del melo <i>Federica Rossi, Camilla Chieco, Edoardo Fiorillo</i> .....	67
Agricoltura di precisione e coltivazione della carota: sfide e opportunità per il territorio italiano <i>Cecilia Squeri, Andrea Mariani, Vincenzo Di Genova, Giuseppe Concaro, Federica Prina, Filippo Milazzo, Giovanni Maria Poggi, Francesca Ventura</i> ....	70
Attraverso il tempo e il colore: NDVI come strumento diagnostico delle dinamiche storiche delle comunità di sirfidi impollinatori <i>Laura Zavatta, Francesca Ventura, Daniele Sommaggio, Serena Magagnoli, Giovanni Burgio</i> .....	74

## **SESSIONE 2 - Metodi innovativi per la stima dei fabbisogni idrici e la gestione irrigua**

Piattaforma proiezioni climatiche per il nord-est: un nuovo strumento per l'adattamento in agricoltura a scala locale <i>Giovanni Massaro, Valentina Gallina, Andrea Cicogna, Fabio Zecchini, Francesco Rech, Giorgio Resci, Irene Delillo, Stefano Micheletti</i> .....	79
Analisi di serie storiche 2000-2023 di dati telerilevati e implicazioni per le coltivazioni lombarde <i>Paolo Gallo, Lorenzo Craveri, Tommaso Porro</i> .....	84
Valutazione della disponibilità idrica per l'agricoltura con il framework geoframe: il caso del bacino del noce <i>Daniele Andreis, Giuseppe Formetta, Stefano Corradini, Riccardo Rigon</i> .....	89
Soluzioni innovative per l'ottimizzazione della gestione irrigua <i>Paola Battilani, Antonio Elia, Luigi Ledda, Luca Ridolfi, Roberto Sacile, Daniele Trincherro</i> .....	94
Progettare gli impatti dei cambiamenti climatici sulla produzione di soia e sul fabbisogno idrico <i>W.B. Barrera Jr., C. Maucieri, M. Borin, F. Morbidini, T. Pogačar, L. Verdi, A. Dalla Marta, R. Ferrise</i> .....	99

Bilanci idrici territoriali in FVG: uno strumento per la valutazione dello stato idrico dei suoli, della percorribilità e delle micotossine del mais. <i>Andrea Cicogna, Sofia Tuzzi, Roberto Medeossi, Elena Ermacora, Stefano Barbieri, Valentino Volpe, Mariangela Sandra, Lara Manzoni, Linda Stel, Valentina Caron</i> .....	103
Metodologia per lo studio delle variabili climatiche a livello regionale applicata allo sviluppo delle filiere minori – il caso del luppolo <i>Tonelli Eliana Paola, Sale Vanna Maria, Biino Uta</i> .....	108
Effetti a breve termine sulle proprietà fisiche e idrauliche di un suolo sabbioso ammendato con compost, vermicompost e biochar <i>Mirko Castellini, Luisa Giglio</i> .....	113

## POSTER

Valutazione delle prestazioni di un sistema di irrigazione basato sul machine-learning rispetto ad un approccio tradizionale: un caso studio su favino <i>Andrea Martelli, Davide Rapinesi, Itzel Inti Donati, Leonardo Verdi, Anna Dalla Marta, Filiberto Altobelli</i> .....	118
Misurazione affiancata del potenziale idrico del fusto su vite in regime irrigato e non. Risultati preliminari su Teroldego <i>Mattedi C., Zottele F., Centurioni F., Caffarra A., Corradini S</i> .....	123
Messa a punto di un metodo di stima dei fabbisogni idrici delle principali colture agrarie piemontesi <i>Irene Vercellino, Stefano Barbero, Emanuele Possiedi, Federico Spanna</i> ...	129
IRRITRE: infrastruttura e strumenti per l'ottimizzazione dell'irrigazione in Trentino <i>Gattolin A., Antonelli F., Franceschi P., Corradini S</i> .....	133

## SESSIONE 3 - Strumenti e modelli agrometeorologici di supporto per la "twin transition" in agricoltura

- L'importanza dello schermo anti radiazioni per la misura della temperatura dell'aria nell'agricoltura di precisione  
*Marcellino Salvador, Stefano Perin, Alex Stevanin.....136*
- Colture dallo spazio: l'uso di google earth engine e modelli di GPP per la spazializzazione della resa delle colture basata sul remote-sensing  
*Carotenuto F., Gioli B., Brilli L., Rossi F., Chieco C., Famulari D., Nardino M.....141*
- Previsione di frane superficiali indotte da pioggia tramite il modello agro-idrologico CRITERIA-1D  
*G. Sannino, F. Tomei, M. Bittelli, M. Bordoni, C. Meisina, R. Valentino.....145*
- Fluttuazioni climatiche e aumento della sensibilità del sistema produttivo agricolo negli ultimi sessanta anni: un case study dalla regione Abruzzo  
*Vincenzo Guerriero, Anna Rita Scorzini, Bruno Di Lena, Stefano Iulianella, Mario Di Bacco, Marco Tallini.....150*
- Analisi multicriteriale per la produzione delle carte di vocazionalità viticola della Sardegna  
*Ana Fernandes de Oliveira, Simone Cossu, Alessandro Marrone, Rita Puddu, Stefania Fanni, Michele Fiori, Daniela Satta.....155*
- Modellistica di sviluppo del nocciolo e verifica con dati sperimentali in Piemonte  
*Magliano D., Spanna F., La Iacona T. Vercellino I., Cassardo C., Andreoli V., Barbero S. ....160*
- Analisi preliminare dell'impatto dell'andamento termopluviometrico sulla qualità del farro: un caso di studio in Toscana  
*Leonardo Verdi, Riccardo Rossi, Michele Moretta, Paolo Armanasco, Anna Dalla Marta, Simone Orlandini, Enrico Palchetti, Marco Mancini.....165*
- Modellazione della dinamica di maturazione del grappolo per la valutazione precoce della qualità organolettica del vino: un caso di studio in Veneto  
*Maria Roberta Bruno, Patrick Marcuzzo, Federica Gaiotti, Luca Masiero, Simone Ugo Maria Bregaglio.....170*



Una piattaforma integrata per l'applicazione di indicatori e modelli a dati agrometeorologici <i>Paola Battilani, Daniele Trincherò</i> .....	174
--	-----

## POSTER

Uso dell'NDVI per stimare il LAI nei seminativi: il pacchetto LAIR <i>Sofia Bajocco, Carlotta Ferrara, Lorenzo Crecco, Nicola Puletti, Simone Bregaglio, Francesco Chianucci</i> .....	178
Comparazione fra le emissioni di protossido di azoto in seguito a concimazione con ammendante organico e fertilizzante minerale in noceto ( <i>Juglans regia</i> L.) <i>C. Chieco, D. Famulari, L. Fiorini, E. Baldi, M. Quartieri, F. Carotenuto, V. Voulgaridis, M. Toselli, M. Nardino</i> .....	182
Una valutazione della transizione verso l'uso sostenibile di fertilizzanti e pesticidi parte del progetto ecowheataly <i>C. Cardillo, A. Del Signore, E. Di Giuseppe, A. Di Paola, A. Gattone, G. Giulioni, M. Pasqui, S. Quaresima, M. Simonetti, I. Zappitelli, P. Toscano</i> .....	187
AgriCS: piattaforma ICT per il trasferimento delle conoscenze a favore dello sviluppo agricolo <i>Volpe V., Barbieri S., Sandra M., Manzoni L., Stel L., Caron V</i> .....	191
Analisi delle annate 2014, 2021, 2022 e 2023 nella regione vinicola piemontese del Barolo mediante l'uso dei modelli di crescita e di biosfera IVINE e UTOPIA <i>Claudio Cassardo, Valentina Andreoli, Giulio Nesti, Luciana Rossato, Tiziana La Iacona, Federico Spanna</i> .....	194
Sistemi integrati per la sostenibilità ambientale del vigneto <i>Daniele Trincherò, Giovanni Paolo Colucci, Elena Filipescu, Juan Camilo Mora Zoppi, Enrico Borgogno Mondino, Federica Ghilardi, Andrea Virano</i> .....	199

# UN FRAMEWORK OPERATIVO PER IL MONITORAGGIO E PREVISIONE DELLA SICCAITA'

## AN OPERATIONAL FRAMEWORK FOR DROUGHT MONITORING AND FORECASTING

Arianna Di Paola<sup>1\*</sup>, Edmondo Di Giuseppe<sup>1</sup>, Ramona Magno<sup>2</sup>, Sara Quaresima<sup>1</sup>, Leandro Rocchi<sup>2</sup>, Elena Rapisardi<sup>1</sup>, and Massimiliano Pasqui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Council of Italy, Institute for BioEconomy, Rome, Italy

<sup>2</sup>National Research Council of Italy, Institute for BioEconomy, Sesto Fiorentino, Italy

\* Corresponding author: arianna.dipaola@ibe.cnr.it

### Abstract

In this study, we introduce an innovative framework for monitoring and forecasting drought at the river basin scale. This framework serves various purposes, including contingent assessments, forecasting probabilistic scenarios of water availability, and supporting decision-making processes related to water management. The framework is built upon two foundational components: *i*) the “Integrated Standardized Drought Index” ( $\mathfrak{D}$ ), designed to gauge drought severity by considering precipitation and river levels over the short to medium term; *ii*) The integration of this index with long-term water memory through a variable termed “Cumulative Deviation from Normal” (CDN); the resulting monitoring variables, namely  $\mathfrak{D}$  and CDN, can be used for generating What-if scenarios. As an illustrative example, we apply the framework to the Po River basin. The usability of What-if scenarios is illustrated by showcasing the results for March 2022, marking the onset of the agronomic season during a notably severe drought year. Additionally, we delve into insights on water usage behaviors among Italian farmers in the Po Valley, as observed in the FADN dataset for two contrasting years: 2015 as an example of non-water-stressed conditions and 2022 as a drought-stressed one, to enrich our discussion.

### Parole chiave

Siccità, indice standardizzato di siccità integrata, indice standardizzato di precipitazione, indice standardizzato di portata, volume di adacquamento.

### Keywords

Drought, Standardized Integrated Drought Index, Standardized Precipitation index, Standardized River Discharge, watering volume.

### Introduction

The escalating frequency of drought events, attributed to climate change, amplifies the impacts of activities such as water withdrawals, land-use changes, and agricultural practices (Tramblay et al., 2020). This is especially true for the agricultural sector which accounts for nearly 70% of total water withdrawal, making it the most water-intensive sector (Ingrao et al., 2023). Effective climate services are crucial to enhance water use efficiency and promote sustainable water management practices, providing decision-makers with essential tools to navigate and respond effectively to drought challenges.

In the present study two of the most used drought indices, namely the Standardized Precipitation Index (SPI, McKee et al., 1993), and the Standardized Streamflow Index (SQI, Telesca et al., 2012) will be used to build a basin-scale operational framework for drought monitoring and forecast. The proposed framework aims to improve the synoptic understanding of drought and enhance water management while simplifying the climate service.

Specifically, the proposed framework includes:

*i*) The computation of a series of SPI and SQI indices spanning continuous 1-36 month intervals, designated as  $SPI_{1-36}$  and  $SQI_{1-36}$  respectively, alongside a corresponding synthetic index, here called Standardized Integrated Drought Index ( $\mathfrak{D}$ ).  $\mathfrak{D}$  can be computed as the ensemble

weighted mean of  $SPI_{1-36}$  ( $\mathfrak{D}_{(SPI)}$ ) or  $SQI_{1-36}$  ( $\mathfrak{D}_{(SQI)}$ ) to facilitate the identification of the onset and duration of severe drought phases and streamlining drought monitoring for decision-makers.

*ii*) The contextualization of the severe phase of drought into the surrounding water supplies using the Cumulative Deviation from Normal (CDN), where the CDN is commonly intended as the cumulative anomalies of precipitation (Smail et al., 2019; Webert and Stewart, 2004), here is accounted by the cumulative monthly (one-month) SPI (i.e.,  $SPI_1$ ).

Additionally, “What-if scenarios” for the upcoming months where hypothetical precipitation scenarios are developed to forecast the likelihood of corresponding  $\mathfrak{D}_{(SPI)}$  and CDN values are presented.

The versatility of the proposed framework is demonstrated by showcasing its representativeness over the Po River basin, which serves as the pilot study area. What-if scenarios from March 2022, marking the onset of the agronomic season in a year where the Po Valley experienced a severe and prolonged drought, are presented as explanatory examples for management purposes and decision-making guidance. Additionally, the water usage of Italian farmers surveyed in 2022 and 2013 (for comparison) by the Farm Accountancy Data Network (FADN) is explored to discuss water use and management.

## Methods

### *Climatic and Hydrological Data Sources.*

Streamflow data for the Po River are retrieved from Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia-Romagna (ARPAE, <https://www.arpae.it/it>), as daily averages from January 1961 to December 2023, collected at the Pontelagoscuro gauging site. Pontelagoscuro is commonly considered the final section of the Po River basin, covering approximately 71,000 km<sup>2</sup>. Daily streamflow is aggregated into monthly mean streamflow ( $Q$ , [m<sup>3</sup>/s]), yielding a monthly time series of 756 entries.

Precipitation is retrieved by the ARCIS precipitation dataset (Pavan et al., 2019), which provides gridded observations at a 5 km spatial resolution of daily precipitation (both liquid and solid) covering North-Central Italy from 1961 to the present. Daily precipitation data are aggregated monthly from January 1961 to December 2023 and spatially averaged across the Po River basin catchment area identified by the Pontelagoscuro section. This process generates a continuous time series of monthly precipitation ( $P$ , 756 entries) that is both spatially and temporally consistent with the Po River streamflow data.

### *The framework*

SPI and SQI indices are computed for continuous month-scales ranging from 1 to 36, referred to as SPI<sub>1-36</sub> and SQI<sub>1-36</sub> respectively, following the methods of Edwards and McKee (1997) and Guttman (1999), with the baseline period set as 1964-2013.

The visualization of the SPI<sub>1-36</sub> and SQI<sub>1-36</sub> series using a heatmap (Fig. 1a) can offer valuable insights into the dynamics of drought across different month-scales, including potential triggers, propagation, and resolution of drought events. However, to quantitatively identify the onset of the severe phase and measure its duration, integration across month-scales is essential. For this reason, we introduce the  $\mathfrak{D}$  index, which can be determined by the ensemble weighted mean of both the SPI<sub>1-36</sub> set ( $\mathfrak{D}_{\{SPI\}}$ ) and the SQI<sub>1-36</sub> set ( $\mathfrak{D}_{\{SQI\}}$ ) followed by standardization into Z-scores. In this study,  $\mathfrak{D}_{\{SPI\}}$  and  $\mathfrak{D}_{\{SQI\}}$  are computed with exponentially decreasing weights as the scale-month increases, prioritizing recent scale-months (i.e., 1 month-scale assumes weight 0.0998 while 36 month-scale 0.0027, and the sum of all the weights is 1). Once  $\mathfrak{D}$  has been calculated, the onset and duration of the severe phase of drought can be quantified using a critical threshold ( $S$ ), here set at minus one standard deviation (i.e.,  $S = -1$ ). Specifically, the onset occurs when  $\mathfrak{D}$  falls below  $S$ , while the duration is the period during which  $\mathfrak{D}$  values remain continuously below  $S$ .

Drought contextualization is achieved using the CDN. Conceptually, CDN represents the running balance relative to average precipitation in the baseline. Since precipitation distribution is typically non-normal, accumulating anomalies to the average would introduce bias and artifacts. To address this limitation and account for positive

skewness in the precipitation distribution, we computed the CDN as the cumulative monthly precipitation standardized as SPII.

Since  $\mathfrak{D}_{\{SPI\}}$  and CDN depend on monthly precipitation, by developing hypothetical scenarios of future precipitation levels it is possible to project  $\mathfrak{D}_{\{SPI\}}$  and CDN (What-if scenarios). In this study, we consider scenarios of precipitation levels of -75, -50, -25, 25, 50, and 75 quartiles of 'normal' precipitation for the upcoming 5 months. Additionally, recognizing that precipitation levels may exhibit a wide range of distributions over the upcoming 5 months, we conduct 100 simulations of random distributions to enrich the projections with a range of potential outcomes.

### *The uses of water for irrigation by Italian farmers surveyed by the FADN.*

We examine the water usage for maize cultivation in two representative years, namely 2022 and 2013, over the irrigation season April-August, consistently with the What-if scenarios. In 2022 the Po Valley experienced a severe and lasting drought, meanwhile 2013 there was no significant water stress.

The Italian counterpart of FADN, known as RICA (Agricultural Accounting Information Network), provides harmonized micro-economic and environmental data of surveyed farms. The dataset is structured as a relational database, consisting of multiple Excel sheets linked by several key-variables such as the unique farm identifier ('COD\_AZIENDA') and the cultivated species ('SPECIE\_VEGETALE'). The most accurate information about the localization of single farms is the agronomic region ('REGIONE AGRARIA') where the farm is located, here used to detect farm observations within the Po Valley. Related water uses per hectares ('VOLUME\_ACQUA\_HA') for the years 2013 and 2022 for maize irrigation are then linked to the summer precipitation and reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) in the corresponding year and agronomic region. In the scope of the present work, the geometries of the agronomic regions have been created by merging the geometries of municipalities within the same agronomic region as documented in CREA (CREA). To link summer P and ET<sub>o</sub> with agronomic regions, the centroid of each polygon representing an agronomic region is matched with the nearest grid point of the ERA5-Land grid.

ET<sub>o</sub> (Allen, 1998) is computed using the ERA5-Land dataset following the procedure outlined in Singer et al. (2021). The ERA5 Land dataset is a reanalysis product by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), available at the Copernicus Climate Change Service (C3S) of the European Commission, providing hourly data dating back to 1950, with a spatial resolution of 0.11 degree, covering the entire globe.

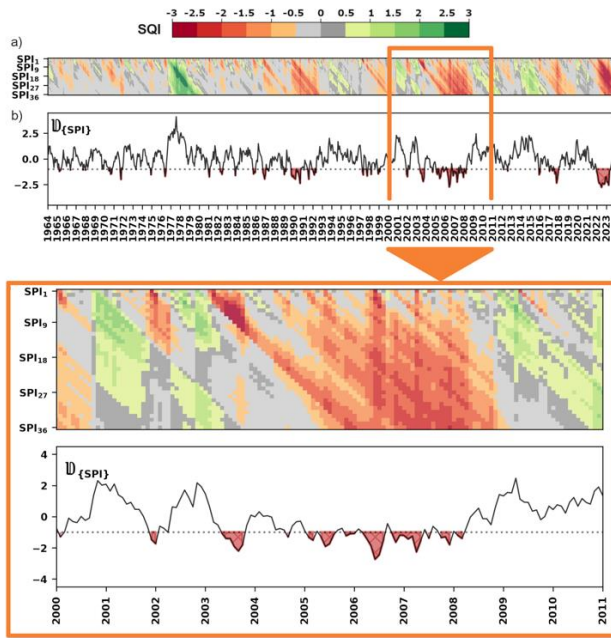


Fig. 1. a) mappa termica di  $SPI_{1-36}$ . Le scale mensili di SPI sono in ordine crescente dall'alto verso il basso; b)  $\mathcal{D}_{\{SPI\}}$ . L'area rossa rappresenta la fase grave identificata da  $\mathcal{D}_{\{SPI\}} < -1$ ; Il riquadro arancione ingrandisce il periodo 2000-2011 per una migliore visualizzazione.

Fig. 1. a)  $SPI_{1-36}$  heatmap. The SPI month-scales are in ascending order from top to bottom; b)  $\mathcal{D}_{\{SPI\}}$ . The shaded red area represents the severe phase identified by  $\mathcal{D}_{\{SPI\}} < -1$ ; The orange box zooms the period 2000-2011 for a better visualization.

## Results and Discussion

### Drought dynamics and propagation

The whole set of  $SPI_{1-36}$  is shown through a heatmap (Fig.1a), however, the same figure can be built by using  $SQI_{1-36}$ , here omitted for the sake of brevity. In the heatmap, upper-left to lower-right red diagonals represent negative precipitation anomalies that statistically propagate across subsequent month-scales, depending on the magnitude of the anomaly. Meteorological droughts appear as 'drought shots', namely distinct red triangular patterns that may extend through subsequent SPI month-scales along the diagonal. The higher the precipitation deficit in a given month, the higher the number of subsequent month-scales it statistically affects. For example, in 2003 a remarkable drought shot propagated through extended month-scales, while subsequent moderate-to-normal precipitation anomalies in early 2004 prevented the system from building up water reserves to withstand future deficits. Similarly, the cumulative impact of subsequent drought shots, even if individually weak, combined with the lack of compensatory precipitation surplus, could contribute to the emergence of a prolonged drought event and a possible accumulation of water shortage, as occurred in 2004-2008 (Fig 1a).

### The severe phase of drought

Red areas in Fig. 1b identify severe droughts, i.e., periods where  $\mathcal{D}_{\{SPI\}}$  fall below minus one standard deviation, here chosen as the critical threshold for the identification of drought severe phase. Both  $\mathcal{D}_{\{SPI\}}$  (Fig. 1b and Fig. 2) and  $\mathcal{D}_{\{SQI\}}$  (Fig. 2) pinpoint several severe droughts occurring between 1988 and 2023 that are in agreement with the existing literature (Montanari et al., 2023; Rossi and Benedini, 2020; Loch et al., 2020; Baronetti et al., 2020; Musolino et al., 2018), proving the reliability of the proposed methodology.

### Drought contextualization on global pattern

Figure 2 shows a synoptic view of how severe droughts are placed to the surrounding water supplies along with the water deficit during severe droughts (blue and cyan circles) and the occurrences of minimum river flows (i.e.,  $Q < 450m^3sec^{-1}$ , black triangles on the timeline). A broad correspondence between CDN, here accounted as a proxy of long-term reserves of the hydrosphere, and  $\mathcal{D}_{\{SPI\}}$  and  $\mathcal{D}_{\{SQI\}}$  shapes are evident. Specifically, it emerges that the major cases of severe drought occurred in conjunction with major drops in the CDN. Indeed, the CDN shows how multi-year periods of slight increases and decreases in precipitation anomalies could drive the system under relatively wet and dry phases. Such periods could escape an inter-annual analysis as well as decadal analyses.

Overall,  $\mathcal{D}_{\{SQI\}}$  and  $\mathcal{D}_{\{SPI\}}$  exhibit similar patterns and identify droughts that coincide temporally. However, a contrasting response from the two indices is evident. While  $\mathcal{D}_{\{SQI\}}$  shows a significantly smoother trend, it misses many short severe droughts identified by  $\mathcal{D}_{\{SPI\}}$ , particularly during the periods of 1977-1984 and 1993-2002. Conversely,  $\mathcal{D}_{\{SQI\}}$  appears to significantly amplify the severity of the two most severe droughts of 2005-2008 and 2022-2023. In this regard, the difference between  $\mathcal{D}_{\{SQI\}}$  and  $\mathcal{D}_{\{SPI\}}$  indices appears less pronounced in the first fifty years. Even during the severe drought of 1990 (circles in Fig. 3), the hydrological response under severe drought was not as amplified as those observed in the last 20 years. For instance, in 1990, there was no significant difference in the precipitation and river deficits under the severe drought. Over the period 2004-2008, the total precipitation deficit was 630mm, while the river deficit was 837mm (207mm difference). In 2021-2023 the precipitation deficit was 477mm, and the river discharge deficit was -770mm (323 mm difference).



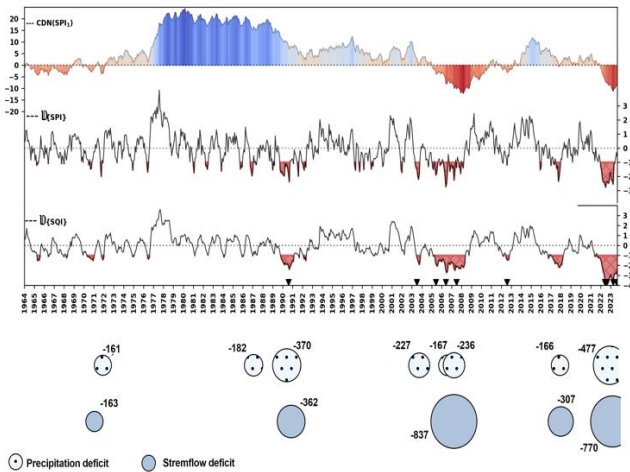


Fig. 2. Sinossi sulla siccità: CDN calcolato come somma cumulativa di  $SPI_1$  (asse-y sinistro),  $D_{SPI}$  e  $D_{SQI}$  (asse-y destro); I cerchi rappresentano il deficit di precipitazioni e deflusso accumulato durante le gravi siccità (solo deficit < -150 mm). I triangoli neri nella sequenza temporale segnalano le occorrenze di portate fluviali minime ( $Q < 450 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ )

Fig. 2. Drought synopsis: CDN computed as the cumulative sum of  $SPI_1$  (left y-axis),  $D_{SPI}$  and  $D_{SQI}$  (right y-axis); Circles represent the whole precipitation and streamflow deficit under the severe droughts (only deficits < -150mm). Black triangles in the timeline report the occurrences of minimum river flows ( $Q < 450 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ ).

#### What-if scenarios:

What-if scenarios of future precipitation levels from March 2022 and related projections for  $D_{SPI}$  and CDN are presented in Fig. 3. What-if scenarios could be projected also for  $D_{SQI}$  for hypothetical streamflow levels to the 'normal', here omitted for the sake of brevity. In 2022 the Po Valley experienced among the major severe droughts of the last decades (Fig.1 and 2). At the onset of the agronomic season, What-if scenarios constructed in March 2022 indicated that only a precipitation surplus exceeding +50% months would have been sufficient to alleviate the severe drought conditions by two months (i.e., by May), or a surplus of +25% over three months (i.e., by June). Any other precipitation scenario suggested a continuation of the severe drought conditions throughout the summer. Even in the event of a surplus of precipitations above 50%, the Cumulative Deviation from Normal (CDN) would have remained at very low levels, indicating that water reserves would not have been replenished to pre-crisis levels by 2021.

#### The irrigation of maize in the Po Valley in 2022 and 2015

Figure 4 shows the irrigation amount (Irr, mm) for maize in 2013 (olive) and 2022 (blue) for farms in the RICA dataset located in the Po Valley. It also includes observed precipitation, reference evapotranspiration, and their difference (P-ETo) during the irrigation season (April-August).

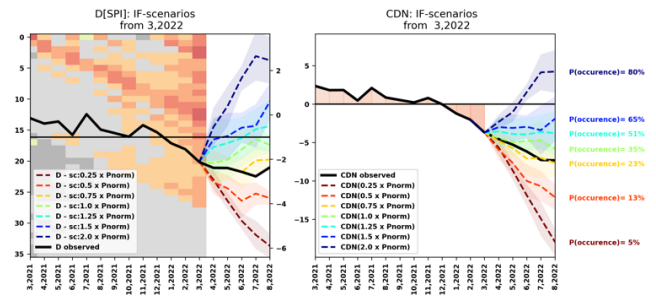


Fig. 3. What-if scenari per  $D_{SPI}$  (pannello di sinistra) e CDN (pannello di destra) da marzo 2022 per i prossimi 5 mesi. La linea nera rappresenta il caso osservato, mentre le linee colorate tratteggiate rappresentano scenari per quartili crescenti di ipotetici livelli di precipitazione rispetto a quelli "normali". Le ombre rappresentano la variabilità attesa data dai diversi modelli di distribuzione delle precipitazioni nella finestra di 5 mesi.

Fig. 3. What-if scenarios for  $D_{SPI}$  (left panel) and CDN (right panel) since March 2022 for the upcoming 5 months. The black line represents the observed case, while the dashed colored lines depict scenarios for increasing quartiles of hypothetical precipitation levels to the 'normal'. Shadows represent the expected variability given by the different distribution patterns of precipitation in the 5-month window.

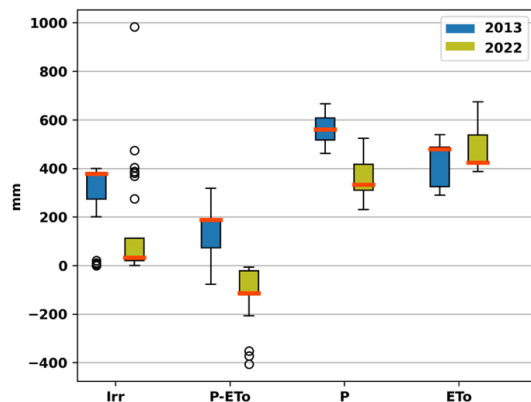


Fig.4. Irrigazione (Irr) per il mais nel 2013 e nel 2022 da parte degli agricoltori censiti dalla RICA e situati nella Pianura Padana, insieme a P, ETo e P-ETo osservati durante la stagione irrigua (Aprile-Agosto).

Fig.4. Irrigation (Irr) for maize in 2013 and 2022 by farmers surveyed by the RICA and located in the Po Valley, along with observed P, ETo, and P-ETo during the irrigation season (April-August).

Average precipitation from April to August across the sampled agronomic regions was 572 mm in 2013 and 351 mm in 2022. Despite the relatively low number of observations ( $n = 41$  in 2013,  $n = 28$  in 2022), the data suggests a trend. In 2013, with more favorable conditions and higher water availability, median irrigation water use per hectare was higher (380 mm). Conversely, in 2022, which experienced a severe drought, water use was

significantly lower (median: 50 mm per hectare) even though overall water demand was higher (average P-ETo: +200 mm for 2013 and -100 mm for 2022).

## Conclusion

Throughout a full exploitation of standardized indices such as the SPI and SQI, we show how some meaningful drought features can be compiled and related dynamics contextualized to the associated water supplies. The framework can provide a synoptic view of droughts while increasing the knowledge of triggers (single or cumulative

drought shots), propagation across time (diagonals) and segments of the water cycle (from precipitation to river streamflow), recovery requirements (deficit and CDN), as well as the simplification of climate services through an ensemble index ( $\mathfrak{D}$ ) and the contextualization of severe phases in the long-term surrounding water supplies (CDN phases and trends. What-if scenarios for CDN and  $\mathfrak{D}$  that consider different possibilities and their potential consequences could reveal useful tools for planning and decision-making processes.

## References

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. FAO 56 Irrigation and drainage paper: crop evapotranspiration. Food and Agriculture Organization Rome, Italy. 1998;
- Baronetti A, González-Hidalgo JC, Vicente-Serrano SM, Acquotta F, Fratianni S. A weekly spatio-temporal distribution of drought events over the Po Plain (North Italy) in the last five decades. *International Journal of Climatology*. 2020;40(10):4463–76.
- CREA. <https://www.crea.gov.it/documents/68457/0/Nota+metodologica+su+regioni+agrarie.pdf/d87d0f31-d298-e944-d6aa-90d92210a173?t=1561366279726>
- Guttman NB. Accepting the Standardized Precipitation Index: A Calculation Algorithm 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 1999;35(2):311–22.
- Ingrao C, Strippoli R, Lagioia G, Huisingh D. Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. *Heliyon*. 2023 Aug 1 [cited 2024 Apr 25];9(8). Available from: [https://www.cell.com/heliyon/abstract/S2405-8440\(23\)05715-8](https://www.cell.com/heliyon/abstract/S2405-8440(23)05715-8)
- Loch A, Santato S, Pérez-Blanco CD, Mysiak J. Measuring the transaction costs of historical shifts to informal drought management institutions in Italy. *Water*. 2020;12(7):1866.
- 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 [cited 2023 Oct 31]. p. 179–83. Available from: <https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipofdroughtfrequency.pdf>
- Montanari A, Nguyen H, Rubinetti S, Ceola S, Galelli S, Rubino A, et al. Why the 2022 Po River drought is the worst in the past two centuries. *Sci Adv*. 2023 Aug 9;9(32):eadg8304.
- Musolino D, Vezzani C, Massarutto A. Drought Management in the Po River Basin, Italy. In: *Drought*. John Wiley & Sons, Ltd; 2018 [cited 2023 Nov 2]. p. 201–15. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119017073.ch11>
- Pavan V, Antolini G, Barbiero R, Berni N, Brunier F, Cacciamani C, et al. High resolution climate precipitation analysis for north-central Italy, 1961–2015. *Clim Dyn*. 2019 Mar 1;52(5):3435–53.
- Rossi G. Coping with Droughts. In: Rossi G, Benedini M, editors. *Water Resources of Italy: Protection, Use and Control*. Cham: Springer International Publishing; 2020 [cited 2023 Nov 6]. p. 291–318. (World Water Resources). Available from: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36460-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36460-1_12)
- Singer MB, Asfaw DT, Rosolem R, Cuthbert MO, Miralles DG, MacLeod D, et al. Hourly potential evapotranspiration at 0.1° resolution for the global land surface from 1981-present. *Sci Data*. 2021 Aug 24;8(1):224.
- Smail RA, Pruitt AH, Mitchell PD, Colquhoun JB. Cumulative deviation from moving mean precipitation as a proxy for groundwater level variation in Wisconsin. *Journal of Hydrology X*. 2019 Nov 1;5:100045.
- Telesca L, Lovallo M, Lopez-Moreno I, Vicente-Serrano S. Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index (SSI) time series in the Ebro basin (Spain). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012 Feb 15;391(4):1662–78.
- Tramblay Y, Koutroulis A, Samaniego L, Vicente-Serrano SM, Volaire F, Boone A, et al. Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Science Reviews*. 2020 Nov 1;210:103348.
- Weber K, Stewart M. A critical analysis of the cumulative rainfall departure concept. *Ground Water*. 2004;42(6–7):935–8.

# DATA-DRIVEN STRATEGIES FOR PRECISION AGRICULTURE: DEVELOPING MACHINE LEARNING MODELS FOR FIELD DECISION SUPPORT

## STRATEGIE BASATE SU DATI PER L'AGRICOLTURA DI PRECISIONE: SVILUPPO DI MODELLI DI MACHINE LEARNING PER IL SUPPORTO DECISIONALE IN CAMPO

Matteo Cardinali<sup>1\*</sup>, Sara Antognelli<sup>1</sup>, Emanuele Ranieri<sup>1</sup>, Mauro Roscini<sup>1</sup>, Alessandro Vignati<sup>1</sup>, Andrea Soccolini<sup>1</sup>, Cecilia Squeri<sup>2</sup>, Diego Guidotti<sup>1</sup>, Francesco Saverio Santaga<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agricolus SRL, via Settevalli, 320, Perugia (PG)

<sup>2</sup> SATA srl, Strada Alessandria 13, 15044 Quargnento (AL)

\* m.cardinali@agricolus.com

### Abstract

Precision farming can highly benefit from decision support systems (DSS). They deliver many data to farmers, but these data are rarely organized to really support farmers decision making.

To this aim, two linked models based on machine learning are currently under development. The first model aims at identifying critical zones of each field. The critical zones are detected continuously during the season, based on satellite data, considering the crop phenological stage. The second model aims at diagnosing the causes of each critical zone, based on the output of different forecast models that estimates single possible causes daily (e.g. pest development stage, disease development risk, water and nutrient needs, waterlogging or thermal stress risk).

The two models are being trained based on data collected in Umbria, Emilia Romagna and Piemonte during 2023 season on tomato, corn and wheat. Future steps include models' validation and improvement based on further data collection currently ongoing.

### Parole chiave

Agricoltura di precisione, dati satellitari, diagnosi agronomica, supporto alle decisioni

### Keywords

Precision farming, satellite data, agronomic diagnosis, decision support

### Introduzione

L'agricoltura di precisione si avvale spesso dei sistemi di supporto alle decisioni (decision support system o DSS). Questi sistemi forniscono raccomandazioni per coltura, specifiche per ciascun campo o area del campo. I DSS sono utilizzati dagli agricoltori mediante applicazioni mobile o web, e forniscono supporto costante a-gli agricoltori, anche mediante interfacce di facile utilizzo (Gallardo et al., 2020). I DSS possono essere progettati per molteplici finalità. I DSS più diffusi supportano decisioni specifiche come l'irrigazione e la fertilizzazione (Gallardo et al., 2020), ma anche l'applicazione di strategie di difesa integrata da parassiti e fitopatie delle colture (vedi ad es. Tonie et al, 2024, Fedele et al., 2024, Sridevy et al., 2023).

Le informazioni di supporto alle decisioni degli agricoltori derivano in larga parte da modelli di previsione del rischio di sviluppo delle fitopatie, della fase fenologica degli insetti, o dal calcolo del fabbisogno irriguo e nutrizionale delle colture. (Sridevy et al., 2023)

In molti DSS, inoltre, la componente cartografica (Butora et al., 2022) e i dati ottenuti da satellite (Mehedi et al., 2024) ricoprono un ruolo molto importante.

Secondo Saiz-Rubio e Rovira-Más, (2020), nella realtà decisionale di campo, dove le decisioni dipendono da molteplici fattori decisionali, gli utenti dei DSS possono

incontrare delle difficoltà nel gestire le complesse informazioni fornite dai DSS, le quali, per essere realmente utili, dovrebbero essere organizzate ed interpretate. In questo contesto, le tecnologie di intelligenza artificiale e machine learning possono essere efficaci per creare modelli che elaborano informazioni complesse e permettono di fornire informazioni facilmente leggibili all'utente finale.

Agricolus è un DSS multifunzione per l'agricoltura di precisione. Allo stato dell'arte, il DSS Agricolus fornisce una serie di informazioni legate a campi coltivati identificati in mappa dall'utente.

Agricolus include un set di modelli previsionali in grado di stimare le seguenti variabili:

- Fabbisogno nutrizionale
- Fabbisogno irriguo
- Rischio di stress da caldo;
- Rischio di ristagno idrico;
- Fase fenologica della pianta;
- Fase fenologia dei principali insetti dannosi;
- Rischio di insorgenza delle principali fitopatologie.

Tali modelli forniscono risultati giornalieri, durante il ciclo colturale, per ciascun campo o zona del campo. Utilizzano come dati di input dati meteo orari, dati satellitari multispettrali (da satellite Sentinel 2), e informazioni sulla

coltura, come le operazioni colturali svolte, la resa attesa, la precessione colturale ecc.

Inoltre, il sistema fornisce i seguenti indici di vigoria della vegetazione:

- NDVI
- Green NDVI
- SAVI
- LAI
- TCARI/OSAVI
- NMDI
- NDMI

Gli indici sono forniti real-time o near real-time per tutte le date disponibili del satellite Sentinel 2, ovvero ogni 3-5 giorni.

Gli indici da satellite e le informazioni fornite dai singoli modelli previsionali sono in grado di fornire dati importanti per le decisioni degli agricoltori, ma le informazioni fornite devono essere confrontate ed elaborate per poter essere usate in modo semplice ed efficace. Per questo motivo, il presente lavoro descrive la creazione di un sistema di modelli che permettano di elaborare e sintetizzare le informazioni presenti in un DSS multifunzione per l'agricoltura (di seguito denominati "modelli di sintesi"), che forniscano informazioni all'utente finale su:

- Presenza di campi o zone del campo con problemi di sviluppo e/o di produttività della coltura
- Cause probabili delle zone critiche rilevate

## Materiali e Metodi

Per il design del sistema di modelli è necessaria l'identificazione delle variabili predittive dei modelli di sintesi. Tale individuazione è stata svolta mediante una ricerca bibliografica.

Una volta individuate le variabili predittive, è stato eseguito un confronto tra i risultati della ricerca bibliografica e lo stato dell'arte del DSS Agricolus. Tale confronto ha permesso di identificare le relazioni tra i dati disponibili e i modelli predittivi già esistenti, identificando i modelli di sintesi da sviluppare, e definendone gli input.

La terza fase è stata quella dell'identificazione delle migliori metodologie per lo sviluppo dei modelli di sintesi. La ricerca bibliografica, insieme a considerazioni empiriche sulle caratteristiche degli algoritmi, hanno permesso di identificare le metodologie più idonee per ciascun modello di sintesi.

Parallelamente è stato messo a punto un piano di campionamento per la raccolta dei dati di training e validazione, prima dell'esecuzione della raccolta dati.

In questo modo sarà possibile eseguire una prima fase di training e validazione dei modelli, che potrà successivamente essere migliorata mediante l'ampliamento del dataset.

## Risultati e Discussione

I principali risultati della ricerca bibliografica hanno evidenziato che:

- gli indici di vegetazione sono sensibili allo stress vegetativo dovuto alla presenza di diverse cause: carenze nutrizionali, stress da caldo, stress idrico, ristagno idrico ecc. Per l'identificazione delle cause del danno, il satellite deve essere integrato con dati ancillari (vedi ad es. Segarra et al., 2020, Benincasa et al., 2018, Liu, 2023, den Besten et al., 2021).
- il valore degli indici di vegetazione dipende anche dalla fase fenologica (Boori et al., 2019, Rolle et al., 2022)
- i danni da parassiti e malattie non sono visibili utilizzando unicamente i dati da satellite Sentinel 2 (Liu et al., 2020, Zheng et al., 2018)

Il confronto di queste informazioni con lo stato dell'arte del DSS Agricolus ha permesso di identificare i modelli di sintesi e i loro input, e quindi identificare le relazioni tra i diversi modelli (fig. 1).

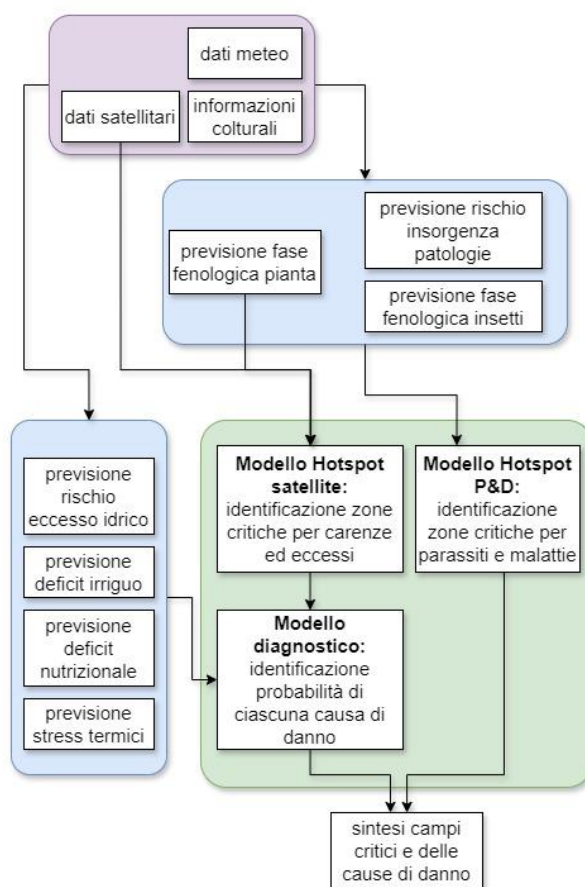


Fig.1 – design del sistema di modelli del DSS (in viola: dati di input; in azzurro: modelli di previsione delle singole variabili; in verde: modelli di sintesi)

Fig. 1 - DSS systems design (in purple: input data; in light blue: prediction models of the individual variables; in green: synthesis models)

La presenza di campi o zone del campo con problemi di sviluppo e/o di produttività della coltura sarà stimata



mediante due modelli differenti: il modello Hotspot satellite, in grado di discriminare le zone critiche del campo per danni visibili alla vegetazione, e il modello Hotspot P&D, in grado di discriminare i campi in cui è presente un danno da patologie o insetti (fig.1). Un terzo modello, il modello diagnostico (fig. 1), sarà in grado di quantificare la probabilità che alcune delle principali cause di danno alla vegetazione abbiano determinato l'hotspot.

In questo modo è possibile sfruttare appieno le informazioni fornite da satellite, interpretandole alla luce dei diversi fattori che influenzano i valori degli indici. Allo stesso tempo, è possibile sfruttare appieno il potenziale informativo dei modelli previsionali e delle informazioni di campo inserite dall'utente all'interno del DSS.

Il modello di identificazione dei campi e delle zone critiche per carenze ed eccessi (modello Hotspot satellite) avrà come input i gradi giorno calcolati per le specifiche colture, e gli indici da Sentinel 2 calcolati per ciascun campo durante la stagione colturale, integrando, in particolare, indici che includono nella formula le bande del rosso, del red-edge, del vicino infrarosso e dell'infrarosso a banda corta, notoriamente correlate ai parametri di stress vegetativo, nutrizionale e stress idrico della pianta.

In questo modo sarà possibile identificare le zone dei campi o gli interni campi con vegetazione stentata o comunque meno vigorosa della media, considerando anche la fase fenologica in cui la pianta si trova. La sensibilità del modello potrà essere in seguito calibrata in base anche alle preferenze degli utilizzatori, che potrebbero voler identificare soltanto le zone con elevata criticità, oppure anche le zone con un livello di criticità inferiore, ma comunque da attenzionare.

Il modello di identificazione dei campi critici per cause fitosanitarie (Hotspot P&D) utilizzerà come dati di input:

- fase fenologica della pianta, stimata da modello o rilevata dall'utente,
- rischio di insorgenza della patologia (stimata da modello considerando i trattamenti fitosanitari effettuati) oppure fase fenologica dell'insetto stimata da modello
- presenza in campo della patologia o dell'insetto eventualmente rilevata dall'utente

In questo modo, il modello sarà in grado di prevedere il potenziale danno alla coltura, considerando non solo il comportamento del patogeno, ma anche quello della pianta.

Il modello di identificazione delle cause di criticità (modello diagnostico) utilizzerà in input gli output di altri modelli predittivi:

- campi e zone critiche per carenze ed eccessi
- deficit irriguo, stimato da modello tenendo conto delle irrigazioni effettuate
- deficit nutrizionale stimato da modello tenendo conto delle fertilizzazioni effettuate
- rischio ristagno idrico stimato da modello
- rischio stress termici stimato da modello

Il modello diagnostico sarà quindi in grado di fornire la probabilità di ciascuna causa di danno. Qualora la causa di

danno più probabile non sia presente tra quelle considerate (deficit irriguo, deficit nutrizionale, stress da caldo, ristagno idrico), il modello attribuirà la problematica alla categoria "altre cause". In futuro, sarà possibile incrementare i dati di input e di training, ed allenare il modello a riconoscere anche altre cause di danno (come, ad esempio, danni da eventi atmosferici estremi come grandine, o gelate), oltre a quelle citate.

In generale, all'evolvere dello stato dell'arte del DSS Agricolus, i modelli di sintesi avranno la possibilità di includere sempre più dati di input, e di migliorare quindi la precisione delle informazioni in output.

Le metodologie individuate per la creazione dei modelli di sintesi sono tutte appartenenti alla categoria degli algoritmi di machine learning.

In questo caso specifico, l'algoritmo usato per la diagnosi del campo/area problematica individuata dal modello Hot-Spot satellite, sarà basato sul metodo della rete bayesiana. La rete bayesiana è un modello probabilistico che rappresenta un insieme di variabili stocastiche con le loro dipendenze condizionali attraverso l'uso di un grafo aciclico diretto. La rete bayesiana risulta piuttosto stabile anche in presenza di dati mancanti (Scutari, 2020), condizione relativamente probabile nel contesto analizzato.

Il modello Hotspot P&D sarà basato sulla metodologia degli alberi decisionali. In un modello predittivo ad albero decisionale, ogni nodo interno rappresenta una variabile, un arco verso un nodo figlio rappresenta un possibile valore di quella variabile. Al termine di ciascun ramo si trova il valore predetto per la variabile obiettivo a partire dai valori delle altre variabili. L'albero decisionale può essere allenato in maniera non supervisionata, oppure, se le relazioni tra le variabili sono note, può essere strutturato in maniera empirica.

Le metodologie descritte sono state identificate come le più efficaci sulla base della bibliografia esistente. Tuttavia, solo la validazione dei modelli finali permetterà di definire se il livello di performance sia sufficiente ed indirizzare eventualmente la ricerca verso altri algoritmi.

I dataset necessari per un training efficace degli algoritmi di machine learning sono molto ampi, e difficilmente reperibili in agricoltura. Per far fronte a questa problematica, sono state messe in atto due strategie complementari. La prima strategia consiste nell'integrare la "conoscenza esperta" all'interno degli algoritmi di machine learning, come suggerito anche da Hou et al., 2020. In questo modo, è possibile limitare gli eventuali errori nell'algoritmo dovuti a dataset sbilanciati o troppo piccoli. Per fare questo, sono state selezionate le variabili predittive non solo in base alla relazione matematica riscontrata nei dati raccolti, ma anche in base alla bibliografia esistente. Inoltre, mentre il modello Hotspot satellite e il modello diagnostico saranno effettivamente allenati con i dati raccolti, il modello Hotspot P&D, pur basandosi su modello ad albero decisionale, è stato disegnato a priori, in quanto le relazioni tra le variabili erano sostanzialmente note.

La seconda strategia è stata quella di creare un piano di campionamento quanto più rappresentativo possibile del campo di applicabilità degli algoritmi, anche se ovviamente, la dimensione campionaria è stata influenzata dalle risorse a disposizione.

Il piano di campionamento per l'allenamento dei modelli prevede il rilievo visivo delle seguenti variabili:

- vigoria (livelli: bassa; medio bassa, media, medio-alta, alta), in base alla fase fenologica e alla coltura in atto
- presenza o assenza di problematiche agronomiche evidenti
- se presenza: specificare la causa o le cause della problematica

Il rilievo dei dataset di training e test è stato eseguito su 7 campi di grano (98 ha totali), 7 di mais (81 ha totali) e 4 di pomodoro (46 ha totali), localizzati in Umbria, Emilia Romagna e Piemonte. Sono stati campionati 3 punti per campo. La raccolta dati è avvenuta settimanalmente per tutta la durata delle colture durante il 2023. I dati del secondo anno sono tuttora in fase di raccolta. La metodologia utilizzata è analoga a quella dell'anno precedente.

Il dataset raccolto sarà utilizzato esclusivamente per le fasi di training e validazione dei modelli Hotspot satellite e modello diagnostico. Per la validazione e il test dei modelli saranno utilizzati anche altri dati da rilievi mensili, raccolti in ulteriori 30 campi (7 coltivati a frumento, 13 a mais, 10 a pomodoro) per un totale di 196 ha, localizzati in varie parti d'Italia (Piemonte, Lombardia, Veneto, Emilia-Romagna, Umbria, Puglia).

I modelli di machine learning migliorano la propria performance e la loro adattabilità ad altri contesti con l'aumentare della quantità e della variabilità dei dati di training. Le raccolte dati eseguite negli anni successivi permetteranno di migliorare i modelli sia in termini di precisione che di campo di applicazione. È un sistema di modelli dinamico, che può cambiare gli input e l'accuratezza degli output nel tempo.

## Conclusioni

In conclusione, il sistema di modelli progettato è in grado di fornire informazioni sintetiche all'utente finale, come suggerito da Saiz-Rubio e Rovira-Más, (2020), permettendo di ottenere informazioni facilmente utilizzabili per le decisioni in ambito agricolo. L'allenamento dei modelli di machine learning in agricoltura rimane comunque un tema delicato, in quanto i modelli di machine learning sono tanto più precisi e affidabili tanto più è ampio il dataset di training, specialmente se il campo di applicabilità è molto variabile. In questo senso, le campagne di raccolta dati eseguite in maniera statisticamente corretta e ripetute negli anni permettono la creazione di dataset che possono offrire la possibilità di migliorare i modelli previsionali basati sul machine learning.

## Bibliografia

- Boori, M. S., Choudhary, K., Paringer, R., Sharma, A. K., Kupriyanov, A., & Corgne, S. (2019, September). Monitoring crop phenology using NDVI time series from Sentinel 2 satellite data. In 2019 5th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP) (pp. 62-66). IEEE.
- Benincasa, P., Antognelli, S., Brunetti, L., Fabbri, C. A., Natale, A., Sartoretti, V., ... & Vizzari, M. (2018). Reliability of NDVI derived by high resolution satellite and UAV compared to in-field methods for the evaluation of early crop N status and grain yield in wheat. *Experimental Agriculture*, 54(4), 604-622.
- Butora, A., Soloniewicz, B., Schwartz, C., Aziz, C., Su, S., & Mahmoud, M. (2022, December). The Practical use of GIS in Agriculture. In 2022 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI) (pp. 1525-1529). IEEE.
- den Besten, N., Steele-Dunne, S., de Jeu, R., & van der Zaag, P. (2021). Towards monitoring waterlogging with remote sensing for sustainable irrigated agriculture. *Remote Sensing*, 13(15), 2929.
- Fedele, G., Salotti, I., Caffi, T., & Rossi, V. (2024). Multi-Modelling Approach to Support Decision Making in Crop Protection. *Plant Health Cases*, (2024), phcs20240004.
- Gallardo, M., Elia, A., & Thompson, R. B. (2020). Decision support systems and models for aiding irrigation and nutrient management of vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 240, 106209.
- Hou, Y., Zheng, E., Guo, W., Xiao, Q., & Xu, Z. (2020). Learning Bayesian network parameters with small data set: A parameter extension under constraints method. *IEEE Access*, 8, 24979-24989.
- Liu, L., Dong, Y., Huang, W., Du, X., Ren, B., Huang, L., ... & Ma, H. (2020). A disease index for efficiently detecting wheat fusarium head blight using sentinel-2 multispectral imagery. *IEEE Access*, 8, 52181-52191.
- Liu, S., Pan, X., Yang, Y., Yuan, J., Yang, Z., Wang, Z., ... & Song, H. (2023). A Crop water stress index based on Remote Sensing methods for monitoring drought in an Arid area. *Remote Sensing Letters*, 14(8), 890-900.
- Mehedi, I. M., Hanif, M. S., Bilal, M., Vellingiri, M. T., & Palaniswamy, T. (2024). Remote Sensing and Decision Support System Applications in Precision Agriculture: Challenges and Possibilities. *IEEE Access*.
- Rolle, M., Tamea, S., Claps, P., Ayari, E., Baghdadi, N., & Zribi, M. (2022). Analysis of maize sowing periods and cycle phases using Sentinel 1&2 data synergy. *Remote Sensing*, 14(15), 3712.
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*, 10(2), 207.
- Segarra, J., Buchailot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, 10(5), 641.
- Scutari, M. (2020). Bayesian network models for incomplete and dynamic data. *Statistica Neerlandica*, 74(3), 397-419.

- Sridevy, S., Devi, M. N., & Sankar, M. (2023). Decision support systems in agricultural industry perspective.
- Srivastava, P. K., & Singh, R. M. (2016). GIS based integrated modelling framework for agricultural canal system simulation and management in Indo-Gangetic plains of India. *Agricultural Water Management*, 163, 37-47.
- Tonle, F. B., Niassy, S., Ndadji, M. M., Tchendji, M. T., Nzeukou, A., Mudereri, B. T., ... & Tonnang, H. E. (2024). A road map for developing novel decision support system (DSS) for disseminating integrated pest management (IPM) technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 217, 108526.
- Zheng, Q., Huang, W., Cui, X., Shi, Y., & Liu, L. (2018). New spectral index for detecting wheat yellow rust using Sentinel-2 multispectral imagery. *Sensors*, 18(3), 868.

# ENHANCING PEST MANAGEMENT IN SUSTAINABLE AGRICULTURE THROUGH AI-DRIVEN REMOTE MONITORING AND PREDICTIVE MODELING

## OTTIMIZZAZIONE DEL PEST MANAGEMENT PER L'AGRICOLTURA SOSTENIBILE CON L'IA ATTRAVERSO IL MONITORAGGIO DA REMOTO E LA MODELLISTICA PREDITTIVA

Roberta Ascolese<sup>1,2\*</sup>, Francesco Nugnes<sup>2</sup>, Giuliano Langella<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Biologia, Napoli (NA)

<sup>2</sup> Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante (CNR-IPSP), Portici (NA)

<sup>3</sup> Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Agraria, Portici (NA)

\* roberta.ascolese@unina.it

### Abstract

Recent climate changes pose significant challenges to phytosanitary management, particularly in pest control, due to fluctuating temperatures and irregular precipitation patterns disrupting the life cycles of acclimated species. In addition, human activities in trade have facilitated the introduction of exotic species with severe impacts on the agriculture sector. The development of effective control techniques using Artificial Intelligence is crucial to better plan activities in Integrated Pest Management. This project focuses on studying *Ceratitis capitata* to update information about its life cycle and to assess its response to *Bactrocera dorsalis* invasion, recently recorded in Southern Italy. With the use of traditional and electronic traps and self-produced agrometeorological smart stations, predictive models are being developed as crucial tools for better planning phytosanitary activities and to be part of an updated Decision Support System.

### Parole chiave

cambiamento climatico; trappole elettroniche; specie invasive; modelli previsionali; protezione delle colture

### Keywords

climate change; e-traps; invasive pests; forecast models; crop protection

### Introduzione

Il settore agricolo risulta tra quelli più suscettibili agli impatti del riscaldamento globale, con considerevoli conseguenze economiche (Mendelson, 2009). Gli imprevedibili eventi climatici, tra cui l'innalzamento della temperatura media giornaliera e l'irregolarità delle precipitazioni, esercitano un'influenza significativa sui rendimenti delle colture (Mahli et al., 2021). Tuttavia, il settore agricolo si trova ad affrontare crescenti minacce, non solo legate alle conseguenze dirette dei cambiamenti climatici sulla fisiologia vegetale, ma anche all'impatto che questi esercitano sulle popolazioni dei fitofagi.

Lo sviluppo degli insetti, in quanto organismi ectotermici, dipende fortemente da variabili come umidità, precipitazioni e soprattutto temperatura (Paaijmans et al., 2013). Negli ultimi anni, i repentini cambiamenti climatici hanno avuto effetti considerevoli sul ciclo vitale di molti parassiti. Di conseguenza, i periodi di sviluppo e di volo di numerose specie di fitofagi non risultano allineati con i dati precedentemente raccolti. In aggiunta, l'aumento delle temperature medie ha causato non solo l'incremento nelle popolazioni di molte specie, ma anche l'espansione del loro areale geografico (Shrestha, 2019; Skendžić et al., 2021). Inoltre, le attività umane come il commercio e i viaggi hanno abbattuto le barriere ecologiche, favorendo l'introduzione e la diffusione di specie esotiche in nuovi territori (Pace et al., 2022). Inoltre, il piano di gestione di campo è sempre più

difficile a causa della riduzione o del divieto dell'utilizzo di molti principi attivi (Dir. 2009/128/CE; Regolamento di attuazione UE 2019/1090) che in precedenza consentivano un buon controllo, ma con effetti nocivi sull'ambiente e sulla salute umana. Tali leggi prevedono un maggiore investimento nell'uso di metodi eco-sostenibili volti alla conservazione dell'ambiente e della biodiversità nonché alla sicurezza alimentare. Negli ultimi anni, il Sud Italia ha affrontato in modo diretto tali problematiche. In dettaglio, nell'ultimo decennio è stato osservato sul territorio della regione Campania un incremento della popolazione della mosca mediterranea della frutta *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae), con conseguente recrudescenza significativa di danni e perdite economiche su diverse colture (Gilioli et al., 2022). Il danno è causato dall'attività trofica delle larve che si nutrono a scapito della polpa del frutto maturo, causando marcescenza e cascola precoce (König et al., 2022) (Fig. 1). Storicamente, l'ampio impiego di strategie di cattura e l'uso diffuso di pesticidi si sono dimostrati efficaci nel contenere le popolazioni di *C. capitata*. Tuttavia, alcune di queste tattiche, un tempo efficienti, hanno perso la loro efficacia a causa della resistenza ai pesticidi sviluppata dai fitofagi. Inoltre, molte sostanze, come il dimetoato e il malatione, largamente impiegate in passato, sono state vietate a causa della loro persistenza nell'ambiente e nell'ottica di un'agricoltura più ecologicamente consapevole (Giunti et al., 2023).



Negli ultimi anni, la regione Campania è diventata anche scenario dell'introduzione e successiva proliferazione di insetti di origine non europea dannosi per le colture, tra cui *Aromia bungii* (Coleoptera: Cerambycidae) (EFSA,2019), *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) (De Michele & Grozea, 2018), *Rhagoletis completa* (Diptera: Tephritidae) (Poggetti et al., 2019), che si sono ora stabilizzati in varie aree del territorio. Tra le varie sfide fitosanitarie, dal 2022 una preoccupazione rilevante è rappresentata dall'invasione di *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) (Nugnes et al., 2023), nota anche come Mosca Orientale della frutta, inclusa tra i 20 organismi nocivi prioritari per l'UE (Regolamento UE 2019/2072). *Bactrocera dorsalis*, provoca danni simili a quelli causati da *C. capitata* sui frutti in maturazione (Fig. 1), ma la caratteristica più preoccupante è la sua alta polifagia, in quanto il suo range di ospiti include oltre 300 specie vegetali, compresi anche gli ortaggi (EPPO). Questa caratteristica potrebbe essere attribuita alla sua complessità tassonomica in quanto afferente in un gruppo di 12 specie (conosciuto come “complesso *Bactrocera dorsalis*”) morfologicamente e, talvolta, geneticamente difficili da discriminare. Questo complesso mostra un'impressionante capacità di adattamento ecologico (Jaffar et al., 2023) e può stabilirsi facilmente e prosperare in nuovi territori, in particolare quelli italiani, approfittando delle condizioni climatiche favorevoli.

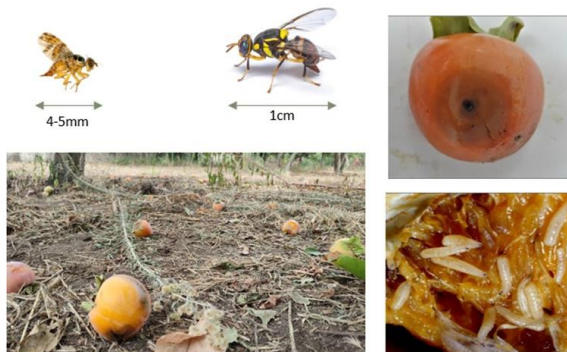


Fig.1 – Da sinistra in alto, femmine di *Ceratitis capitata* e di *Bactrocera dorsalis* – Tipici danni su frutti maturi causati da entrambe le specie

Fig. 1 – From the left on top, an adult female of *Ceratitis capitata* and an adult female of *Bactrocera dorsalis* - Typical damages on ripening fruits caused by both species

Lo studio aggiornato della biologia dei parassiti in funzione dei cambiamenti climatici è fortemente necessario per pianificare meglio le attività di difesa delle colture (Bajwa et al., 2020). Il monitoraggio entomologico e la raccolta dati agrometeorologici sono due tra gli strumenti fondamentali per raggiungere tale scopo. Tuttavia, queste attività possono essere potenziate e migliorate utilizzando l'Intelligenza Artificiale.

In particolare, il monitoraggio da remoto con l'uso di trappole elettroniche consente una maggiore supervisione sul campo in tempo reale, riducendo al minimo sia il tempo sia i

costi per le attività di controllo (Ascolese et al., 2022), rendendo anche possibile individuare con precisione i momenti della giornata in cui i voli del fitofago target sono più concentrati.

Nel campo della modellistica, l'uso dell'Intelligenza Artificiale è cruciale per lo sviluppo e la verifica di diversi modelli descrittivi in grado di prevedere i primi voli ed i picchi di sfarfallamento nonché di valutare le differenze da un anno all'altro attraverso il calcolo dei gradi giorno (Toscano et al., 2022). Ciò potrebbe consentire l'identificazione sia degli effetti diretti dei cambiamenti climatici su specie già acclimatate, sia la proiezione di probabili scenari futuri per la diffusione di specie aliene (Wen et al., 2024).

Tale progetto è focalizzato sullo studio della biologia di *Ceratitis capitata* per aggiornare i dati sulla presenza degli adulti in campo e valutare possibili cambiamenti nelle diverse fasi del ciclo vitale. Lo studio si focalizza anche sullo sviluppo e sulla nuova espansione di *Bactrocera dorsalis* nei territori della regione Campania, per chiarire se questa specie invasiva possa completare una o più generazioni all'anno e analizzare la sua possibile relazione competitiva con la mosca mediterranea. Saranno effettuate analisi quantitative e qualitative delle piante ospiti per stimare l'entità dei danni di *C. capitata* sui frutti e per esaminare quali colture autoctone siano più suscettibili all'attacco di *B. dorsalis*. Interpolando i dati entomologici e agrometeorologici, l'obiettivo finale del presente studio è sviluppare e testare nuovi tipi di modelli descrittivi e predittivi per stabilire azioni fitosanitarie più mirate e pianificare metodi di controllo biologico per promuovere la riduzione dei pesticidi.

## Materiali e Metodi

Le attività di monitoraggio sono condotte nella regione Campania, in un'area che comprende le località di Palma Campania, Ottaviano, San Gennaro Vesuviano e Sarno.

L'area di studio comprende 6 siti dove sono presenti entrambi i fitofagi, tutti caratterizzati da un'infestazione attiva da parte di *C. capitata* e, in alcuni, anche da *B. dorsalis* (Fig. 2). Questa area fa parte della Zona Infestata dove, nel 2022, *B. dorsalis* ha iniziato la sua diffusione sul territorio regionale e dove sono state effettuate attività di monitoraggio preventivo a decorrere dal 2018 (Nugnes et al., 2018).

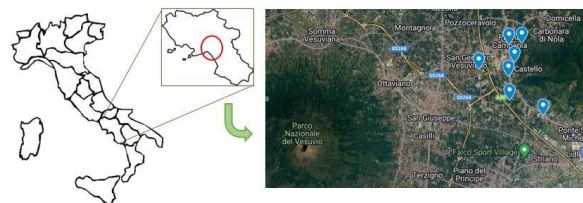


Fig. 2 – Area di studio in cui sono condotte le attività di monitoraggio. I punti blu corrispondono ai 6 siti caratterizzati da infestazione attiva

Fig. 2 – Study area in which monitoring activities are carried out. Blue points represent the 6 sites characterized by active infestation

I dati entomologici sono stati raccolti con cadenza settimanale utilizzando diversi tipi di trappole (adesive e modello McPhail) innescate con Trimed-lure e Metil-Eugenolo, rispettivamente per gli individui maschili di *C. capitata* e di *B. dorsalis*.

Inoltre, alcune trappole McPhail sono state attivate con soluzione di lievito *Torula*, per monitorare femmine adulte di entrambe le specie. In parallelo sono state posizionate e testate anche prototipi di trappole elettroniche (e-trap) per il monitoraggio da remoto (BugBox by SbS Group) (Fig. 3).



Fig. 3 – Tipologie di trappole tradizionali ed elettroniche impiegate nello studio: McPhail, trappole collanti e prototipi di e-trap (BugBox by SbS Group)

Fig. 3 – Types of traditional and electronic traps used in the study: McPhail, sticky trap and e-trap prototypes (BugBox by SbS Group)

Sono stati adottati metodi di Deep Learning per addestrare il sistema di riconoscimento delle e-trap al fine di distinguere gli esemplari presenti all'interno del BugBox. Utilizzando una piattaforma web-based, tutti gli esemplari presenti nella e-trap e fotografati dalla microcamera posta al suo interno sono stati sottoposti a labeling manuale che prevede la loro delimitazione in “bounding-box” e la classificazione in categorie specifiche per ciascuna specie identificata. In seguito, tali dati sono elaborati attraverso algoritmi Python al fine di addestrare il sistema di riconoscimento digitale a discriminare le varie specie catturate nelle e-trap (Fig. 4).

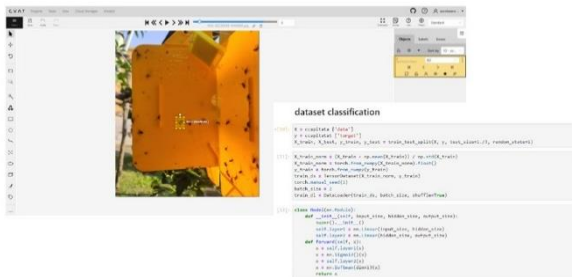


Fig. 4 – Labeling manuale attraverso la piattaforma web-based per sviluppare e addestrare il sistema di riconoscimento della e-trap per la discriminazione delle varie specie

Fig. 4 – Manual labeling through the web-based platform to develop and to train the recognition system of the e-trap for discriminating different species

In ogni sito sono state installate stazioni agrometeorologiche a basso costo per raccogliere dati sulla temperatura dell'aria

e del suolo, umidità relativa, umidità del suolo, precipitazioni, direzione e velocità del vento (Fig. 5). La comunicazione di tali stazioni si basa su Ultra Narrow Bands e i dati sono costantemente disponibili in remoto utilizzando l'app Telegram, che consente di controllare il loro stato e le misurazioni in tempo reale.

I dati agrometeorologici sono campionati con frequenza alta (10 minuti), memorizzati in un database privato tramite canale SigFox ed elaborati tramite script in R.

Per la raccolta dei dati meteorologici, sono state valutate anche altre fonti, come i dati di temperatura e umidità provenienti da datalogger e stazioni meteorologiche ufficiali come quelle della Protezione Civile e del Servizio Fitosanitario della regione Campania.

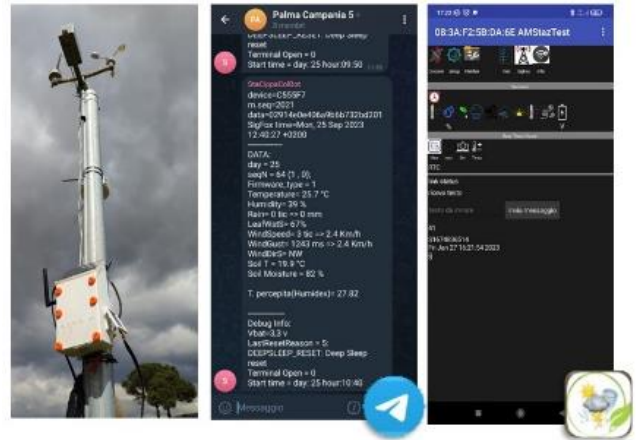


Fig. 5 – Stazione agrometeorologica impiegata nello studio – Canale Telegram per il controllo da remoto e interfaccia dell'app Agrometeo per testare i sensori via Bluetooth

Fig. 5 – Smart control unit used in the study – Telegram channel for the remote control and Smart App Agrometeo for the test of the sensors via Bluetooth

A compimento del primo anno di attività, è stata condotta un'analisi preliminare dei gradi giorno su entrambe le specie. Dai dati entomologici raccolti con il monitoraggio settimanale delle trappole tradizionali e dai gradi giorno calcolati dalle temperature medie giornaliere misurate dalle smart station, è stato effettuato un confronto con diversi valori di temperature di sviluppo riportate in letteratura, in quanto dato biologico caratterizzante di ogni popolazione e corrispondente anche a tratti genetici e di origine del parassita. Dall'interpolazione dei dati entomologici e agrometeorologici, verranno in seguito sviluppati diversi tipi di modelli predittivi: Modelli di Nicchia Ecologica (ENM) per sviluppare mappe di rischio dell'espansione potenziale di *Bactrocera dorsalis* in nuovi territori, Reti Neurali Artificiali (ANN) (Jayanthi et al., 2011) e modelli descrittivi fondati su Equazioni Differenziali Ordinarie (ODE) e basati su dati biologici relativi allo sviluppo di tutti gli stadi del ciclo vitale per prevedere con più precisione l'emergenza degli adulti in campo (Rossini et al., 2022).

Tutti i dati entomologici e agrometeorologici sono stati raccolti a decorrere dal 1° gennaio 2023 e le attività di

monitoraggio sono tuttora costantemente operative sul territorio della regione Campania.

## Risultati preliminari e Discussioni

Confrontando le temperature medie ambientali con diverse temperature soglia di sviluppo, è stato osservato uno spostamento nel ciclo vitale di *C. capitata*. I primi sfarfallamenti della mosca mediterranea sono stati osservati nei siti di indagine con largo anticipo rispetto a quanto atteso dai dati noti circa il suo ciclo vitale e rispetto a quanto predetto secondo i valori di threshold considerati (Tab. 1). Questo fenomeno sembrerebbe confermare l'impatto che l'innalzamento della temperatura media giornaliera eserciti sul ciclo di *C. capitata* anticipando di fatto l'emergenza degli individui svernanti a causa delle condizioni climatiche favorevoli.

*Tab. 1 – Analisi preliminari dei gradi giorno confrontati con temperature di sviluppo da letteratura per C. capitata*

*Tab. 1 - Preliminary analysis of degree days compared with developmental threshold in literature for C. capitata*

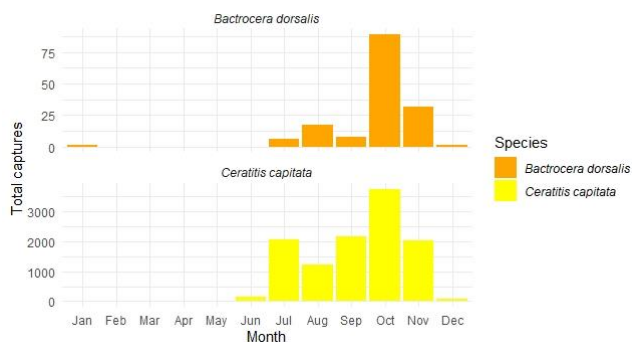
Bibliografia	T soglia (°C)	GG	Emergenza prevista
Tassan et al., (1982)	9,7	325,2	02/05/2023
Allen et al., (1976)	10	620	05/06/2023

La stessa analisi preliminare è stata condotta su *B. dorsalis*, i cui individui non sono stati intercettati durante nessuno dei periodi identificati come possibili eventi secondo le previsioni calcolate. Il primo individuo di *B. dorsalis* nel 2023 è stato catturato a metà luglio e non è stato riscontrato alcun esemplare durante la primavera, come di contro previsto dalle analisi previsionali condotte (Tab. 2).

*Tab. 2 – Analisi preliminari dei gradi giorno confrontati con temperature di sviluppo da letteratura per B. dorsalis*

*Tab. 2 - Preliminary analysis of degree days compared with developmental threshold in literature for B. dorsalis*

Queste osservazioni lasciano aperte diverse ipotesi. Le popolazioni presenti nel 2022 potrebbero non essere sopravvissute durante la stagione invernale mentre gli esemplari rinvenuti durante l'estate del 2023 potrebbero essere il risultato di nuove incursioni. Pertanto, indagini molecolari sono ancora in corso per studiare e confrontare le popolazioni di *B. dorsalis* ritrovate in Campania sia nel 2022 sia nel 2023. I dati del primo anno suggeriscono, inoltre, una presenza più consistente di *C. capitata* rispetto a *B. dorsalis* nei siti esaminati. Tuttavia, il maggior numero di catture per entrambe le specie è stato concentrato nel mese di ottobre (Fig. 6), con una temperatura media giornaliera di circa 23-25°C con umidità relativa del 70%.



*Fig. 6 – Totale delle catture di B. dorsalis e C. capitata registrate durante le attività di monitoraggio nel 2023*

*Fig. 6 – Total of captures of B. dorsalis and C. capitata collected during the monitoring activities in 2023*

## Conclusioni

L'urgenza di un'agricoltura più sostenibile e sicura dal punto di vista alimentare riduce il numero e la quantità di sostanze attive consentite nella gestione integrata dei parassiti. Pertanto il monitoraggio accurato e preventivo dei parassiti è essenziale per lo sviluppo di programmi di controllo economici ma soprattutto eco-sostenibili. In questo contesto, diventa imperativo concepire metodologie più evolute ed efficienti, sfruttando l'IA per formulare approcci innovativi di monitoraggio e controllo.

Lo sviluppo di un sistema di riconoscimento accurato per le e-traps sarà cruciale per ottenere dati entomologici giornalieri che possano ridefinire questi risultati preliminari e descrivere meglio modelli predittivi per le specie target. Il monitoraggio agrometeorologico e degli insetti in tempo reale sarà fondamentale per lo sviluppo di modelli di previsione che possano essere integrati nei sistemi di supporto decisionale per *Ceratitis capitata* e *Bactrocera dorsalis* nel Sud Italia.

## Ringraziamenti

Bibliografia	T soglia (°C)	GG	Emergenza prevista
De Villiers et al. (2016)	9	380	30/04/2023
Samayoa et al. (2018)	9,8	325,5	03/05/2023
Kim & Kim (2018)	9,5	716,7	08/06/2023
Stephens et al. (2017)	13	470	22/06/2023

Questa ricerca è co-finanziata e condotta nell'ambito del progetto "Unità Regionale di Coordinamento Fitosanitario" (URCoFi) in collaborazione con il Servizio Fitosanitario della Regione Campania.

## Bibliografia

- Allen, J. C. (1976). A modified sine wave method for calculating degree days. *Environmental Entomology*, 5(3), 388-396.
- Ascolese, R., Gargiulo, S., Pace, R., Nappa, P., Griffo, R., Nugnes, F., & Bernardo, U. (2022). E-traps: A valuable monitoring tool to be improved. *EPPO Bulletin*, 52(1), 175-184.
- Bajwa, A. A., Farooq, M., Al-Sadi, A. M., Nawaz, A., Jabran, K., & Siddique, K. H. (2020). Impact of climate change on biology and management of wheat pests. *Crop Protection*, 137, 105304. [centrofunzionale.regione.campania.it](http://centrofunzionale.regione.campania.it)

- De Michele, A., & Grozea, I. (2018). Review of the spreading of *Halyomorpha halys* in Italy and confirmation of presence in Romania. *Research Journal of Agricultural Science*, 50(4).
- De Villiers, M., Hattingh, V., Kriticos, D. J., Brunel, S., Vayssières, J. F., Sinzogan, A., Billah, M.K., Mohamed, S.A., Mwatawala, M., Abdelgader, H., Salah, F.E.E. & De Meyer, M. (2016). The potential distribution of *Bactrocera dorsalis*: considering phenology and irrigation patterns. *Bulletin of Entomological Research*, 106(1), 19-33.
- European Food Safety Authority (EFSA), de la Peña, E., Schrader, G., & Vos, S. (2019). Pest survey card on *Aromia bungii*. *EFSA Supporting Publications*, 16(12), 1731E.
- Gilioli, G., Sperandio, G., Colturato, M., Pasquali, S., Gervasio, P., Wilstermann, A., Dominic, A.R. & Schrader, G. (2022). Non-linear physiological responses to climate change: the case of *Ceratitidis capitata* distribution and abundance in Europe. *Biological Invasions*, 1-19.
- Giunti, G., Benelli, G., Campolo, O., Canale, A., Kapranas, A., Liedo, P., De Meyer, M., Nestel, D., Ruiu, L., Scolari, F., Wang, X. & Papadopoulos, N. T. (2023). Management of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitidis capitata*: past, present, and future. *Entomologia Generalis*, 43(6), 1241-1263.
- gd.eppo.int
- Jaffar, S., Rizvi, S. A. H., & Lu, Y. (2023). Understanding the invasion, ecological adaptations, and management strategies of *Bactrocera dorsalis* in China: A Review. *Horticulturae*, 9(9), 1004.
- Jayanthi, P. K., Verghese, A., & Sreekanth, P. D. (2011). Predicting the oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) trap catch using artificial neural networks: A case study. *International journal of tropical insect science*, 31(4), 205-211.
- Kim, S. B., & Kim, D. S. (2018). A tentative evaluation for population establishment of *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) by its population modeling: Considering the temporal distribution of host plants in a selected area in Jeju, Korea. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 21(2), 451-465.
- König, S., Steinmüller, S., & Baufeld, P. (2022). Origin and potential for overwintering of *Ceratitidis capitata* (Wiedemann) captured in an official survey in Germany. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 129(5), 1201-1215.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*, 13(3), 1318.
- Mendelsohn, R. (2009). The impact of climate change on agriculture in developing countries. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1(1), 5-19.
- Nugnes, F., Russo, E., Viggiani, G., & Bernardo, U. (2018). First record of an invasive fruit fly belonging to *Bactrocera dorsalis* complex (Diptera: Tephritidae) in Europe. *Insects*, 9(4), 182.
- Nugnes, F., Miele, F., Carbone, C., Ascolese, R., Figlioli, L., Bernardo, U. (2023). Studi preliminari sulla variabilità genetica di *Bactrocera dorsalis* e dinamica dell'infestazione in Campania. CNIE 12-16. June 2023 Palermo.
- Paaijmans, K. P., Heinig, R. L., Seliga, R. A., Blanford, J. I., Blanford, S., Murdock, C. C., & Thomas, M. B. (2013). Temperature variation makes ectotherms more sensitive to climate change. *Global change biology*, 19(8), 2373-2380.
- Pace, R., Ascolese, R., Miele, F., Russo, E., Griffo, R. V., Bernardo, U., & Nugnes, F. (2022). The bugs in the bags: The risk associated with the introduction of small quantities of fruit and plants by airline passengers. *Insects*, 13(7), 617.
- Poggetti, L., Raranciuc, S., Chiabà, C., Vischi, M., & Zandigiacomo, P. (2019). Altitude affects the distribution and abundance of two non-native insect pests of the common walnut. *Journal of applied entomology*, 143(5), 527-534.
- Rossini, L., Bruzzone, O. A., Contarini, M., Bufacchi, L., & Speranza, S. (2022). A physiologically based ODE model for an old pest: Modeling life cycle and population dynamics of *Bactrocera oleae* (Rossi). *Agronomy*, 12(10), 2298.
- Samayoa, A. C., Choi, K. S., Wang, Y. S., Hwang, S. Y., Huang, Y. B., & Ahn, J. J. (2018). Thermal effects on the development of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) and model validation in Taiwan. *Phytoparasitica*, 46, 365-376.
- Shrestha, S. (2019). Effects of climate change in agricultural insect pest. *Acta Scientific Agriculture*, 3(12), 74-80.
- Skendžić, S., Zovko, M., Pajač Živković, I., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). Effect of climate change on introduced and native agricultural invasive insect pests in Europe. *Insects*, 12(11), 985.
- Stephens, A. E. A., Kriticos, D. J., & Leriche, A. (2007). The current and future potential geographical distribution of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). *Bulletin of Entomological Research*, 97(4), 369-378.
- Tassan, R. L., Hagen, K. S., Cheng, A., Palmer, T. K., Feliciano, G., & Blough, T. L. (1983). Mediterranean fruit fly life cycle estimations for the California eradication program.
- Toscano-Miranda, R., Toro, M., Aguilar, J., Caro, M., Marulanda, A., & Trebilcok, A. (2022). Artificial-intelligence and sensing techniques for the management of insect pests and diseases in cotton: A systematic literature review. *The Journal of Agricultural Science*, 160(1-2), 16-31.
- Wen, X., Fang, G., Chai, S., He, C., Sun, S., Zhao, G., & Lin, X. (2024). Can ecological niche models be used to accurately predict the distribution of invasive insects? A case study of *Hyphantria cunea* in China. *Ecology and Evolution*, 14(3), e11159.



# TREND DI TEMPERATURA A SCALA LOCALE IN AREE MEDITERRANEE: ANALISI SPAZIOTEMPORALE DEI DATI ACQUISITI DALLA RETE AGROMETEOROLOGICA DELLA BASILICATA DAL 2000 AL 2023

## LOCAL SCALE TEMPERATURE TRENDS IN MEDITERRANEAN AREAS: SPATIO- TEMPORAL ANALYSIS OF DATA ACQUIRED BY THE BASILICATA AGROMETEOROLOGICAL NETWORK FROM 2000 TO 2023

Emanuele Scalcione<sup>2\*</sup>, Pietro Dichio<sup>2\*</sup>, Maria Lanfredi<sup>1</sup>, Rosa Coluzzi<sup>1</sup>, Vito Imbrenda<sup>1</sup>, Caterina Samela<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale – Consiglio Nazionale delle Ricerche (IMAA-CNR) c.da S. Loja - 85050 Tito Scalo (PZ)

<sup>2</sup> Agenzia Lucana di Sviluppo e di Innovazione in Agricoltura (ALSIA) Via Annunziatella 64 - 75100 Matera

\*[emanuele.scalcione@alsia.it](mailto:emanuele.scalcione@alsia.it)

### Abstract

The success of climate change adaptation in agriculture heavily relies on the degree of preparedness and therefore on the ability to correctly interpret meteorological-climate data at local scale for the setting up of proactive strategies in the management of climate-driven adversities. This study focuses on annual mean temperature time series recorded by the agrometeorological network of the Basilicata region from 2000 to 2023. The spatial inspection of the time series performed by investigating Spatial-Temporal Matrices, shows a significant positive trend all over in the region. An estimate of such a trend in the agricultural district of the Metapontum Plain accounts for an increase of about 1 °C in thirty years. The only exception is the behaviour observed in spring, which shows slight temperature decrease instead. Based on these findings, given the decreasing number of cold hours during the period November-March, agricultural strategies should favour species with a low cold requirement.

### Parole chiave

Vulnerabilità climatica, Land Degradation, Italia mediterranea, Fabbisogno in freddo, Fenologia

### Keywords

Climatic vulnerability, Land Degradation, Mediterranean Italy, Cold requirement, Phenology

### Introduzione

Il sesto Rapporto di Sintesi dell'IPCC di Valutazione sui Cambiamenti Climatici evidenzia che la temperatura media globale, rispetto al cinquantennio 1850-1900, è aumentata di 1,1 °C. Detto incremento, sempre secondo il rapporto dell'IPCC, è causato dalle attività umane attraverso le emissioni di gas serra. Inoltre, se consideriamo il periodo compreso tra il 1850 e il 2019 osserviamo che il 42% del totale dei gas a effetto serra di origine antropica è stato emesso negli ultimi 30 anni (IPCC Rapporto di Sintesi AR6 – Cambiamenti Climatici, 2023 -). Secondo l'IPCC le proiezioni per il futuro, basate su modelli matematici, indicano un'ulteriore crescita della temperatura misurabile con la frequenza, durata e intensità di eventi meteorologici estremi, quali le ondate di calore, la siccità e le precipitazioni intense.

Numerosi sono i lavori sperimentali che hanno studiato gli effetti del cambiamento climatico sulle produzioni agricole, con particolare riferimento al soddisfacimento del fabbisogno in freddo delle gemme (Fernandez et al., 2023), maggiore incidenza del rischio di gelate tardive (Scalcione et al., 2022), l'anticipo del ciclo vegetativo e riproduttivo (Gordo et al., 2010), la maggiore incidenza di scottature dei frutti (Racsko and Schader, 2012), un maggiore rischio di carenza idrica (Medrano et al., 2015) e maggiore probabilità di danni all'agricoltura e alle infrastrutture del territorio (Bentivenga et al. 2020). L'agricoltura è influenzata dai

cambiamenti climatici a seguito dell'interazione fra la fisiologia delle piante e le variabili climatiche con impatti significativi sulla quantità e qualità delle produzioni agricole (Lobell and Burke, 2008; Hatfield et al., 2011, Montanaro et al., 2023).

Le stime dell'IPCC sopra riportate riguardano la scala globale ma i cambiamenti climatici si manifestano in modo diverso nelle diverse regioni e le valutazioni di impatto richiedono informazioni accurate alla scala locale. In termini di rischio, valutazioni attendibili dovrebbero prendere in considerazione anche i contesti biogeografici e sociali su cui tali cambiamenti insistono.

Questo studio analizza il regime termico della serie temporale 2000-2023 della Basilicata per evidenziare possibili cambiamenti in atto, gli impatti attesi sulle colture agrarie e le relative azioni di adattamento.

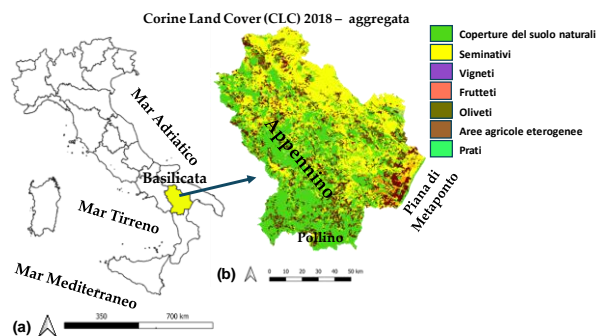
L'analisi verte sui dati acquisiti da tutte le stazioni della rete agrometeorologica dell'ALSIA per cui le serie di temperature sono complete in tutto il periodo studiato e poi in maniera specifica sui climi sub-umidi, mediterranei e semi-aridi del distretto agricolo del Metapontino, che sono caratterizzati da vulnerabilità alla land degradation. La Piana di Metaponto ricade in pieno nell'Italia Mediterranea in cui i periodi più siccitosi sono contestuali con i periodi più caldi dell'anno (Lanfredi et al., 2020). Il cambiamento climatico potrebbe rendere più aride queste zone facendo aumentare anche la vulnerabilità alla desertificazione. Nei climi sub-umido, mediterraneo e semi-arido, la percentuale di

seminativi critici è intorno al 5% e si dimezza quando si passa al clima umido suggerendo l'esistenza di un legame diretto tra criticità e clima (Lanfredi et al., 2023).

## Materiali e Metodi

### Area di studio

La Basilicata si estende per quasi 10000 km<sup>2</sup> ed è caratterizzata da paesaggi morfologicamente molto vari, divisi quasi equamente tra montagne e colline (rispettivamente 47% e 45%), con le aree pianeggianti che raggiungono appena l'8% della superficie complessiva. La copertura del suolo è molto eterogenea, con una disposizione che riflette approssimativamente l'orografia. Quest'ultima è l'elemento che maggiormente condiziona il clima che contempera zone continentali a cavallo dell'Appennino, ma anche zone temperate e talune con clima semi-arido.



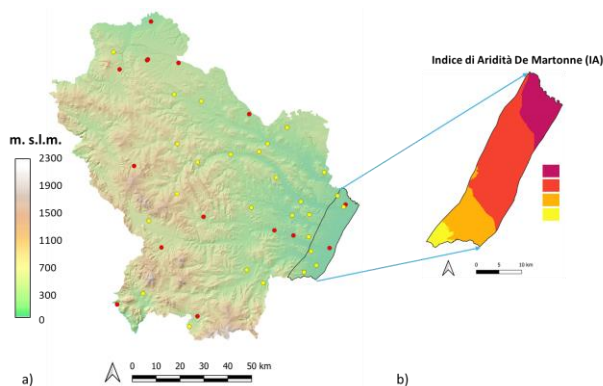
*Fig.1 - La Basilicata è caratterizzata da una ruralità diffusa (meno del 2% di superfici artificiali) con una forte presenza di aree agricole (57%) e coperture naturali (41%). Zone agricole di pregio, come la Piana del Metaponto sulla costa ionica, mostrano evidenti segni di intensificazione agricola.*

*Fig.1 - Basilicata is characterized by a diffused rurality (less than 2% of artificial surfaces) with a strong presence of agricultural areas (57%) and natural covers (41%). Valuable agricultural districts, such as the Metapontum Plain on the Ionian Coast, show overt signs of agricultural intensification.*

Tra le aree economicamente più vivaci della regione vi è la Piana Metapontina, che si estende per circa 40 km di costa sullo Ionio caratterizzandosi come distretto agricolo specializzato (ortofrutta in particolare) e come sede di una fiorente industria balneare. Non mancano in quest'area delle zone naturalistiche di pregio incluse nella Rete Natura 2000, quasi sempre connesse ai rimboschimenti di conifere effettuati negli anni Cinquanta al tempo della Riforma Agraria.

### Dati

Per questo lavoro sono stati utilizzati dati di temperatura media mensile acquisiti dalla rete agrometeorologica dell'ALSIA (Agenzia Lucana di Sviluppo e di Innovazione in Agricoltura) nel periodo 2000-2023. L'analisi si basa sulle ventisette stazioni della rete per le quali le serie disponibili sono complete.



*Fig.2 - a) Modello digitale di elevazione della Basilicata e stazioni della rete agrometeorologica dell'ALSIA (in giallo le stazioni con serie completa nel periodo 2000-2023); b) Classificazione climatica secondo l'indice di Aridità di De Martonne della Piana di Metaponto.*

*Fig.2 - a) Digital Elevation Model of Basilicata and the ALSIA's agrometeorological network (in yellow the stations with complete series over the period 2000-2023); b) Climate classification according to De Martonne's Aridity Index of the Metapontum Plain.*

### Metodi

L'analisi spazio-temporale dei dati forniti dalla rete è stata realizzata definendo delle Matrici Spazio-Temporali (MST) che riassumono i valori medi mensili della temperatura stimati dal 2000 al 2023, opportunamente standardizzati rispetto alla media ed alla varianza del periodo nella singola stazione. Quest'ultima trasformazione risponde all'esigenza di confrontare temperature rilevate in diversi contesti climatici locali fortemente determinati dall'eterogeneità orografica della regione. Immagazzinando i dati in MST, le cui righe rappresentino le stazioni e le colonne gli anni di osservazione, è possibile un'analisi quali-quantitativa non convenzionale dell'uniformità spaziale degli andamenti temporali osservati nella regione, basandosi sull'interpretazione dei colori in una visualizzazione della MST come immagine. L'analisi quantitativa dei trend dei dati originali (valore numerico e significatività statistica) e la proiezione dei valori di temperatura al 2030, basata su tali trend, è stata poi effettuata sulla media di cinque stazioni della costa ionica, un distretto agricolo di alto valore, dove studi pregressi hanno evidenziato vulnerabilità climatica (Lanfredi et al., 2023). Le stazioni selezionate sono posizionate in aree con climi sufficientemente omogenei da garantire la rappresentatività della media spaziale.

Sono stati utilizzati i metodi non parametrici di Mann-Kendall e Sen, sia sui dati originali che sui dati in cui è stata minimizzata l'autocorrelazione interannuale applicando una procedura di "pre-whitening" (Kahled et al 1998):

$$T'(y) = T(y) - r_1(Ty - 1)$$

dove  $y$  è l'anno corrente ed  $r_1$  è il coefficiente di correlazione ad un anno.

Nel test di Mann-Kendall, l'ipotesi nulla,  $H_0$ , è che non ci sia alcun trend. L'ipotesi alternativa,  $H_1$ , sostiene invece la

presenza di un trend. La condizione fondamentale per l'applicazione di tale metodologia è che le deviazioni dal trend siano indipendenti e ordinate casualmente. Questa condizione raramente si realizza in serie temporali di variabili meteorologiche e climatiche.

Poiché le stime di autocorrelazione e trend si influenzano mutuamente, queste possono favorire l'ipotesi H1 nel caso dei dati originali e quella H0 nel caso dei dati decorrelati. La strategia adottata in questo studio è stata pertanto di eseguire due stime differenti e considerare valida l'ipotesi H1 solo se entrambe le analisi sono in accordo con una significatività statistica  $<0.01$ . In tal caso, entrambi i valori dei trend sono utilizzati per le proiezioni al 2030, ottenendo un range di valori nel quale può variare la tendenza piuttosto che un singolo valore.

## Risultati e Discussione

Fig. 3 mostra la MST delle temperature medie annuali misurate nelle ventisette stazioni per le quali le serie temporali 2000-2023 sono complete.

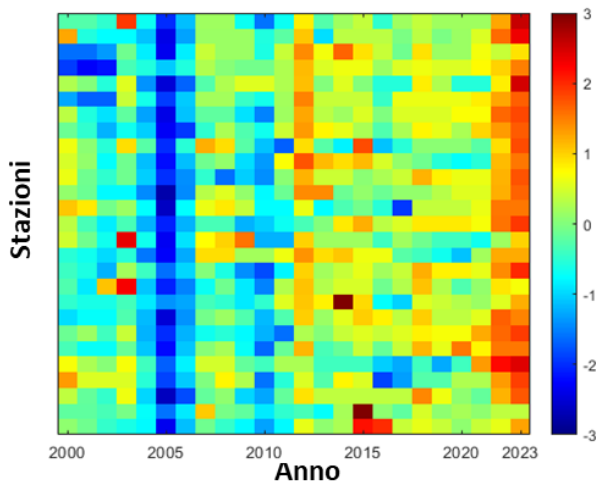
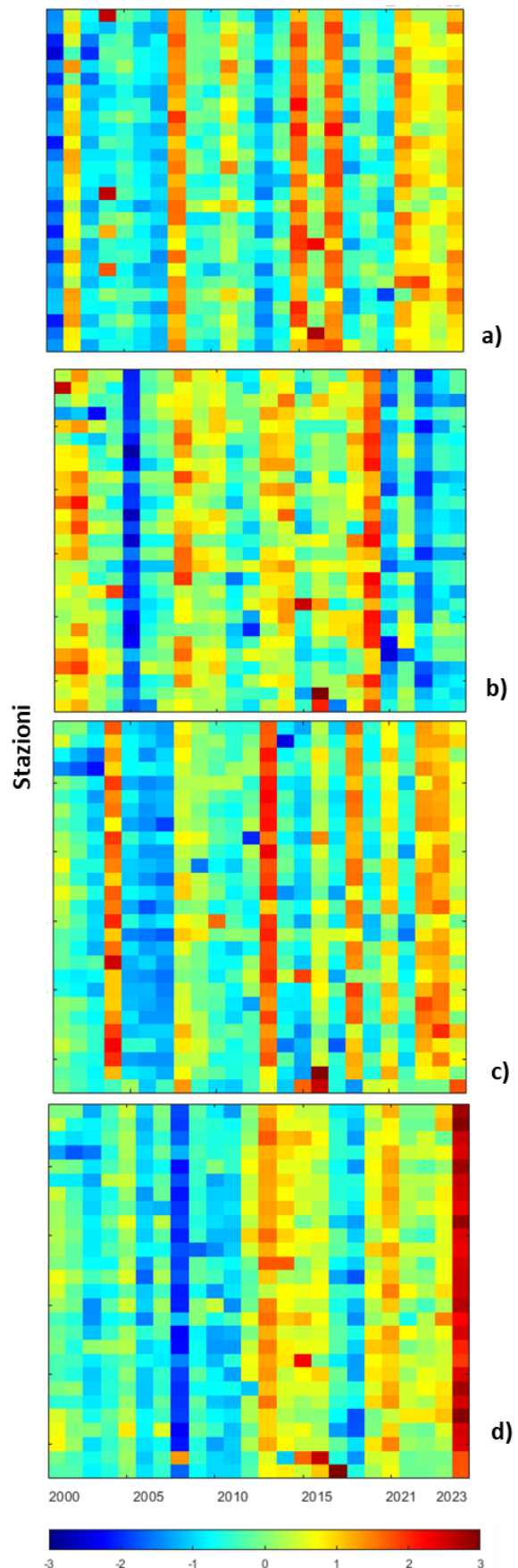


Fig.3 – Matrice Spazio-Temporale della temperatura media annuale. I valori sono standardizzati e rappresentano le anomalie in unità di  $\sigma$ .

Fig.3 – Spatial-Temporal Matrix of annual mean temperature. The values are standardized and represent anomalies in units of  $\sigma$ .

Fig.4 - MST per i valori stagionali: a) Inverno, b) Primavera, c) Estate, d) Autunno.

Fig.4 - MST for the following seasons: a) Winter, b) Spring, c) Summer, d) Autumn.





Le anomalie standardizzate mostrano un buon livello di uniformità spaziale, sia negli anni singolari, come il 2005, sia nel progressivo aumento della temperatura (spostamento verso il rosso nella barra dei colori), che diventa chiaramente visibile negli ultimi due anni. Da notare che nel 2023 gli aumenti raggiungono il valore di  $3\sigma$ .

Le stesse matrici, per le medie stagionali, sono riportate in Fig.4 dalla quale si evince che aumenti sono stati registrati in tutte le stagioni con l'eccezione della primavera, in cui invece le anomalie negative prevalgono a partire dal 2021.

Queste MST permettono di ricostruire la stagionalità media della temperatura, che è il parametro chiave, sia per il meteo-clima, sia per la fenologia della vegetazione. Dalla Fig. 4 si evince che sono stati registrati aumenti in tutte le stagioni con l'eccezione della primavera, in cui invece le anomalie negative prevalgono a partire dal 2021.

Un'informazione particolarmente interessante è riportata in Fig. 4d in cui sono riportati i valori autunnali. La passata stagione si presenta come un outlier statistico, il che suggerisce l'inizio di un potenziale periodo di ulteriore innalzamento delle temperature alla fine del 2023. Limitandoci infine all'area della Piana di Metaponto (Fig.5), il trend stimato  $s=0.035$  °C/anno è significativo con significatività  $<0.01$ . Il trend stimato dopo il pre-whitening fornisce  $s'=0.025$  °C/anno con la stessa significatività. Considerando la media di questi due valori, i risultati proiettati al 2030 forniscono un aumento di circa 1 °C rispetto al 2000.

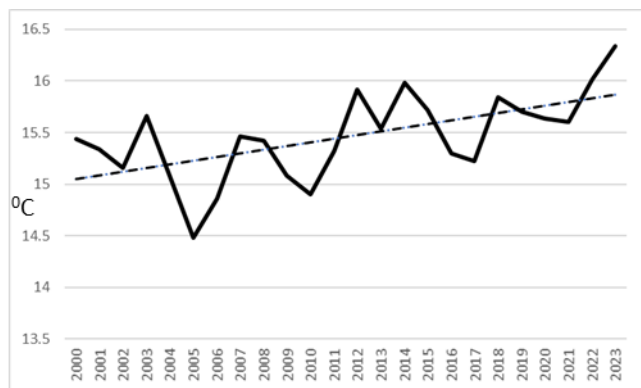


Fig.5 - Andamento della temperatura media annuale dal 2000 al 2023 nella Piana di Metaponto.

Fig.5 - Trend of the average annual temperature from 2000 to 2023 in the Metapontum Plain..

## Conclusioni

Lo studio ha evidenziato che in Basilicata si registrano trend crescenti significativi della temperatura media annuale, particolarmente evidenti nell'ultimo decennio. L'aumento è generalizzato nella regione, come mostrato dalle Matrici Spazio-Temporali dei valori standardizzati. Ne deriva che ci potrebbero essere effetti diretti sull'accumulo delle ore in freddo per il periodo novembre-marzo. Pertanto, la frutticoltura regionale, ed in particolare quella del Metapontino, deve preferire specie a basso fabbisogno in freddo. Le elaborazioni confermano la necessità per le coltivazioni arboree di adottare strategie di difesa dall'aumento termico come l'applicazione di reti ombreggianti o altri mezzi che riducono il carico termoradiativo del frutteto. L'unica eccezione all'aumento generalizzato è costituita dai valori primaverili che negli ultimi cinque anni sono stati leggermente più bassi del periodo precedente. Infatti, in questi anni la data di raccolta delle primizie di drupacee è stata leggermente posticipata rispetto alle date previste dai costitutori.

Inoltre, 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.

## Ringraziamenti

I dati meteorologici sono stati forniti da ALSIA (Agenzia Lucana di Sviluppo e di Innovazione in Agricoltura) ed elaborati nell'ambito di una convenzione tra ALSIA ed IMAA-CNR.

## Bibliografia

- Egea JA, Mimoun MB, Kodad O, El Yaacoubi A, Ghrab M, Egea J, Benmoussa H, Borgini N, Elloumi O, Luedeling E, 2023. Climate change impacts on winter chill in Mediterranean temperate fruit orchards. *Regional Environmental Change* 23:7.
- Gordo O., Sanz J.S., 2010. Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems. *Global Change Biology* 16(3): 1082-1106.
- Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, Thomson AM, Wolfe D, 2011. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. *Agronomy Journal* 103(2): 351-370.
- Khaled H. Hamed, A. Ramachandra Rao, A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data, *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 1998, 182-196.
- IPCC Sesto Rapporto di Valutazione, Cambiamenti Climatici 2023. <https://www.ipcc.ch/>.

- Lanfredi M, Coluzzi R, Imbrenda V, Macchiato M, & Simoniello T, (2020). Analyzing space–time coherence in precipitation seasonality across different European climates. *Remote Sensing*, 12(1), 171.
- Lanfredi M, Coluzzi R, Imbrenda V, Scalcione E, Atti del XXV convegno nazionale di agrometeorologia, Matera 14-16 giugno 2023, pag. 58-62.
- Lobell DB, Burke MB, 2008. Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. *Environ. Res. Lett.* 3 (2008) 034007.
- Medrano H, Tomás M, Martorell S, Escalona J-M, Pou A, Fuentes S, et al., 2015. Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agron. Sust. Dev.* 35, 499–517.
- 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*. Atti del XXV convegno nazionale di agrometeorologia, Matera 14-16 giugno 2023, pag. 1-4.
- Racsko J, Schrader LE, 2012. Sunburn of apple fruit: historical background, recent advances and future perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences* 31(6): 455-504.
- Scalcione E, Dichio P, Fabrizio G, Liotti J, Lacertosa G. Studio delle gelate tardive nell'area del Metapontino. *Italian Journal of Agrometeorology*. Atti del XXIV convegno nazionale di agrometeorologia, Cagliari 15-17 giugno 2022, pag. 167-16

# EVALUATION OF WEATHER-RELATED HAZARD IN RELATION TO NATURAL DISASTERS IN THE ABRUZZO REGION

## VALUTAZIONE DELL'HAZARD AGROMETEOROLOGICO IN RELAZIONE A RECENTI CALAMITÀ NATURALI DICHIARATE PER L'ABRUZZO

Giulia Maria Bellucci<sup>1\*</sup>, Roberta Alilla<sup>1</sup>, Flora De Natale<sup>1</sup>, Barbara Parisse<sup>1</sup>,  
Antonio Gerardo Pepe<sup>1</sup>, Antonella Pontrandolfi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria – Centro di ricerca Agricoltura e Ambiente, via della Navicella 4 Roma  
<sup>\*</sup> giuliamaria.bellucci@crea.gov.it

### Abstract

The work presents a case study referring to the Abruzzo Region, aiming to evaluate from an agrometeorological point of view the natural disasters officially declared in agriculture, defined as extreme weather events leading to damages over the threshold of 30% on productions, farms' structures and/or infrastructures, according to the Italian legislation (declaration decrees of the Italian Ministry of Agriculture, Food Sovereignty and Forestry). The disasters declared in the region for the last 10 years were extracted from the national database created by CREA on declared disasters in agriculture, where they have been classified by type of event, such as drought, flood rains, frosts, strong winds, etc., and by the type of damage. In a second step, some agrometeorological indices have been elaborated according to the type of events, the time and the location of the declared disasters and a cross analysis has been carried out, in order to identify among the various indices potentially more capable of capturing, in terms of intensity, duration and frequency of atmospheric events, those leading to significant damages (disasters). In the context of weather-related risk assessment in agriculture, the study aims to contribute to the discussion among the hazard analysis methodologies within the studies on vulnerability/resilience definition for more effective risk assessment in agriculture.

### Keywords

Agrometeorology, natural disasters, weather extremes, meteorological risk, hazard indices

### Parole chiave

Agrometeorologia, calamità naturali, eventi meteorologici estremi, rischio meteorologico, indici di hazard

### Introduction

In the context of climate change, the increasingly frequent weather extremes are expected to rise the occurrence of “natural disasters” (Alexander 2016), defined as serious alterations and socio-economic disruptions. The approach to climatic risk assessment mainly adopted at international level considers a weather extreme event as a “hazard”, which can “potentially” damage human systems and ecosystems. However, not all the weather hazards turn into “disasters”, depending on the magnitude of the event and also on the vulnerability of the affected systems (Handmer et al. 2013). Weather extremes have gained an increasing interest from the research community during the last two decades (Zwiers et al. 2013; WMO 2016; Seneviratne et al. 2021), leading also to the development of specific indices for their assessment, as those proposed by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices – ETCCDI (Klein Tank et al. 2009). Specific indices have been developed also for the weather-related hazard analysis in the agricultural sector, to describe the weather events “potentially” having the greatest impact on crops, mainly drought and heavy rain. More recent studies focused on the development of adequate loss and damage accounting for extreme weather events (Doktycz & Abkowitz 2019).

The present case study aims to analyze the correspondence between events already declared as natural disasters in

agriculture and meteorological data, testing different indices of weather extremes.

The general goal is to contribute to define methods for a more effective assessment of weather-related risk in agriculture.

### Materials and methods

#### *Disaster declarations*

Data about weather-related disasters in agriculture mainly derive from the official declarations issued by the Ministry of Agriculture, with some additional information drawn from regional technical reports. In Italy, the legislative and policy scheme of risk management in agriculture started in 1970 with the National Solidarity Fund for natural disasters in agriculture (NSF), reformed in 2004 with the law n. 102/2004. According to the Italian law, a “*natural disaster*” in agriculture is defined as an exceptional “*adverse weather such as frost, storms and hail, ice, heavy rains or severe droughts that destroy more than 30 percent of the average annual production, calculated on the basis of the previous three years or a three-year average based on the previous five years, excluding the lowest value and the highest one*”. In addition, damages on farms' structures and infrastructures are also included.

Two public measures supported farmers in case of natural disasters affecting agricultural production until 2023:

compensatory state payments and public contributions for insurance contracts with private companies. Insurable risks cited in the yearly “National Plans for risk management in agriculture” (MiPAAF 2022) were excluded from the state compensatory help, although some derogations were admitted. Anyway, in the last 15 years, Italian farmers’ participation in crop insurance has been very low, never exceeding 20% of agricultural Gross Domestic Production (GDP) and 11% of farms involved ([Database Sicuragro ISMEA](#)). In the Abruzzo Region, only 3.4% of the total farms and 1% of the total agricultural production were insured (ISMEA 2023). Therefore, the Ministry official decrees had covered most of the weather events leading to officially recognized disasters (tab.1). Each decree was based on a request from the region involved, accompanied by technical reports that describe the adverse weather event (based on weather station data), the location, the crops and/or structures and infrastructures affected and the consequent economic damages. The decree was issued by the Ministry if the regional request met all the law requirements. Hereinafter disasters recognized by both Ministry and regional declarations are referred to “declared disasters”.

Tab.1 – Declared weather-related disasters in agriculture in the period 2014-2023 in the Abruzzo region.

Tab.1 – Calamità dichiarate in agricoltura nel periodo 2014-2023 in Abruzzo

Provinces of areas involved (NUTS 3)	Weather-related disaster as defined by decree	Decree/declaration	Year	Start date	End date	Type of damage *
Pescara	Heavy rain leading to floods	D.M. 18050 del 03/09/2015 DL 51	2014-2015	2014-01-01	2015-05-07	S
Chieti	Heavy rain leading to floods	D.M. 18050 del 03/09/2015 DL 51	2014-2015	2014-01-01	2015-05-07	P, S, I
L'Aquila	Heavy rain leading to floods	D.M. 3325 del 05/02/2016	2015	2015-10-14	2015-10-14	P, I
Pescara	Heavy rain leading to floods	D.M. 24267 del 18/11/2015	2015	2015-03-04	2015-03-06	S
Chieti	Heavy rain leading to floods	D.M. 24267 del 18/11/2015	2015	2015-03-04	2015-03-06	P, S, I
Teramo	Persistent rain	D.M. 24267 del 18/11/2015	2015	2015-03-04	2015-03-06	S
Chieti	Hail	DGR 737/2016	2016	2016-06-19	2016-06-19	P
L'Aquila	Hail	DGR 737/2016	2016	2016-06-19	2016-06-19	P
Chieti	Hail	DGR 737/2016	2016	2016-06-24	2016-06-25	P
L'Aquila	Hail	DGR 737/2016	2016	2016-06-24	2016-06-25	P
L'Aquila	Excess of snow	D.M. 27850 del 30/10/2017	2017	2017-01-18	2017-01-19	P, S, I
Teramo	Excess of snow	D.M. 27850 del 30/10/2017	2017	2017-01-05	2017-01-25	P, S, I
Pescara	Excess of snow	D.M. 27850 del 30/10/2017	2017	2017-01-05	2017-01-25	P, S, I
Chieti	Excess of snow	D.M. 27850 del 30/10/2017	2017	2017-01-06	2017-01-25	P, S, I
L'Aquila	Hail	DGR 575/2019	2019	2019-07-10	2019-07-10	P
L'Aquila	Heavy rain leading to floods	DGR 576/2019	2019	2019-07-28	2019-07-28	P
L'Aquila	Excess of rain	DGR 757/2023	2023	2023-04-01	2023-05-31	P
Chieti	Excess of rain	DGR 757/2023	2023	2023-04-01	2023-06-30	P
Pescara	Excess of rain	DGR 757/2023	2023	2023-04-01	2023-06-30	P
Teramo	Excess of rain	DGR 757/2023	2023	2023-04-01	2023-06-30	P

\* P - Productions; S - Structures; I - Infrastructures

Table 1 summarizes the information about declarations related to the Abruzzo region in the last 10 years, drawn from a specific database managed by CREA ([CREA database catalogue](#)) which collects data on Ministry decrees. The table also reports further relevant weather events verified by the regional offices not fitting the law requirements though. The present analysis focuses on disasters due to precipitation (i.e. liquid and solid), with the exception of the hail that can't

be detected by the available meteorological data (only radar data could be used).

It should be underlined that the disaster designation in the decrees (e.g. heavy rain, persistent rain) is quite ambiguous and does not seem to relate to the duration and intensity of precipitation event. For example, a very critical case is that of decree 18050/2015, covering a period of 17 months and reporting heavy rain leading to flood (no further details are available). Moreover, classifying as “persistent rain” an extreme event occurred in a very short period, that could directly hit productions, structures and infrastructures (like that of DM 24267/2015 in Teramo province), and as “excess of rain” a three months event, that might also produce indirect damages such as plant diseases and root asphyxiation due to wet conditions (like those declared by DGR 757/2023), gives raise to ambiguity.

#### Meteorological data

The AgERA5 gridded weather dataset provided by the Copernicus Climate Change Service (C3S) (Boogaard et al. 2020) was used to investigate the impact of different kinds of precipitation events. The dataset derives from the re-analysis ERA5 data aggregated to daily time steps and corrected towards a finer topography at a 0.1° spatial resolution. Daily precipitation time series for the period 2014-2023 were extracted from this dataset for the 58 AgERA5 cells corresponding to the Abruzzo agricultural areas, identified through the Class 2 of Corine Land Cover (European Environment Agency 2018), excluding pastures (Class 2.3.1). Only AgERA5 cells with a minimum agricultural cover of 40% were considered. Then, the selected cells were assigned to the corresponding provinces, by overlaying the administrative boundaries to the cell centres. Overall, 24 cells were assigned to Chieti, 10 to both Pescara and L’Aquila, 14 to Teramo.

#### Precipitation indices

Some indices were chosen to catch the different kind of disasters depending on precipitation intensity and duration. First, heavy rain indices were computed. For each selected AgERA5 cell, the 95<sup>th</sup> percentile of precipitation on wet days in the 1991-2020 reference period was computed, in order to make a first assessment on local extreme precipitation values. Secondly, given that 95<sup>th</sup> percentiles varied around 20 mm, two indices of extreme precipitation proposed by the ETCCDI (Klein Tank et al. 2009) were computed at a monthly scale and aggregated at province level (mean value of all the selected cells): i) R10mm: number of heavy precipitation days (when daily precipitation  $\geq 10$  mm); ii) R20mm: number of very heavy precipitation days (when daily precipitation  $\geq 20$  mm).

In addition, other daily thresholds higher than 20 mm were tested, with the aim of catching the weather events corresponding to the declared disasters. Daily indices were aggregated as mean value at a province level considering only the cells where precipitation exceeded the threshold. Moreover, the percentage of cell exceeding the threshold on the total of each province was calculated.

Finally, referring to persistent rain, two monthly metrics have been computed and aggregated as mean at province level: number of wet days ( $P \geq 1$  mm) and the corresponding total precipitation.

## Results

The map in fig.1 shows the 95<sup>th</sup> percentile values of precipitation on wet days in the 1991-2020 reference period for all the AgERA5 cells considered in the Abruzzo region. The values range from around 19 mm to 27 mm, with the highest percentiles located in the Fucino plane, in the province of L’Aquila. Therefore, a daily precipitation of approximately 20 mm can be considered an uncommon event in this area. This daily precipitation amount is generally associated with potential damages on agriculture, as reported in literature (Nobakht et al. 2019), and is defined as “very heavy rain”, while “heavy rain”, corresponding to 10 mm, is also considered for this kind of assessments.

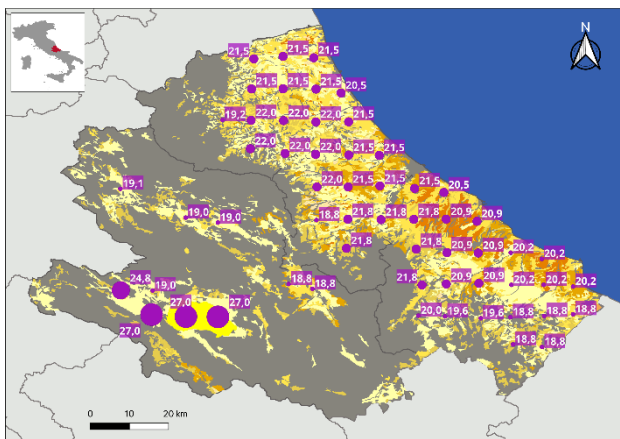


Fig.1 - 95<sup>th</sup> percentile values of daily precipitation in the AgERA5 cells selected for the Abruzzo region  
 Fig.1 - Valori del 95° percentile delle precipitazioni giornaliere nelle celle di AgERA5 selezionate per l’Abruzzo

The evolution over time of the mean monthly number of heavy precipitation days (R10mm) and very heavy precipitation days (R20mm) in the four Abruzzo provinces are represented in figure 2 and 3 respectively. Overall, the annual pattern of R10mm is very heterogeneous across the period, while generally it shows a similar evolution among provinces (fig. 2). The highest frequencies are found in February/March 2018 for most provinces and in May/June 2023 everywhere. In addition, the maximum January values for Pescara, Teramo and Chieti occurred in 2017. These results are consistent with only two declared disasters: DM 27850/2017 and DGR 757/2023.

As regards R20mm (fig. 3), some relevant peaks are shown for L’Aquila during the last months of 2018, 2019 and 2020. Highest frequencies are concentrated in the fall/winter season, except for 2014 in the Chieti province and 2023 in the Chieti, Pescara and Teramo provinces. These exceptions are consistent with only two declared events: DGR 757/2023 and, likely, DM 18050/2015, although the latter refers to a

very long period and it makes it uncertain the detection of the actual dates of disasters.

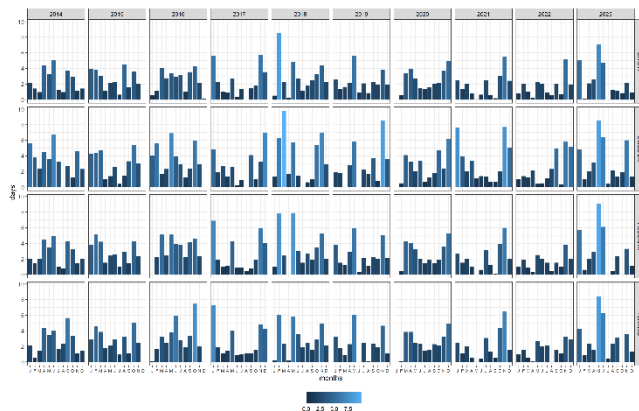


Fig.2- Mean value of days with  $P \geq 10$  mm computed for each province considering all the selected cells  
 Fig.2 - Numero medio di giorni con  $P \geq 10$ mm calcolato per ogni provincia considerando tutte le celle selezionate



Fig.3 – Mean value of days with  $P \geq 20$  mm computed for each province considering all the selected cells  
 Fig.3 - Numero medio di giorni con  $P \geq 20$ mm calcolato per ogni provincia considerando tutte le celle selezionate

Consequently, several daily precipitation thresholds, from 30 up to 60 mm, have been progressively tested to improve the analysis. Given that a precipitation event may occur in a very limited area, the threshold has been verified at a single cell level. The maximum threshold suitable for detecting all declared disasters was equal to 50 mm (tab. 2). Indeed, adopting the 60 mm threshold, two declared disasters were not identified (so, daily precipitation during all the other disasters exceeded 60 mm): exceptions refer to the declaration of the heavy rain covering more than 17 months (DM 18050/2015) and the single day event in L’Aquila province occurred on 28/07/2019 (DGR 576/2019). However, the 50 mm threshold captured many other events during the analysed period which did not lead to officially declared disasters. That could happen for several reasons, for instance because the event occurred out of the most sensitive crop stages. The percentages of declared disasters on the total number of 50 mm events were 14%, 29%, 30% and 18% for



L'Aquila, Chieti, Pescara, and Teramo provinces, respectively.

A further investigation has been performed focusing on extended rainy periods which have turned out not to be well represented by the aforementioned indices of extreme precipitation. Looking at an extremely sensitive phenological period for several crops, the total precipitation and the number of wet days from April to June are shown in figure 4 for all the years considered. The 2023 peaks stand out with values much higher than previous ones. This result matches the DGR 757/2023 declared disaster, caused by persistent rain (reported as “excess of rain” in table 1).

Tab. 2 – Date, mean precipitation, and cover percentage of cells where daily  $P \geq 50$  mm for each province. (a) L'Aquila and Pescara; (b) Chieti and Teramo. Dates within of declared disaster periods are in red

Tab. 2 – Data, precipitazione media e % di copertura delle celle con  $P$  giornaliera  $\geq 50$  mm per ogni provincia. (a) L'Aquila and Pescara; (b) Chieti and Teramo. In rosso le date ricadute nei periodi coperti dalle calamità dichiarate

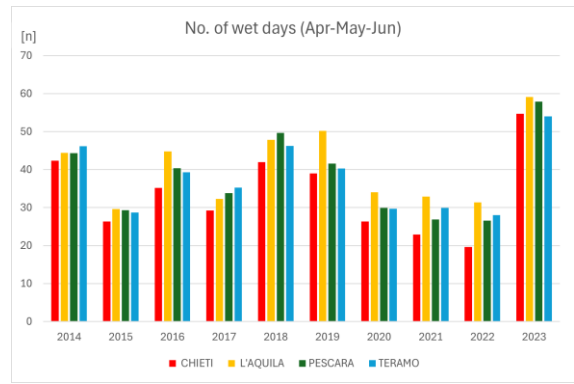
(a)

L'AQUILA			PESCARA		
Date	P mean	coverage	Date	P mean	coverage
05/03/2015	64	60%	01/09/2014	72	90%
14/10/2015	66	30%	23/01/2015	57	70%
15/07/2016	67	60%	05/03/2015	86	100%
18/01/2017	67	20%	24/09/2015	67	90%
10/09/2017	60	30%	10/10/2015	55	40%
15/12/2017	60	40%	26/11/2015	54	70%
27/12/2017	53	30%	27/11/2015	53	70%
03/05/2018	55	20%	15/07/2016	133	100%
22/10/2018	60	20%	06/08/2016	78	70%
28/10/2018	64	40%	17/01/2017	52	20%
29/10/2018	73	30%	18/01/2017	71	100%
28/07/2019	50	30%	15/11/2017	63	90%
03/11/2019	60	40%	03/05/2018	67	60%
21/12/2019	51	30%	22/10/2018	65	100%
05/06/2020	54	30%	10/07/2019	65	90%
25/09/2020	66	40%	26/03/2020	64	90%
06/12/2020	62	30%	20/11/2020	61	90%
03/11/2021	61	40%	08/10/2021	59	40%
22/11/2022	54	30%	26/02/2022	56	90%
17/01/2023	53	40%	15/06/2023	61	60%
03/11/2023	66	40%			

(b)

CHIETI			TERAMO		
Date	P mean	coverage	Date	P mean	coverage
14/06/2014	53	29%	01/09/2014	59	93%
01/09/2014	63	67%	23/01/2015	57	7%
02/09/2014	52	46%	05/03/2015	81	100%
23/01/2015	57	17%	24/09/2015	55	50%
05/03/2015	78	100%	10/10/2015	54	57%
24/09/2015	79	100%	26/11/2015	52	7%
10/10/2015	55	4%	27/11/2015	53	7%
14/10/2015	58	4%	15/07/2016	100	100%
26/11/2015	62	88%	06/08/2016	82	7%
27/11/2015	56	92%	17/01/2017	52	36%
15/07/2016	95	67%	18/01/2017	63	43%
06/08/2016	67	46%	15/11/2017	59	86%
18/01/2017	67	96%	03/05/2018	60	86%
15/11/2017	62	17%	22/10/2018	53	43%
03/05/2018	61	50%	10/07/2019	66	86%
22/10/2018	77	96%	26/03/2020	61	86%
28/10/2018	52	4%	31/08/2020	57	43%
29/10/2018	63	4%	20/11/2020	57	86%
10/07/2019	52	42%	26/12/2020	52	43%
26/03/2020	60	58%	08/10/2021	59	7%
20/11/2020	58	50%	26/02/2022	55	86%
08/10/2021	59	4%	15/06/2023	71	100%
26/02/2022	52	42%			
15/06/2023	64	79%			

(a)



(b)

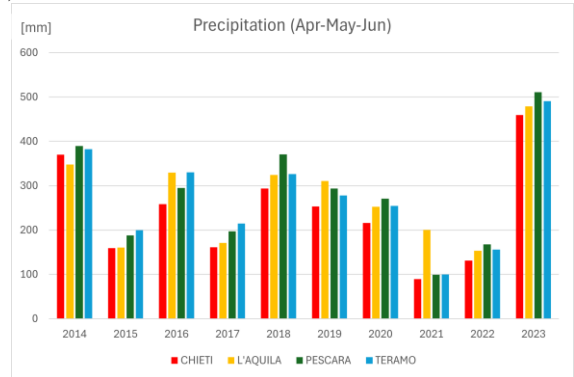


Fig.4 – Number of wet days (a) and total precipitation (b) from April to June across the analysed period for each province.

Fig.4 – Numero di giorni piovosi (a) e precipitazioni totali (b) da aprile a giugno per ogni provincia nel periodo di analisi

## Discussion and Conclusions

This case study provides some interesting points about pros and cons in using weather extreme indices for risk analyses in agriculture.

First, all the disasters turned out to be linked to weather extremes, while not all the extremes led to declared disasters. In addition, the 50 mm daily precipitation threshold, which has proven to be most helpful in catching the disasters, resulted to be very much higher than both the common thresholds used for extreme precipitation in agriculture (10 and 20 mm) and the 95th percentile values. These results confirm the complex relationship between weather extremes and disasters, due to the role of other factors such as vulnerability/resilience of agricultural systems and the periods of occurrence in the agrarian season (Lesk et al. 2016).

On the other hand, results show that not all disasters in agriculture derive from extreme precipitation events, as emerged from prolonged rainy periods, which also caused relevant damages. For this reason, it is important not to limit the risk analysis to the most common intensity-based precipitation indices.

Furthermore, official disaster declarations are greatly influenced by the criteria followed to issue them. In fact, at institutional level, it is evident the lack of a homogeneous preliminary meteo-climatic evaluations, which should also be considered when adopting policy measures. The same heterogeneity can be found in the time coverage and disaster

designation, shows a general inconsistency. Generally, the ambiguity in the definition of a factual disaster is also reflected in the existing literature (Kourtit et al. 2023). As already mentioned, this fact makes even more difficult to find adequate weather extremes indices able to catch disaster declarations.

Anyway, very extreme weather events widely recognized as damaging could be taken into account (e.g. like in the index-based insurances) together with certifications of post-event damages. In the meanwhile, some reflections could be done on the frequency of these extreme events which seems to be not so exceptional as needed in the context of theoretical risk assessment (Alilla et al. 2024).

Some other limitations of this preliminary study arise from the use of reanalysis datasets, which are not fully consistent with the weather station data that feed the meteorological analyses presented by regional technical reports supporting declaration requests.

Nevertheless, in light of the results obtained, the case study encourages to push towards further investigations on actual weather-related disasters, also considering other kind of events (e.g. extreme temperatures, hails, and strong winds) as well as longer periods, and extending the analysis to other regions.

## References

- Alexander LV (2016) Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: a review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. *Weather Clim Extremes* 11:4–16. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.007>
- Alilla R, Capitanio F, De Natale F, Parisse B and Pontrandolfi A (2024) An agro-meteorological hazard analysis for risk management in a Mediterranean area: a case study in Southern Italy (Campania Region). *Theor Appl Climatol*. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04878-x>
- Boogaard H, Schubert J, De Wit A, Lazebnik J, Hutjes R, Van der Grijn G (2020) Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi: 10.24381/cds.6c68c9bb (Accessed on 28-Apr-2023)
- Doktycz C, Abkowitz M (2019) Loss and Damage Estimation for Extreme Weather Events: State of the Practice. *Sustainability* 11(15):4243. <https://doi.org/10.3390/su11154243>
- European Environment Agency, 2018. CORINE Land Cover 2018 (vector), Europe, 6-yearly – version 2020\_20u1, May 2020. <https://doi.org/10.2909/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acdf0>
- Handmer J, Honda Y, Kundzewicz ZW, Arnell N, Benito G, Hatfield J, Mohamed IF, Peduzzi P, Wu S, Sherstyukov B, Takahashi K, Yan Z (2013) Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. In *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press pp 231–290. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX-Chap4\\_FINAL-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX-Chap4_FINAL-1.pdf)
- ISMEA - Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare (2023) Rapporto ISMEA sulla gestione del rischio in Agricoltura 2023, ISMEA <https://www.ismea.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/3225>
- Klein Tank AMG, Zwiers FW and Zhang X (2009) Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72. World Meteorological Organization, Geneva Switzerland. WMO/TD No. 1500
- Kourtit K, Nijkamp P, Banica A (2023) An analysis of natural disasters' effects – A global comparative study of 'Blessing in Disguise'. *Socio-Economic Planning Sciences*, Volume 88: 101599, ISSN 0038-0121, <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101599>
- Lesk C, Rowhani P and Ramankutty N (2016) Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*. 2016 Jan 7; 529(7584) pp 84-87 doi: 10.1038/nature16467. PMID: 26738594.
- MIPAAF (2022) Decreto n. 148418 del 31 marzo 2022 - Piano di gestione dei rischi in agricoltura 2022 <https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/17999>
- Nobakht M, Beavis P, O'Hara S, Hutjes R and Supit I (2019): Agroclimatic indicators from 1951 to 2099 derived from climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi: 10.24381/cds.dad6e055 (Accessed on 28-Apr-2023)
- Seneviratne SI, Zhang X, Adnan M, Badi W, Dereczynski C, Di Luca A, Ghosh S, Iskandar I, Kossin J, Lewis S, Otto F, Pinto I, Satoh M, Vicente-Serrano SM, Wehner M and Zhou B (2021) Weather and climate extreme events in a changing climate. In *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 University Press, pp 1513–1766, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- WMO and GWP (2016) Handbook of drought indicators and indices. In *Integrated drought management programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*. Svoboda M, Fuchs BA (Eds.). Geneva. ISBN: 978–92–63–11173–9
- Zwiers FW et al. (2013) Climate extremes: challenges in estimating and understanding recent changes in the frequency and intensity of extreme climate and weather events. In: Asrar G, Hurrell J (eds) *Climate science for serving society*. Springer, Dordrecht [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6692-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6692-1_13)



# EFFECTS OF THE EMILIA ROMAGNA FLOOD OF MAY 2023 ON N<sub>2</sub>O EMISSIONS

## *EFFETTO DELL'ALLUVIONE IN ROMAGNA DEL MAGGIO 2023 SULLE EMISSIONI DI N<sub>2</sub>O*

Daniela Famulari<sup>1\*</sup>, Marianna Nardino<sup>1</sup>, Lorenzo Fiorini<sup>1</sup>, Francesco M. Boniello<sup>1</sup>, Matteo Mari<sup>1</sup>,  
Federico Carotenuto<sup>1</sup>, Federica Rossi<sup>1</sup>, Pietro Crudele<sup>2</sup>, Gianluca Pilo<sup>2</sup>, Mattia Onofri<sup>2</sup>, Camilla Chieco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la BioEconomia (CNR – IBE), Sede di Bologna, Via P. Gobetti, 101, 40129, Bologna.

<sup>2</sup>Conserve Italia soc. coop. agricola, Via Paolo Poggi, 11 40068 San Lazzaro di Savena (BO).

\*[daniela.famulari@cnr.it](mailto:daniela.famulari@cnr.it)

### **Abstract**

Measurements of N<sub>2</sub>O fluxes from the soil started at the beginning of the growing season (March 2023) on a pear orchard on the Azienda Agricola Massari farm in the province of Ravenna (Conselice). The area was among the hardest hit by the flooding events of May 2023, with more than a month of flooding of the fields: N<sub>2</sub>O measurements at the site revealed a considerable increase in nitrous oxide emissions. Following the flooding events, in fact, conditions of lack of oxygen in the soil are created, an ideal condition for denitrification processes, also driven by the increased availability of nitrogen present: this study aims to quantify the extent of this impact on N<sub>2</sub>O.

### **Parole chiave**

Rischi alluvionali; agricoltura; N<sub>2</sub>O; camera dinamica; flussi dal suolo.

### **Keywords**

Flood risks; agriculture; N<sub>2</sub>O; dynamic chambers; soil fluxes.

### **Introduction**

Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) represents the third most significant greenhouse gas (GHG) following carbon dioxide and methane, exhibiting a global warming potential (GWP) over a 100-year period that exceeds 310 times that of CO<sub>2</sub>. It has a lifespan of 114 years (IPCC, 2023), and besides it contributes to the depletion of the stratospheric ozone layer (Ravishankara et al., 2009). Despite representing only 6% of the global greenhouse effect, the substantial increase in atmospheric N<sub>2</sub>O since the 1990s has attracted significant attention, particularly in understanding its sources and sinks. In 2019, the global mean atmospheric N<sub>2</sub>O concentration reached 332 ppb (IPCC, 2023) and continues to rise at an average annual growth rate of 0.25% (e.g. Lan et al., 2024). It is released into the atmosphere from both natural and anthropogenic sources (e.g. Tian, 2020). Biogenic N<sub>2</sub>O emissions primarily arise from soils and aquatic ecosystems, with microbial nitrification and denitrification serving as the primary processes responsible for N<sub>2</sub>O production. (Mosier et al. 1998; Stein & Yung 2003): it basically involves the transformation of any other nitrogen (N) species into nitrous oxide, N<sub>2</sub>O. After flooding events, conditions such as waterlogged soil and reduced oxygen availability create an ideal environment for denitrification processes to occur. The flooding-induced denitrification process typically leads to an increase in N<sub>2</sub>O emissions from the soil. This is because the anaerobic (oxygen-deprived) conditions favor the activity of

denitrifying bacteria, which produce N<sub>2</sub>O as a byproduct. Additionally, flooding can enhance the availability of nitrogen compounds in the soil, further stimulating denitrification and N<sub>2</sub>O production. Studying the impact of flooding events on denitrification processes and subsequent N<sub>2</sub>O emissions is crucial, especially given the implications for nitrogen cycling and greenhouse gas emissions. To quantify this impact, a combination of field measurements, laboratory experiments, and modeling approaches are needed to provide a complete picture of the impact. This study is focused on the measurement of N<sub>2</sub>O fluxes from the soil over a pear orchard field that suffered the flooding events of May 2023 over the Romagna region. The original objective of the study was to quantify the carbon absorbed by the crop during an entire growing season in order to assess its potential effect in terms of climate change 'mitigation', following the method by Nardino et al., 2013, and considering at the same time all potential GHG emissions, to be included in the balance as CO<sub>2</sub>-eq. The occurrence of the flooding event in May 2023 disrupted the measurements for one month and a half, but provided an unintentional experiment on the evaluation of the impact of flooding on N<sub>2</sub>O soil emissions.

## Materials and Methods

### *The field site and the flooding event*

Measurements were conducted on a pear orchard with an extension of more than 6 hectares, and a planting about 20 years old (Fig.1), from Azienda Agricola Massari, located in Conselice (RA), N 44°53' - E11°81', in the Emilia Romagna Region. The field campaign started on 22/03/2023, with measurements of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes by eddy covariance technique, and N<sub>2</sub>O fluxes using dynamic enclosure method. During the month of May 2023, a significant natural disaster occurred in the Romagna region that had profound repercussions on the territory: heavy rainfall led to widespread flooding, affecting both urban and rural areas. In the studied area, within the Conselice Council, the flooding disrupted transportation networks, damaged infrastructure, and posed risks to public safety. The flooding also had environmental consequences, such as river bank erosion, overtopping, water contamination, damage to natural habitats, and impact on local farmers and their livelihoods. Between 2<sup>nd</sup> and the 17<sup>th</sup> of May, 4 billion m<sup>3</sup> of precipitation occurred, 14 at first and then 23 watercourses flooded at the same time, and further 13 rivers exceed alarm levels over the Romagna Region. At the pear orchard site, the water level reached 120 cm at the peak stage, and stayed around 20 cm above the ground for over 5 weeks.



Fig.1- Aerial photo of the pear orchard in Conselice, with the location of the 10 collars for N<sub>2</sub>O chamber measurements (red circles).

Fig.1- Foto aerea del frutteto di Conselice, con l'ubicazione dei 10 collari per le misure di N<sub>2</sub>O in camera (cerchi rossi).

### *N<sub>2</sub>O flux measurements*

Ten soil collars were permanently installed along the pear tree rows (Fig.1), and each collar offset recorded. Soil N<sub>2</sub>O fluxes were measured using a portable N<sub>2</sub>O trace gas analyzer (LI-7820 N<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>O, Li-Cor Inc.) connected with an automated soil chamber (LI-8200-01S Smart Chamber, Li-Cor Inc.) shown in Fig. 2. Intensive emission monitoring was done after the flooding event, between June and September 2023, with weekly frequency; monitoring continued with fortnightly and then monthly measurements

for the remainder of the year, when initial emission levels were reestablished.

The N<sub>2</sub>O flux was calculated using the following equation:

$$F_{N_2O} = \frac{VP(1-W_0)}{RST} \frac{dN_2O}{dt} \quad (1)$$

Where F<sub>N<sub>2</sub>O</sub> is the soil N<sub>2</sub>O flux (nmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), V is the chamber volume (m<sup>3</sup>), P is the atmospheric pressure (Pa), W<sub>0</sub> is initial water vapor mole fraction (mol mol<sup>-1</sup>), R is the gas constant (Pa m<sup>3</sup> mol<sup>-1</sup>k<sup>-1</sup>), S is the soil area (m<sup>2</sup>), T is chamber temperature (°K),  $\frac{dN_2O}{dt}$  is the rate of N<sub>2</sub>O change (nmol mol<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) during the chamber closure. Soil temperature and soil moisture were measured with a Stevens HydraProbe connected to the Smart Chamber alongside flux measurements.



Fig. 2 – Measurement apparatus for N<sub>2</sub>O fluxes on the pear orchard field: on the left, chamber collar inserted in the soil, on the right the dynamic chamber attached to the portable measuring system LI-7820.

Fig. 2 – Sistema di misurazione dei flussi di N<sub>2</sub>O nel pereto: a sinistra, collare della camera inserito nel terreno, a destra la camera dinamica collegata al sistema di misurazione portatile LI-7820.

## Results and Discussion

The N<sub>2</sub>O fluxes measured at the beginning of April 2023 (Fig.3, top panel) can be considered background level of emission for the pear orchard in Conselice. The fertilization at the site is done by drop fertirrigation through the growing season; at that stage, the vegetation was just flowering and no fertirrigation events had occurred. The level of N<sub>2</sub>O emission was on average 0.35 nmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, ranging from 0.16 to 0.57 nmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, and little spatial variability among the sampling points was observed, as can be seen in Fig.3. By looking at the situation on 27<sup>th</sup> of June, after the flooding event, a much larger spatial variability can be noticed between the sampling points, indicating that the soil at the site has been heavily affected (Fig.3). On the 27<sup>th</sup> of June,

the average flux observed was  $5.79 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , with values ranging from 0.6 to  $19.4 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

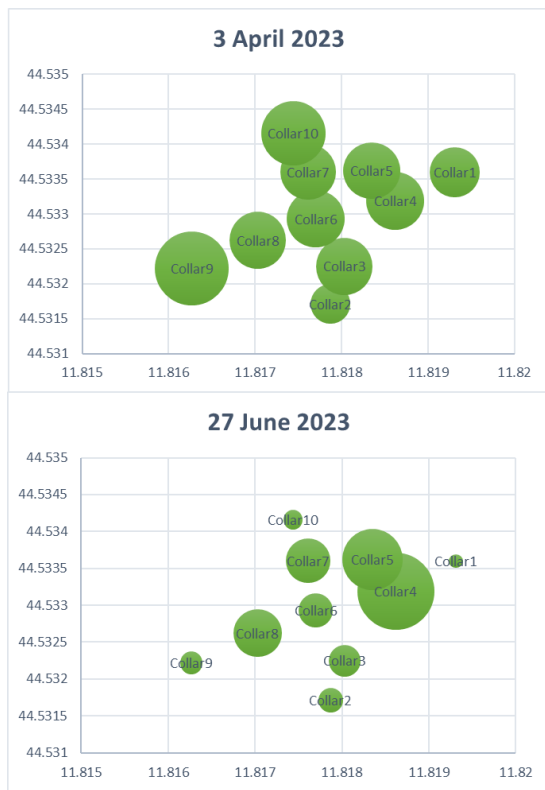


Fig. 3 – Spatial variability of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions across the sampling points (chamber collars) before (top panel), and after (bottom panel) the flood events. The circles dimension indicate the magnitude of the measured fluxes, and are set on a different scale.

Fig. 3 – Variabilità spaziale delle emissioni di  $\text{N}_2\text{O}$  nei punti di campionamento (collari della camera) prima (sopra) e dopo (sotto) gli eventi alluvionali. Le dimensioni dei cerchi indicano l'entità dei flussi misurati e sono impostate su una scala diversa.

The higher levels of  $\text{N}_2\text{O}$  emission observed in the following period, and throughout the summer season (see Fig. 4) persisted, and background levels were resumed only during the autumn (data not shown here). After about 5 weeks of waterlogged conditions, the soil resulted saturated with water, and then moist for a long time. The hot season caused soil temperatures to increase, creating an ideal environment for microbial activity, and denitrification could take place for an extended amount of time. No addition of N fertiliser occurred, as the growing season and the consequent harvest were compromised. However, the water brought in by the flood being contaminated with sewage and animal manure among other things, acted as a large scale fertilisation event.

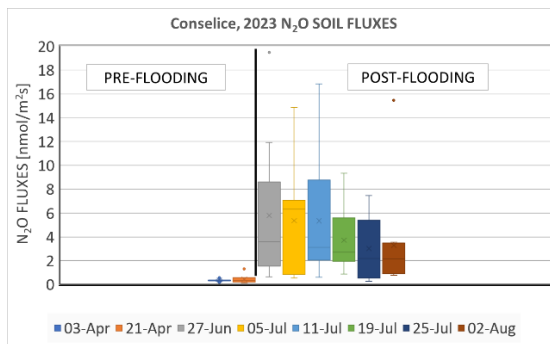


Fig. 4 – Box and whisker plot of the  $\text{N}_2\text{O}$  soil flux measurements covering the summer season 2023 in Conselice.

Fig. 4 – Box e whisker plot delle misure del flusso di  $\text{N}_2\text{O}$  dal suolo relative alla stagione estiva 2023 a Conselice.

## Conclusions

The flood events during May 2023 in Romagna caused an increase in  $\text{N}_2\text{O}$  soil emissions from a pear orchard by a factor of 10 circa from the background levels occurring before the flood, and persisted through the summer season. From our data, it is evident that the flooding events acted as a large scale fertilization event.

The N-input to the soil caused by the flood events could not be measured, as for a long period (one and a half month) the site could not be reached. Because of this, it was not possible to calculate a specific emission factor of the flood event for  $\text{N}_2\text{O}$ .

The  $\text{N}_2\text{O}$  flux dataset collected, together with the meteorological information and soil analyses conducted at the site could provide useful in the validation of field scale modelling of GHG emissions, for the case of flood events.

## Acknowledgements

This research was conducted as part of the project CONTROL CARBON, “Contabilizzazione delle emissioni nette delle colture orticole/frutticole per elaborare proposte di metodologie per la generazione di crediti di carbonio”, part of the PIANO DI INNOVAZIONE PSR 2014-2020 financed by Regione Emilia Romagna, tipo di Operazione 16.2.01, FOCUS AREA 3A.

## References

- IPCC, 2023: Sections. In: 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
- Lan, X., K.W. Thoning, and E.J. Dlugokencky: Trends in globally-averaged  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , and  $\text{SF}_6$  determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2024-04, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>

- Mosier, A. Soil processes and global change. *Biol Fertil Soils* 27, 221–229 (1998). <https://doi.org/10.1007/s003740050424>
- Nardino M., Pernice F., Rossi F., Georgiadis, Facini O., Motisi D., 2013. Annual and monthly carbon balance in an intensively managed Mediterranean olive orchard. *Photosynthetica*, 51: 63–74.
- Ravishankara, A.R. & Daniel, John & Portmann, Robert. (2009). Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. *Science* (New York, N.Y.). 326. 123-5. 10.1126/science.1176985.
- Stein, L. Y., and Y. L. Yung. 2003. “Production, Isotopic Composition, and Atmospheric Fate of Biologically Produced Nitrous Oxide.” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 31 (1): 329–356. doi:10.1146/annurev.earth.31.110502.080901.
- Tian, H., Xu, R., Canadell, J.G. et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature* 586, 248–256 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>

# L'APP AGROAMBIENTE ABRUZZO. THE AGROAMBIENTE ABRUZZO APP

Fabio Pietrangeli <sup>1</sup>, Angelo Mazzocchetti <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Regione Abruzzo – Dipartimento Agricoltura. Ufficio direttiva qualità dei suoli e servizi agrometeo. [fabio.pietrangeli@regione.abruzzo.it](mailto:fabio.pietrangeli@regione.abruzzo.it)

<sup>2</sup>Regione Abruzzo – Dipartimento Agricoltura. Ufficio direttiva qualità dei suoli e servizi agrometeo. [angelo.mazzocchetti@regione.abruzzo.it](mailto:angelo.mazzocchetti@regione.abruzzo.it)

## Abstract

The Agroambiente Abruzzo app manages Integrated Defense in an innovative way. It allows you to manage climate data from your phone or PC, making them visible to users, monitoring data, the Integrated Defense Bulletin, and much other useful information. The system allowed us to remotely manage participatory monitoring.

## Parole chiave

app, Agroambiente, Abruzzo

## Keywords

app, Agroambiente, Abruzzo

## Introduzione

L'app Agroambiente Abruzzo si inserisce in un contesto di Difesa Integrata che nella nostra regione vanta una esperienza trentennale.

Infatti, sin dalla fine degli anni '80, a cura dell'A.R.S.S.A. (Agenzia Regionale Servizi Sviluppo Agricolo) c'è stato un gruppo di tecnici specializzati, circa 30, che ha svolto un servizio di difesa sulle colture maggiormente diffuse, prioritariamente vite e olivo, ma anche drupacee, cereali e ortive. Di pari passo è stata curata l'attivazione di una rete di monitoraggio climatico coordinato dal C.A.R. (Centro Agrometeorologico Regionale) di Scerni.

Nei primi anni novanta si è lavorato molto intensamente per sostituire la difesa a calendario con un tipo di difesa più ragionato: il primo passo, quello che veniva definita Difesa guidata, era quello di operare in campo e di prevedere gli interventi fitosanitari, sulla base di indicazioni climatiche e previsioni meteorologiche. L'ulteriore evoluzione, a inizi anni duemila, è stata quella di introdurre la Difesa integrata, in cui, prima ancora di intervenire con i prodotti chimici, si attuano tutte le buone norme di coltivazione atte a favorire uno stato fisiologico ottimale per la pianta, mettendola nelle migliori condizioni fisiologiche e vegetative: potature mirate, limitazione degli apporti azotati per evitare eccessivo rigoglio vegetativo, equilibrio nel fornire componenti nutrizionali, lavorazioni essenziali per uno stato ottimale del suolo, tutte azioni mirate a contrastare in modo naturale l'insorgenza di malattie, lasciando all'ultima istanza l'intervento chimico, sempre attuato però con criterio (monitoraggio visivo diretto sulla coltura delle patologie e indiretto con l'ausilio di trappole per gli insetti più dannosi) per operare nei tempi giusti e con i prodotti più indicati a seconda del patogeno e dello stato fenologico della pianta. L'informazione agli utenti è stata sempre fornita con l'emissione di un Bollettino settimanale.

Chiaramente negli anni il lavoro si è evoluto e, se nei primi anni novanta il rilievo era cartaceo e il Bollettino veniva spedito per lettera, in seguito si è iniziato a introdurre i rilievi

su Personal Computer e a pubblicare il Bollettino su Televideo e successivamente a spedirlo via mail.

Nei primi anni del 2000, l'ulteriore evoluzione ha interessato la gestione dei rilievi effettuati direttamente in campo tramite telefono. Inserendo il dato in campo, lo stesso era reso visibile su personal computer in forma di dati aggregati e organizzati, utilizzabili dal coordinatore per la redazione del Bollettino che per anni, a livello regionale, è stato il dott. Angelo Mazzocchetti.

Da pochi anni, nel 2018, il lavoro di monitoraggio in campo si è ulteriormente evoluto, sempre attuato con smartphone o iPhone, ma, vista l'evoluzione dei sistemi, c'è la possibilità di effettuare anche foto e, di avere una interfaccia semplice, molto intuitiva. Questo lavoro, coordinato, anche nelle fasi evolutive del sistema, dall'attuale responsabile del Bollettino Difesa Integrata, dott. Fabio Pietrangeli, ci ha permesso di portare avanti l'idea di un monitoraggio partecipato, divenuto sempre più necessario vista la carenza di personale tecnico dipendente regionale.

Oggi si punta ad avere informazioni di campo sia da tecnici pubblici o privati, sia da aziende agricole. Il tutto, appunto, gestito via telefono e tramite l'app Agroambiente Abruzzo. Anche il Bollettino viene ora pubblicato sulla stessa app, che quindi permette sia di avere dati in entrata, sia di avere gli output dei dati inseriti ed elaborati.

La piattaforma Agroambiente Abruzzo gestisce in maniera semplice ed intuitiva sia i dati climatici che quelli dei rilievi in campo, fenologici e dei patogeni. Per questo il nostro slogan è la Difesa a portata di mano.

Di questo, quindi, vi parleremo.

## Materiali e Metodi

Come opera l'App Agroambiente Abruzzo. Per il pubblico sono previste 6 sezioni: Bollettino difesa integrata, Agrometeorologia, Approfondimenti tecnici, Informazioni utili, Visualizza monitoraggio.

Nella prima sezione sono pubblicati i Bollettini di difesa integrata, che sono di norma a cadenza settimanale, ma, il



fatto di essere interattivi, permette di modificarli, aggiornarli o pubblicarli in ogni momento, quindi anche a cadenza periodica più stretta.

Il Bollettino si incardina sui tre parametri canonici della Difesa Integrata: clima, monitoraggio e strategia di difesa. Esso vuole avere una struttura semplice, lineare, leggibile da telefono e quindi sintetica, in cui si inserisce qualche immagine significativa (insetti, malattie, stadio fenologico, etc.). Per approfondimenti si rimanda agli stessi tramite link. Nella prima parte si leggono e si commentano brevemente i dati climatici, di una settimana precedente o anche di un periodo precedente, si inseriscono le previsioni del tempo, che oggi tramite un link rimandano alle previsioni meteo del Cetemps (che si ringrazia). Sempre nell'ambito dei dati climatici, si inseriscono i dati fenologici, che fanno riferimento al monitoraggio di campo, rendendo questa sezione più completa, di fatto una sezione di Agrofenologia, cioè, non il solo mero dato climatico o previsionale, ma lo stesso valutato nell'ambito di un riferimento alla coltura.

Nella seconda sezione, Agrometeorologia, sono invece pubblicati i dati climatici, siano essi tabelle settimanale di riepilogo, o anche dati mensili riepilogativi, o quant'altro possa riguardare l'Agrometeorologia, in maniera più approfondita. Di norma nel Bollettino si rimanda a questa sezione tramite un link.

Nella terza sezione Approfondimenti tecnici, ci sono argomenti di vario genere, trattati in maniera più approfondita, inerenti alla difesa, la tecnica agronomica, la fenologia, l'agrometeorologia, che possono essere letti direttamente dall'utente in questa sezione, e a quali nel Bollettino spesso si rimanda con un link.

Nella quarta sezione, Informazioni utili, ci sono delle notizie generali, riguardanti l'agricoltura, in genere possono essere bandi regionali, Scadenze importanti, ma anche link di approfondimento di articoli tecnici.

Nella quinta sezione, Visualizza Monitoraggio, l'utente può leggere i dati rilevati dalla rete di monitoraggio, soprattutto nei punti prossimi al luogo da cui si connette. Questo è per rendere pubblico e utile un dato che viene rilevato, naturalmente a campione, ma che poi può e deve fornire notizie utili a tutti.

Fin qui i dati disponibili come output al pubblico (Fig.1)



Fig.1 - Interfaccia dell'App Agroambiente Abruzzo ed esempi di pagine relative al Bollettino

Fig.1 - Interface of Agroambiente Abruzzo App and examples of pages relating to the Bulletin

Quella che rappresenta però l'innovazione vera e propria che sta vivendo questo nuovo sistema di rilevamento è il Monitoraggio aziendale (Fig. 2).

Questa settimana sezione è quella pensata per permettere il "monitoraggio partecipato".

In pratica vengono coinvolte le aziende sul territorio che potranno fornire volontariamente dei dati rilevati.

Queste aziende, a differenza del pubblico che accede liberamente ai dati in output, devono essere dotate di username e password, fornite dal Responsabile del Bollettino per inserire i dati di campo rilevati.

Le aziende sono coordinate e seguite, sia a livello centrale, che a livello di singoli comprensori, da tecnici regionali, e sono formate e messe in grado di inserire i rilievi, attraverso uno strumento pensato in maniera semplice e intuitiva. Questo monitoraggio oggi riguarda Vite e Olivo, ma può estendersi anche ad altre colture.

Entrando in questa sezione sono riportate le sezioni Fenologia, ritenuta molto importante, e altre sezioni relative ai principali patogeni. Inoltre, un dato su Segnalazione fitosanitaria per patogeni non ricompresi sull'elenco, o sintomatologie sconosciute.

Il rilievo in campo è semplice, si richiede in genere un dato da inserire, un numero in caso di catture delle trappole, e poi, sempre, per ogni patologia, una fotografia.

Tale fotografia, che in tempo reale è disponibile per il Responsabile del Bollettino permette un controllo di validazione del dato inserito.

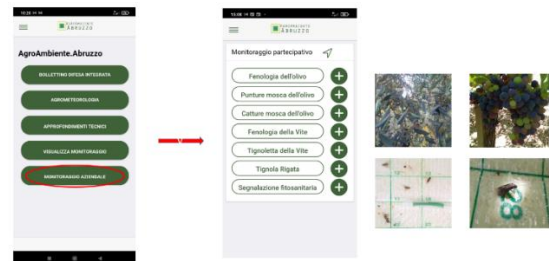


Fig.2 - Interfaccia della sezione Monitoraggio aziendale (Fig.2 - Interface of the Company monitoring section)

## Conclusioni

L'App Agroambiente Abruzzo in questi anni sta cercando di gestire un lavoro complesso, che è quello di reperire dati utili per impostare un Bollettino Regionale di Difesa Integrata.

Negli anni si sta costantemente migliorando l'app attraverso i suggerimenti di chi la utilizza e fornisce importanti feedback, e il lavoro dell'azienda che ha realizzato l'App dal punto di vista informatico e che la aggiorna fruendo dei nostri input.

Al momento si ritiene che la stessa abbia raggiunto un livello operativo più che soddisfacente e che solo piccoli aggiustamenti possano renderla ancora più performante.

Per questo, naturalmente, si lavora tutti insieme.

Si coglie l'occasione per ringraziare tutti coloro che hanno collaborato negli anni e tuttora collaborano al sistema di Difesa Integrata Abruzzo.

# VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI DELLE SPECIE ARBOREE PER LA FORESTAZIONE URBANA

## ASSESSING THE VULNERABILITY TO CLIMATE CHANGE OF TREE SPECIES FOR URBAN AFFORESTATION

Cristiano Gala<sup>1\*</sup>, Gabriele Curci<sup>1,2</sup>, Loretta Pace<sup>3</sup>, Alessandro Marucci<sup>4</sup>, Federico Falasca<sup>4</sup>, Dina Del Tosto<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Center of Excellence in Telesensing of Environment and Model Prediction of Severe events (CETEMPS), Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila, Italy

<sup>2</sup>Dipartimento di Science Fisiche e Chimiche (DSFC), Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila, Italy

<sup>3</sup>Dipartimento di Medicina clinica, sanità pubblica, scienze della vita e dell'ambiente (MESVA), Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila, Italy

<sup>4</sup>Dipartimento di Ingegneria civile, edile - architettura e ambientale, Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila, Italy

<sup>5</sup>Ufficio Politiche Ambientali e qualità della Vita, Comune dell'Aquila, L'Aquila, Italy

\*[cristiano.gala@guest.univaq.it](mailto:cristiano.gala@guest.univaq.it)

### Abstract

Nature-based solutions are increasingly vital for climate change adaptation, especially in urban settings, where integrating natural systems can enhance resilience. Urban forests are one of the most used methods for adding ecosystem services to an urban environment and at the same time address urban-specific climate change challenges such as heat-island effect, intense rainfall and water management. However, the effects of climate change in the long-term on urban forests are not often taken into account when planning interventions such as afforestation. Species selection for urban forests should, among other factors, be based on an assessment of local future climatic conditions, so to ensure the long-term viability of the project. We propose a methodology applicable across Europe, using publicly available climate datasets and species distribution data to analyse climatic niches for tree species. Comparing these ranges with local climatic data from L'Aquila, we develop a suitability matrix providing vulnerability scores for each species based on projected climate changes. The analysis ranks the species which are less vulnerable to projected future climate conditions. The application to the pilot area of L'Aquila suggests that some species already present will still be suitable also in future climate (e.g. *Quercus pubescens*) while others will not (e.g. *Quercus petraea*), and species not traditionally present may become suitable (e.g. *Quercus ilex*).

### Parole chiave

Forestazione urbana, selezione di specie, vulnerabilità ai cambiamenti climatici

### Keywords

Urban afforestation, species selection, climate change vulnerability

### Introduzione

Le aree urbane in tutto il mondo sono significativi contribuenti ai cambiamenti climatici antropogenici e sono anche tra le più colpite da essi. Le città sono particolarmente vulnerabili all'aumento dell'intensità e della frequenza di tempeste, ondate di calore, inondazioni costiere e forti piogge. Tali eventi meteorologici estremi comportano grandi rischi per gli ambienti urbani poiché molteplici pericoli climatici e non climatici possono interagire e influenzare la salute umana, i mezzi di sussistenza e le infrastrutture su larga scala (Gasper et al., 2011; I.P.C.C., 2022). È quindi vitale considerare gli ambienti urbani non solo come contributori alla crisi climatica ma anche come attori principali nelle azioni di mitigazione e adattamento. Molte soluzioni di adattamento climatico per le infrastrutture sono state proposte e attuate, ma un crescente consenso favorisce una combinazione di soluzioni basate sulla natura (NBS) che cercano di creare resilienza attraverso la creazione e l'incorporazione di ecosistemi naturali all'interno del tessuto urbano (European Environment Agency., 2021). Questo approccio fornisce, in principio, resilienza e la fornitura di molteplici servizi ecosistemici contemporaneamente (Commission, 2021; Epelde et al., 2022). La popolarità e

l'efficacia delle NBS come strumento per aumentare la resilienza ai cambiamenti climatici delle aree urbane sono state ampiamente esplorate e documentate (Oral et al., 2020). Tuttavia, l'attuazione di tali soluzioni non è sempre semplice e deve essere valutata attentamente (Commission, 2021; Seddon et al., 2020). La necessità di una ricerca continua a sostegno delle NBS è fondamentale per valutarne la sostenibilità e la longevità (Frantzeskaki and McPhearson, 2022; Seddon et al., 2020; Turner et al., 2022). I problemi possono sorgere quando tali soluzioni non vengono pianificate accuratamente prendendo in considerazione i modelli climatici futuri che potrebbero influenzarne la fattibilità, la sostenibilità ed efficacia nel lungo termine (Anderegg et al., 2020).

L'uso della foresta urbana per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici negli ambienti urbani mostra risultati promettenti. Tuttavia, è importante definire chiaramente gli obiettivi di un progetto di foresta urbana e valutare ulteriormente se l'obiettivo verrà effettivamente raggiunto. Vari elementi potrebbero ridurre significativamente l'efficacia della foresta urbana nel raggiungere gli obiettivi desiderati. La vulnerabilità degli alberi agli eventi meteorologici estremi, al degrado dell'habitat, alle specie invasive, alle malattie e ai



cambiamenti nel ciclo vitale delle piante viene esacerbata dai cambiamenti climatici (Allen et al., 2010; Anderegg et al., 2020; Lindner et al., 2010). È importante per gli operatori valutare attentamente le future condizioni in cui queste foreste dovranno sopravvivere, garantendo che i benefici che forniscono verranno mantenuti quando più necessario.

Un'analisi delle future condizioni ambientali dovrebbe informare la composizione delle specie della foresta, ovvero se è possibile che una tale foresta non solo sopravviva ma prosperi. In questo lavoro, combiniamo la distribuzione delle specie del progetto European Tree Atlas con le informazioni climatiche del passato e del futuro, con l'obiettivo di classificare quelle specie in termini di loro idoneità climatica futura. Testiamo la nostra metodologia nel comune dell'Aquila, una città di medie dimensioni nell'Italia centrale, che sta includendo la forestazione urbana come una possibile azione nella sua strategia di adattamento ai cambiamenti climatici. Il metodo sviluppato potrebbe essere facilmente applicato ad altre città e luoghi.

## Materiali e Metodi

I dati sulla distribuzione delle specie arboree sono stati ottenuti dall'European Tree Atlas (de Rigo et al., 2016). Le specie arboree più comuni e dominanti native dell'Italia sono state selezionate tra quelle disponibili. Mentre i dati climatici sono stati ottenuti dal progetto ClimateEU (Marchi et al., 2020) (Fig 1). La distribuzione delle specie arboree è stata correlata ai dati spaziali delle variabili bioclimatiche, il che ha permesso di ottenere una nicchia climatica per ciascuna delle variabili scelte (Fig 2). Questi intervalli principali sono stati quindi confrontati con i valori storici e predetti per le stesse variabili bioclimatiche ottenuti dalle osservazioni meteorologiche per la città de L'Aquila (Curci et al., 2021). Gli indicatori bioclimatici utilizzati sono la Temperatura Media Annuale (MAT), la Temperatura Massima Estiva (Tmax\_sm), la Temperatura Minima Invernale (Tmin\_wt) e le Precipitazioni Estive (PPT\_sm). I dati sono stati utilizzati per produrre un elenco di specie valutate in base alla sovrapposizione dei loro intervalli principali ai valori storici o previsti per una determinata variabile bioclimatica. Questo è stato utilizzato come indicazione della loro vulnerabilità ai cambiamenti climatici, insieme a un punteggio di adattabilità ideato in base al range di temperatura o precipitazione della nicchia climatica delle specie.

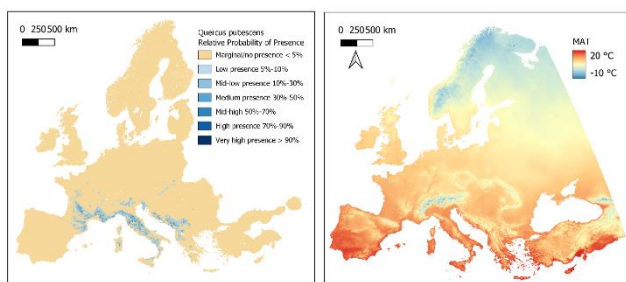


Fig.1 - Confronto dei dati bioclimatici e della distribuzione delle specie utilizzati. A. Probabilità relativa di presenza per *Quercus pubescens* dall'European Tree Atlas. B.

Temperatura Media Annuale (MAT) di ClimateEU a risoluzione di 1 km<sup>2</sup>.

Fig.1 - Comparison of both bioclimatic and species distribution data used. A. Relative probability of presence for *Quercus pubescens* from the European Tree Atlas. B. ClimateEU Mean Annual Temperature (MAT) at 1 km<sup>2</sup> resolution.

## Risultati e Discussione

La maggior parte delle specie esaminate mostra una elevata vulnerabilità alle condizioni climatiche previste, in particolare alla temperatura massima media estiva e alla temperatura media annua. Le prestazioni di ciascuna specie per ciascuna variabile bioclimatica utilizzata possono essere osservate nella Tabella 1. Le prime cinque specie ottenute dall'analisi mostrano risultati promettenti come buoni candidati per il progetto di forestazione urbana proposto. Tutte le specie sono presenti nella zona di riferimento. *Quercus pubescens*, *Castanea sativa* e *Fraxinus ornus* si trovano naturalmente e sono considerate native localmente, componendo la maggior parte delle foreste naturali e seminaturali nella zona. *Pinus nigra* è diffuso sia in città che nelle montagne circostanti, anche se non è considerato nativo localmente. Tuttavia, prospera nelle attuali condizioni ecologiche e climatiche. Il fatto che queste specie siano anche le meno vulnerabili dimostra che il metodo utilizzato ha applicazioni nella vita reale e corrisponde a quanto osservato localmente. *Quercus ilex*, d'altra parte, è più diffuso a quote più basse e in aree più calde dell'Italia centrale. Essendo una quercia sempreverde mediterranea, è altamente adattata a condizioni secche e calde tutto l'anno. La nostra analisi mostra che può anche sostenere climi moderatamente freddi. Attualmente questa specie è piantata in città, ma non si trova naturalmente nel paesaggio circostante. Se questa specie dovrebbe essere utilizzata per un tale progetto richiede una considerazione attenta. Le future condizioni climatiche previste per la zona suggeriscono che sarebbe un candidato perfetto per le foreste future che prospereranno in tali condizioni. Tuttavia, la sua introduzione potrebbe rappresentare un cambiamento significativo per la biodiversità locale, poiché le foreste mediterranee sclerofille non sono da aspettarsi nella zona. La sfida nel voler mantenere la coerenza ecologica durante la pianificazione dei cambiamenti climatici futuri non è da sottovalutare. La scelta delle specie per un tale progetto dovrebbe considerare molti fattori aggiuntivi, come la conservazione della biodiversità locale, i servizi ecosistemici, i requisiti di gestione e la resilienza ecologica. La disponibilità di acqua durante le stagioni più secche deve essere garantita e le sue esigenze a lungo termine devono essere calcolate attentamente in base ai cambiamenti previsti nelle precipitazioni e nell'evapotraspirazione. Poiché gli obiettivi di questo progetto sono di fornire soluzioni naturali ai cambiamenti climatici previsti nelle precipitazioni e nella temperatura, è importante che i suoi benefici desiderati compensino e superino le risorse necessarie per mantenere la foresta. La raccolta e lo stoccaggio delle acque piovane

durante eventi meteorologici estremi possono essere un importante strumento per contrastare gli eventi di siccità.

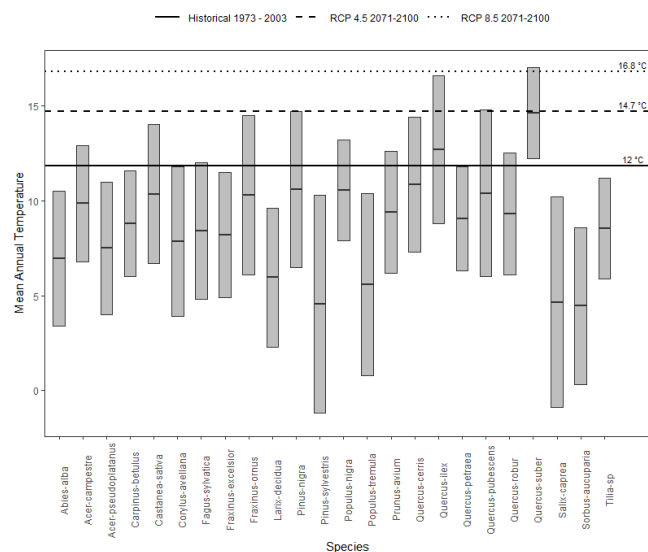


Fig.2 – Range climatico delle specie MAT. L'altezza della barra indica il 95° e il 5° percentile dell'intero intervallo climatico della specie, e la barra centrale indica la mediana. Le linee orizzontali forniscono il valore storico per L'Aquila, calcolato nel periodo 1973-2003, e i valori proiettati di RCP 4.5 e 8.5.

Fig.2 - Species core climatic ranges for MAT. Bar height indicates 95 and 5 percentile of the entire species range, and middle bar the median. Horizontal lines supply the historical value for the L'Aquila, calculated on the period 1973-2003, and the projected RCP 4.5 and 8.5 values.

## Conclusioni

Grazie all'uso di dataset di qualità disponibili pubblicamente e dati climatici omogeneizzati dalle osservazioni locali, siamo stati in grado di produrre una metodologia facilmente riproducibile per la valutazione rapida della vulnerabilità delle specie arboree ai cambiamenti climatici, e ne abbiamo illustrato l'applicazione per la città dell'Aquila. La vulnerabilità climatica non è spesso considerata nella pianificazione di foreste urbane per l'adattamento ai cambiamenti climatici (Khan and Conway, 2020), e quindi è necessario un modo semplice per effettuare questa valutazione in modo rapido attraverso le città europee. Gli attori interessati potrebbero spesso trascurare aspetti importanti se le informazioni non sono facilmente disponibili, quindi c'è la necessità di un tale metodo. Abbiamo anche mostrato l'importanza dell'uso di serie temporali basate sulle osservazioni locali poiché i risultati saranno molto inaccurati se si utilizzano dati interpolati. La capacità di ottenere tali informazioni in modo semplice e pratico può essere di grande beneficio per gli attori interessati.

Tab.1 - Punteggi di vulnerabilità (0-3) dalle variabili bioclimatiche utilizzate per ciascuna specie. Punteggi più alti indicano una maggiore vulnerabilità. Le specie sono ordinate dalla meno vulnerabile alla più vulnerabile.

Tab.1 - Vulnerability scores (0-3) from the bioclimatic variables used for each species. Higher scores indicate higher vulnerability. Species are ordered from least vulnerable to most vulnerable.

Species	MAT	MaxSM	MinWT	PrecSM	Adaptability	Total
Quercus-ilex	1	2	0	0	1	4
Pinus-nigra	2	2	0	0	1	5
Quercus-pubeszens	2	3	0	0	0	5
Castanea-sativa	2	3	0	0	1	6
Fraxinus-ornus	2	3	0	1	0	6
Quercus-cerris	2	3	0	0	2	7
Quercus-suber	1	2	2	0	3	8
Corylus-avellana	3	3	0	3	0	9
Fagus-sylvatica	2	3	1	2	1	9
Populus-nigra	2	3	0	1	3	9
Acer-campestre	2	3	0	2	3	10
Quercus-robur	2	3	0	3	2	10
Acer-pseudoplatanus	3	3	1	3	1	11
Fraxinus-excelisor	3	3	1	3	1	11
Pinus-sylvestris	3	3	2	3	0	11
Prunus-avium	2	3	1	3	2	11
Salix-caprea	3	3	2	3	0	11
Sorbus-aucuparia	3	3	2	3	0	11
Abies-alba	3	3	2	3	1	12
Populus-tremula	3	3	2	3	1	12
Quercus-petraea	3	3	1	2	3	12
Carpinus-betulus	3	3	1	3	3	13
Larix-decidua	3	3	3	3	1	13
Tilia-sp	3	3	2	3	2	13

## Bibliografia

- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., Cobb, N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manag., Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate* 259, 660–684.
- Anderegg, W.R.L., Trugman, A.T., Badgley, G., Anderson, C.M., Bartuska, A., Ciais, P., Cullenward, D., Field, C.B., Freeman, J., Goetz, S.J., Hicke, J.A., Huntzinger, D., Jackson, R.B., Nickerson, J., Pacala, S., Randerson, J.T., 2020. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science* 368, 7005.
- Commission, E., 2021. Evaluating the impact of nature-based solutions: a handbook for practitioners. Publications Office of the European Union, LU.
- 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 region (Central Italy), 1930–2019. *International Journal of Climatology* 41, 4414–4436.
- de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., San-Miguel-Ayanz, J., 2016. The European Atlas of Forest Tree Species: modelling, data and information on forest tree species. In: *European Atlas of Forest Tree Species*.

- Publications Office of the European Union, Luxembourg, p. e01aa69+.
- Epelde, L., Mendizabal, M., Gutiérrez, L., Artetxe, A., Garbisu, C., Feliu, E., 2022. Quantification of the environmental effectiveness of nature-based solutions for increasing the resilience of cities under climate change. *Urban Forestry and Urban Greening* 67.
- European Environment Agency., 2021. Nature-based solutions in Europe policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction. Publications Office, LU.
- Frantzeskaki, N., McPhearson, T., 2022. Mainstream Nature-Based Solutions for Urban Climate Resilience. *BioScience* 72, 113–115.
- Gaspar, R., Blohm, A., Ruth, M., 2011. Social and economic impacts of climate change on the urban environment. *Curr. Opin. Environ. Sustain* 3, 150–157.
- I.P.C.C., 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers.
- Khan, T., Conway, T.M., 2020. Vulnerability of Common Urban Forest Species to Projected Climate Change and Practitioners Perceptions and Responses. *Environ Manage* 65, 534–547.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manag* 259, 698–709.
- Marchi, M., Castellanos-Acuña, D., Hamann, A., Wang, T., Ray, D., Menzel, A., 2020. ClimateEU, scale-free climate normals, historical time series, and future projections for Europe. *Sci Data* 7, 428.
- Oral, H.V., Carvalho, P., Gajewska, M., Ursino, N., Masi, F., Hullebusch, E.D. van, Kazak, J.K., Exposito, A., Cipolletta, G., Andersen, T.R., Finger, D.C., Simperler, L., Regelsberger, M., Rous, V., Radinja, M., Buttiglieri, G., Krzeminski, P., Rizzo, A., Dehghanian, K., Nikolova, M., Zimmermann, M., 2020. A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: a critical assessment based on case studies and literature. *Blue-Green Syst* 2, 112–136.
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C.A.J., Smith, A., Turner, B., 2020. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci* 375, 20190120.
- Turner, B., Devisscher, T., Chabaneix, N., Woroniecki, S., Messier, C., Seddon, N., 2022. The Role of Nature-Based Solutions in Supporting Social-Ecological Resilience for Climate Change Adaptation. *Annu. Rev. Environ. Resour* 47, 123–148.

# EVALUATION OF DEGREE-DAYS FOR SPRING CROPS, CONSIDERING UPPER TEMPERATURE THRESHOLDS AND CUT-OFF TECHNIQUES

## *VALUTAZIONE DEI GRADI-GIORNO PER COLTURE PRIMAVERILI, CONSIDERANDO SOGLIE DI TEMPERATURA SUPERIORI E TECNICHE DI CUT-OFF*

Giovanni Maria Poggi<sup>1</sup>, Luca Armadoro<sup>2</sup>, Marco Vignudelli<sup>2</sup>, Francesca Di Cesare<sup>1</sup>, Francesca Ventura<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Biological, Geological and Environmental Sciences (BiGeA), Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Bologna, Italy

<sup>2</sup>Department of Agricultural and Food Sciences, Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Bologna, Italy

\*Corresponding author email: francesca.ventura@unibo.it

### **Abstract**

Variations in temperature trends connected to climate change have considerable consequences on plants' phenological development, being temperature its major driving force. Several modeling approaches exist, to simulate the phenological development through the calculation of GDDs, all of them having in common the consideration that the plant starts to cumulate heat units above a minimum temperature threshold (base temperature), required to develop from one stage to another, and slows down, or stops, when a maximum temperature threshold is reached.

Aim of the present work was to compare different upper threshold cut-off techniques, applied to the single triangle method, in order to assess which of them could give the best results in terms of GDDs calculation for summer crops in the climate change scenario in the North of Italy. For this purpose, a historical series of phenological data was used, comparing "standard years" and years in which high temperatures conditions were recorded.

### **Parole chiave**

Calcolo dei GDD, fenologia, cambiamenti climatici, tecniche di cut-off, soglie termiche

### **Keywords**

GDDs calculation, phenology, climate change, cut-off techniques, thermal thresholds

### **Introduction**

Variations in temperature trends connected to climate change have considerable consequences on plants' phenological development, being temperature its major driving force. This connection is expressed in growing degree days (GDDs), defined as the "heat units" (useful for the progression of the life cycle) accumulated during a day (24 h), as reported in Poggi et al. (2022).

Several modeling approaches exist, to simulate the phenological development through the calculation of GDDs, all of them having in common the consideration that the plant starts to cumulate heat units above a minimum temperature threshold (base temperature), required to develop from one stage to another in its life cycle.

The simplest way to calculate GDDs is represented by the so-called "rectangle method" (Arnold 1960). This is an averaging method, calculating GDDs starting from daily maximum and minimum air temperature.

This model assumes that the useful heat cumulated in the 24 hours for the phenological development can be approximated to the difference between mean daily temperature and crop base temperature.

However, it now has been extensively demonstrated how this approach presents several weaknesses, due to its excessive simplification.

First of all, it assumes that the relationship between the whole range of temperature and GDDs is linear, despite the

recognized evidence that the response of biological organisms to temperature is nonlinear (Maiorano 2012).

The nonlinear approach considers that plants development rate increases linearly with temperature only between the base temperature and the optimal temperature for the crop development. Once temperature exceeds the optimal, developmental rate starts decreasing, till it becomes zero when temperature reaches the so-called "maximum cardinal temperature".

Secondly, averaging method does not take into account daily temperature fluctuation, while developmental rates at constant or variable temperatures are deeply diverse.

To solve both problems, the most refined models make use of the beta-distribution function method. The equation takes into account  $T_{base}$ ,  $T_{optimal}$  and  $T_{max}$  of plant development. Thermal time is considered to be zero if  $T < T_{base}$  or if  $T > T_{max}$ , and to be maximum if  $T = T_{optimal}$ . The equation models the decrease of the developmental rate as temperature exceeds  $T_{optimal}$  and approaches to  $T_{max}$ . Moreover, using hourly temperature data as input, it considers daily temperature fluctuation (Zhou and Wang 2018).

At an intermediate level of complication, between the too simple "rectangle method" and the highly refined "beta-distribution function method", other methods have been proposed for estimating GDDs cumulation, and are frequently employed in field-operational contexts, having

the advantage of being easy-to-use, using as input minimum and maximum daily temperature instead of hourly temperature.

These methods aim to take into account daily temperature fluctuation, assuming that daily temperature profile can be represented by a geometrical shape, such as the single triangle method (Snyder et al. 1999).

In a climate characterized by high temperatures, these methods can be refined with “cut-off” techniques (horizontal, vertical, intermediate), in order to consider the detrimental effect of temperatures higher than  $T_{optimal}$ . In these cut-off methods, degree-day calculation area is modified in relation to an upper threshold temperature, above which developmental rate starts to decrease, or stops, depending on the cut-off strategy used (University of California Davis,

[www.ipm.ucdavis.edu/WEATHER/ddconcepts.html](http://www.ipm.ucdavis.edu/WEATHER/ddconcepts.html)).

Given all these considerations, GDDs calculation method, which do not consider an upper threshold temperature, and thus do not take into consideration negative effects of high temperatures on plants’ development, can be successfully applied under “standard” climate conditions, but could be inadequate under climate change conditions, characterized by increasing frequency of heat waves, leading to interpretations of climate effects not consistent with the real phenological response to temperature.

In this context, aim of the present work was to compare different upper threshold cut-off techniques, applied to the single triangle method, in order to assess which of them could give the best results in terms of GDDs calculation for summer crops in the climate change scenario in the North of Italy. For this purpose, a historical series of phenological data was used, comparing “standard years” and “warm years” (years in which high temperatures conditions were recorded).

## Materials e Methods

Twenty-one years of phenological data were used in this study (2003 – 2023), obtained from the phenological bulletin, released weekly by the Department of Agricultural and Food Sciences (DISTAL), University of Bologna. The bulletin publishes data of the phenological surveys carried out in accordance with the Phenagri protocol (Pasquini 2006), at the agro-phenological station experimental plots sited in Cadriano (BO) (44° 33' 03" N, 11° 24' 36" E). Phenology was analyzed according to the internationally recognized BBCH scale (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt, and Chemical industry), encoding plants’ development stages using a double-digit code, going 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).

For GDDs calculation, to be coupled to phenological data, weather data (daily maximum and minimum temperature) were provided by DISTAL agrometeorological station, sited next to the DISTAL agro-phenological station.

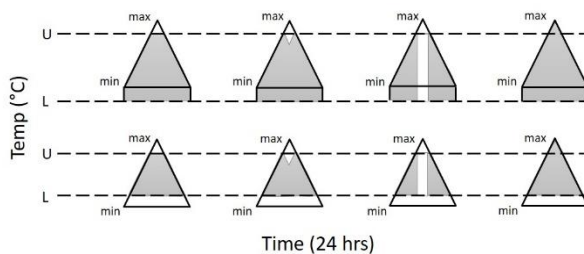
To evaluate high temperature regimes effects on GDDs calculation for summer crops, the aforementioned 21 years

were divided in “standard years” and “warm years”, following the procedure of Fornaciari et al. (2023); “standard” and “warm” years were defined as years in which average temperature in the trimester June – August was respectively above and below the median value of the 21-years period.

First of all CGDD (Cumulated Growing Degree Days) for the reaching of BBCH stage 65 (full flowering) and 89 (full maturity) were calculated, using the single triangle method with no cut-off techniques for “standard years”, in order to define thermal requirements for two crop species used in this study, for the reaching of BBCH stages 65 and 89. The two chosen crops are particularly relevant summer crops for the area of the Po Plain, in the north of Italy: corn (*Zea mays*, L.) and sorghum (*Sorghum vulgare* Pers.).

Then, in order to understand which upper threshold cut-off technique for GDDs calculation could give the best results in the climate change context, with respect to the use of single triangle method with no cut-off strategies, both single triangle method with no cut-off and with cut-off techniques (horizontal, vertical and intermediate), respectively, were used in “warm years” to simulate the DAS (Days After Sowing) at which thermal requirements for BBCH 65 and BBCH 89 were reached.

DAS for the reaching of BBCH 65 and BBCH 89 observed in the field in warm years (obtained from phenological bulletin) were thus compared with DAS for the reaching of BBCH 65 and BBCH 89 predicted with the different aforementioned strategies, using Root Mean Square Error (RMSE)



*Fig. 1: Possibili relazioni tra il ciclo termico giornaliero e le soglie termiche superiore e inferiore.*

*(max= temperatura massima giornaliera, min= temperatura minima giornaliera, U= soglia termica superiore, L= soglia termica inferiore)*

*Fig. 1: Possible relationships between the daily temperature cycle and the upper and lower thresholds.*

*(max= maximum daily temperature, min= minimum daily temperature, U= upper threshold temperature, L= lower threshold temperature)*

The different cut-off techniques are presented in Figure 1. Briefly, the horizontal cut-off method considers that development continues at a constant rate when temperature exceeds the upper threshold. The intermediate cut-off method assumes that development slows (but does not stop) at temperatures above the upper threshold. The vertical cut-off method considers that development totally stops over the upper threshold temperature. Considering the

conceptualization of the different cut-off techniques, the upper threshold was chosen equal to crop T optimal (temperature over which developmental rate starts decreasing) for horizontal and intermediate strategies, while it was chosen equal to crop T max (temperature over which developmental rate totally stops) for vertical cut-off. For corn T base, T optimal and T max adopted were 8°C, 30°C and 40 °C, respectively (Zhou and Wang 2018; Raes et al. 2018). For sorghum, 8°C, 30°C and 42 °C were used (Singh et al. 2017; Raes et al. 2018).

## Results and discussion

The two groups of standard and warm years are presented in Table 1.

*Tabella 1: Anni standard e anni caldi nel periodo considerato di 21 anni, in base alla temperatura media nel trimestre giugno – agosto. Il valore mediano di riferimento, calcolato sull'intero dataset, è 24,4°C.*

*Table 1: Standard and warm years in the 21-years considered period, 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 °C	2003	26.8 °C
2005	22.8 °C	2009	24.5 °C
2006	22.4 °C	2012	25.9 °C
2007	23.7 °C	2015	25.1 °C
2008	24.0 °C	2017	26.1 °C
2010	24.0 °C	2018	24.9 °C
2011	24.4 °C	2019	26.0 °C
2013	23.8 °C	2021	24.9 °C
2014	23.0 °C	2022	25.6 °C
2016	23.9 °C	2023	24.9 °C
2020	24.2 °C		

CGDD for the reaching of BBCH stage 65 and 89 were calculated using the single triangle method with no cut-off techniques for “standard years”. For corn, these two thermal thresholds corresponded to 837 and 1757 CGDD, while for sorghum they resulted equal to 949 and 1680 CGDD, respectively.

These thermal thresholds were used to simulate DAS necessary to reach full flowering and full maturity in warm years, with single triangle method both with and without cut-off techniques. The predicted DAS obtained with the different strategies were compared with the DAS observed (from phenological bulletins). RMSE between observed and predicted DAS for both phenological stages of both crops are presented in Table 2.

With regard to the flowering phase, for both crops, it was observed that, looking at RMSE values, the application of the cut-off strategies resulted in modest improvements, compared to the single triangle method without the use of

upper thresholds. In the considered “warm years”, full flowering was, on average, reached on 25<sup>th</sup> June and 4<sup>th</sup> July for corn and sorghum, respectively. Thus, the phenophase was reached before summer high thermal regime resulted in a large lag between the CGDDs calculated with and without the consideration of an upper threshold temperature. In particular, vertical cut-off method did not show any improvement compared to the single triangle method, as the considered upper threshold temperature adopted (40 °C and 42 °C) was never reached. For the same reason, the prediction of the DAS for the reaching of BBCH 89, with vertical cut-off and single triangle method showed the same RMSE. On the contrary, other cut-off strategies resulted in a reduction of the RMSE compared to the single triangle method for the modelling of the DAS for the reaching of BBCH 89. As reported in Table 2, in particular, intermediate cut-off technique showed the best results for both crops. These results are not surprising. In fact, as previously observed by Maiorano (2012), in the modelling of GDDs cumulation for poikilothermic organisms, vertical cut-off does not consider any slowdown of GDDs cumulation above T optimal, until the maximum temperature is reached. Horizontal cut-off is notoriously more imprecise respect to intermediate cut-off. In fact, the first one is incorrect for temperatures higher than optimal, assuming that development continues at a constant rate above the upper threshold, thus not considering the detrimental effect of excessive temperatures on plant development. The second, on the contrary, can be considered a better approximation of the physiological response of the crop, considering that plant development slows at temperatures above the upper threshold (fixed equal to T optimal).

Comparing the two crops of this case study, modelling solution adopted showed better results for corn than for sorghum. “Standard” years were used for the identification of the thermal thresholds for the reaching of BBCH 65 and BBCH 89. For corn, these two phenophases in the “standard” years respectively showed a standard deviation of 49 and 118 CGDD, respectively. For sorghum, these two standard deviations were 105 and 149 CGDD, respectively. Higher standard deviations observed in sorghum could at least partially explain the phenomenon. In the case of corn, RMSE values of 6.13 and 6.43 obtained with intermediate cut-off strategy for BBCH 65 and BBCH 89 modelling can be considered particularly satisfying, as seven days correspond to the experimental error (the used dataset is, in fact, derived from phenological observations of weekly released bulletins).

## Conclusions

Aim of the present work was to compare different upper threshold cut-off techniques, applied to the single triangle method, in order to assess which of them could give the best results in terms of GDDs calculation for summer crops in the climate change scenario in the North of Italy. In fact, these techniques are frequently employed in field-operational contexts, having the advantage of being easy-to-use, using as input minimum and maximum daily temperature instead of



hourly temperature. However, these approximation methods require specific validation, as their performance can deeply vary in function of the time of the year, the geographical location and the biology of the crop under consideration. For these reasons, case study such the one here presented are precious source of information about the possibility of successfully employ cut-off techniques for the modelling of GDDs cumulation in a specific area.

*Tabella 2: Errore quadratico medio (RMSE) dei giorni dalla semina (DAS) osservato – previsto, per il raggiungimento di BBCH 65 e BBCH 89, per mais e sorgo.*

*Table 2: Observed - predicted DAS RMSE for the reaching of BBCH 65 and BBCH 89, for corn and sorghum.*

Corn		Sorghum	
BBCH 65		BBCH 65	
GDDs calculation method	RMSE (d)	GDDs calculation method	RMSE (d)
Single Triangle	6.43	Single Triangle	10.67
Vertical cut-off	6.43	Vertical cut-off	10.67
Horizontal cut-off	6.13	Horizontal cut-off	10.40
Intermediate cut-off	6.13	Intermediate cut-off	10.04
BBCH 89		BBCH 89	
GDDs calculation method	RMSE (d)	GDDs calculation method	RMSE (d)
Single Triangle	9.56	Single Triangle	12.85
Vertical cut-off	9.56	Vertical cut-off	12.85
Horizontal cut-off	8.14	Horizontal cut-off	12.00
Intermediate cut-off	6.43	Intermediate cut-off	10.45

## References

Arnold, C. Y. 1960. "Maximum-Minimum Temperatures as a Basis for Computing Heat Units." *Proceedings. American Society for Horticultural Science* 76.

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>.

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.

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): 1–17. <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, Caria 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>.

Zhou, Guanglin, and Quanjiu 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>.



# ***PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS (PCA) TO THE STUDY OF THE MAIN CHARACTERISTICS OF THE POLLINIC SEASON OF THE TAXON OLEA EUROPEA (OLIVE TREE) IN THE PERIOD 2010 - 2023***

## **ANALISI PCA (PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS) APPLICATA ALLO STUDIO DELLE PRINCIPALI CARATTERISTICHE DELLA STAGIONE POLLINICA DEL TAXON OLEA EUROPEA (OLIVO) NEL PERIODO 2010 - 2023**

Danilo Tognetti<sup>1\*</sup>, Lucia Ciarrocchi<sup>2</sup>, Silvia Bartolacci<sup>3</sup>, Nadaniela Egidi<sup>2</sup>, Stefano Leonesi<sup>1</sup>, Filippo Olivieri<sup>3</sup>, Nadia Trobiani<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> AMAP Regione Marche

<sup>2</sup> Università di Camerino, Scuola di Scienze e Tecnologia

<sup>3</sup> ARPAM Regione Marche

\* tognetti\_danilo@amap.marche.it

### **Abstract**

PCA is a multivariate analysis technique used to reduce the dimensionality of variables: from a set of initial information, a new set of data is generated by reducing the number of variables, the *Principal Components*, keeping most of the information. The projection of the original variables on a smaller number of principal components unrelated to each other, is obtained through appropriate transformations maintaining the total variance. The PCA, in order to express in synthetic form the synergistic action of the set of variables, suggests which of them are able to effectively represent the initial data by ordering them according to decreasing variance. This paper describes an application of PCA analysis in the aerobiological field, between variables describing the pollinic season and climatic variables. The aerobiological measurements come from the ARPA Marche network, the climatic ones from the AMAP Marche network. The purpose of the work was to investigate which of the climatic variables considered are more correlated to the aerobiological quantities related to the *Olea* in different periods of the year inherent in the pollinic season; data on oil production in the area of interest were also considered.

### **Parole chiave**

Analisi PCA; piante allergeniche; pollini; stagione pollinica; cambiamenti climatici; temperatura; precipitazione; regione Marche; *Olea* europea; olivo.

### **Keywords**

PCA Analysis; allergenic plants; pollen; pollinic season; climate changes; temperature; precipitation; Marche region; *Olea* europea; olive tree.

### **Introduzione**

L'Analisi delle Componenti Principali (PCA) viene utilizzata in molti settori: medico, sociale, economico, meteorologico, chemiometrico, etc.. Infatti, non solo consente di ridurre la dimensionalità del problema, ma fornisce un'interpretazione grafica leggibile e comprensibile delle osservazioni rispetto alle *Componenti Principali* scelte. Nel presente lavoro la PCA è stata applicata a due studi in ambito aerobiologico: lo studio delle stagioni polliniche dell'*Olea* europea e lo studio delle stagioni polliniche in relazioni a variabili meteorologiche. L'analisi del primo studio ha riguardato variabili che descrivono le diverse caratteristiche delle stagioni polliniche (inizio, durata, picco massimo del polline rilevato, ...) mentre nel secondo si sono cercate le relazioni più significative fra le variabili inerenti la stagione pollinica e quelle meteorologiche. Si è cercata infine una possibile relazione fra l'andamento della stagione pollinica e la produzione di olio relativa allo stesso anno.

### **Materiali e Metodi**

Durante l'analisi svolta, è stato utilizzato il software Past4 (Past4 4.1 1999-2024) che permette di implementare la PCA inserendo sotto forma di tabella la matrice dei dati iniziali, la quale ha come colonne le variabili originali e come righe le diverse osservazioni. Tale software calcola e visualizza i *loadings* ossia i coefficienti delle *componenti principali* (CP) rispetto alle variabili originali. Infatti le CP vengono costruite come combinazioni lineari delle variabili originali imponendo la condizione di ortogonalità e vengono ordinate in modo decrescente rispetto alle relative varianze. Dunque i *loadings* rappresentano una misura della quantità di informazione di ogni singola variabile originale che ciascuna CP porta con sé.

I dati sulle stagioni polliniche dell'*Olea* europea (date di inizio e di fine fioritura, quantitativo di polline) sono stati ottenuti tramite le misure della stazione di monitoraggio aerobiologico di Castel di Lama (AP4) appartenente alla rete di monitoraggio "POLLnet" del Sistema nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) di cui ARPA Marche fa

parte. La serie storica disponibile copre il periodo 2010-2023. Tali dati sono stati messi in relazione con quelli meteorologici ottenuti a partire dalle misure rilevate dalla stazione agrometeorologica della rete AMAP Marche scelta perché posizionata in prossimità della stazione aerobiologica AP4 (Fig. 1). Le variabili meteorologiche considerate, ritenute le più significative per l'evoluzione della stagione pollinica (Tognetti, 21), sono: temperatura media (°C), precipitazione totale (mm), umidità relativa media (%) sempre riferite al periodo 2010-2023.

I quantitativi relativi della produzione di olio sono quelli disponibili nel sito dell'ISTAT.

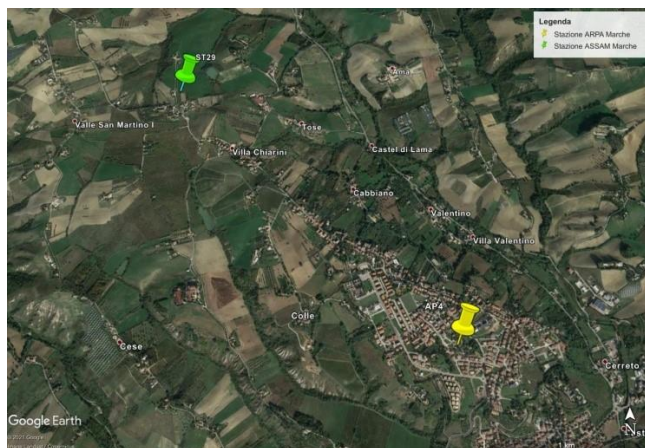


Fig.1 – Posizione geografica della stazione aerobiologica AP4 dell'ARPA Marche e della stazione agrometeorologica ST29 dell'AMAP Marche dislocate nel comune di Castel di Lama (AP).

Fig.1 – Geolocalization of ARPA Marche aerobiological station AP4 and of AMAP Marche agrometeorological station ST29 in the territory of the city of Castel di Lama (AP province).

## Risultati e Discussione

### Studio sulle stagioni polliniche dell'Olea europea

Una prima applicazione della PCA riguarda lo studio delle stagioni polliniche su una serie storica di 14 anni (dal 2010 al 2023) dell'Olea europea, a partire dai dati delle concentrazioni giornaliere di polline registrate nella località di Castel di Lama (AP4). Per ciascun anno vengono riportati: *Inizio*, ovvero il giorno di inizio stagione pollinica espresso come giorno giuliano; *Fine*, ovvero il giorno giuliano di fine stagione pollinica; *Durata*, ovvero la durata in giorni della stagione pollinica; *Valore di picco*, ovvero la massima concentrazione giornaliera di polline raggiunta (pollini/m<sup>3</sup>); *Data di punta (polline)*, ovvero il giorno (giuliano) di massima concentrazione giornaliera di polline; *Somma totale di polline*, ovvero il totale del polline misurato durante l'anno (pollini/m<sup>3</sup>) (Fig. 2).

	Inizio	Fine	Durata	Valore di picc	Data di punta	Somma total
2010	148	162	14	691,36	150	4788,95
2011	143	155	12	449,38	150	3037,65
2012	146	160	14	948,46	153	6389,4444
2013	148	169	21	701,77	159	3851,77
2014	131	160	29	277,53	147	2156,12
2015	122	157	35	933,83	152	6502,75
2016	144	163	19	318,18	151	1707,58
2017	141	166	25	430,43	151	1945,33
2018	142	159	17	580,68	147	3246,34
2019	152	165	13	341,16	155	1513,13
2020	138	158	20	411,87	146	2898,55
2021	147	166	19	984,60	153	8629,36
2022	140	158	18	1037,63	148	5635,35
2023	144	160	16	372,98	149	2521,59

Fig.2 - Set di dati iniziali delle variabili che descrivono le stagioni polliniche come tabella di input del programma Past4.

Fig.2 - Initial data set of variables describing pollinic seasons as an input table to the software Past4.

Eseguito la PCA, si ha che la prima e la seconda componenti principali raggiungono assieme una buona e accettabile percentuale della varianza cumulativa totale.

Dai valori dei loadings osserviamo che la prima CP è correlata positivamente con le variabili *Inizio*, *Fine* e *Data di punta*, negativamente con la *Durata*, mentre la seconda CP è correlata positivamente con *Valore di Picco* e *Somma totale di polline*.

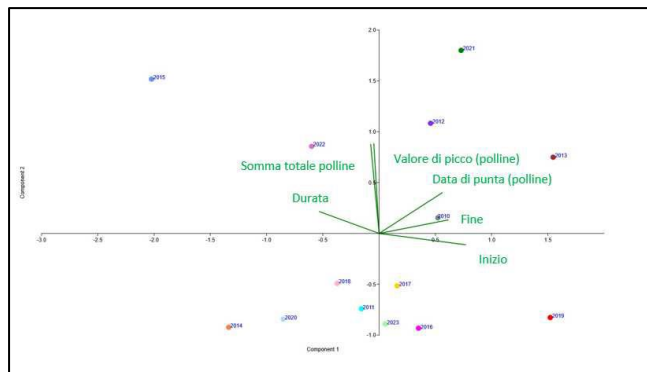


Fig.3 - Scatter plot risultato dalla PCA per le stagioni polliniche. Sono visualizzati come assi x e y la prima e la seconda componente principale; le osservazioni sono rappresentate con le nuove coordinate.

Fig.3 - Scatter plot result for the PCA applied to pollinic seasons. The first and second Principal Components are displayed as x and y axes; the observations are represented with the new coordinates.

L'analisi dello scatter plot (Fig. 3) consente di studiare le relazioni tra le osservazioni e le variabili originali, di evidenziare eventuali gruppi di osservazioni simili e di visualizzare la correlazione tra le variabili originali.

Se si valuta la posizione delle osservazioni nei quattro quadranti del grafico si deduce che i punti con la prima componente positiva sono caratterizzati da una stagione pollinica iniziata tardi e più corta; quelli con prima componente negativa, hanno una stagione pollinica anticipata e lunga; quelli con seconda componente positiva, registrano un'alta produttività di polline; quelli con seconda

componente negativa hanno un basso quantitativo di polline. Inoltre, punti nel grafico molto vicini tra loro corrispondono ad anni con stagione pollinica con caratteristiche simili, come gli anni 2011, 2016 e 2023.

Infine dallo studio delle proiezioni delle variabili originali (assi in verde nella Fig. 3) si ricavano le correlazioni esistenti tra loro. Considerando due delle variabili originali, la loro correlazione è strettamente legata all'angolo  $\theta$  formato dalle loro proiezioni: se  $\theta \ll 90^\circ$  allora sono correlate positivamente e minore è l'angolo, più sarà grande la correlazione; se  $\theta$  è prossimo a  $90^\circ$  allora non sono correlate; infine se  $\theta$  è circa  $180^\circ$  allora sono correlate negativamente. Ancora dalla stessa figura si deduce che le variabili *Somma totale di polline* e *Valore di picco* sono strettamente correlate positivamente, mentre *Durata* e *Inizio* sono inversamente correlate.

Tuttavia, la visualizzazione delle correlazioni esistenti tra le variabili è un risultato secondario della PCA e tali correlazioni andrebbero approfondite con metodi più accurati e mirati, adatti allo scopo.

#### Studio delle stagioni polliniche in relazione a variabili meteorologiche

Partendo dallo studio del quantitativo di polline registrato nei mesi di maggio e giugno e dai dati meteorologici giornalieri di precipitazione totale (mm), temperatura massima ( $^\circ\text{C}$ ), temperatura minima ( $^\circ\text{C}$ ), temperatura media ( $^\circ\text{C}$ ), escursione termica ( $^\circ\text{C}$ ) e umidità relativa (%) nei mesi da gennaio a giugno, l'utilizzo della PCA ha permesso di individuare quali fattori meteorologici e in che periodo dell'anno influenzano maggiormente la stagione pollinica. Dapprima viene eseguita una semplice analisi di correlazione, utilizzando il coefficiente di correlazione di Spearman ( $r_s$ ), tra le variabili originali in modo da escludere quelle strettamente correlate tra loro che forniscono quindi informazioni ridondanti.

Nell'applicazione della PCA si è scelto l'andamento settimanale delle variabili meteo dei primi cinque mesi dell'anno, identificando ogni singolo anno come un gruppo ben definito. Successivamente per lo scatter plot si è preso come assi principali due delle prime tre componenti principali, non sempre le stesse, in modo tale che queste fossero correlate a variabili originali diverse, mantenendo una buona percentuale di varianza cumulativa.

Nell'interpretazione del grafico si è studiata la disposizione e l'orientamento degli ellissi contenenti una percentuale arbitraria sufficientemente grande della variabilità delle osservazioni di ogni singolo gruppo. In questo lavoro abbiamo scelto tale percentuale pari al 70%.

A titolo di esempio è riportato lo scatter plot relativo alla seconda settimana di maggio (Fig 4) dove come assi principali sono state prese la prima e la terza componenti principali, la prima è correlata con l'umidità e la precipitazione mentre la terza con la temperatura massima e quella minima.

Considerando ogni singolo anno, in particolare l'anno 2019, si nota che il corrispondente ellisse (in rosso) è posizionato per gran parte nel secondo quadrante, dove le temperature

sono basse (terza CP negativa), l'umidità è alta con qualche precipitazione (prima CP positiva).

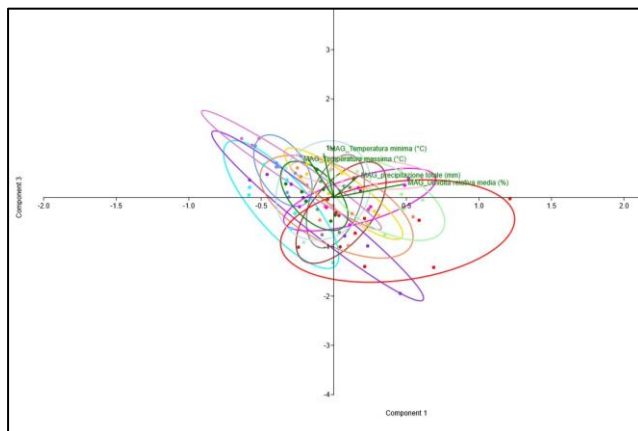


Fig.4 - Scatter plot risultato dalla PCA per le variabili meteorologiche (umidità, precipitazione totale, temperatura massima, temperatura minima) della seconda settimana di maggio di ciascun anno dal 2010 al 2023. Sono visualizzati come assi x e y la prima e la terza componente principale; le osservazioni sono rappresentate con le nuove coordinate.

Fig.4 - Scatter plot result for the PCA considering the meteorological variables (humidity, total precipitation, maximum temperature, minimum temperature) of the second week of May for each year from 2010 to 2023. They are displayed as x and y axes for the first and third principal components; The observations are represented in the new coordinate system.

Le variabili meteorologiche, quali umidità, precipitazione, temperatura minima e massima, di ogni settimana, suddivise per anni, sono state sintetizzate in opportune tabelle, in modo da scegliere cosa confrontare tra i diversi anni.

Attraverso il confronto tra anni con quantitativo di polline simile da una parte, differente dall'altra, è stato possibile determinare le condizioni meteorologiche che incidono maggiormente sul quantitativo di polline.

Si è visto che

- in anni in cui i mesi di gennaio e/o febbraio non sono stati particolarmente freddi (mesi di vernalizzazione dell'olivo) la produzione di polline è stata bassa;
- temperature piuttosto fredde o importanti precipitazioni nelle ultime settimane di aprile e maggio diminuiscono la produzione o la cattura del polline.

In particolare il primo risultato dimostra come l'*Olea*, assieme ad altre piante da frutto, possieda un fabbisogno di freddo da soddisfare per garantire una buona produzione.

Da notare infine che le condizioni meteorologiche del mese di giugno non sono state prese in considerazione, in quanto non possono condizionare l'inizio della fioritura ma al massimo il quantitativo di polline che viene prodotto in quel mese.

## Studio sulla produzione dell'olio

Dai dati del quantitativo di polline registrato nei mesi di maggio e giugno, da quelli meteorologici dei mesi da luglio a novembre e dalla produzione di olive da tavola e da olio (espressi in quintali) raccolti dal sito Istat per la provincia di Ascoli Piceno, si sono cercate eventuali correlazioni tra fattori meteorologici e produzione di olive da tavola e da olio (Fig 5).

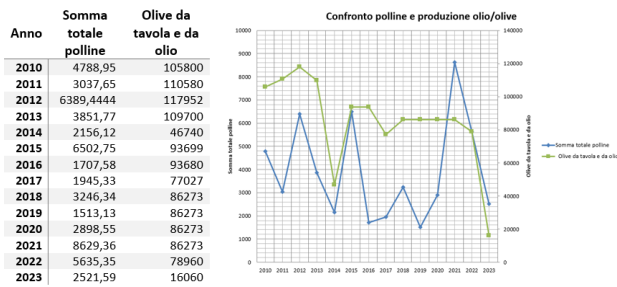


Fig.5 - Serie annua del totale di polline (pollini/m<sup>3</sup>) e del totale di produzione di olive da tavola ed olio (qt), periodo 2010-2023.

Fig.5 - Annual series of the total pollen (pollen/m<sup>3</sup>) and total production of table and oil olives (QT), period 2010-2023.

In questo studio ci si è concentrati sugli anni 2018, 2019, 2020, 2021 poiché in tali anni si è registrato approssimativamente lo stesso valore nella produzione ma un diverso quantitativo di polline. Anche in questo caso per effettuare la PCA, si sono costruite le tabelle mensili dei mesi di giugno, luglio, agosto, settembre, ottobre e novembre dei quattro anni di interesse. Si è notato come il periodo estivo è risultato essere molto importante per la produzione finale: ad esempio, l'anno 2021 ha registrato una resa in produzione molto più bassa rispetto agli altri anni facendo registrare temperature superiori e precipitazioni più scarse rispetto agli altri anni.

Ciò porterebbe ad ipotizzare che temperature alte e siccità nel quadrimestre di interesse influenzano negativamente la produzione di olive, tuttavia occorrerebbe svolgere ulteriori ed approfondite analisi includendo tutta la serie storica dei 14 anni, attualmente in fase di reperimento e ricostruzione da parte nostra.

## Conclusioni

Come abbiamo visto, l'Analisi delle Componenti Principali (PCA) è una tecnica innovativa dell'analisi multivariata che consente di trattare una grande quantità di dati e di estrarre da essi le informazioni più importanti. Nonostante alcuni svantaggi quali l'elevata sensibilità ai valori anomali nei dati iniziali, l'ipotesi di esistenza di una relazione lineare tra i dati e la possibile difficoltà nell'interpretazione dell'esatto significato delle componenti principali, la PCA resta un metodo flessibile e ampiamente utilizzato in diversi settori. La costruzione delle componenti principali permette infatti

di ridurre l'interdipendenza tra le variabili incrementando la stabilità e la robustezza del modello e di semplificare in maniera significativa il problema iniziale consentendo di visualizzare i dati multidimensionali su uno spazio bidimensionale. Ciò permette di trovare delle relazioni esistenti tra i dati dapprima non evidenti. Inoltre spesso la PCA viene usata come punto di partenza per lo studio di fenomeni che includono un numero di variabili elevato in quanto permette di effettuare una preliminare selezione delle stesse da utilizzare per procedere con analisi più approfondite e mirate.

I risultati ottenuti in questo lavoro, in particolare nello studio delle stagioni polliniche in relazione alle variabili meteorologiche corrispondono ad una fase iniziale di un progetto che in futuro potrà essere sicuramente approfondito e potrebbe provare come la PCA possa essere uno strumento utile per la tutela ambientale e per la previsione dell'andamento della stagione pollinica di una qualsiasi specie botanica a partire da fattori meteorologici sempre più mutevoli a causa dei possibili effetti del cambiamento climatico, in particolare del progressivo aumento delle temperature, fenomeno riscontrato anche nelle Marche e della possibile variazione del regime delle precipitazioni (Tognetti, 2021).

## Ringraziamenti

Andrea Mistaro per i preziosi consigli sull'impiego della PCA in campo ambientale.

## Bibliografia

- Ian T Joliffe (2002). Principal Component Analysis. Springer, New York.
- Past4, Università di Oslo (1999-2024). Past4 Reference manual. 1999 - 2024.
- Eugene Isaacson, Herbert Bishop Keller (1994). Analysis of numerical methods. Courier Corporation, New York.
- Frenquelli G., 2002. Interactions between climate changes and allergenic plants. *Monaldi Arch Chest Dis*, 57: 2, 141-143.
- Frenquelli G., Ghitarrini S., Tedeschini E., 2014. Climatic change in Mediterranean area and pollen monitoring. *Flora Mediterranea*, 24, 99-107.
- Bartolacci S., Trobiani N., 2010. Pollini e cambiamenti climatici: correlazione di variabili climatiche con lo spettro pollinico. *Rapporto ambiente - SNPA Edizione 2019*, 11, 176-180.
- D. Tognetti, S. Bartolacci, S. Leonesi, N. Trobiani (2021). Trend pollinici: correlazioni con le variabili climatiche nelle Marche. *Atti del XXIII convegno nazionale di agrometeorologia - Agricoltura 4.0 e Cambiamento Climatico: il ruolo dell'agrometeorologia*.



# LONG-TERM ANALYSIS OF THE PHENOLOGY OF ROBINIA: IMPACTS OF THERMAL VARIABILITY AND PERSPECTIVES FOR HONEY PRODUCTION

## ANALISI A LUNGO TERMINE DELLA FENOLOGIA DELLA ROBINIA: IMPATTI DELLA VARIABILITÀ TERMICA E PROSPETTIVE PER LA PRODUZIONE DI MIELE

Fausto Carbonari<sup>1\*</sup>, Chiara Epifani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria – Centro di ricerca Agricoltura e Ambiente, Via della Navicella 2/4, 00184 Roma  
[\\*fausto.carbonari@crea.gov.it](mailto:fausto.carbonari@crea.gov.it)

### Abstract

A historical series of black locust (BL) production and flowering data collected by a beekeeping company in Piedmont (Italy) from 1981 to 2023 was analysed. Possible discontinuity points were identified for the phenological phases of flowering, and the correlation between these and some thermometric indicators was investigated. Subsequently, the correlation between years of low or abundant honey production and BL flowering was also analysed. Two discontinuity points were identified in 1989 and 2007. In 2007-2023, flowering occurred about 18 days earlier than the average flowering date in 1981-1988. Higher average temperatures in the period between January and the beginning of flowering strongly influence the latter, anticipating it. A moderate positive linear correlation between early/late flowering and unsatisfactory/satisfactory honey production was shown. Understanding the impacts of climatic variability on the flowering of nectariferous plants and on honey production is essential to adapt apary management in response to environmental conditions.

### Parole chiave

Serie storica, Punti di discontinuità, Indicatori termometrici, Fenologia vegetale, Produzione melaria

### Keywords

Time series, Discontinuity points, Thermometric indicators, Plant phenology, Honey production

### Introduzione

Il Comitato di Fenologia della United States International Biological Program (US/IBP) definisce la fenologia come: “la scienza che studia il ritmo temporale di fenomeni biologici ricorrenti negli organismi, le loro cause (fattori biotici e abiotici) e le interrelazioni tra fasi della stessa o di differenti specie” (Baker *et al.*, 1967). La fenologia vegetale si occupa, quindi, della comprensione dei ritmi stagionali delle piante e della loro evoluzione nel tempo in risposta alle grandezze meteorologiche e alla variabilità climatica.

Proprio perché la fenologia è in grado di evidenziare i cambiamenti che gli esseri viventi subiscono, questo settore scientifico ha ottenuto negli ultimi tempi una considerevole attenzione (Chmielewski, 2003). Si rivela, ad esempio, utile nella gestione del rischio per via della diversa sensibilità delle piante agli agenti estremi (gelate, ondate di caldo, grandine): a seconda della fase fenologica durante la quale l'evento si verifica il danno può avere un impatto differente (Schwartz, 2013). La conoscenza dei dati fenologici è quindi rilevante sia per il settore agricolo che forestale, interessati infatti da un numero sempre maggiore di studi (Chmielewski *et al.*, 2005; Jabłońska *et al.*, 2015; Vilhar *et al.*, 2018; Ziegler *et al.*, 2020; Alilla *et al.*, 2022). Tra le specie forestali, la robinia (*Robinia pseudoacacia* L.) risulta essere di particolare importanza per il suo valore economico (Farkas & Zajáč, 2007).

Introdotta per la prima volta in Italia nel 1662 nell'Orto botanico di Padova, la robinia si è diffusa prima nel Nord-Ovest e poi nel resto del territorio nazionale (Pignatti, 1982). Appartenente alla famiglia delle Fabacee, la robinia è una specie invasiva a rapido accrescimento nota per la sua elevata attitudine nettariana (*i.e.*, fino a >500 kg/ha di miele) da cui si ricava l'apprezzato miele di acacia (Ricciardelli d'Albore & Intoppa, 2000). In Italia, viene prodotto soprattutto nella zona prealpina del Piemonte e della Lombardia, in misura minore nelle zone pedemontane appenniniche del centro e, con importanza ancora inferiore, in alcune aree del Sud (Grillenzoni *et al.*, 2001).

L'Osservatorio Nazionale Miele (2024) ha stimato una produzione potenziale di robinia, in annate non caratterizzate da condizioni di calamità, di 20-25 kg/alveare nelle regioni particolarmente vocate come Piemonte, Lombardia, Liguria, Friuli, Veneto ed Emilia-Romagna, di 15-20 kg/alveare in Toscana, Marche e Lazio, e di 15-18 kg/alveare in Calabria. Nel 2022, circa 24.000 tonnellate di miele sono state prodotte a livello nazionale, per un valore di 144 milioni di euro. Nel 2023, però i danni da andamento meteorologico avverso hanno determinato delle perdite ingenti. In particolare, per il miele di acacia è stato registrato un danno medio dal 75% fino al 100% con un mancato ricavo complessivo di oltre 80 milioni di euro (Osservatorio Nazionale Miele & ISMEA, 2023).

Come riporta il Report 2024 dell'Osservatorio: “al fine di sostenere l'evoluzione di tale comparto è necessario integrare

un articolato sistema di monitoraggio produttivo ad uno meteo-climatologico specifico, in grado di documentare in modo inequivocabile il rapporto di causa-effetto tra fenomeno (o situazione) meteo e mancata produzione”.

Tra le variabili ambientali più influenti, la temperatura è riconosciuta come la forzante principale che guida il ciclo di sviluppo delle piante negli ecosistemi temperati e boreali (de Reaumur, 1735; Leopold & Jones, 1947; Lieth, 1974).

In questo studio vengono presentati i risultati preliminari di un’analisi delle relazioni tra indicatori termometrici, dati fenologici di fioritura della robinia e dati di produzione di miele di acacia.

## Materiali e Metodi

I dati fenologici e di produzione di miele monoflorale di acacia sono raccolti dall’azienda apistica “Anna Mainardi Scarampi” di Montaldo Scarampi (Asti) e messi a disposizione dall’Associazione Regionale Produttori Apistici del Piemonte – Aspromiele (Fig.1) costituiscono una serie storica pluridecennale compresa tra il 1981 e il 2023.

Fig.1 – Registro delle osservazioni fenologiche e delle indicazioni di produzione compilato dagli apicoltori.

Fig.1 – Report of phenological observations and production indications compiled by beekeepers.

Con l’obiettivo di approfondire le modalità di raccolta delle due tipologie di dati sono state condotte una serie di interviste ai gestori dell’azienda, da cui è emerso che i dati fenologici, relativi alle date di inizio e fine fioritura, sono stati raccolti osservando: la fioritura di robinia nelle vicinanze dell’apiario, l’inizio dell’attività di bottinatura delle api alla ripresa primaverile e le caratteristiche del nettare stoccato nelle arnie. I dati di produzione sono stati registrati come numero di melari raccolti, tradotti in kg di miele assumendo una produzione media per melario pari a 15 kg, sono corredati da un giudizio qualitativo sulla produzione (i.e., “ottimo” = 3 melari, “buono” = 2 melari, “scarso” = 1,5 melari, cattivo = 1 melario, “pessimo” = < 1/2 melario) e sono accompagnati anche da note relative ad eventuali eventi meteorologici che possono aver condizionato negativamente la produzione. In entrambi i casi, ma soprattutto per i dati di produzione, non si tratta di vere e proprie misure ma di proxy di dati diretti che non sono disponibili. In particolare, i dati

di produzione espressi in kg mantengono, quindi, un certo grado di incertezza di cui si è tenuto conto durante l’analisi dei risultati.

I dati di temperatura dell’aria sono stati scaricati dal dataset AgERA5 del Copernicus Climate Change Service - Climate Data Store (Boogaard et al., 2020) e fanno riferimento alla cella con centroide 44°48’00”N, 8°18’00”E della griglia di 0,1° di risoluzione in cui ricadono le coordinate geografiche dell’apiario.

## Risultati e Discussione

I data set di inizio e fine fioritura presentano dei dati mancanti per gli anni: 1988, 1993, 1994, 1997 e 2000.

In tabella 1 si riportano alcune statistiche descrittive delle due serie.

Tab.1 – Principali statistiche descrittive per i data set di inizio e fine fioritura.

Tab.1 - Main descriptive statistics for start and end of flowering data set.

Statistica	Inizio fioritura		Fine fioritura	
	Data	DOY	Data	DOY
Media	07-mag	127	22-mag	142
Mediana	06-mag	127	21-mag	141
Massimo	31-mag	151	13-giu	164
Minimo	21-apr	111	09-mag	129
Outlier	31-mag	151	13-giu	164
Conteggio	38	38	38	38
Dev. St.	9,21	9,21	6,74	6,74

È stata verificata la normalità dei due campioni con i test di Shapiro-Wilk e d’Agostino-Pearson. Entrambi i test hanno dato esito positivo, confermando così la normalità dei dati. Outlier sono considerati i valori oltre la soglia di media +/- 1,96 volte la deviazione standard. Sono stati individuati due outlier, uno per l’inizio e uno per la fine della fioritura, entrambi relativi allo stesso anno, il 1984 (Fig. 2).

I due data set mostrano una tendenza negativa con elevata variabilità da un anno all’altro. Il lavoro si è poi concentrato sul solo data set di inizio fioritura che mostra un più evidente, anche se moderato, andamento verso il basso. Il valore dell’R<sup>2</sup> pari a 0,52, considerando la complessità del fenomeno, l’alta variabilità e il rumore di fondo derivato dalle caratteristiche dei dati, dà un’indicazione, anche se non così marcata, di cambiamento nel tempo.



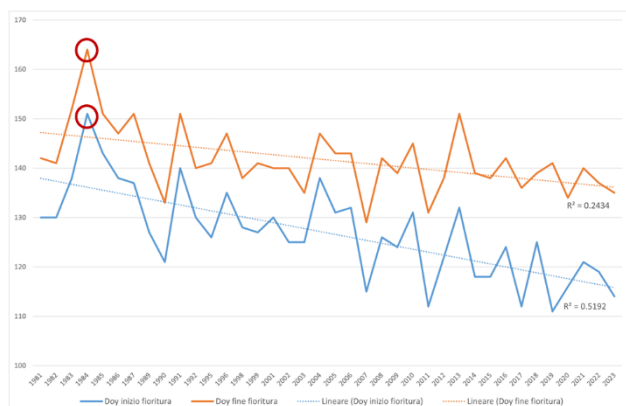


Fig.2 – Andamento delle date di inizio (blu) e fine (arancione) fioritura (DOY) per il periodo 1981-2023. Evidenziati con un cerchio rosso gli outlier.

Fig.2 – Trend of the start (blue) and end (orange) dates of flowering (DOY) for the period 1981-2023. The outliers are highlighted with a red circle.

Osservando l'andamento della serie di inizio fioritura si è voluto analizzare l'eventuale presenza di punti di discontinuità. Sono stati utilizzati tre diversi metodi: il test di Pettitt (Pettitt, 1979), il test di Buishand (Buishand, 1982) e lo *Standard Normal Homogeneity Test* – SNHT (Alexandersson, 1986). Tutti e tre i test identificano il 2007 come punto di discontinuità con una elevata significatività (Pettitt  $p$ -value<0,001; Buishand  $p$ -value<0,01; SNHT  $p$ -value<0,01), il SNHT test ne ha identificato anche un secondo, il 1989 sempre significativo ( $p$ -value<0,05).

I due punti di discontinuità suddividono la serie storica in tre periodi (Fig.3). Considerando che la media dell'intera serie corrisponde ad un DOY (day of the year) pari a 127, ovvero il 7 maggio, il primo periodo (1981-1988) è caratterizzato da anni consecutivi in cui la data di fioritura ha valori superiori alla media, presentandosi quindi in ritardo rispetto ad essa; il secondo periodo (1989-2006) presenta un andamento più variabile con valori positivi (ritardo) e alcuni negativi (anticipo); il terzo periodo (2007-2023) è caratterizzato da una prevalenza di anni soprattutto consecutivi con date di inizio fioritura in anticipo rispetto al valore medio. In particolare, se si vanno a confrontare la media delle date di fioritura del primo periodo (18 maggio) con la media delle date di inizio fioritura del terzo periodo (30 aprile) il risultato del T-test è altamente significativo ( $p$ -value <0,001).

Per approfondire le analisi sono stati individuati una serie di indicatori meteorologici e agrometeorologici, esclusivamente su base termometrica, che fossero correlati con le date di inizio fioritura e si è confrontato il loro andamento tra il primo e il terzo periodo.

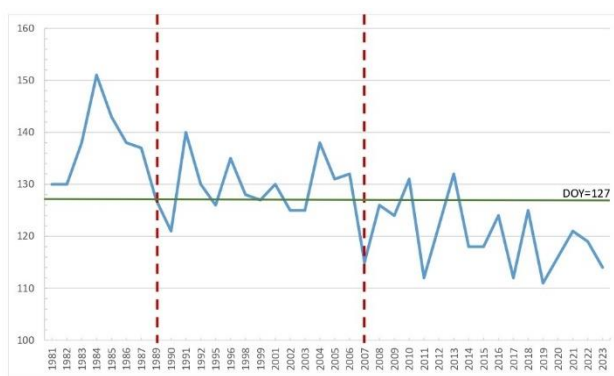


Fig.3 – Date di inizio fioritura. In evidenza, i punti di discontinuità degli anni 1989 e 2007 (linee tratteggiate in rosso) e il valore medio (linea verde).

Fig.3 – Flowering start dates. Highlighted the discontinuity points of the years 1989 and 2007 (red dotted lines) and the mean value (green line).

Gli indicatori utilizzati sono la media delle temperature massime giornaliere (Tx), la media delle temperature medie giornaliere (Tm), la media delle temperature minime giornaliere (Tn) e la media dell'escursione termica giornaliera (DTR) calcolate per diverse finestre temporali comprese tra il 1° gennaio e l'inizio di fioritura di ciascun anno considerato. Inoltre, ad ogni data di fioritura è stato associato il valore di *Growing Degrees Days* (GDD), con temperatura base pari a 10°C, cumulato a partire dal 1° gennaio e fino alla data di inizio fioritura.

Tab.2 – Risultati dell'analisi di correlazione tra indicatori termometrici e date di inizio fioritura.

Tab.2 – Results of correlation analysis between thermometric indicators and flowering start dates.

Indicatore	r Pearson	p-value
Media Tx giornaliera	-0,55***	0,0003
Media Tm giornaliera	-0,50**	0,0013
Media Tn giornaliera	-0,29	0,0820
Media DTR	-0,50**	0,0014
GDD	0,59***	0,0001

\*\*\*  $p$ -value <0,001; \*\*  $p$ -value <0,01

Dai risultati dell'analisi di correlazione (Tab.2) è emerso che la media delle Tx, la media delle Tm e la media delle DTR tra gennaio e l'inizio della fioritura sono inversamente correlate, seppur in maniera debole, con la data di inizio fioritura. Anche le GDD mostrano una correlazione significativa con un valore di  $r$  in questo caso, positivo. Non appare invece significativa la relazione tra la media delle Tn giornaliera e la data di inizio fioritura. I risultati ottenuti dimostrano che la variabilità della data di inizio della fioritura per questa serie storica può essere spiegata dalla variabilità dei valori medi di Tx, Tm e DTR ma non da quella di Tn, nonostante tutte queste variabili siano correlate tra loro. In particolare, all'aumentare dei valori medi di Tx, Tm e DTR, che vengono calcolati in una finestra temporale precedente la fioritura, corrisponde un anticipo dell'inizio della stessa. I risultati delle GDD danno un segnale opposto poiché il valore di  $r$  di Pearson è positivo: probabilmente va considerato che queste ultime, facendo riferimento a valori cumulati oltre la temperatura base, tengono conto di una finestra temporale più

ridotta rispetto a quella utilizzata per il calcolo degli altri indicatori.

Per analizzare l'andamento degli indicatori tra il primo (1981-1988) e il terzo periodo (2007-2023), si è utilizzato il T-test a due code a varianza diseguale (Tab.3).

Tab.3 – Risultati del T Test tra i valori degli indicatori calcolati nel primo periodo (1981-1988) e terzo periodo (2007-2023).

Tab.3 – T Test results between the indicator values calculated in the first period (1981-1988) and third period (2007-2023).

Indicatore	Media (°C) 1981-1988	Media (°C) 2007-2023	T Test	p-value
Media Tx giornaliera	11,0	12,0	-2,838*	0,0141
Media Tm giornaliera	5,9	6,9	-3,373**	0,0050
Media Tn giornaliera	1,7	2,3	-1,19	0,0764
Media DTR	9,2	9,8	-2,237*	0,0378
GDD	135,7	107,7	1,934	0,0893

\*\* p-value <0,01; \* p-value <0,05

Analizzando i risultati del T-Test statisticamente significativi, si può osservare che le medie delle Tx e delle Tm nel terzo periodo sono aumentate di 1°C rispetto al primo, mentre la media delle DTR di 0,5°C. Non è stata invece osservata alcuna differenza tra le medie delle Tn e delle GDD tra il primo e il terzo gruppo. Risultano, quindi, più esplicative le singole variabili termiche come la Tm e Tx rispetto alle Tn e le GDD.

La seconda parte del lavoro ha riguardato l'analisi della serie storica di dati di produzione di miele. In questo caso, sono sette gli anni di dati mancanti: 1988, 1993, 1994, 1997, 2000, 2007 e 2011. I primi cinque si sovrappongono ai dati mancanti delle serie fenologiche, mentre gli anni 2007 e 2011 sono anni in cui manca soltanto il dato di produzione che è stato sostituito con il valore medio della serie (23 kg).

I dati di produzione e di inizio fioritura sono stati standardizzati (data di fioritura media=7 maggio; produzione media=23 kg) (Fig. 4).

In più della metà dei casi (63%) lo Z-score delle due serie presenta lo stesso segno: una produzione al di sopra della media si è presentata quasi sempre in corrispondenza di valori di Z positivi di inizio fioritura, che corrispondono ad anni di ritardo, mentre una produzione inferiore alla media si presenta associata a valori di Z negativi di inizio fioritura, cioè ad anni di anticipo. Questo andamento uniforme, inoltre, caratterizza anni consecutivi soprattutto nella prima e ultima parte della serie storica, corrispondenti al primo e terzo periodo individuati dall'analisi dei punti di discontinuità. Successivamente, le cinque categorie qualitative di produzione sono state aggregate in modo da ottenere una classe soddisfacente ("ottimo" e "buono", da 2 a 3 melari), una classe intermedia ("scarso" circa 1 melario e mezzo) e una insoddisfacente ("pessima" e "cattiva" da 1 a meno di mezzo melario).

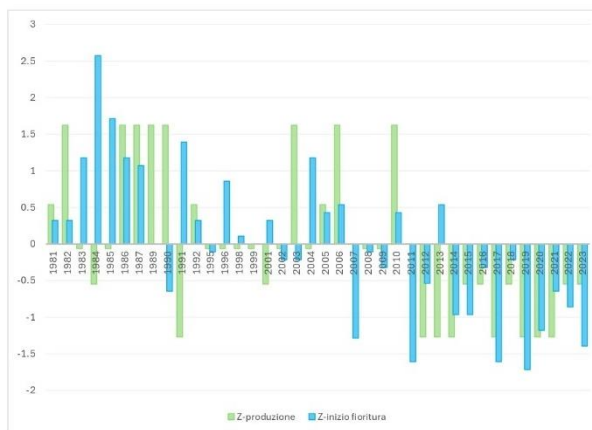


Fig.4 – Standardizzazione dei dati di inizio fioritura (blue) e di produzione (verde).

Fig.4 – Standardization of start flowering (blue) and honey production data (green).

Nel periodo 1981-1988, il 71% degli anni presenta una produzione soddisfacente mentre il 14% è stato giudicato negativamente; nel 2007-2023 le percentuali si invertono: circa il 6% degli anni ha prodotto una soddisfacente quantità di miele, mentre nel 71% dei casi la produzione è stata giudicata insoddisfacente. È stato calcolato l'indice  $r$  di Pearson tra le date di inizio di fioritura degli anni con produzione soddisfacente e insoddisfacente e i relativi dati di produzione di miele in kg, ottenendo un valore di  $r=0,38$  ( $p\text{-value}<0,05$ ). Ciò suggerisce la presenza di una relazione lineare positiva moderata tra anticipo/posticipo della fioritura e produzione insoddisfacente/soddisfacente di miele. Tuttavia, va sottolineato che il risultato sicuramente è condizionato dalla natura stessa dei dati di produzione e del loro metodo di raccolta (dati non misurati).

## Conclusioni

Nel presente lavoro è stata mostrata una metodologia per mettere in relazione eventi meteorologici, fenologia e produzione di miele di acacia. Reperire dati relativi alla fioritura associati a dati di produzione per un periodo di tempo così lungo è sicuramente una rarità nel settore apistico ed è per questo che nonostante il rumore di fondo derivato dalle modalità di raccolta dati, si è deciso di valorizzarli con questa analisi.

L'individuazione di punti di discontinuità si è dimostrato uno strumento utile per scomporre la serie storica pluridecennale di inizio fioritura e individuare, quindi, dei periodi caratterizzati da diversi *pattern* termometrici.

Senza dubbio, è stato confermato un diverso andamento termometrico e quindi fenologico del periodo 1981-1988 rispetto al 2007-2023, riconducibile in particolare ad un aumento delle temperature nell'ultimo periodo della serie storica. L'esplorazione delle variabili termiche utilizzate necessita maggiori approfondimenti per aumentare l'accuratezza dell'analisi e l'interpretazione dei risultati. Sicuramente utilizzando delle metodologie di raccolta dei dati di produzione più accurate si potrebbe descrivere in

maniera più approfondita il fenomeno delle mancate produzioni.

Inoltre, va sottolineato che tra inizio della fioritura e produzione esiste sicuramente una relazione ma è necessario considerare anche altri fattori qui non analizzati quali: la produzione di nettare da parte delle piante, gli eventi che influenzano l'attività di bottinatura delle api (e.g., condizioni meteo sfavorevoli) e le pratiche apistiche.

Tale analisi, seppur preliminare risulta fondamentale nella comprensione e gestione delle avversità abiotiche e delle mancate produzioni che affliggono il settore apistico in questi ultimi anni.

## Ringraziamenti

Questa ricerca è parte integrante delle attività del Progetto IPHEN – Italian Phenological Network, nell'ambito delle attività di Agrometeorologia di Rete Rurale Nazionale. Si ringrazia Aspromiele per aver messo a disposizione i dati e il tecnico dell'associazione Ulderica Grassone per averli recuperati. Un ringraziamento particolare va ad Anna Mainardi e Manfredo Scarampi, proprietari dell'azienda apistica, per l'entusiasmo e la disponibilità con i quali hanno accolto le nostre interviste e soprattutto per la passione che mettono nel loro lavoro.

## Bibliografia

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- 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(7), 16. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071623>
- Baker, H. G., Langenheim, J., Blair, B., Lettau, K., Daubenmire, R. F., Lindsey, A. A., de Foliart, G. R., Loucks, O. L., Evans, F. C., Smith, F. E., Gilbert, G. E., Stearns, F., Hilsenhoff, W., Weller, M. W., Horrall, R., Zimmerman, J. H., Kendeigh, S. C., & Bliss, L. C. (1967). Phenology Program of the IBP. *BioScience*, 17(10), 712–714. <https://doi.org/10.2307/1294088>
- Boogaard, H., Schubert, J., De Wit, A., Lazebnik, J., Hutjes, R., & Van der Grijn, G. (2020). *Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/https://doi.org/10.24381/cds.6c68c9bb>
- Buishand, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58, 11–27.
- Chmielewski, F. M. (2003). Phenology and Agriculture. In M. D. Schwartz (Ed.), *Phenology: An Integrative Environmental Science* (pp. 505–522). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0632-3\\_31](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0632-3_31)
- Chmielewski, F. M., Muller, A., & Kuchler, W. (2005). Possible impacts of climate change on natural vegetation in Saxony (Germany). *International Journal of Biometeorology*, 50, 96–104. <https://doi.org/10.1007/s00484-005-0275-1>
- de Reaumur, R. A. F. (1735). Observations du thermomètre faites à Paris pendant l'année 1735, comparées avec celles qui ont été faites sous la ligne, à l'Isle de France, à Alger et quelques unes de nos îles de l'Amérique. *Mémoires l'Académie Royale Des Sciences de Paris*, 545–576.
- Farkas, Á., & Zajác, E. (2007). Nectar production for the Hungarian honey industry. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 1(2), 125–151.
- Grillenzoni, F. V., Sabatini, A. G., & Margotti, N. (2001). Il miele di Robinia italiano. *Informatore Botanico Italiano - Atti Simposio Di Actuopalinologia*, 33(2), 444–449.
- Jabłońska, K., Kwiatkowska-Falińska, A., Czernecki, B., & Walawender, J. P. (2015). Changes in spring and summer phenology in Poland - responses of selected plant species to air temperature variations. *Polish Journal of Ecology*, 63(3), 311–319. <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2015.63.3.002>
- Leopold, A., & Jones, S. E. (1947). A Phenological Record for Sauk and Dane Counties, Wisconsin. *Ecological Monographs*, 17(1), 81–122.
- Lieth, H. (1974). *Phenology and Seasonality Modeling*. Springer-Verlag.
- Osservatorio Nazionale Miele. (2024). Andamento produttivo e di mercato miele stagione 2023. *IlValoredellaTerra*.
- Osservatorio Nazionale Miele, & ISMEA. (2023). *REPORT MANCATE PRODUZIONI PRIMAVERILI 2023 E STIMA DEL DANNO*.
- Pettitt, A. N. (1979). A Non-parametric to the Approach Problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126–135.
- Pignatti, S. (1982). *Flora D'Italia - Vol. I*. Edagricole.
- Ricciardelli d'Albore, G., & Intoppa, F. (2000). *Fiori e Api: La flora visitata dalle Api e dagli altri Apoidei in Europa*.
- Schwartz, M. D. (2013). *Phenology: An Integrative Environmental Science* (M. D. Schwartz (ed.); II). Springer Dordrecht Heidelberg New York London. <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-94-007-6925-0.pdf>
- Vilhar, U., De Groot, M., Žust, A., Skudnik, M., & Simončič, P. (2018). Predicting phenology of European beech in forest habitats. *IForest*, 11(1), 41–47. <https://doi.org/10.3832/ifer1820-010>
- Ziegler, K., Pollinger, F., Böll, S., & Paeth, H. (2020). Statistical modeling of phenology in Bavaria based on past and future meteorological information. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(3–4), 1467–1481. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03178-4>

# EFFECTS OF SALT STRESS ON GROWTH AND PRODUCTION OF MEDICINAL AND AROMATIC PLANTS IN LAMIACEAE FAMILY

## EFFETTI DELLO STRESS SALINO SULLA CRESCITA E PRODUZIONE DELLE PIANTE MEDICINALI ED AROMATICHE DELLA FAMIGLIA DELLE LAMIACEAE

Laura D'Andrea<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> CREA– Centro di Ricerca Agricoltura e Ambiente, via Celso Ulpiani 5, 70125, Bari

\*laura.dandrea@crea.gov.it

### Abstract

Salinity of soils or waters obstacles to increase production in plant growing areas throughout the world and especially in arid and semi-arid regions it can severely limit plant growth. Thus, salinity becomes a serious problem for plant cultivation, including medicinal and aromatic plants (MAPs). They are cultivated for different plant parts and their active constituents are used in the pharmaceutical, cosmetic and food industries. This review describes the effects of salt stress on some plants of Lamiaceae family at different growth stages, from seed germination to reproductive stage, and the approaches used to improve salt tolerance are discussed.

### Parole chiave:

Stress salino, piante medicinali e aromatiche, crescita e resa della pianta, effetto, tolleranza

### Keywords:

Salt stress, medicinal and aromatic plants, plant growth and yield, effect, tolerance

### Introduction

Plants are usually exposed to different abiotic stresses (light, temperature, water stress, heavy metals, salinity) which limit their growth and productivity as well as cause considerable loss to worldwide agricultural production (Shao *et al.*, 2008). One of the most important abiotic stresses is salt stress. Salinity of soil or water obstacles to increase production in plant growing areas throughout the world and especially in arid and semi-arid regions, it can severely limit plant growth (Jamil *et al.*, 2006). Thus, salinity becomes a serious problem for plant cultivation, including medicinal and aromatic plants (MAPs).

According to the World Health Organization (WHO, 2002), approximately 60–80% of people worldwide use traditional herbal medicines to meet their primary health care needs.

Among MAPs, there is the family of Lamiaceae (Labiatae), that is composed of more than 240 genera and with more than 6000 species. Many plants belonging to the family contains different biochemical compounds, they are widely used for purposes such as pharmacology, cosmetics, food, and fragrance industries. Their production is severely challenged by abiotic stresses, including salinity.

Current data shown that world's salinity affected area of land is about 1125 million hectares. Currently, one-fifth of irrigated lands are salt-affected, and 1.5 million hectares of lands are becoming unsuitable for agricultural production every year because of high salinity levels. If the salinization of soils continues in such way, 50% of cultivable lands will be lost by 2050 (Sanower, 2019).

Soil salinization and sodification can be attributed either to natural conditions or anthropogenic activities. Natural causes

include factors such as climate, lithology, topography, and pedology, whereas human causes are mostly related to agricultural land-use, and specifically because of improper methods of irrigation, and poor quality of water used for irrigation (Said-Al Ahl and Omer, 2011).

The negative effects of salt stress on MAPs could be explained by: (i) a reduction in osmotic potential of the soil solution that reduces plant available water and thus creates a water stress in plants, (ii) a deterioration in the physical structure of the soil such that water permeability and soil aeration are diminished, and (iii) an increase in the concentration of the certain ions that have an inhibitory effect on plant metabolism (specific ion toxicity) and mineral nutrient imbalances and deficiencies or (iv) a combination of these factors (Sreenivasulu *et al.*, 2007).

This review describes the effects of salt stress on some plants of Lamiaceae family at different growth stages, from seed germination to reproductive stage, and the approaches used to improve salt tolerance are discussed.

### Materials and Methods

The study was carried out on a review of international and national scientific publications to obtain much information about salt stress. Different scientific database [Google Scholar platform, the Scopus scientific database, and the editorial portal (MPDI, Elsevier ecc.)] were used. From each publication, data and results regarding the effect of salt stress on plant growth and morphology and on the quantity and quality of essential oil of some aromatic plants of Lamiaceae family were extrapolated.

## Results and Discussion

### Effects of salt stress

Seed germination - Salinity affects germination of seeds in two ways: (i) there may be enough salt in the medium to decrease the osmotic potential to such a point which retard or prevent the uptake of water necessary for mobilization of nutrient required for germination, (ii) the salt constituents or ions may be toxic to the embryo (Jamil et al., 2006). The negative response of seed germination under salt stress has been reported on *Ocimum basilicum* (Miceli et al., 2003; Ramin, 2005), *Origanum majorana* (Ali et al., 2007), and *Thymus maroccanus* (Belaqziz et al., 2009).

Seedling growth - Salinity affects the seedling growth by slow or less mobilization of reserve foods, suspending the cell division, enlarging, and injuring hypocotyls. Reduced seedling growth has also been reported on basil (Miceli et al., 2003; Ramin, 2005), marjoram (Baatour et al., 2010), and thyme (Belaqziz et al., 2009).

Survival - An excess of soluble salts in the soil leads to osmotic stress, specific ion toxicity and ionic imbalances (Munns, 2003) and, therefore, plant can go to death. It has been reported that survival percentage was decreased significantly under salinity conditions on marjoram (Shalan et al., 2006) thyme (Ezz El-Din et al., 2009), spearmint (Al-Amier et al., 2007), lemon balm (Ozturk et al., 2004); sage plants (Hendawy and Khalid, 2005).

Plant growth - Salt stress usually limits plant growth and productivity of many MAPs species by affecting diverse morpho-physiological and biochemical characteristics (Rahman et al., 2023). Several authors have reported plant growth reduction because of salinity stress on *Majorana hortensis* (Shalan et al., 2006); *Thymus maroccanus* (Belaqziz et al., 2009); *Thymus vulgaris* (Najafian et al., 2009); *Salvia officinalis* (Ben Taarit et al., 2009); *Mentha pulegium* (Queslati et al., 2010); *Mentha x piperita*, *Mentha pulegium* and *Mentha suaveolens* (Aziz et al., 2008).

Morphological characteristics - The effects of salt stress were reflected by a significant reduction in number of leaves, leaf area, leaf length, leaf biomass, shoot height, shoot number, plant height. These effects were observed on *Lavandula angustifolia* (Chrysargyris et al., 2018), *Mentha piperita* var. *officinalis* (Tabatabaie and Nazari, 2007), *Satureja hortensis* (Najafi et al., 2010), *Salvia officinalis* (Ben Taarit et al., 2009); *Thymus vulgaris* (Ezz El-Din et al., 2009); *Ocimum basilicum* (Said-Al Ahl and Mahmoud, 2010), *Melissa officinalis* (Ozturk et al., 2004), *Rosmarinus officinalis* (El-Esawi et al., 2017).

Flowering - Flowering is one of the main growth stages. A significant reduction in flower number, flower fresh and dry yield, was showed under salt stress in many MAPs, like *Ocimum basilicum* (Said-Al Ahl and Mahmoud, 2010), *Lavandula angustifolia* (Chrysargyris et al., 2018), *Thymus vulgaris* (Ezz El-Din et al., 2009); *Salvia officinalis* (Ben Taarit et al., 2009).

Biomass Yield - The effects of high salinity on plants can be observed at the whole-plant level as the death of plants and/or decreases the productivity (Parida and Das, 2005). A significant reduction in the biomass fresh and dry yield was

observed in *Mentha piperita* var. *officinalis* (Tabatabaie and Nazari, 2007), *Satureja hortensis* (Najafi et al., 2010), *Melissa officinalis* (Ozturk et al., 2004), *Lavandula angustifolia* (Chrysargyris et al., 2018).

Essential oil percentage and yield - The response of essential oil percentage and yield to salt stress is different. There are reports of an increase in essential oil percentage due to lower levels of salinity was also found on savory (Baher et al., 2002); sage (Hendawy and Khalid, 2005), thyme (Ezz El-Din et al., 2009) and basil (Said-Al Ahl and Mahmoud, 2010). In contrast, other reports showed a significant reduction of essential oil percentage on lemon balm (Ozturk et al., 2004) and sweet marjoram (Shalan et al., 2006).

The essential oil yield, under salt stress, increases in *Satureja hortensis* (Baher et al., 2002) and *Salvia officinalis* (Hendawy and Khalid, 2005), whereas it decreases in *Mentha piperita* (Tabatabaie and Nazari, 2007); peppermint, pennyroyal, and apple mint (Aziz et al., 2008), *Thymus maroccanus* (Belaqziz et al., 2009), and basil (Said-Al Ahl and Mahmoud, 2010).

Primary metabolites - Total carbohydrate content was pronouncedly increased with increasing salt stress levels of *Salvia officinalis* (Hendawy and Khalid, 2005). Content of soluble sugars was higher in plants treated with NaCl which has been shown on *Satureja hortensis* (Najafi et al., 2010). Oil yield and composition was decreased significantly under salt stress in sage (Ben Taarit et al., 2010). The level of soluble proteins decreased in salinity stressed sweet marjoram (Ali et al., 2007). Proline occurs widely in higher plants and accumulates in larger amounts than other amino acids (Abraham et al., 2007). The increase in proline content could be attributed to a decrease in proline oxidase activity in saline conditions (Muthukumarasamy et al., 2000). According to literature, proline accumulates in leaves as a response to salt stress on *Origanum majorana* (Ali et al., 2007), *Salvia officinalis* (Hendawy and Khalid, 2005), *Mentha spicata* (Al-Amier and Craker, 2007), *Satureja hortensis* (Najafi et al., 2010).

Secondary metabolites - Salinity was able also to affect the essential oil constituents. It was found that in *Origanum vulgare* (Said-Al Ahl and Hussein, 2010), the main essential oil constituent (carvacrol) decreased under salt stress, while p-cymene and  $\gamma$ -terpinene contents increased under non-salt stress treatments. On *Majorana hortensis* (Shalan et al., 2006), the highest amount of carvacrol and the lowest amount of  $\gamma$ -terpinene were obtained by increasing the salinity levels. Soil salinity increased the content of linalool and decreased eugenol content in the essential oil of *Ocimum basilicum* var. *purpurascens* (Said-Al Ahl et al., 2010). The specific major essential oils compounds of *Rosmarinus officinalis* via causing a reduction in  $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -pinene and cineole contents, along with an increase in linalool, camphor, borneol and verbenone contents (El-Esawi et al., 2017). Moreover, the amount of terpenoids,  $\alpha$ -terpinyl acetate, 1,8-cineole and linalyl acetate were all increased in *Salvia mirzayanii* under salt stress (Valifard et al., 2018). The total phenolic content was improved under salt stress in *Mentha pulegium* (Oueslati et al., 2010) and *Melissa officinalis* (Hawrylak-Nowak et al., 2021), but it was significantly

decreased in *Rosmarinus officinalis* and *Lavandula angustifolia* (Chrysargyris et al., 2018).

Photosynthetic pigments - Increased salinity levels reduced the content of photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, and total carotenoids) in *Satureja hortensis* (Najafi et al., 2010), *Lavandula angustifolia* (Chrysargyris et al., 2018), *Melissa officinalis* (Safari et al., 2020), *Rosmarinus officinalis* (Chetouani, et al., 2019), and *Thymus vulgaris* (Koocheki et al., 2008).

Approaches used to improve salt tolerance

Seed priming - Seed priming has been reported to be one of the efficient methods used to stimulate seed germination and seedling growth of many plant species, including MAPs, particularly under stressed conditions (Biswas et al., 2023). Indeed, Farahani and Maroufi (2011) showed that the highest germination percentage, seedling vigor and seedling dry biomass were reported in the hydro-primed seeds of *Ocimum basilicum* as compared to non-primed ones.

Exogenous application of compatible solutes - The accumulation of some compatible osmolytes, such as proline and glycine betaine (GB), is one of the common responses adopted by tolerant plants under salt stress (Raldugina et al., 2023). For instance, exogenous proline has been largely reported to improve various physiological processes, including ROS detoxification, stabilization of proteins and maintenance of membrane stability (El Moukhtari et al., 2020). These findings were observed in various MAPs., in fact an exogenous proline addition, as foliar treatment, under mild salt stress, increased growth parameters, salt resistance index and volatile oil production of *Rosmarinus officinalis* plant (Abdelkader et al., 2019). Similarly, mannitol was also used to reduce the inimical impacts of salt stress on *Melissa officinalis*, when the result was an enhancement in mineral nutrients, total soluble sugars, proline content and essential oils content (Khalid and Cai, 2011).

Exogenous application of plant hormones - Plant hormones, or phytohormones, are known to play vital roles in salt stress tolerance and have many beneficial and stimulative effects on plant growth and production (Kaya et al., 2009). Recently, many studies have focused on their beneficial effects in different MAPs (Tadele and Zerssa, 2023). In fact, exogenous application of salicylic acid (SA) reduced salt toxicity and enhanced antioxidant activity in *Mentha pulegium* (Farhadi and Ghassemi, 2020), and *Rosmarinus officinallis* (El-Esawi et al., 2017), whereas increased proline content and phenolic compounds and improved antioxidant capacity in *Melissa officinalis* (Safari et al., 2020), under different levels of salinity. In addition, Elhindi et al. (2017) showed that 60 and 120 mM NaCl treatment can inhibit *Ocimum basilicum* plant growth and nutrient uptake and increased electrolyte leakage and Na<sup>+</sup> content, whereas 0.5 or 1 mM of SA foliar spray reversed these effects and alleviated all the caused damages in salt-stressed plants. Brassinosteroid is another plant hormone, and its exogenous application has been proved to be effective in alleviating the inimical impacts of salt stress on plants, including MAPs (Waskiewicz et al., 2016). For example, the spray mitigated the harmful effects of salt stress and enhanced the

biosynthesis of total phenolic and essential oils in *Mentha × piperita* (Çoban and Goktürk, 2016). Jasmonic acid, GA and cytokinin also play a crucial role in salt stress tolerance (Ryu and Cho, 2015).

Exogenous application of plant nutrients - Several studies have confirmed the crucial role of plant nutrients, including macronutrients, micronutrients, and beneficial elements, in salt stress tolerance in many MAPs. For example, exogenous Fe and Zn have been applied to salt-stressed *Rosmarinus officinalis* (Hassanpouraghdam et al., 2020) and *Ocimum basilicum* (Elhindi et al., 2016) plants, the results were an improvement in root growth, chlorophyll content, total phenolic, total flavonoids contents and an increase in essential oils content in salt-stressed. According to Zrig et al. (2019), foliar spray of K<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> under sat stress significantly increased leaf biomass, improved the antioxidant activity, enhanced leaf K<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> contents and importantly it increased the concentrations of some essential oils and gallic acid in *Thymus vulgaris*. In addition, Si supplementation could induce salt tolerance of *Ocimum basilicum* (Robotjazi et al., 2020), plants by improving photosynthesis, membrane integrity, toxic radicals detoxification and antioxidant enzymes activities.

Exogenous application of antioxidant molecules and signaling molecules - Various signaling molecules are widely involved in many physiological and biochemical processes in plants (Mariyam et al., 2023). On the other hand, at low concentration, they also have been reported to play the role of second messengers in intracellular signaling cascades to trigger the abiotic stress tolerance, including salinity (Kumar et al., 2023). Nitric oxide (NO) application significantly improved germination traits increased dry weight and chlorophyll content and markedly enhanced antioxidant activity and proline content in *Ocimum basilicum* under salt stress (Saeidnejad et al., 2013). In addition, Safari et al. (2020) reported that supplying of exogenous glutathione (GSH) improved the content of photosynthetic pigments, triggered the accumulation of proline and phenolic compounds, enhanced antioxidant activity and modulated stress-induced lipid peroxidation in *Melissa officinalis* under salt stress.

## Conclusions

Medicinal and aromatic plants are cultivated for different plant parts (root, stem, leaves, flowers, fruits and seeds), and their active constituents are used in the pharmaceutical, cosmetic and food industries. They have been promising plants for marginal lands, new reclaimed-soils and semi-arid regions. There are many studies in literatures on the response, and sensitivity at different plant stages of MAPs in Lamiaceae family to salt stress, while others describe treatments as strategies to improve the tolerance under salt-stressed conditions. Therefore, the application of seed priming, different exogenous compounds, including compatible solutes, plant hormones, plant nutrients, signaling and antioxidant molecules, showed their stimulative effects on plant growth, yield and high quality of many Lamiaceae species, under different levels of salinity. In



conclusion, these approaches are an important necessity for their economic potential and their importance in worldwide market.

## References

- Abdelkader, M.A.I., et al., 2019. Using proline treatments to promote growth and productivity of *Rosmarinus officinalis* L. plant grown under soil salinity conditions. Middle East. Journal of Applied Sciences, 9: 700–710
- Abraham E., et al., 2003. Light-dependent induction of proline biosynthesis by abscisic acid and salt stress is inhibited by brassinosteroid in Arabidopsis. Plant Mol Biol, 51:363-72.
- Al-Amier H., Craker L.E. 2007. In-Vitro selection for stress tolerant spearmint. Reprinted from: Issues in new crops and new uses. J. Janick and A. Whipkey (eds.). ASHS Press, Alexandria, VA.:306-10.
- Ali R.M. et al., 2007. The effects of treatment with polyamines on dry matter, oil and flavonoid contents in salinity stressed chamomile and sweet marjoram. Plant Soil Environ, 53:529-43.
- Aziz E.E. et al., 2008. Influence of salt stress on growth and essential oil production in peppermint, pennyroyal, and apple mint. J Herbs Spices Med Plants; 14(1 & 2):77-87.
- Baatour O.R. et al., 2010. Salt effects on the growth, mineral nutrition, essential oil yield and composition of marjoram (*Origanum majorana*). Acta Physiol Plant, 32:45-51.
- Baher Z.F. et al., 2002. The influence of water stress on plant height, herbal and essential oil yield and composition in *Satureja hortensis* L. Flav Fragr J, 17:275-7.
- Belaqziz R. et al., 2009. Salt stress effects on germination, growth and essential oil content of an endemic thyme species in Morocco (*Thymus maroccanus* Ball.). J Applied Sci Res, 5(7):858-63.
- Ben Taarit M.K. et al., 2009. Plant growth, essential oil yield and composition of sage (*Salvia officinalis* L.) fruits cultivated under salt stress conditions. Ind Crops Prod, 30(3):333-7.
- Ben Taarit M.K. et al., 2010. Changes in fatty acid and essential oil composition of sage (*Salvia officinalis* L.) leaves under NaCl stress. Food Chem, 9(3):951-6.
- Biswas S. et al., 2023. Efficacy of seed priming strategies for enhancing salinity tolerance in plants: An overview of the progress and achievements. Plant Stress, 100186.
- Chetouani M. et al., 2019. Morphological-physiological and biochemical responses of Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) to salt stress. Materials Today: Proceedings, 13: 752–761.
- Chrysargyris A. et al., 2018. Physiological and biochemical responses of *Lavandula angustifolia* to salinity under mineral foliar application. Front. Plant Sci., 9: 489.
- Çoban O., Goktürk B.N., 2016. Brassinosteroid effects on some physical and biochemical properties and secondary metabolite accumulation in peppermint (*Mentha piperita* L.) under salt stress. Ind. Crop Prod., 86: 251–258.
- El Moukhtari A. et al., 2020. How does proline treatment promote salt stress tolerance during crop plant development? Front. Plant Sci., 11: 1127.
- El-Esawi M.A. et al., 2017. Salicylic acid-regulated antioxidant mechanisms and gene expression enhance rosemary performance under saline conditions. Frontiers in Physiology, 8: 716.
- Elhindi K.M. et al., 2017. Effectiveness of salicylic acid in mitigating salt-induced adverse effects on different physio-biochemical attributes in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). Journal of Plant Nutrition, 40: 908–919.
- Elhindi K.M. et al., 2016. Effect of foliar-applied iron and zinc on growth rate and essential oil in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under saline conditions. Progress in Nutrition, 18: 288–298.
- Ezz El-Din A.A. et al., 2009. Response of *Thymus vulgaris* L. to salt stress and alar (B9) in newly reclaimed soil. J Appl Sci Res, 5(12):2165-70.
- Farahani H.A., Maroufi K., 2011. Effect of hydropriming on seedling vigour in basil (*Ocimum basilicum* L.) under salinity conditions. Adv. Environ. Biol., 5: 828–833.
- Farhadi N., Ghassemi G.K., 2020. Physiological changes of *Mentha pulegium* in response to exogenous salicylic acid under salinity. Scientia Horticulturae, 267: 109325.
- Hassanpouraghdam M.B. et al., 2020. Foliar application of nano-zinc and iron affects physiological attributes of *Rosmarinus officinalis* and quietens NaCl salinity depression. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 20: 335–345
- Hawrylak-Nowak B. et al., 2021. NaCl-induced elicitation alters physiology and increases accumulation of phenolic compounds in *Melissa officinalis* L. Int. J. Mol. Sci., 22: 6844.
- Hendawy S.F., Khalid KhA., 2005. Response of sage (*Salvia officinalis* L.) plants to zinc application under different salinity levels. J Appl Sci Res, 1:147-55.
- Jamil M. et al., 2006. Effect of salt (NaCl) stress on germination and early seedling growth of four vegetables species. JCEA 2006; 7(2):273-282.
- Kaya C. et al., 2009. The role of plant hormones in plants under salinity stress. Tasks for Vegetation Sciences, 44: 45–50.
- Khalid K.A., Cai W., 2011. The effects of mannitol and salinity stresses on growth and biochemical accumulations in lemon balm. Acta Ecol Sin, 31:112-120.
- Koocheki A. et al., 2008. Effect of drought, salinity, and defoliation on growth characteristics of some medicinal plants of Iran. J Herbs Spices Med Plants, 14(1-2):37-53.
- Kumar H. et al., 2023. Anti-oxidant potential of plants and probiotic spp. in alleviating oxidative stress induced by H2O2. Biomedicine & Pharmacotherapy, 165: 115022.
- Mariyam S. et al., 2023. Review on nitric oxide at the forefront of rapid systemic signaling in mitigation of salinity stress in plants: Crosstalk with calcium and hydrogen peroxide. Plant Science, 111835.
- Miceli A. et al., 2003. Effect of water salinity on seeds-germination of *Ocimum basilicum* L., *Eruca sativa* L. and *Petroselinum hortense* Hoffm. Acta Hort (ISHS), 609:365-70.
- Munns R., 2003. Comparative physiology of salt and water stress. Plant Cell Environ, 25:239-50.

- Muthukumarasamy M. et al., 2000. Influence of triadimefon on the metabolism of NaCl stressed radish. *Biol Plant*, 43:67-72.
- Najafi F. et al., 2010. The effects of salt stress on certain physiological parameters in summer savory (*Satureja hortensis* L.) plants. *J Stress Physiol Bioch*, 6(1):13-21.
- Najafian S. et al., 2009. Effect of salicylic acid and salinity in thyme (*Thymus vulgaris* L.): investigation on changes in gas exchange, water relations, and membrane stabilization and biomass accumulation. *Aust J Basic Appl Sci*, 3(3):2620-6.
- Oueslati S. et al., 2010. Physiological and antioxidant responses of *Mentha pulegium* (Pennyroyal) to salt stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 32: 289–296.
- Ozturk A. et al., 2004. Effect of salt stress and water deficit on plant growth and essential oil content of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). *Pak J Bot*, 36(4):787-92.
- Parida A.K., Das A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicol Environ Saf*, 60:324-49.
- Queslati S. et al., 2010. Physiological and antioxidant responses of *Mentha pulegium* (Pennyroyal) to salt stress. *Acta Physiol Plant*, 32(2):289-96.
- Raldugina G.N. et al., 2023. Heterologous coda gene expression leads to mitigation of salt stress effects and modulates developmental processes. *International Journal of Molecular Sciences*, 24: 13998.
- Ramin A.A., 2005. Effects of salinity and temperature on germination and seedling establishment of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *J Herbs Spices Med Plants*, 11(4):81-90.
- Robatjazi R. et al., 2020. Benefits of silicon nutrition on growth, physiological and phytochemical attributes of basil upon salinity stress. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 7: 37–50.
- Ryu H., Cho Y.G., 2015. Plant hormones in salt stress tolerance. *Journal of Plant Biology*, 58: 147–155.
- Saeidnejad A.H. et al., 2013. Effects of exogenous nitric oxide on germination and physiological properties of basil under salinity stress. *Journal of Medicinal Plants and By-Products*, 1: 103–113.
- Safari F. et al., 2020. Physiochemical and molecular responses of salt-stressed lemon balm (*Melissa officinalis* L.) to exogenous protectants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 42: 1–10.
- Said-Al Ahl H.A.H., Omer E.A., 2011. Medicinal and aromatic plants production under salt stress. A review. *Herba Polonica*, 57(1): 72-87.
- Said-Al Ahl H.A.H., Hussein M.S., 2010. Effect of water stress and potassium humate on the productivity of oregano plant using saline and fresh water irrigation. *Ozean J Appl Sci*, 3(1):125-41.
- Said-Al Ahl H.A.H., Mahmoud A.A., 2010. Effect of zinc and/or iron foliar application on growth and essential oil of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under salt stress. *Ozean J Appl Sci*, 3(1):97-111.
- Said-Al Ahl H.A.H. et al. 2010. Response of different basil varieties to soil salinity. *Int Agrophysics*, 24:183-8.
- Sanower H., 2019. Present scenario of global salt affected soils, its management and importance of salinity research. *Int. J. Biol. Sci.*, 1: 1–3.
- Shalan M.N. et al., 2006. Effect of water salinity and some nutritional compounds of the growth and production of sweet marjoram plants (*Majorana hortensis* L.). *Egypt J Agric Res*, 84(3):959.
- Shao H.B. et al., 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C R Biologies*, 331(3):215-25.
- Sreenivasulu N. et al., 2007. Deciphering the regulatory mechanisms of abiotic stress tolerance in plants by genomic approaches. *Gene*, 388(1-2):1-13.
- Tabatabaie S.J., Nazari J., 2007. Influence of nutrient concentration and NaCl salinity on growth, photosynthesis and essential oil content of peppermint and lemon verbena. *Turk J Agric*, 31:245-53.
- Tadele K.T., Zeressa G.W., 2023. Biostimulants and phytohormones improve productivity and quality of medicinal plants under abiotic stress. In *Medicinal Plants: Their Response to Abiotic Stress*. Springer Nature Singapore, Singapore, pp. 335–362.
- Valifard M. et al., 2018. Effect of salt stress on terpenoid biosynthesis in *Salvia mirzayanii*: from gene to metabolite. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 94: 389–399.
- Waskiewicz A. et al., 2016. Participation of phytohormones in adaptation to salt stress. *Plant Hormones under Challenging Environmental Factors* 75-115.
- WHO, 2002. *Traditional Medicine Strategy (2002–2005)*. WHO/EDM/TRM/2002.1. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Zrig A. et al., 2019. The impact of foliar fertilizers on growth and biochemical responses of *Thymus vulgaris* to salinity stress. *Arid Land Research and Management* 33, 297–320.

# EFFECT OF LIGHT (QUALITY, QUANTITY AND PHOTOPERIOD) IN INDUSTRIAL HEMP CULTIVATION

## EFFETTO DELLA LUCE (QUALITÀ, QUANTITÀ E FOTOPERIODO) NELLA COLTIVAZIONE DELLA CANAPA INDUSTRIALE

Laura D'Andrea<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> CREA– Centro di Ricerca Agricoltura e Ambiente, via Celso Ulpiani 5, 70125, Bari

\*laura.dandrea@crea.gov.it

### Abstract

Industrial hemp (*Cannabis sativa* L. subsp. *sativa*) is one of the oldest cultivated plants used for many purposes throughout centuries. The different dimensions of light are photoperiod (day length), light quantity (intensity) and light quality (the spectral distribution). Light is one of the crucial environmental factors influencing growth, development, and biosynthesis of phytochemicals in plants. The aim of this review was to know the effect of light (quality, quantity, and photoperiod) on plant morphology and productivity of industrial hemp. These studies, carried out indoor and in field, showed that the light plays an important role not only in plant size and stature but also in the accumulation of cannabinoids.

### Parole chiave:

canapa industriale, luce, fotoperiodo, quantità, qualità

### Keywords:

industrial hemp, light, photoperiod, quantity, quality

### Introduction

#### *Industrial hemp*

Industrial hemp (*Cannabis sativa* L. subsp. *sativa*) is one of the oldest cultivated plants used for many purposes throughout centuries. It originated from Eurasia and was spread worldwide gaining its popularity as a source of fibers (Fike, 2016) and seeds (Schultz et al., 2020) or dual-purpose (Tang et al., 2016). Due to the introduction of other fiber sources, as well as concerns regarding its psychoactive properties, hemp cultivation progressively declined in the 20th century (Moscariello et al., 2021).

The constantly increasing demand for renewable raw materials, especially in the bio-feedstock production and biorefineries, and changes in the legalization of growth, resulted in the comeback of industrial hemp production in recent decades (Moscariello et al., 2021; Fike, 2016). Industrial hemp varieties contain low levels of psychoactive substance delta-9-tetra-hydrocannabinol (THC) (Moscariello et al., 2021).

According to the current European Union legislative, hemp cultivars allowed for production may not contain more than 0.3% THC on a dry basis (Moscariello et al., 2021; Giupponi et al., 2020). However, higher content of non-psychoactive cannabinoids such as cannabidiol (CBD), cannabidiol (CBG), and cannabichromene (CBC), is a reason for the growing interest in hemp production for the use in cosmetics and pharmaceuticals (Rupasinghe et al., 2020; Jin et al., 2019).

#### Effect of light (quality, quantity, and photoperiod)

The different dimensions of light are photoperiod (day length), light quantity (intensity) and light quality (the spectral distribution).

Light is one of the crucial environmental factors influencing growth, development, and biosynthesis of phytochemicals in plants (Proietti et al., 2021). The Earth's rotation on its axis results in regular light–dark cycles. Plants have developed sensitive mechanisms to measure and to adapt to the length of the photoperiod (Osnato et al., 2021; Roeber et al., 2021). The duration of the photoperiod, in combination with light quality, and intensity, regulates plant growth and development through various internal and external signals (Bhatta, et al., 2021).

The plant receives signals from the light environment through photoreceptors. These are divided into families according to the spectrum of the solar light they sense; red and far-red lights are absorbed by phytochromes, blue light and UV-A by cytochromes, phototropins and F-box containing flavin-binding proteins, while UV-B light is sensed by the UVR8 photoreceptor (Roeber et al., 2021; Serrano-Bueno et al., 2017). Additionally, by modifying the composition of wavelengths, activity of phytohormones may also change which can stimulate flowering, inhibit elongation of the stem, or reduce plant height (Bhatta, et al., 2021).

Considering the effect of photoperiod on flowering (Osnato et al., 2021; Roeber et al., 2021), plants can be divided into:

- long-day plants, which flower under a longer photoperiod;
- short-day plants, which flower under a shorter photoperiod; and

- day-neutral plants, which are not responsive to changes in photoperiod.

Besides flowering, photoperiod also influences daily photosynthesis, growth, and starch metabolism (Roeber et al., 2021; Adams and Langton, 2005).

Many studies have examined the correlation between photoperiod and flowering patterns in different families: e.g., Leguminosae (Garner and Allard, 1920; Weller and Ortega, 2015) and Brassicaceae (Amasino, 1996).

The light quality (the spectral distribution) plays a significant role when cultivating a crop in a controlled environment.

In the horticulture and crop science industry, it has been long known that one can manipulate plant morphology and metabolism with the light spectrum. For example, blue light has been shown to decrease internode length and enhance compactness of various species (Dong et al., 2014; Wu et al., 2014; Khan and Marwat, 2011), whereas far-red and green wavelengths have been shown to induce shade avoidance syndrome symptoms, including stem and leaf elongation and premature flowering (Franklin and Whitelam, 2005).

#### The aim of this review

The aim of this review was to know the effect of light (quality, quantity, and photoperiod) on plant growth, development, morphology, and productivity of industrial hemp (*Cannabis sativa* L. subsp. *sativa*).

## Materials and Methods

The study was conducted on a review of international and national scientific publications to obtain a lot of information on the effects of light on hemp production.

Different scientific database [Google Scholar platform, the Scopus scientific database, and the editorial portal (MPDI, Elsevier ecc.)] were used. From each publication, data, and results regarding the effect of light photoperiod (day length), light quantity (intensity) and light quality (the spectral distribution) on plant growth, development, morphology, and productivity of industrial hemp (*Cannabis sativa* L. subsp. *sativa*) were extrapolated.

## Results and Discussion

### *Effects of photoperiod (day length)*

Flowering in hemp is induced by photoperiod under a critical daylength (Lisson et al., 2000). *Cannabis sativa* is a quantitative short-day plant where decreasing daylength regulates flowering initiation (van der Werf et al., 1994).

Amaducci et al. (2008) redefined hemp as a “qualitative” short-day plant due to its continuous dynamic flowering response to photoperiod.

Lisson et al. (2000) investigated the critical daylength period for two European hemp varieties in a controlled environment, reporting a daylength-dependent photoperiod-induced phase.

Some studies reported that shorter photoperiods induce early flowering (Amaducci et al., 2008; Hall et al., 2012).

Other authors have also found that longer photoperiods increased stem yield (Hall et al., 2014; van der Werf et al., 1994) and production of cannabinoids (Valle et al., 1978).

Understanding flowering pathways is critical to delineate growing seasons and determine suitable climatic regions for hemp varieties (Amaducci et al., 2015; Salentijn et al., 2019). The selection of inappropriate varieties can result in early flowering or a long flower development phase, producing low yields of the desired product and a heterogeneous crop that is mechanically impracticable to harvest (Amaducci et al., 2008; Desanlis et al., 2013).

### *Effects of light quantity (intensity)*

Light intensity is a prominent characteristic of industrial hemp, a photophilic plant, making it highly responsive to variations in light intensity and quality. The growth and development of the hemp plant are directly influenced by the intensity of light it receives.

Wei et al. (2021) discovered that when hemp plants respond to different types of light, activating their cryptochromes, which led to increased plant growth and higher biomass.

Cheng et al. (2022) found that light spectra significantly increased hemp growth in terms of shoot fresh biomass (15%), shoot dry biomass (27%), number of leaves per plant (13%), stem diameter (10%), root length (6%) and chlorophyll content (7%). Moreover, they conducted a study that revealed the significant positive impact of light spectra on hemp growth in terms of increased plant biomass, stem diameter, and SPAD value.

In recent research, Cheng et al. (2023) found that different light sources influenced morphology and cannabinoid production, tetrahydrocannabinol contents, improved the quality of cannabis, and enhanced the DNA repair capacity. They also discovered that utilizing different light sources had a profound impact on the morphology of cannabis plants and influenced the production of cannabinoids.

Overall, different researchers have documented the effects of light intensity on hemp growth (Amrein et al., 2020; Cheng et al., 2022; Danziger and Bernstein, 2021; Namdar et al., 2019).

### *Effects of light quality (the spectral distribution)*

The most common light source used nowadays for indoor cannabis production is light emitting diodes (LEDs) which can have a widely varying spectrum (Rodriguez-Morrison et al., 2021; Cheng et al., 2022), while the combination of red and blue light resulted in smaller leaf area and more compact morphology in comparison to a white light source (Lalge et al., 2017; Reichel et al., 2021).

Lalge et al., (2017) investigated the effect of red (600–700 nm, peak 660), blue (400–500 nm, peak 450) and white light on the morphological and photosynthetic qualities of *Cannabis sativa* L. The two treatments were the white light (WL), and a combination of blue red lights (BR). Plants grown under WL were 23% taller than those grown under the BR light emitting diodes. The leaf area was also greater under WL than BR by 20%. The number of lateral branches and length of dominant lateral branch were not significantly different. The WL treatment, that emit a full spectrum of light, affects plant growth and development better than BR light. The quantum efficiency of photosystem II, ranged from 0.810 to 0.845, indicated non-stressed plants.

Reichel et al., (2021) observed that the light spectra considered had an influence on the morphology of the plant, especially the height. Here, the shade avoidance induced by the lower R:FR ratio under the ceramic metal halide lamp (CHD) was of particular interest. The sugar leaves seemed to be of elementary importance in the last growth phase for yield composition. Furthermore, the last four weeks of flowering were crucial to influence the yield composition of *Cannabis sativa* L. through light spectra. The dry flower yield was significantly higher under both LED treatments compared to the conventional CHD light source. The results indicated that the plant morphology can be artificially manipulated by the choice of light treatment to create shorter plants with more lateral branches which seem to be beneficial for yield development.

Islam et al., (2021) studied that cannabinoids accumulation in the hemp plant greatly depends on light quality under a controlled growing system. *Sativa*-type hemp plant (enriched with THC) increased CBD accumulation under some controlled light combinations. Green light has a significant role in CBD and CBDA synthesis, where FR and UV-A (along with green) play a positive and negative role in this process, respectively. Earlier, cannabinoids were identified as stress markers, but it was unclear which compound/compounds are directly involved with the light stress environment as stress markers in the hemp plant. In our study, THCA showed a significant role as a stress marker followed by CBDA. On the other hand, THC and CBD showed a negligible response as stress response compounds to such conditions.

In a study conducted by Sweet (2016), it was noted that 600–1,000 W high-pressure sodium (HPS) lights were the most used lighting source in Washington State during the flowering phase. In contrast, a wide variety of lighting types were reported to be used in the vegetative rooms, such as fluorescent light bulbs (CFL or T5), metal halide bulbs (MH), HPS lamps, induction bulbs, light-emitting diodes (LED), or a combination of different lighting types. During the propagation phase, the most used lighting source is fluorescent light (Chandra et al., 2017). When using older technology, such as HPS or fluorescent light, the spectrum is seldom adjusted according to the plants' needs: the technology has been originally developed for totally different applications, such as street or office lighting.

#### Effects of light quality and quantity

The light quality and quantity play a significant role when cultivating cannabis in a controlled environment. Hemp cultivars have exhibited diverse photoperiod requirements for vegetative growth and reproductive development (Hall et al., 2014; Potter, 2014). Its capacity to convert photosynthetically active radiation into biomass is exceptionally efficient (Rodriguez-Morrison et al., 2021). Longer photoperiod favors photosynthesis, thereby increasing plant growth and dry weight, but it delays flowering. Under a continuous light regime of 18 or 24 h, hemp plants remain in the vegetative state. Reproductive growth is initiated after a two-week exposure to 12 h of continuous light daily (Jin et al., 2019; Potter, 2014).

Zhang et al., (2021) investigated the effects of varying light cycles in regulating extension growth and flowering response of 15 essential oil and 12 fiber/grain hemp cultivars both indoors and outdoors. Plants were subjected to 11 photoperiods in the controlled rooms ranging from 12 to 18 h, and natural day length in the field. They conclude that most of the essential oil cultivars and some southern fiber/grain cultivars evaluated express suitable photoperiods for tropical and sub-tropical region cultivation.

The effect of light cycles and other environmental conditions on plant development, from germination to senescence, has been investigated in industrial hemp by other researchers (Hall et al., 2012; Mediavilla et al., 1998; Mishchenko et al., 2017).

## Conclusions

Based on the results obtained from this investigation, it can be concluded that different types of light (quality, quantity, and photoperiod) have diverse beneficial effects on growth, yield, and cannabinoid profile of industrial hemp (*Cannabis sativa* L. subsp. *sativa*). These studies, carried out indoor and in field, showed that the light plays an important role not only in plant size and stature but also in the accumulation of cannabinoids.

## Acknowledgments

This study was funded by the Italian Ministry of Agriculture, Food Sovereignty and Forests (Masaf) under the “CaRiFIT 2022” research project “Canapa e Ricerca Fileria Italiana 2022” (Decreto Direttoriale prot. n. 0667575 del 30/12/2022 - CUP J53C23000460001).

## References

- Adams S., Langton F., 2005. Photoperiod and plant growth: A review. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 80: 2–10.
- Amaducci S., Colauzzi M., Zatta A., Venturi G., 2008. Flowering dynamics in monoecious and dioecious hemp genotypes. *J. Ind. Hemp*, 13: 5–19.
- Amaducci S., Scordia D., Liu F.H., Zhang Q., Guo H., Testa G., Cosentino S.L., 2015. Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Ind. Crops Prod.*, 68: 2–16.
- Amasino R.M., 1996. Control of flowering time in plants. *Curr. Opin. Genet. Dev.*, 6: 480–487.
- Amrein P., Rinner S., Pittorino T., Espel J., Schmidmayr D., 2020. Influence of light spectra on the production of cannabinoids. *Med Cannabis Cannabinoids*, 3.
- Bhatta M., Sandro P., Smith M.R., Delaney O., Voss-Fels K.P., Gutierrez L., Hickey L.T., 2021. Need for speed: Manipulating plant growth to accelerate breeding cycles. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 60: 101986.
- Chandra S., Lata H., ElSohly M.A., Walker L.A., Potter D., 2017. Cannabis cultivation: methodological issues for obtaining medical-grade product. *Epilepsy Behav.* 70: 302–312.
- Cheng X., Wang R., Liu X., Zhou L., Dong M., Rehman M., Fahad S., Liu L., Deng G., 2022. Effects of Light Spectra

- on Morphology, Gaseous Exchange, and Antioxidant Capacity of Industrial Hemp. *Front Plant Sci.*, 13.
- Cheng X., Zhao K., He X., Zheng H., Wang R., Liu C., Zhou L., Fahad S., Deng G., 2023. Differential protein response to different light quality conditions of industrial hemp cultivation based on DIA technology. *Ind. Crops Prod.*, 197.
- Danziger N., Bernstein N., 2021. Light matters: effect of light spectra on cannabinoid profile and plant development of medical cannabis (*Cannabis sativa L.*). *Ind. Crops Prod.*, 164.
- Desanlis F., Cerruti N., Warner P., 2013. Hemp agronomics and cultivation. In: Arnaud, P.B.S.A.L. (Ed.), *Hemp: Industrial Production and Uses*. CAB International 2013, Wallingford, UK, pp. 98–124.
- Dong C., Fu Y., Liu G., Liu H., 2014. Growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield and quality of wheat (*Triticum aestivum L.*) exposed to LED light sources with different spectra combinations. *J Agron Crop Sci*, 200: 219–230.
- Fike J., 2016. Industrial hemp: Renewed opportunities for an ancient crop. *Crit. Rev. Plant Sci.*, 35: 406–424.
- Franklin K.A., Whitelam G.C., 2005. Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. *Ann Bot*, 96: 169–175.
- Garner W.W., Allard H.A., 1920. Effect of the relative length of day and night and other factors of the environment on growth and reproduction in plants. *Mon. Weather Rev.*, 48 (415): 415–415.
- Giupponi L., Leoni V., Carrer M., Cecilian G., Sala S., Panseri S., Pavlovic R., Giorgi A., 2020. Overview on Italian hemp production chain, related productive and commercial activities, and legislative framework. *Ital. J. Agron.*, 15: 194–205.
- Hall J., Bhattarai S.P., Midmore D.J., 2012. Review of flowering control in industrial hemp. *J. Nat. Fibers*, 9: 23–36.
- Hall J., Bhattarai S.P., Midmore D.J., 2014. The effects of photoperiod on phenological development and yields of industrial hemp. *J. Nat. Fibers*, 11: 87–106.
- Islam M.J., Ryu B.R., Azad M.O.K., Rahman M.H., Cheong E.J., Lim J.-D., Lim Y.-S., 2021. Cannabinoids accumulation in hemp (*Cannabis sativa L.*) plants under LED light spectra and their discrete role as a stress marker. *Biology*, 10: 710.
- Jin D., Jin S., Chen J., 2019. Cannabis indoor growing conditions, management practices, and post-harvest treatment: A review. *Am. J. Plant Sci.*, 10: 925.
- Khan M.A., Marwat K.B., 2011. 2011. The effects of light quality and temperature on the growth and development of geraniums. *Pak J Bot*; 43: 679–688.
- Lalge A., Cerny P., Trojan V., Vyhnanek T., 2017. The effects of red, blue and white light on the growth and development of *Cannabis sativa L.* *Mendel Net.*, 8: 646–651.
- Lisson S.N., Mendham N.J., Carberry P.S., 2000. Development of a hemp (*Cannabis sativa L.*) simulation model 2. The flowering response of two hemp cultivars to photoperiod. *Aust. J. Exp. Agric.*, 40: 413–417.
- Mediavilla V., Jonquera M., Schmid-Slembrouck I., Soldati A., 1998. Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis sativa L.*). *J. Int. Hemp Assoc.*, 5 (2): 68–74.
- Mishchenko S., Mokher J., Laiko I., Burbulis N., Kyrychenko H., Dudukova S., 2017. Phenological growth stages of hemp (*Cannabis sativa L.*): codification and description according to the BBCH scale. *Agricultural Sciences, Zemes Ukio Mokslai*, 24: 31–36.
- Moscariello C., Matassa S., Esposito G., Papirio, S., 2021. From residue to resource: The multifaceted environmental and bioeconomy potential of industrial hemp (*Cannabis sativa L.*). *Resour. Conserv. Recycl.*, 175:105864.
- Namdar D., Charuvi D., Ajampura V., Mazuz M., Ion A., Kamara I., Koltai H., 2019. LED lighting affects the composition and biological activity of *Cannabis sativa* secondary metabolites. *Ind. Crops Prod.*, 132.
- Osnato M., Cota I., Nebhnani P., Cereijo U., Pelaz S., 2021. Photoperiod control of plant growth: Flowering time genes beyond flowering. *Front. Plant Sci.*, 12: 805635.
- Potter D.J., 2014. A review of the cultivation and processing of cannabis (*Cannabis sativa L.*) for production of prescription medicines in the UK. *Drug Test Anal.*, 6: 31–38.
- Proietti S., Moscatello S., Riccio F., Downey P., Battistelli A., 2021. Continuous lighting promotes plant growth, light conversion efficiency, and nutritional quality of *Eruca vesicaria (L.) Cav.* in controlled environment with minor effects due to light quality. *Front. Plant Sci.*, 12: 730119.
- Reichel P., Munz S., Hartung J., Präger A., Kotiranta S., Burgel L., Schober T., Graeff-Hönninger S., 2021. Impact of three hemp different light spectra on the yield, morphology, and growth trajectory of three different *Cannabis sativa L.* strains. *Plants*, 10: 1866.
- Rodriguez-Morrison V., Llewellyn D., Zheng Y., 2021. Cannabis yield, potency, and leaf photosynthesis respond differently to increasing light levels in an indoor environment. *Front. Plant Sci.*, 12: 456.
- Roeber V.M., Schmülling T., Cortleven A., 2021. The photoperiod: Handling and causing stress in plants. *Front. Plant Sci.*, 12: 781988.
- Rupasinghe H.V., Davis A., Kumar S.K., Murray B., Zheljzkov V.D., 2020. Industrial hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) as an emerging source for value-added functional food ingredients and nutraceuticals. *Molecules*, 25: 4078.
- Salentijn E.M.J., Petit J., Trindade L.M., 2019. The complex interactions between flowering behavior and fiber quality in hemp. *Front. Plant Sci.*, 10: 10.
- Schultz C.J., Lim W.L., Khor S.F., Neumann K.A., Schulz J.M., Ansari O., Skewes M. A., Burton R.A., 2020. Consumer and health-related traits of seed from selected commercial and breeding lines of industrial hemp, *Cannabis sativa L.* *J. Agric. Food Res.*, 2: 1–13.
- Serrano-Bueno G., Romero-Campero F.J., Lucas-Reina E., Romero J.M., Valverde F., 2017. Evolution of photoperiod sensing in plants and algae. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 37: 10–17.
- Sweet S.L., 2016. The energy intensity of lighting used for the production of recreational cannabis in Washington



- State and implications for energy efficiency. PhD thesis, Evergreen State College.
- Tang K., Struik P.C., Yin X., Thouminot C., Bjelkova M., Stramkale V., Amaducci S., 2016. Comparing hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars for dual-purpose production under contrasting environments. *Ind. Crops Prod.*, 87: 33–44.
- Valle J.R., Vieira J.E.V., Aucelio J.G., Valio I.F.M., 1978. Influence of photoperiodism on cannabinoid content of *Cannabis sativa* L. *Bull. Narc.*, 30: 67–68.
- van der Werf H.M.G., Haasken H.J., Wijlhuizen M., 1994. The effect of daylength on yield and quality of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Eur. J. Agron.*, 3: 117–123.
- Wei X., Zhao X., Long S., Xiao Q., Guo Y., Qiu C., Qiu H., Wang Y., 2021. Wavelengths of LED light affect the growth and cannabidiol content in *Cannabis sativa* L. *Ind. Crops Prod.*, 165: 113433
- Weller J.L., Ortega R., 2015. Genetic control of flowering time in legumes. *Front. Plant Sci.*, 6: 207.
- Wu Q., Su N., Shen W., Cui J., 2014. Analyzing photosynthetic activity and growth of *Solanum lycopersicum* seedlings exposed to different light qualities. *Acta Physiol Plant*, 36: 1411–1420.
- Zhang M., Anderson S.L., Brym Z.T., Pearson B.J., 2021. Photoperiodic flowering response of essential oil, grain, and fiber hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars. *Front. Plant Sci.*, 12: 694153.

# WEATHER TREND AND IMPACT ON SUGAR ACCUMULATION IN MONTEPULCIANO GRAPES IN A VITICULTURAL AREA OF ABRUZZO

## TREND METEO E RIPERCUSSIONI SU CONFERIMENTI E ACCUMULO ZUCCHERINO NELLE UVE DI MONTEPULCIANO IN UN COMPRESORIO VITICOLO DELL'ABRUZZO

Lucia Giordano<sup>1</sup>, Bruno Di Lena<sup>2</sup>, Alberto Palliotti<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali, Università degli Studi di Perugia, Borgo XX giugno 74, 06128 Perugia

<sup>2</sup>Centro Agrometeorologico Regionale, Contrada Colle 11, Scerni, (Chieti)

\*[alberto.palliotti@unipg.it](mailto:alberto.palliotti@unipg.it)

### Abstract

The increase in temperatures and drought years is negatively impacting viticultural production, favoring cooler and higher altitude areas. This necessitates a reevaluation of both technical updates for new plantings and environmental mitigation strategies for existing vineyards. Weather variations require careful, constant, and multi-year analysis to understand interannual variability in viticultural territories, crucial for adopting appropriate corrective measures. Recent studies have highlighted the importance of spring and summer temperatures on sugar accumulation and grape ripening processes, while regional differences, such as those recently observed in Burgundy, underscore specific roles of temperatures for red and white wines. This study analyzes the relationships between meteorological conditions and harvest data over the period 1998-2022 in a viticultural area in Abruzzo, aiming to better understand the impact of climate variations on the production of quality wine.

### Parole chiave

Aumento temperature, annate siccitose, grado zuccherino, variazioni meteorologiche, vendemmia

### Keywords

Temperature increase, drought years, sugar content, meteorological variations, harvest

### Introduzione

L'aumento delle temperature (T) dell'aria e le frequenti annate siccitose stanno favorendo la produzione di vini di pregio nelle aree più fresche, incluse quelle situate a quote altimetriche più elevate, a scapito di quelle notoriamente più calde o a quote più basse. Nuovi areali, ritenuti finora poco idonei, stanno infatti acquisendo un'importanza crescente per una viticoltura di qualità, mentre cali significativi nelle rese unitarie e squilibri qualitativi sono purtroppo ricorrenti in molte delle attuali aree viticole. Si stanno pertanto delineando, per i nuovi impianti, aggiornamenti tecnici riguardo i vitigni, i portinnesti, i sistemi di allevamento, l'orientamento ed esposizione dei versanti, mentre per i vigneti in produzione è cruciale valersi di tecniche di mitigazione ambientale (es. caolino, biostimolanti, reti ombreggianti, irrigazioni localizzate, interventi di dry farming, ecc.). Queste ultime sono necessarie per mitigare gli effetti negativi causati dalle alterazioni meteo ormai non più imprevedibili, tra i quali: l'accelerazione della maturazione tecnologica delle uve con aumenti degli zuccheri nei mosti e quindi dell'alcolicità dei vini, il disaccoppiamento tra la maturazione tecnologica e quella fenolica, il calo del tenore acidico e l'aumento del pH del mosto con ripercussioni negative sulla stabilità, nonché i fenomeni di disidratazione degli acini e scottature solari. L'analisi dei trend evolutivi dei parametri meteo, specie se di lungo periodo, assumono una importanza

strategica ai fini dello studio della variabilità inter-annuale, che spesso è frutto dell'alternarsi di differenti tipi di circolazione dell'aria e dell'attività solare, nonché per evidenziare eventuali punti di discontinuità nei parametri meteo. Tali conoscenze sono alla base per eseguire interventi tecnici correttivi tenendo in considerazione le variazioni, spesso in aumento, delle T sia ottimali che soglia nelle diverse fasi fenologiche. Così, ad esempio, a proposito delle T dell'aria negli ultimi anni è emerso che: 1) le sommatorie termiche cumulate del periodo primaverile sono correlate all'epoca di vendemmia (Di Lena *et al.*, 2018); 2) le T estive di luglio-agosto hanno un ruolo primario nell'accumulo zuccherino (Lanari *et al.*, 2014); 3) le T elevate determinano il posizionamento del periodo di maturazione in un momento meno favorevole alla produzione di vini di qualità (Van Leeuwen *et al.*, 2019); 4) in Borgogna è stato assegnato un ruolo importante alle escursioni termiche per i vini rossi, mentre per quelli bianchi sono rilevanti le medie delle T massime (Davis *et al.*, 2019). Sulla base di quanto sopra, il presente lavoro analizza le relazioni tra l'andamento meteo e i dati di vendemmia durante l'arco temporale 1998-2022 in un comprensorio viticolo omogeneo abruzzese.

## Materiali e Metodi

Lo studio è stato effettuato utilizzando gli archivi della cantina Villesse di Villalfonsina (CH) relativi al periodo 1998-2022; nello specifico, un database che per ogni singolo conferimento delle uve di Montepulciano riporta grado zuccherino (°Babo) e il peso netto. Nel periodo in esame sono stati analizzati ben 147.398 conferimenti e, per sintesi, si riportano i dati relativi alle date di conferimento ed il grado zuccherino medio ponderato al 50% del conferimento delle uve. Per l'analisi climatica sono stati utilizzati i dati giornalieri di pioggia (P, mm) e T minima (Tmin, °C) e massima (Tmax, °C) rilevate nella stazione meteo di Scerni (CH), prossima all'areale Villalfonsina, afferente alla rete di monitoraggio climatico del Centro Agrometeorologico Regionale dell'Abruzzo. La T media giornaliera (Tmed) è stata calcolata come  $(Tmin+Tmax)/2$ . Sono state altresì calcolate per i periodi primaverili (aprile-giugno), estivi (luglio-settembre), le medie delle escursioni termiche giornaliere  $\Delta T$  e le medie delle T massime e minime. Le sommatorie termiche attive (in gradi giorno, GG) sono state calcolate in base all'indice di Amerine-Winkler ( $GG = \sum (Tmed - 10 \text{ }^\circ\text{C})$ ) nel periodo primaverile (aprile-giugno), estivo (luglio-settembre), nonché per l'intero ciclo vegeto-produttivo (aprile-settembre). L'incidenza degli eventi termici estremi è stata analizzata da aprile a settembre, mediante il calcolo del numero di giorni con T massime maggiori di 30 °C (Tmax-30) e 35 °C (Tmax-35).

## Risultati e Discussione

La caratterizzazione agrometeorologica del periodo 1998-2022 rivela un aumento delle temperature e del numero di giorni con temperature massime superiori a 30°C e 35°C durante l'intero ciclo vegeto-produttivo (aprile-settembre), senza variazioni significative nelle precipitazioni (Tabelle 1 e 2, Figura 1).

*Tab.1 - Variabili meteorologiche medie nel periodo 1998-2022 (le piogge sono le somme).*

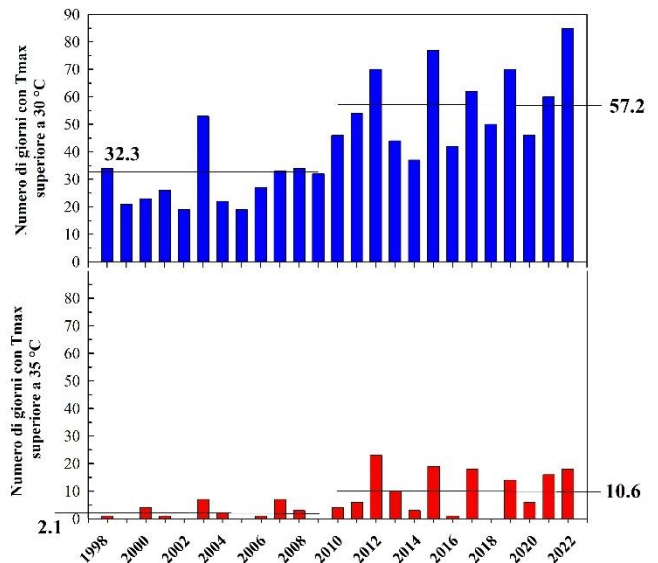
*Tab.1 - Average meteorological variables during the period 1998-2022 (rainfall data are cumulative).*

Anno	Periodo primaverile (aprile-giugno)				Periodo estivo (luglio-settembre)			Stagione vegetativa (aprile-settembre)	Precipitazioni (aprile - settembre)	
	Tmax	Tmin	P	GG	Tmax	Tmin	P	GG	mm	
1998	22,4	14,7	125,4	775,0	27,0	19,9	260,0	1244,5	2020	385,4
1999	22,3	15,0	147,4	787,0	26,8	19,8	180,2	1225,8	2013	327,6
2000	22,9	15,8	54,9	859,1	27,3	19,6	206,2	1242,0	2101	261,1
2001	21,8	14,1	124,6	727,5	27,4	19,4	53,2	1234,9	1962	177,8
2002	21,7	14,3	276,6	734,1	25,6	18,0	284,2	1087,8	1821	560,8
2003	23,6	15,4	77,6	892,4	28,0	20,5	188,4	1318,8	2211	266,0
2004	20,3	13,2	214,0	615,3	27,0	19,3	130,6	1212,5	1828	344,6
2005	22,0	14,2	133,4	741,6	26,0	18,6	182,2	1131,4	1873	315,6
2006	22,0	14,2	162,2	739,8	26,7	18,9	214,4	1179,0	1919	376,6
2007	23,2	15,7	61,8	859,7	27,7	19,4	84,6	1252,4	2112	146,4
2008	22,1	14,2	155,2	746,5	27,0	19,3	153,4	1210,0	1957	308,6
2009	22,2	14,6	347,0	765,8	27,5	20,3	73,4	1283,1	2049	420,4
2010	22,9	13,7	105,8	761,6	28,8	19,0	141,6	1286,3	2048	247,4
2011	22,9	12,4	162,8	697,4	30,2	18,3	182,0	1309,6	2007	344,8
2012	24,4	14,2	147,2	846,4	31,1	21,2	220,0	1486,9	2333	367,2
2013	23,6	13,9	162,4	795,4	29,9	19,8	92,8	1370,7	2166	255,2
2014	23,0	13,8	176,0	763,9	28,4	18,8	200,2	1253,0	2017	376,2
2015	24,9	14,5	116,8	891,7	31,3	21,0	86,0	1490,4	2382	202,8
2016	23,2	13,3	159,2	750,0	28,3	18,6	238,8	1243,5	1994	398,0
2017	24,6	13,8	134,4	842,6	29,8	18,9	202,4	1326,9	2169	336,8
2018	24,4	14,2	147,6	843,2	29,4	19,1	331,6	1312,9	2156	479,2
2019	23,0	13,0	274,2	726,2	30,5	19,1	99,8	1367,2	2093	374,0
2020	23,3	12,4	195,4	726,0	29,8	18,7	89,4	1313,8	2040	284,8
2021	23,4	12,1	80,2	724,2	30,3	19,1	121,2	1351,4	2076	201,4
2022	25,0	13,9	97,2	872,5	30,7	19,5	141,0	1393,9	2266	238,2

*Tab.2 - Rette di regressione relative alle variabili meteorologiche e ai gradi giorno nel periodo 1998 -2022. Il livello di probabilità dell'errore è indicato come segue: ns  $P > 0,05$ ; \*  $P \leq 0,05$ ; \*\*  $P \leq 0,01$ . \*\*\*  $P \leq 0,001$ .*

*Tab.2 - Regression lines for meteorological variables and degree days for the period 1998-2022. The level of significance of the error is indicated as follows: ns  $P > 0,05$ ; \*  $P \leq 0,05$ ; \*\*  $P \leq 0,01$ . \*\*\*  $P \leq 0,001$ .*

Periodo	Variabile	Intercetta	$\beta$	test F	R <sup>2</sup>	Sign.
Primaverile (aprile - giugno)	$\Delta T$	-348,8	0,18	105,7	0,82	***
	Tmax	-173,7	0,10	16,6	0,42	***
	Tmin	175,1	-0,08	14,6	0,39	***
	P	-1059,2	0,60	0,10	0,00	ns
	GG	-1158,1	0,96	0,25	0,01	ns
Estivo (luglio - settembre)	$\Delta T$	-382,7	0,19	78,9	0,77	***
	Tmax	-338,3	0,18	40,1	0,64	***
	Tmin	44,46	-0,01	0,32	0,01	ns
	P	3213,1	-1,52	0,58	0,02	ns
Stagione vegetativa (aprile - settembre)	GG	-14412,7	7,81	13,3	0,37	**
	Tmax-30	-15570,9	8,77	6,04	0,21	*
	Tmax-35	-3906,9	1,97	30,9	0,57	***
		-1146,9	0,57	12,1	0,34	**



*Fig.1 - Numero di giorni con temperatura massima dell'aria superiore a 30 e a 35 °C nell'intervallo 1998-2022.*

*Fig.1 - Number of days with maximum air temperature exceeding 30 and 35 °C in the years range 1998-2022.*

A partire dall'anno 2010, negli ultimi 13 anni, si osserva un aumento del 7,5% dei gradi giorno (GG) e quasi un raddoppio dei giorni con temperature massime superiori a 30 °C, mentre i giorni con T maggiori di 35 °C sono aumentati di oltre 5 volte rispetto al periodo precedente. Questa tendenza ha portato a fenomeni dannosi come la fotoinibizione fogliare e la disidratazione degli acini esposti alla radiazione solare diretta. Negli ultimi 13 anni si è verificato anche un significativo aumento della media delle escursioni termiche, con un incremento del 40% rispetto al periodo precedente, influenzando la sintesi degli aromi e degli antociani nelle uve (Figura 2).

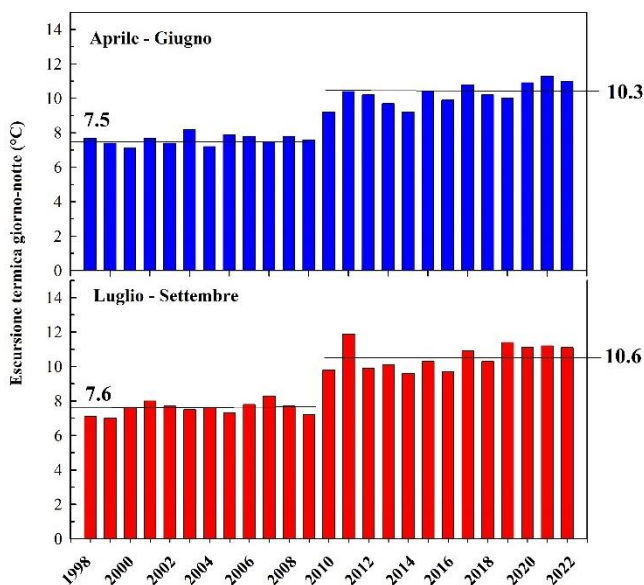


Fig.2 - Escursioni termiche giorno-notte nell'intervallo 1998-2022 nei sottoperiodi primaverile (aprile - giugno) ed estivo (luglio - settembre).

Fig.2 - Day-night temperature range during the period 1998-2022 in the spring (April - June) and summer (July - September).

Le precipitazioni stagionali sono rimaste sostanzialmente costanti, con circa un terzo del totale che si verifica durante il periodo primaverile e il restante due terzi durante il periodo estivo. Le annate con elevate precipitazioni primaverili hanno visto un aumento della pressione della peronospora, come nel 2002, 2004, 2009, 2019 e 2023. Le date di conferimento delle uve di Montepulciano hanno mostrato una variabilità considerevole, con il 50% delle uve consegnate in cantina che si è distribuito tra il 30 settembre registrato negli anni 1998 e 2017 e il 16 ottobre relativo al 2004 (Figura 3A). La gradazione zuccherina media ponderata delle uve consegnate ha variato da un minimo di 17,3 °Babo nel 2014 a un massimo di 20 °Babo nel 2022, riflettendo gli elevati livelli termici registrati nel 2022 (Figura 3B). Negli ultimi quattro anni, i livelli di zucchero sono rimasti costantemente al di sopra di 19 °Brix, in particolare nel 2022 con un elevato conteggio di 2.266 GG. Le specifiche DOC Montepulciano d'Abruzzo richiedono una forza alcolica naturale minima per volume dell'11,5%, che sale al 12% per la versione riserva, rendendo necessarie uve con un contenuto di zucchero di 17,1 e 17,8 °Brix rispettivamente. In tutti gli anni analizzati, le uve consegnate rappresentavano il 50% del totale, soddisfacendo questi livelli minimi di zucchero, dimostrando la idoneità dell'ambiente per la coltivazione del Montepulciano. Anche negli ultimi quattro anni (2019-2022), il contenuto di zucchero nei mosti misurato al 50% della consegna delle uve è variato da 19,3 a 20 °Brix, producendo vini con un contenuto alcolico relativamente moderato, variando da 13,3 a 13,8%. In generale, gli anni caratterizzati da temperature elevate e piogge limitate durante l'estate mostrano un contenuto medio di zucchero più elevato, come nel 2007,

2015 e negli ultimi quattro anni: 2019, 2020, 2021 e 2022 (Figura 3).

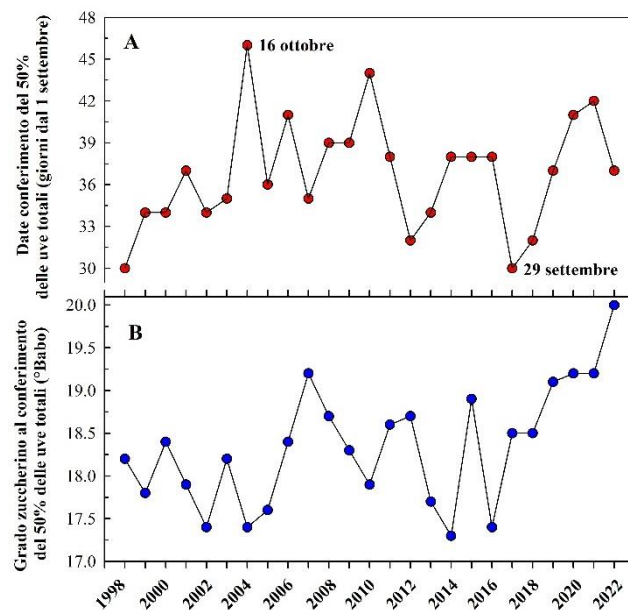


Fig.3 - Date di conferimento del 50% delle uve totali nell'intervallo 1998-2022 (A), grado zuccherino medio ponderato calcolato al conferimento del 50% delle uve totali nel periodo 1998-2022 (B).

Fig.3 - Dates of 50% grape conferring in the range 1998-2022 (A), weighted average sugar content calculated at 50% grape conferring during the time period 1998-2022 (B).

## Conclusioni

La conoscenza del decorso meteo stagionale in un arco di tempo sufficientemente lungo in un comprensorio viticolo circoscritto, soprattutto se risulta omogeneo dal punto di vista tecnico, è certamente di ausilio nell'organizzazione degli enopoli, soprattutto se a base cooperativa e quindi con maggiori difficoltà di gestione, e soprattutto dei singoli conferimenti fornendo utili indicazioni sulla probabile data di vendemmia e sulla composizione analitica delle uve. Nel comprensorio viti-vinicolo di Villalfonsina, piuttosto omogeneo per vitigno, portinnesto, sistema di allevamento e caratteristiche dei suoli, le variazioni riscontrate nelle date di conferimento delle uve e nella gradazione zuccherina dei mosti sono da imputare prevalentemente al decorso annuale dei fattori meteo, poiché le produzioni medie d'uva variano di poco, ovvero da 14 a 16 t/ha.

## Ringraziamenti

I dati utilizzati nel presente studio sono stati forniti dalla Cantina Sociale Olearia Vinicola di Villalfonsina (CH).

## Bibliografia

- Davis R. E., Dimon R. A., Jones G. V., Bois B. (2019). The effect of climate on Burgundy vintage quality rankings. *OENO One* 53(1): 59-73.
- Di Lena, B., Silvestroni O., Lanari V., Palliotti A. (2018). Climate change effect on cv. Montepulciano in some wine-growing areas of the Abruzzi region. *Theoretical and Applied Climatology*, 136: 1145-1155.
- Lanari V., Palliotti A., Sabbatini P., Howell G.S., Silvestroni O., (2014). Optimizing deficit irrigation strategies to manage vine performance and fruit composition of field-grown 'Sangiovese' (*Vitis vinifera* L.) grapevines. *Scientia Horticulturae* 179: 239-247.
- Van Leeuwen C., Destruct-Irvine A., Dubernet M., Duchene E., Godwy M., Marguerit E., Pieri P., Parker A., de Resseguier L., Ollat N., (2019). An update on the impact of climate change in viticulture and potential adaptations. *Agronomy* 9(9): 514.

# AEROBIOLOGICAL MONITORING IN THE FUCINO PLAIN (ABRUZZO, ITALY) TO SUPPORT AGRICULTURAL PRODUCTION IN A CHANGING CLIMATE CONTEXT

## IL MONITORAGGIO AEROBIOLOGICO NELLA PIANA DEL FUCINO (ABRUZZO, ITALIA) A SUPPORTO DELLE PRODUZIONI AGRARIE IN UN CONTESTO CLIMATICO IN EVOLUZIONE

Pace L.<sup>1\*</sup>, Farda B.<sup>1</sup>, Djebaili R.<sup>1</sup>, Sabbi E.<sup>1</sup>, Torge M.<sup>1</sup>, Pascucci G.<sup>1</sup>, Pellegrini M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Medicina clinica, Sanità pubblica, Scienze della Vita e dell'Ambiente. Università degli Studi dell'Aquila  
[\\*loretta.pace@uniwaq.it](mailto:loretta.pace@uniwaq.it)

### Abstract

Fungal spores are highly prevalent in any environment. In contact with plant tissues, fungal spores cause dangerous disease symptoms that most seriously result in the deterioration or loss of the plant itself. Fucino (Abruzzo, Italy) is one of the most important agricultural areas in the country, with intensive crops of agronomic interest. The objective of this study was to conduct qualitative and quantitative investigations of the most prevalent airborne conidiophore forms of phytopathological interest. Aerobiological monitoring was conducted using a volumetric sampler based on the capture of fungal spores by impact, followed by analysis of the samples obtained under an optical microscope at a magnification of 400x. The results demonstrated the preponderance of the genera *Cladosporium* and *Alternaria*, with a concentration of 91% and 6%, respectively. Other phytopathogenic spore genera, although present in lower concentrations (3%), are highly invasive and harmful.

### Parole chiave

Aerobiologia, spore fungine, fitopatologia

### Keywords

Aerobiology, fungal spores, phytopathology

### Introduzione

Le spore fungine (conidiospore) sono altamente diffuse in ogni ambiente. Condizioni ottimali di umidità elevata, temperatura mite e scarsa aerazione, possono determinarne la sopravvivenza anche per lunghi periodi nello stato di quiescenza. La loro concentrazione nell'aria che respiriamo è cospicua, specialmente nelle zone con densa vegetazione, nelle zone agricole, nelle stalle, negli ambienti di stoccaggio del legname, del fieno e delle derrate alimentari (Doehlemann et al., 2017). A contatto con i tessuti vegetali maggiormente suscettibili, le spore fungine provocano sintomi di malattia anche molto pericolosi che hanno, come conseguenza più grave, il deterioramento o la perdita della pianta stessa. Nonostante la necessità di intraprendere pratiche agricole sostenibili volte alla diminuzione dell'uso di agrofarmaci, ancora oggi vengono utilizzate tonnellate di queste sostanze, con lo scopo di prevenire la perdita delle produzioni alimentari (Farda et al., 2023). Il Fucino è una delle regioni agricole più importanti e fertili della penisola italiana con coltivazioni differenti che vanno da quelle intensive di cereali e patate, a quelle di barbabietole, finocchi, e molte altre. Situata nella Marsica, provincia Aquilana, con un'estensione di circa 150 km<sup>2</sup> e una superficie coltivabile di oltre 16000 ha è incorniciata da rilievi montuosi, tra i quali la catena del Sirente-Velino ad est e i monti Simbruini ad ovest (Tomassetti et al., 2003). La

piana del Fucino deriva dal prosciugamento dell'omonimo lago che occupava la conca, estendendosi per circa 165 km<sup>2</sup>. Le condizioni pedo-climatiche del territorio influenzano le caratteristiche dei vegetali. La struttura limo-argillosa e i suoli ricchi di elementi nutritivi, tra i quali azoto, fosforo e potassio, la capacità di ritenzione idrica dei terreni e la risalita idrica delle falde sottostanti e l'escursione termica nel periodo produttivo, sono sole alcune delle condizioni tipiche che permettono alle colture di esprimere al meglio il loro potenziale (Burri and Petitta, 2004; Petitta et al., 2009). La maturazione e la dispersione delle spore fungine è fortemente condizionata dalle condizioni atmosferiche, quali: umidità relativa, temperatura, luce e velocità del vento. I movimenti delle masse d'aria influenzano gli spostamenti orizzontali e verticali e determinano, in particolari situazioni, l'aumento della distanza di dispersione (Pace et al., 2019). Pertanto, il monitoraggio aerobiologico riveste un ruolo importante in campo agronomico, rappresentando uno strumento utile alla rilevazione della presenza di fitopatogeni in atmosfera. Tale studio ha avuto l'obiettivo di indagare per la prima volta le forme conidiofore aerodisperse di maggior interesse fitopatologico e le relative concentrazioni nell'area del Fucino.



## Materiali e Metodi

Il metodo di campionamento utilizzato per le analisi qualitative e quantitative di spore fungine aerodisperse è quello volumetrico basato sulla cattura per impatto (Hirst, mod. Lanzoni VPPS 2000) secondo la norma UNI 11108:2004. Il campionatore è stato installato ad una altezza di circa 14 m in prossimità della Piana del Fucino in modo da coprire la regione di interesse agricolo ed il monitoraggio è stato effettuato per l'intera stagione estiva. Una pompa aspirante convoglia attraverso una fenditura l'aria da analizzare ( $10\text{L min}^{-1}$ ) su una superficie adesiva dove le spore fungine si depositano per impatto. I campioni così ottenuti sono esaminati al microscopio ottico ad un ingrandimento del 400x.

## Risultati e Discussione

Il monitoraggio effettuato nella piana del Fucino ha permesso di rilevare qualitativamente e quantitativamente le spore fungine aerodiffuse: *Alternaria*, *Cladosporium*, *Oidium*, *Epicoccum*, *Stemphylium*, *Torula*, *Botrytis*, *Periconia*, *Pithomyces*, *Helminthosporium*, come mostrato in Figura 1.

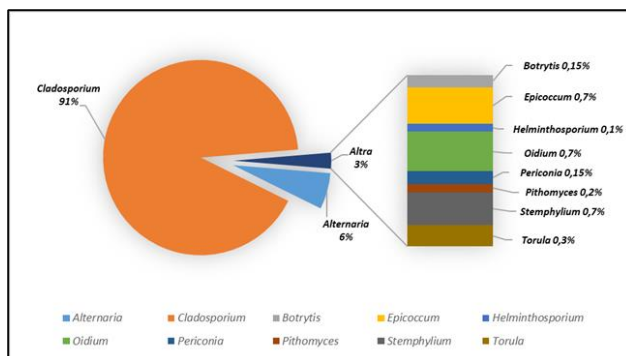


Fig. 1 – Valori delle concentrazioni (spore  $\text{m}^{-3}$ ) relative alle principali spore fungine aerodisperse.

Fig. 1 – Concentration values (spores  $\text{m}^{-3}$ ) of the main airborne fungal spores

Le due forme conidiofore maggiormente riscontrate sono *Cladosporium* (91%) ed *Alternaria* (6%), generi altamente attenzionati per la larga diffusione e per la fitopatogenicità. Le spore di *Cladosporium* possono causare malattie in diverse piante di interesse agricolo quali: pomodoro (*Solanum lycopersicum* L., Famiglia Solanaceae), melanzana (*Solanum melongena* L., Famiglia Solanaceae), peperone (*Capsicum annuum* L., Famiglia Solanaceae) e zuccina (*Cucurbita pepo* L. Famiglia Solanaceae). La patologia che ne deriva prende il nome di cladosporiosi, e il principale agente è il *Cladosporium fulvum* (Joosten and de Wit, 1999). Nella zuccina la malattia si manifesta su tutta la parte aerea: sulle foglie si sviluppano aree irregolari dal colore vitreo-grigiastro che necrotizzano, lacerandosi al centro. Sui frutti si evidenziano tacche tondeggianti

leggermente depresse sulle quali si può creare una muffa grigio-vellutata dall'aspetto marcescente. La malattia si sviluppa maggiormente con umidità relative elevate (80-90%) e temperature medie (18-22°C). Nelle piante di pomodoro, causano disseccamento fogliare e difficoltà nella maturazione dei frutti, con delle macchie di colore brunonerastro (Thomma et al., 2005). Anche in questo caso, per l'insorgere dell'infezione è necessario avere una umidità elevata (circa 90%) e temperatura mite (non superiore ai 30°C). Infatti, nella maggior parte delle coltivazioni, i sintomi compaiono nel periodo di fine estate - inizio autunno.

Le spore di *Alternaria* trovano il loro optimum a temperature che variano tra i 18° e i 32°C, e con umidità relativa, causata anche da piogge e irrigazioni frequenti, superiore al 65%.

L'alternariosi può manifestarsi in diverse entità vegetali d'interesse agronomico. Per esempio, nelle carote (*Daucus carota* L., Famiglia Apiaceae) la malattia si manifesta sulla superficie fogliare, con lo sviluppo di piccole macchie necrotiche a contorno clorotico. Una forte infezione comporta notevoli danni alla fisiologia globale della pianta, con conseguente diminuzione del raccolto (Soteros, 1979). Nelle patate (*Solanum tuberosum* L., Famiglia Solanaceae) la patogenesi si manifesta sul fusto e sulle foglie con la comparsa di maculature scure, tondeggianti, a struttura concentrica. Nei tuberi si formano delle aree brunastre con superficie increspata, dove si rileva la presenza di marciume secco e spugnoso (Tsedaley, 2014). Anche le coltivazioni di cavolo (*Brassica oleracea* L., Famiglia Brassicaceae) sono interessate dall'attacco di spore di *Alternaria*. Sulle infiorescenze, si rilevano diffusi imbrunimenti che, in condizioni di alta umidità ambientale, causano efflorescenze verde-olivastre (Saharan et al., 2016).

Altri generi di spore fitopatogene, anche se presenti in minore concentrazione (3%), sono altamente invasivi e dannosi.

*Oidium* (0.7%) provoca una malattia che prende il nome comune di mal bianco e si sviluppa in condizioni climatiche asciutte e ventilate. Le spore, trasportate sulle foglie, producono un micelio che può raggiungere le cellule al di sotto della cuticola, comportando un graduale ingiallimento e disseccamento. Oltre alla riduzione della funzionalità fogliare, l'oidio può determinare deformazione degli organi colpiti, con ulteriori danni fisiologici ed estetici.

Sono soggette all'attacco dell'oidio quasi la totalità delle piante coltivate, tra queste le principali sono le barbabietole (*Beta vulgaris* L., Famiglia Amaranthaceae), le patate, le carote e il finocchio (*Foeniculum vulgare* Mill., Famiglia Apiaceae) (Kiss et al., 2008).

*Stemphylium* (0.7%) è responsabile di malattie su diverse colture, quali aglio (*Allium sativum* L., Famiglia Amaryllidaceae), cipolla (*Allium cepa* L., Famiglia Amaryllidaceae) e asparago (*Asparagus officinalis* L., Famiglia Asparagaceae). Colpisce gli organi verdi delle piante e non solo le foglie, causandone fenomeni di marcescenza. Le infezioni iniziano la loro azione sulle foglie e raggiungono l'apice del danno nei periodi con condizioni climatiche vantaggiose (Abdel-Hafez et al., 2014; Foster et

al., 2019). Anche in questo caso le irrigazioni frequenti e la mancanza di corretti interventi sui terreni possono rendere l'ambiente favorevole per lo sviluppo di tale patogeno.

Per il nascere dell'infezione è indispensabile una quantità sufficiente di inoculo del patogeno e la presenza contemporanea di acqua sugli organi vegetali e di temperature adeguate, che esercitano un'azione diretta su tutte le fasi del suo ciclo biologico (Ambiente Regionale per la protezione ambientale della Toscana - ARPAT). La gravità di questa malattia è legata anche alla temperatura che ha il suo optimum intorno ai 25°C. *Torula* (0.3%) invece è uno dei vari generi che causano la fumaggine, una fitopatologia diffusa anche se non letale di alcune piante da frutto e ornamentali. In alcuni casi la fumaggine può passare dall'apparato fogliare ai frutti con conseguenti danni a livello economico ed estetico che portano ad un deprezzamento del prodotto finale (Watts, 1932).

*Epicoccum* (0.7%) causa macchie fogliari su diverse tipologie di colture vegetali, in particolare lattuga (*Lactuca sativa* L., Famiglia Asteraceae), bietola (*Beta vulgaris* var. *cicla*, Famiglia Amaranthaceae) e spinacio (*Spinacia oleracea* L., Famiglia Amaranthaceae).

Le macule che si formano sulle foglie possono evolvere nel tempo in marciume e conseguente lacerazione, con perdita di grandi quantità di raccolto.

*Helminthosporium* (0.1%) è la causa della scabbia argentata, causata da *H. solani* della patata, una malattia che colpisce gli stoloni o il tubero nella zona epidermica, determinando la comparsa di pustole di colore argenteo, circolari e con contorni non definiti. Si può trasmettere anche attraverso tuberi o semi infetti e può presentarsi in qualsiasi fase di sviluppo della pianta, anche nella fase di conservazione attraverso il contatto tra tuberi sani e tuberi infetti. Fattore determinante per l'infezione è un alto grado di umidità che spesso viene garantito dalle irrigazioni dei campi adiacenti o circostanti (Muhanna and Elwan, 2020).

Le concentrazioni delle diverse forme conidioifore aerodiffuse sono state utilizzate per l'elaborazione di un calendario sporologico, mostrato in Figura 2.

La piena stagione estiva (luglio e agosto) rappresenta il periodo di maggiore criticità. La maturazione e la dispersione delle spore fungine è influenzata dalle condizioni atmosferiche, come pioggia, umidità relativa, temperatura e velocità del vento (Crandall and Gilbert, 2017). Nel caso di *Alternaria*, la massima concentrazione di spore nell'aria si ha in piena estate, come per *Cladosporium*, *Epicoccum*, *Pithomyces* e *Stemphylium*. In questo caso, nei mesi più caldi, le spore di *Stemphylium* possono diffondersi anche a grandi distanze dando il via a dei cicli di infezioni piuttosto problematici.

<i>Alternaria</i>				
<i>Botrytis</i>				
<i>Cladosporium</i>				
<i>Epicoccum</i>				
<i>Helminthosporium</i>				
<i>Oidium</i>				
<i>Periconia</i>				
<i>Pithomyces</i>				
<i>Stemphylium</i>				
<i>Torula</i>				
	Jun	Jul	Aug	Sep

Fig. 2 – Calendario delle spore fungine aerodisperse nella piana del Fucino. Nel calendario i colori indicano le classi di concentrazione standard utilizzate in aerobiologia: bassa (giallo), media (arancione), alta (rosso).

Fig. 2 – Calendar of airborne fungal spores in the Fucino plain. In the calendar the colors indicate the standard concentration classes used in aerobiology: low (yellow), medium (orange), high (red).

Invece, per *Periconia* e *Helminthosporium* la diffusione media delle spore si osserva già a partire dal mese di giugno, raggiungendo i valori elevati in agosto. Generalmente, l'infezione provocata dalle spore di *Oidium* tende a raggiungere la massima intensità a luglio e agosto per poi regredire progressivamente a settembre e l'acqua (soprattutto sotto forma di piogge intense) causa una riduzione per effetto dilavante. I generi *Torula* e *Botrytis* sono caratterizzati da una precoce diffusione già a partire dalla tarda primavera.

## Conclusioni

Lo studio svolto ha permesso di analizzare per la prima volta le forme conidioifore aerodisperse di maggior interesse fitopatologico e le relative concentrazioni nell'area del Fucino. In un contesto climatico in veloce cambiamento, il monitoraggio aerobiologico delle spore fungine può costituire un valido strumento per prevedere la necessità dell'uso di mezzi tecnici per il controllo della loro diffusione e limitarne un uso eccessivo. Al minor uso di fitofarmaci immessi nell'ambiente corrisponderebbero numerosi vantaggi ovvero la diminuzione di problematiche riguardanti l'aria che respiriamo, il suolo e l'acqua di falda. Lo scopo è dunque individuare la qualità e la quantità di spore fungine fitopatogene aerodisperse in modo da effettuare trattamenti antiparassitari nelle zone agricole solo se necessari. Questo approccio è utile allo sviluppo di una strategia di prevenzione indirizzata a migliorare la qualità delle colture, a salvaguardare l'ambiente nonché a risparmiare sulla quantità di fitofarmaci da acquistare.

## Bibliografia

Abdel-Hafez, S. I. I., Abo-Elyousr, K. A. M., Abdel-Rahim, I. R. (2014). Effectiveness of plant extracts to control purple blotch and *Stemphylium* blight diseases of onion (*Allium cepa* L.) in Assiut, Egypt. Archives Of

- Phytopathology And Plant Protection, 47(3), 377–387. <https://doi.org/10.1080/03235408.2013.809926>
- Ambiente Regionale per la protezione ambientale della Toscana (ARPAT). Monitoraggio spore fungine in ambienti agricoli. [www.arpato.toscana.it](http://www.arpato.toscana.it).
- Burri, E., and Petitta, M. (2004). Agricultural changes affecting water availability: from abundance to scarcity (Fucino Plain, central Italy). *Irrigation and Drainage*, 53(3), 287–299. <https://doi.org/10.1002/ird.119>
- Crandall, S. G., and Gilbert, G. S. (2017). Meteorological factors associated with abundance of airborne fungal spores over natural vegetation. *Atmospheric Environment*, 162, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.018>
- Doehlemann, G., Ökmen, B., Zhu, W., Sharon, A. (2017). Plant Pathogenic Fungi. *Microbiology Spectrum*, 5(1). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0023-2016>
- Farda, B., Djebaili, R., Del Gallo, M., Pellegrini, M. (2023). Endophytic Bacteria. In *Biofungicides: Eco-Safety and Future Trends* (pp. 40–64). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003287575-3>
- Foster, Jennifer. M., Tayviah, C. S., Stricker, S. M., Gossen, B. D., McDonald, M. R. (2019). Susceptibility to *Stemphylium vesicarium* of asparagus, onion, pear, and rye in Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 41(2), 228–241. <https://doi.org/10.1080/07060661.2019.1574901>
- Joosten, M., and de Wit, P. (1999). The tomato–*cladosporium fulvum* interaction: A Versatile Experimental System to Study Plant-Pathogen Interactions. *Annual Review of Phytopathology*, 37(1), 335–367. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.37.1.335>
- Kiss, L., Jankovics, T., Kovács, G. M., & Daughtrey, M. L. (2008). *Oidium longipes*, A New Powdery Mildew Fungus on Petunia in the USA: A Potential Threat to Ornamental and Vegetable Solanaceous Crops. *Plant Disease*, 92(5), 818–825. <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-5-0818>
- Muhanna, N., & Elwan, S. (2020). Salts as controlling agents of lettuce leaf spot diseases. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 47(1), 119–133. <https://doi.org/10.21608/zjar.2020.70230>
- Petitta, M., Fracchiolla, D., Aravena, R., Barbieri, M. (2009). Application of isotopic and geochemical tools for the evaluation of nitrogen cycling in an agricultural basin, the Fucino Plain, Central Italy. *Journal of Hydrology*, 372(1–4), 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.009>
- Pace, L., Boccacci, L., Casilli, M., Fattorini, S. (2019). Temporal variations in the diversity of airborne fungal spores in a Mediterranean high-altitude site. *Atmospheric Environment*, 210, 166–170. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.04.059>
- Singh Saharan, G., Mehta, N., Meena, P. D. (2016). *Alternaria* Diseases of Crucifers: Biology, Ecology and Disease Management. In *Alternaria Diseases of Crucifers: Biology, Ecology and Disease Management*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0021-8>
- Soteros, I. J. (1979). Pathogenicity and control of *Alternaria radicina* and *A. dauci* in carrots. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 22(1), 191–196. <https://doi.org/10.1080/00288233.1979.10420860>
- Tomassetti, B., Angelosante Bruno, A., Pace, L., Verdecchia, M., Visconti, G. (2009). Prediction of *Alternaria* and *Pleospora* concentrations from the meteorological forecast and artificial neural network in L'Aquila, Abruzzo (Central Italy). *Aerobiologia*, 25(3), 127–136. <https://doi.org/10.1007/s10453-009-9117-7>
- Tsedaley, B. (2014). Review On Early Blight (*Alternaria* spp.) of Potato Disease and its Management Options. 4(27). [www.iiste.org](http://www.iiste.org)
- Watts, J. W. (1932). *Torula* Infection: A Review and Report of Two Cases. *The American Journal of Pathology*, 8(2), 167-192.9. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19>

# HEAT WAVES: OCCURRENCE, IMPACTS AND ADAPTATION IN APPLE ORCHARDS

## *LE ONDATE DI CALORE NEI FRUTTETI: FREQUENZA, CONSEGUENZE E POSSIBILITA' DI ADATTAMENTO IN COLTURE DI MELO*

Federica Rossi<sup>1\*</sup>, Camilla Chieco<sup>1</sup>, Edoardo Fiorillo<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup> Istituto per la BioEconomia. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Via Piero Gobetti 101, 40125 Bologna

\*[federica.rossi@ibe.cnr.it](mailto:federica.rossi@ibe.cnr.it)

### **Abstract**

Apple, as most fruit trees, is a high-temperature vulnerable crop as heat stress stimulate fruit sunburns and yield reduction. Heat waves occurrence in Italian regions most vocationally producing high-quality, marketable, apples, and in other European apple producing areas, is monitored here. Risk of future yield losses are expected to increase in larger Europe because the region's climate is projected to become increasingly hot with an associated increment in the number of damaging heatwave events.

Therefore, interventions to reduce crop loss seem to be essential for growers to remain economically viable and to compete in a global market with highest quality fruits.

In this context, the evaporative cooling practice is an effective solution and our study aimed to understand if an operational adoption of this practice would be worthwhile. This study is a partial contribution from an international project (Climate Kic Friendly Fruit) project to evidence the potential heat waves hazard in EU orchards, to provide farmers with effective recommendations on setting and operating evaporative cooling. In addition, some alternative possible strategies are considered to tackle the problem

### **Parole chiave**

Ondate di calore, temperatura, adattamento, melo

### **Keywords**

Heat waves, temperature, adaptation, apple

### **Introduction**

Adaptation to climate change is imperative to enable agriculture sustainability. Heatwaves (HW) are among the most dangerous natural threats, but rarely receive adequate attention, as they often lack the spectacular and sudden violence of other hazards.

There is increasing recognition that heat-related risks might be reduced at all levels through systematic development of heatwave early warning systems, alerting decision-makers and adaptation measures (WMO, 2015)

Apple, as most fruit trees, is a vulnerable crop as heat stress stimulate sunburn development on fruits. In particular, the exposure of trees growing in semi-arid conditions to high solar irradiance and elevated temperature has demonstrated to promote sun-related skin disorders (Morales Quintana et al, 2020). Risk of future yield losses are expected to increase in larger Europe because the region's climate is projected to become increasingly hot with an associated increment in the number of damaging heatwave events.

Therefore, interventions to reduce crop loss seem to be essential for growers to remain economically viable and to compete in a global market with highest quality fruit.

In this context, the evaporative cooling practice is a potentially effective solution and this current study aims to understand if an operational adoption of this practice would be worthwhile.

The results are a contribution from an Climate Kic project (Friendly Fruit) project to evidence the potential heat waves hazard in EU orchards, and to provide farmers with effective recommendations on setting and operating evaporative cooling. In addition, some alternative possible strategies are considered to tackle the problem. This information has the objective to support the development of sunburn mitigation strategies and enhance farmers' capacity to mitigate negative associated with sunburn in apple production.

### **Materials and methods**

Taking into account some of the most important European apple production areas (identified by CORINE Land Cover inventory), simple regression lines allowed to evidence the HWs occurrence in the last 21975-1998 period.

Some measurements were carried out during an experimental trial to verify the cooling capability of overhead sprinkling at leaf and fruit levels



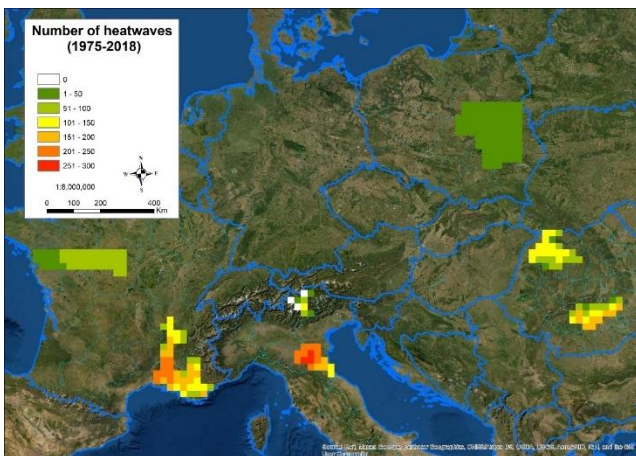


Figure 1. Numerosità delle ondate di calore registrate nel periodo 1975- 2018 nelle aree studio selezionate.

Fig. 1. Number of heatwaves over the 1975-2018 period for the selected study areas.

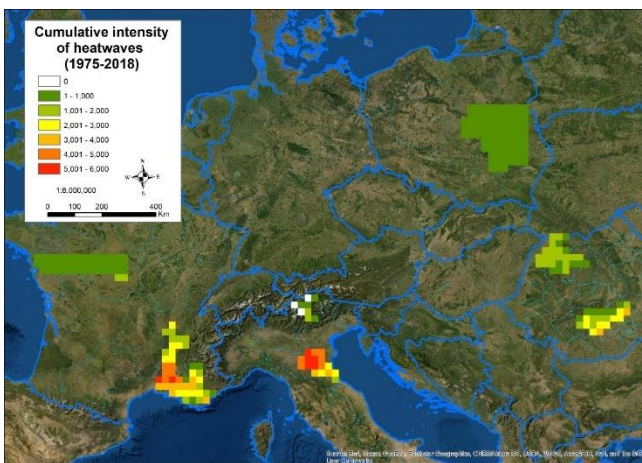


Figura 2. Intensità delle ondate di calore per periodo 1975-2018 nelle aree studio selezionate

Figure 2. Intensity of heatwaves over the 1975-2018 period for the selected study areas.

## Results and discussion

Fig 1 and 2 represent the past and increasing HWs occurrence and intensity, evident even if both parameters have a large local variability as they are influenced by latitude and altitude. The slope comparison of the different areas shows that the areas located further South and overlooking the Mediterranean Sea are the ones currently most exposed. As far as Italy is regarded, Risk in Trentino Alto Adige were lower than in Emilia Romagna, but it has however to be pointed out that the low spatial resolution of the Agri4cast dataset does not allow the distinction between valley zones (where apple orchards are located) from mountainous areas.

The result of this analysis confirm the necessity of developing efficient cooling measures to counteract the growing HW risks, to operationally facilitate apple orchards adaptation to the new climate conditions of the next future.

Some potential field solution are therefore pointed out in the study. First, testing and assessing the feasibility of evaporative cooling to reduce the HW using conventional drip irrigation integrated with over-canopy sprinklers (Manfrini et al, 2018). The micro-irrigation systems customized for irrigation needs may in fact be insufficient to cover the current daily evaporation peaks, as it implies the partial restitution of the plant consumption, especially in the two-month period July-August in which the maximum increase in fruit is recorded (Iglesias et al., 2002).

In concomitance with such interventions during HWs occurrence a sudden decrease in temperature of leaves and fruits was registered in our trials as soon as trees were subjected to irrigation (-2°C for leaves, and - 4°C for fruits). However, the ‘cooling’ effect lasted exclusively for the duration of the irrigation itself. After the irrigation was concluded, the temperature of both organs steadily increased their temperature until 17:00 h, and then, after that, decreasing until nightfall.

Technical advices should therefore considered to produce a long-lasting cooling, as for example short bursts of ‘cooling irrigation’ to be activated exclusively in extreme heat conditions. In alternative, the modification of irrigation time schedule can be a useful way to reduce HWs potential damages, as well as the adoption of multiple daily irrigation scheduling.

Alternative solutions to reduce HW impacts have also to be taken into account, as varietal selection and the use of shading nets able to reduce the radiation exposure responsible of quality-compromising fruit sunburns (Racso and Schrader, 2012).

## Conclusions

In the light of HW increasing evidence, agrometeorological supported advices to farmers may empower them to tackle climate change and reduce its impacts by finding the best strategy, or a combination of strategies, tailored to their local conditions, and needs. To counteract HWs, a strong interdisciplinary effort is needed. Predictive models, based on concomitant occurrence of HWs favourable meteorological factors (including wind speed, irradiation, HR) should merge with innovative breeding approaches for improving heat tolerance and with effective protection measures activated at management level.

## Bibliography

- Iglesias, I., Salvia, J., Torguet, L., and Cabù s, C. (2002). Orchard cooling with overtree microsprinkler irrigation to improve fruit colour and quality of ‘Topred Delicious’ apples. *Sci. Hortic. (Amsterdam)* 93 (1), 39–51.
- Manfrini L., Gatti G., Morandi B., Corelli Grappadelli L., Bortolotti G., Rossi F., Facini O., Chieco C., Gerin M.; Solimando D., Letterio T., Anconelli S. (2018). Microclimatic physiological and productive effect of the overcanopy irrigation in an apple orchard, in: *Acta*

Horticulturae, Pastoriestraat, International Society for Horticultural Science, 2020, 1281, pp. 377 - 383

Morales-Quintana, L., Waite, J.M., Kalcits, L., Torres, C.A. and Ramos, P. (2020). Sun injury on apple fruit: Physiological, biochemical and molecular advances, and future challenges. *Scientia Horticulturae* 260 (108866).

Racsko J., Schrader L.E. (2012). Sunburns of apple fruits: historical background, recent advances and future perspectives. *Critical reviews in Plant Sciences*, 31, 455-504

WMO N. 1142- Mc Gregor P., Bessemoulin K., E and Menne B. Eds. *Heat waves and health: guidance to early warning systems*. ISBN 978-92-63-11142-5.



# AGRICOLTURA DI PRECISIONE E COLTIVAZIONE DELLA CAROTA: SFIDE E OPPORTUNITÀ PER IL TERRITORIO ITALIANO

## PRECISION AGRICULTURE AND CARROT CULTIVATION: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES IN ITALY.

Cecilia Squeri<sup>1\*</sup>, Andrea Mariani<sup>1</sup>, Vincenzo Di Genova<sup>1</sup>, Giuseppe Concaro<sup>1</sup>, Federica Prina<sup>1</sup>, Filippo Milazzo<sup>2</sup> Giovanni Maria Poggi<sup>3</sup>, and Francesca Ventura<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Sata S.R.L. Strada Alessandria 13, 15044 Quargnento (AL)

<sup>2</sup> Agricolus S.R.L. Via Settevalli 320 – 06129 Perugia, Italia

<sup>3</sup> Department of Biological, Geological and Environmental Sciences (BiGeA), Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Bologna, Italy

<sup>4</sup> Department of Agricultural and Food Sciences (DISTAL), Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Bologna, Italy

\* [c.squeri@satasrl.it](mailto:c.squeri@satasrl.it)

### Abstract

The development of precision agriculture technologies is at a highly advanced stage, although Italy remains, according to the European Innovation Scoreboard, a moderate innovator. Certainly, a key role in the promotion of precision agriculture technologies has been played by the funding measures of the past few years that have driven digitalisation in some Italian agricultural sectors. Agricultural digitalisation has not followed a homogeneous development among Italian crops, being more present in the extensive crop sectors and in viticulture. The Italian horticultural sector, in which carrot cultivation is a strategic crop with 9.270 hectares cultivated in 2023 (ISTAT), was instead investigated to a limited extent in terms of adoption level and expected benefits. Aim of the study was to investigate the penetration rate of precision agriculture technologies in the carrot sector in Italy, and the opportunities for improvement that the sector requires.

### Parole chiave

Agricoltura di precisione, Orticoltura, Carote, Livello di adozione

### Keywords

Precision agriculture, Horticulture, Carrots, Technology adoption

### Introduzione

Le operazioni agricole comportano complessi problemi decisionali, caratterizzati da notevoli livelli di incertezza. I fattori che determinano l'efficacia degli interventi in campo sono molteplici e comprendono disponibilità di acqua e sostanze nutritive e una serie di fattori specifici, quali le caratteristiche pedoclimatiche del sito di coltivazione la tecnica culturale adottata. Un'elevata variabilità di questi parametri all'interno di un singolo appezzamento diversifica ulteriormente l'ottimizzazione e l'efficacia dei trattamenti. In tali casi, la pratica comune di considerare il campo come un'entità omogenea riduce l'efficienza di vari interventi. Oggi, le sfide poste all'agricoltura, tra le quali spiccano la riduzione dei trattamenti fitosanitari e l'ottimizzazione dei costi di produzione, trovano risposta negli strumenti e tecnologie dell'agricoltura di precisione, che permettono la raccolta e la gestione oggettiva delle informazioni, per renderle disponibili a tecnici e produttori al fine di effettuare scelte consapevoli. Non solo, negli ultimi anni l'avvento dell'Intelligenza Artificiale (AI) promette nuovi sviluppi che consentiranno ai tecnici di creare nuove proiezioni, algoritmi e sistemi di supporto decisionali (Decision Support System, DSS) (Aubert *et al.*, 2012; Wolfert *et al.*, 2017).

Alcuni casi di successo, in cui l'utilizzo combinato di questi strumenti ha consentito di monitorare la variabilità temporale e spaziale in campo, adattando gli input alle reali esigenze del suolo e delle piante coltivate, sono stati esplorati per diverse colture. Le applicazioni della gestione sito-specifica

hanno portato ad un aumento della redditività, miglioramento nella quantità e nella qualità della resa, nonché riduzione dei costi e degli impatti ambientali (Vecchio *et al.*, 2020).

In Italia, la più importante indagine sul tasso di adozione delle tecnologie in agricoltura viene presentata dall'Osservatorio Smart AgriFood. I dati del gruppo di lavoro hanno mostrato come il trend di adozione delle tecnologie digitali in Italia anche nel 2023 è stato investito di una crescita decisa (+19%) (Cinquemani, 2024). L'incremento delle soluzioni 4.0, però, non ha interessato in modo uniforme tutta la filiera produttiva. Infatti i dati mostrano che il numero delle aziende che adottano soluzioni 4.0 è rimasto stabile (72%), suggerendo che questo aumento è dovuto all'aggiunta di più soluzioni per ogni azienda. Infatti, un tema importante evidenziato dal Report dell'Osservatorio SmartAgriFood riguarda la maturità digitale delle aziende, che oggi rimane ancora fortemente dipendente dalla possibilità delle aziende di poter investire fondi e capitale umano.

Long *et al.* (2016) avevano già indagato le barriere che pongono limiti all'adozione di tecnologie a livello europeo, identificando tra le principali la scarsa consapevolezza dei produttori, i costi elevati, la mancanza di impatto verificato delle tecnologie, i problemi normativi e politici, la mancanza di competenze e le iniziative di ricerca non aderenti alle necessità del mercato. Nello studio veniva già affrontato il

tema della diversità di impatti e benefici delle soluzioni 4.0 a seconda della tipologia di filiera alle quali venivano applicate, portando come esempio virtuoso il caso del vino in Australia e Nuova Zelanda, che ha saputo integrare in modo congruente le tecnologie 4.0 perché generassero benefici diretti ai produttori.

È evidente come il processo di adozione non sia un fenomeno immediato, ma dipenda da una vasta gamma di variabili come l'attitudine dell'agricoltore, le caratteristiche strutturali dell'azienda, l'ubicazione, i fattori organizzativi/istituzionali e quelli legati all'informazione (Vecchio *et al.*, 2020).

Un altro elemento importante da evidenziare è quello dell'integrazione tra soluzioni. Se infatti anche nel 2023 la meccanizzazione è stato il principale fattore determinante nella crescita del tasso di adozione dell'agricoltura di precisione, la possibilità di utilizzare i dati in modo organico e integrato resta un elemento di criticità. Infatti, se la tecnologia viene adottata soprattutto da grandi aziende che utilizzano più soluzioni, allora è importante comprendere se il flusso di dati può essere gestito complessivamente da un solo software per facilitare l'utente. Come evidenziato da Zambon *et al.* (2019), l'azienda 4.0 non sarà gestita da un solo sistema 4.0, ma riunirà sotto di sé diversi sistemi verticali specializzati e integrati. Di conseguenza, la facilità nell'utilizzo e di scambio di dati diventa un fattore fondamentale per incentivarne l'adozione, a condizione che questo aspetto non comporti un significativo aumento dei costi di investimento (Pierpaoli *et al.*, 2013). Infatti, uno dei temi evidenziati in diversi studi sull'argomento quello del costo di capitale umano che ancora oggi resta il soggetto principale al quale è affidata la responsabilità dell'imputazione dei dati, operazione time-consuming (Long *et al.*, 2016; Bolfe *et al.*, 2020).

Una maggiore "Ease of Use" si raggiunge anche con l'informazione. Le politiche agricole sono decisive per promuovere nuove misure a sostegno dei sistemi di informazione e delle reti o dei progetti che coinvolgono sia le piccole che le grandi aziende agricole come anche evidenziato dal Report dell'Osservatorio SmartAgrifood. Inoltre, le nuove misure politiche orientate all'informazione possono portare all'aumento delle competenze in agricoltura e ad una maggiore disponibilità di professionalità tecniche e di consulenza. Maggiori livelli di informazione tra gli agricoltori possono anche ridurre la percezione della complessità del processo di adozione delle tecnologie digitali. Migliorare questo livello di informazione può aiutare l'agricoltore a comprendere i vantaggi e le opportunità associate agli strumenti per l'agricoltura di precisione.

Da ultimo, nelle grandi filiere organizzate, le grandi aziende hanno assunto un ruolo fondamentale nell'incentivazione delle tecnologie in quanto, in operazioni legate alla gestione della filiera stessa, hanno finanziato protocolli di coltivazione in cui i software di agricoltura 4.0 sono presenti in modo, talvolta, obbligatorio. Le conseguenze dirette di queste operazioni sono da un lato il finanziamento di software 4.0, che spinge aziende agricole anche di medio-piccole dimensioni a dotarsi di queste soluzioni, dall'altro la possibilità che la stessa azienda, se inserita in diverse filiere,

si trovi a utilizzare la stessa tipologia di soluzione. Grandi capi filiera quindi chiedono e guidano adozione di tecnologie.

Lo scopo del presente lavoro è stato quello di indagare il livello di adozione di tecnologie in Italia, prendendo la filiera della carota come modello. A tale scopo, sono stati analizzati diversi studi che hanno registrato la propensione all'adozione delle tecnologie, ponendoli a confronto con un'indagine che è stata proposta a diversi soggetti operanti nella filiera (produttori, magazzini e trasformatori).

## Materiali e metodi

Da un'indagine tra le pubblicazioni degli ultimi anni, si nota come i focus principali della ricerca sulla filiera carota sono principalmente due: la previsione delle rese e la gestione delle infestanti.

Le mappe di resa sono una delle funzionalità più utilizzate nell'agricoltura di precisione, e la loro stima nel caso della carota risulta particolarmente complessa, visto lo sviluppo ipogeo della coltura (Wei *et al.*, 2020). Inoltre, la scarsa consapevolezza della variabilità interparcellare che caratterizza le aziende della filiera, spesso di dimensioni medio-piccole, e la mancanza di serie di dati pluriennali, limitano anche lo sviluppo di sistemi di predizione delle rese basati sull'AI. (Suarez *et al.*, 2024).

Se dai dati dell'osservatorio SmartAgrifood emerge che il mercato negli anni è riuscito a implementare soluzioni che creassero un buon matching tra fabbisogno degli agricoltori e offerta, non sono presenti studi che indaghino l'uniformità di adozione delle tecnologie tra le diverse filiere produttive. In un'indagine condotta da SATA s.r.l. si è cercato di comprendere quale fosse il tasso di adozione delle tecnologie 4.0 tra i player della filiera carota.

La coltivazione della carota ha rappresentato per anni una delle filiere strategiche italiane. Nonostante una riduzione delle superfici negli ultimi anni, nel 2023 sono stati registrati 9.270 ettari coltivati (ISTAT), in cui il Fucino rappresenta di certo una delle aree più vocate a livello italiano.

L'indagine ha visto coinvolte 29 aziende su tutto il territorio italiano, di cui 15 solo produttori, mentre i restanti erano produttori che lavoravano anche nelle fasi di magazzino. Tra le aziende, è emerso che l'83% degli intervistati adotta soluzioni di agricoltura 4.0, dato in linea con quanto evidenziato dal Report dell'Osservatorio SmartAgrifood a livello generale.

## Risultati

Andando a indagare le tipologie di soluzioni adottate, i dati anche per quanto riguarda la filiera carota, confermano quanto emerso dall'indagine dell'Osservatorio SmartAgrifood, in quanto le soluzioni più utilizzate dalle aziende sono quelle per il controllo delle macchine (Fig. 1).

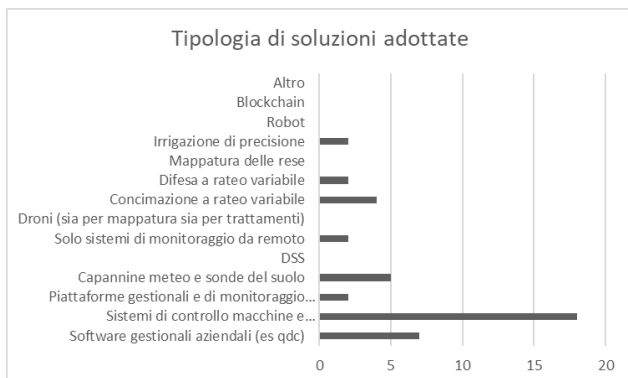


Fig.1 – Tipologia di soluzioni di agricoltura 4.0 adottate dalle aziende della filiera carota.

Fig.1 – Type of agriculture 4.0 solutions adopted by companies in the carrot supply chain.

L'acquisto di tali sistemi ha sicuramente beneficiato degli incentivi concessi dalle misure di credito d'imposta per la Transizione 4.0. Purtroppo però, a livello aziendale, l'utilizzo delle macchine resta spesso limitato ai sistemi di guida autonoma, mentre le funzionalità legate per esempio alla mappatura delle rese o alla concimazione a rateo variabile restano ancora ad un minor livello di adozione. Tuttavia, emergono comunque tra le soluzioni adottate i sistemi gestionali aziendali, le stazioni meteo e i sistemi di concimazione a rateo variabile, mentre non vengono adottati da nessuna azienda i DSS. Nei dati dell'Osservatorio SmartAgrifood, al contrario, DSS, blockchain e sistemi di controllo delle rese erano citati come soluzioni emergenti. In particolare, la mancanza di aziende che utilizzino DSS conferma la mancanza di soluzioni verticali e dedicate alla coltivazione della carota.

Tra i benefici attesi (Fig. 2) le aziende hanno citato l'ottimizzazione degli input e del carico degli operatori, la consapevolezza per la gestione aziendale, l'adesione ai requisiti di legge e l'accesso ai finanziamenti.

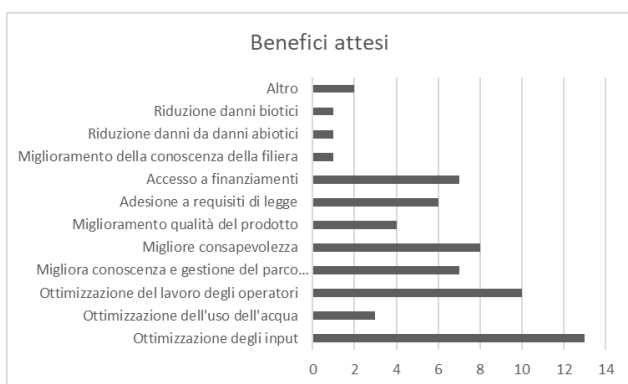


Fig.2 – Benefici attesi dall'adozione delle tecnologie di agricoltura 4.0.

Fig.2 – Expected benefits from the adoption of agriculture 4.0 technologies.

Tra le motivazioni che hanno spinto le aziende ad adottare le soluzioni di agricoltura 4.0 emerge la volontà di miglioramento e l'utilizzo di finanziamenti (Fig.3).

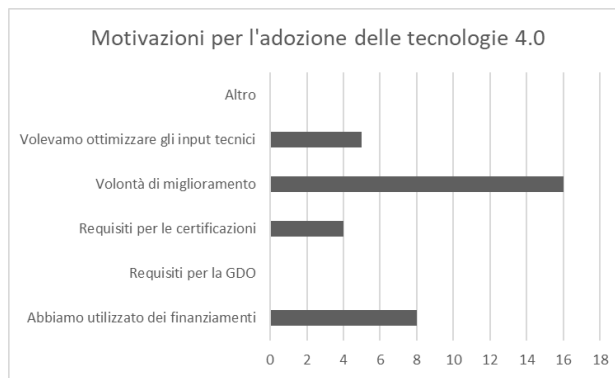


Fig.3 – Ragioni per le quali sono state adottate le soluzioni di agricoltura 4.0 nelle aziende intervistate.

Fig.3 – Reasons why agriculture 4.0 solutions were adopted in the companies interviewed.

Ciò conferma ulteriormente il ruolo fondamentale della normativa nell'incentivazione e guida delle aziende nell'adozione delle tecnologie di agricoltura 4.0 come anche evidenziato da Long *et al.* (2016). Non emerge invece un ruolo attivo della GDO, spesso promotrice di innovazione. Analizzando con le aziende sottoposte all'indagine quali sono i fattori che limitano l'adozione delle tecnologie, i risultati si pongono in linea con quanto emerso da diversi studi in merito, ossia il costo dell'investimento iniziale (Fig. 4).

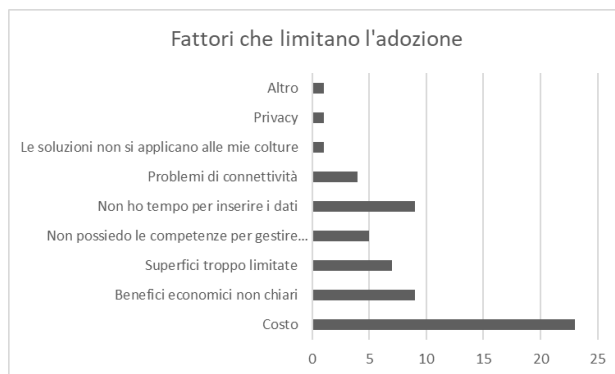


Fig.4 – Fattori che limitano l'adozione delle tecnologie 4.0 nelle aziende produttrici della filiera carota.

Fig.4 – Limiting factors in the adoption of 4.0 technologies in carrot supply chain companies.

Altre due criticità emerse dall'indagine sono le problematiche dovute all'imputazione dei dati e i benefici economici oggi non chiari alle aziende. In un contesto popolato da aziende medio-piccole come quello delle carote, è importante analizzare in quale modo le soluzioni di agricoltura 4.0 possono inserirsi nell'operatività aziendale. Se infatti l'azienda non possiede le risorse per gestire in modo organico le piattaforme, tale gestione tende a ricadere sulla figura dell'agronomo.

Tra le nuove sfide che sono state citate dalle aziende intervistate, emerge il tema dell'irrigazione, su cui si inseriscono anche diversi temi certificativi che potrebbero ricoprire un ruolo di importanza nei prossimi anni, quali

SPRING, l'Add-On di GlobalGap IFA per la gestione dell'acqua. La certificazione si articola su 5 aree di valutazione che comprendono sia temi legati alla valutazione dei rischi e la conformità legale, sia la gestione sostenibile dell'acqua in azienda.

Per questo diventerà di fondamentale importanza per le aziende dotarsi di sistemi per il monitoraggio dei parametri ambientali (dove non presenti soluzioni pubbliche) e piattaforme digitali che possano garantire il calcolo dei parametri richiesti da SPRING, come ad esempio Agricolus. La piattaforma, infatti, integra tra le sue soluzioni un DSS dedicato all'irrigazione, in grado di stimare l'evapotraspirazione colturale e il fabbisogno idrico degli appezzamenti.

## Conclusioni

In conclusione, la survey condotta con focus sulla filiera carota è in linea con quanto mostrato dalle indagini condotte dall'Osservatorio SmartAgrifood su diversi aspetti. Al contempo, però, sono anche emersi alcuni elementi di criticità dovuti sia al mercato delle soluzioni 4.0, sia alle caratteristiche della filiera stessa. Infatti, si riscontra una mancanza di soluzioni verticali dedicate soprattutto alla produzione della carota quali DSS e modelli *ad hoc* limita l'adozione di tecnologie 4.0, e le aziende che compongono il contesto di riferimento sono spesso caratterizzate da superfici medio-piccole e un livello di innovazione aziendale limitato alle macchine 4.0 e al registro dei trattamenti elettronico.

In questo processo di transizione i requisiti di legge e la possibilità di accedere a finanziamenti, quali i CSR regionali e i progetti europei, restano fattori fondamentali per incentivare l'integrazione di più sistemi di agricoltura 4.0.

In ottica evolutiva, la possibilità di creare un database pluriennale e completo dei dati aziendali, sarà anche fondamentale per soddisfare i requisiti di sostenibilità e per andare verso il mercato dei crediti di carbonio. In questa prospettiva, le applicazioni di agricoltura 4.0, non solo saranno integrate come mezzi di produzione e ottimizzazione degli input aziendali, ma avranno anche un ruolo fondamentale per il monitoraggio e la raccolta dei dati per il calcolo degli impatti ambientali.

Infine, è emerso come il ruolo dell'agronomo sia di fondamentale importanza specialmente in filiere frammentate come quella della carota. Le competenze e la preparazione sulle tematiche di agricoltura 4.0 saranno elementi chiave per guidare le aziende in questo processo di transizione.

## Ringraziamenti

Lo studio è stato condotto nell'ambito del progetto Horizon Farmtopia (settembre 2023 – agosto 2026) "Democratizing Digital Farming for All – FARMTOPIA'S PATH TO EMPOWERING SMALL FARMS WITH DIGITAL TECHNOLOGIES".

## Bibliografia

- Aubert, B.A.; Schroeder, A.; Grimaudo, J, 2012. IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decis. Support Syst.*, 54, 510–520.
- Bolfè E.L.; de Castro Jorge L.A.; Del'Arco Sanches I.; Luchiarì A.J.; Cabral da Costa C.; de Castro Victoria D.; Inamasu R.Y.; Grego C.R.; Ferreira V.R.; Raminéz A.R., 2020. Precision and Digital Agriculture: Adoption of Technologies and Perception of Brazilian Farmers. *Agriculture*, 10(12), 653, 1-13.
- Cinquemani, 2024. Smart farming: le tecnologie ci sono, ora bisogna usarle. *Agronotizie*. <https://agronotizie.imagelinenetwork.com/agricoltura-economia-politica/2024/03/18/smart-farming-le-tecnologie-ci-sono-ora-bisogna-usarle/81516>.
- Long, T.B.; Blok, V.; Coninx, 2016. Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: Evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy. *J. Clean. Prod.*, 112, 9–21.
- Osservatorio SmarAgrifood. Report 2023.
- Pierpaoli, E.; Carli, G.; Pignatti, E.; Canavari, M., 2013. Drivers of precision agriculture technologies adoption: A literature review. *Procedia Technol.*, 8, 61–69.
- Suarez L.A.; Robertson-Dean M.; Robson A., 2024. Forecasting carrot yield with optimal timing of Sentinel 2 image acquisition. *Precision Agriculture*, 25, 570-588.
- Vecchio, Y.; Agnusdei, G.P.; Miglietta, P.P.; Capitano, F., 2020. Adoption of Precision Farming Tools: The Case of Italian Farmers. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(3), 869, 1-16.
- Wei M.C.F.; Maldaner L.F.; Ottoni P.M.N.; Molin J.P., 2020. Carrot Yield Mapping: A Precision Agriculture Approach Based on Machine Learning. *AI*, 1(2), 229-241.
- Wolfert, S.; Ge, L.; Verdouw, C.; Bogaardt, M.J., 2017. Big data in smart farming—A review. *Agric. Syst.*, 153, 69–80.
- Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M. G., & Colantoni, A. (2019). Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. *Processes*, 7(1), 36.

# THROUGH TIME AND COLOR: NDVI AS A DIAGNOSTIC TOOL OF THE HISTORICAL DYNAMICS OF POLLINATING HOVERFLY COMMUNITIES

## ATTRAVERSO IL TEMPO E IL COLORE: NDVI COME STRUMENTO DIAGNOSTICO DELLE DINAMICHE STORICHE DELLE COMUNITÀ DI SIRFIDI IMPOLLINATORI

Laura Zavatta<sup>1\*</sup>, Francesca Ventura<sup>1</sup>, Daniele Sommaggio<sup>2,3</sup>, Serena Magagnoli<sup>1</sup>, Giovanni Burgio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DISTAL – Department of Agricultural and Food Sciences, University of Bologna, 40127 Bologna, Italy

<sup>2</sup> Department of Life Sciences, University of Modena and Reggio Emilia (Italy)

<sup>3</sup> NBFC, National Biodiversity Future Center, Piazza Marina, 61, 90133, Palermo (Italy)

\* laura.zavatta4@unibo.it

### Abstract

The impacts of climate change on the Castiglione dei Pepoli Abies forest, a peculiar ecological habitat in Tuscan-Emilian Apennines, has been evaluated in order to study potential changing in habitat equilibrium and loss of biodiversity. Since the 1950s, international expeditions have uncovered similarities in meteorological conditions between this forest and weather stations in North Europe. Entomological surveys evaluated biodiversity of hoverflies (Diptera Syrphidae) and other taxa since the sixties. The present study delves into the evolution of hoverfly communities over six decades, correlating diversity trends with meteorological conditions. Temperature and precipitation patterns, alongside vegetation changes, have been scrutinized. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) highlights shades of color that indicate changes in environmental health and vegetation cover and has been employed in this study to track potential vegetation changes over time and explore their impact on the dynamics of hoverfly communities, particularly focusing on genera with phytophagous larvae, which are more sensitive to vegetation alterations. Initial findings suggest declines of species richness in some phytophagous genera, and a parallel increase of other genera, indicating shifts in habitat suitability. While meteorological records indicate a significant temperature increase, precipitation analyses did not reveal a significant trend. This research enhances our understanding of community dynamics of an important bioindicator taxon like hoverfly, guiding the development of conservation strategies and techniques.

### Parole chiave

Sirfidi, impollinazione, NDVI, temperatura, precipitazioni, serie storiche, dinamiche di comunità

### Keywords

Hoverflies, pollination, NDVI, temperature, precipitations, time series, community dynamics

### Introduzione

L'importanza degli insetti impollinatori, responsabili di molti servizi ecosistemici essenziali che concorrono anche al benessere umano è nota da tempo. Le cause del loro declino sono tutt'ora oggetto di studio in tutto il mondo, e sono state individuate principalmente in fattori derivanti dal processo di antropizzazione del territorio e della sua gestione, fattori responsabili della perdita degli habitat naturali (Potts et al., 2010). L'impatto dei cambiamenti climatici sulle comunità ecologiche è sempre più evidente, portando a disturbi nell'equilibrio degli habitat e alla perdita di biodiversità (Settele et al., 2016). I campionamenti entomologici rappresentano uno strumento di inestimabile valore per valutare la salute dell'ambiente, poiché gli insetti interagiscono strettamente con le componenti biotiche e abiotiche degli ecosistemi. Tra di essi, i sirfidi spiccano come eccellenti indicatori ambientali oltre che efficienti impollinatori, grazie alla loro capacità di occupare una vasta gamma di nicchie ecologiche durante lo stadio vitale di larva. Le larve dei sirfidi mostrano infatti una notevole diversificazione nella loro ecologia e dieta, comprendendo

specie con larve afidifaghe, fitofaghe, saproxiliche e xylofaghe. Questa varietà ecologica offre una visione completa dello stato di salute di un ambiente specifico. (Sommaggio et al., 2019). La sopravvivenza di questi insetti bioindicatori è fortemente influenzata dai cambiamenti climatici, i quali possono causare spostamenti e disallineamenti nelle fenologie tra piante e impollinatori, oppure rendere inagibili determinate nicchie ecologiche. (Barendregt et al., 2022; Doyle et al., 2020). Lo studio del territorio e della sua trasformazione nel corso del tempo rappresenta un approccio efficace per valutare le possibili cause che influenzano i cambiamenti nelle popolazioni di impollinatori come i sirfidi. Un'utile metodologia per analizzare l'evoluzione del territorio nel tempo è la caratterizzazione delle piante e delle foreste mediante l'utilizzo dell'Indice di Vegetazione a Differenza Normalizzata (NDVI) (Pesaresi, Mancini, & Casavecchia, 2020; Pesaresi, Mancini, Quattrini, et al., 2020). L'NDVI è un indice calcolato utilizzando informazioni provenienti da immagini satellitari di telerilevamento. Viene calcolato mediante rapporto tra la riflettanza della luce rossa visibile e della luce NIR (Near Infra Red). Questo indice viene utilizzato per monitorare la salute e la distribuzione della

vegetazione, e il suo range di valori va da -1 a +1. Valori bassi di NDVI indicano tendenzialmente assenza di vegetazione (aree urbanizzate o corpi idrici), mentre valori alti indicano presenza di vegetazione sana (Pettorelli et al., 2011). L'NDVI trova applicazioni in diverse discipline scientifiche, incluso lo studio delle interazioni tra insetti e ambiente e l'evoluzione delle loro dinamiche di popolazione nello spazio e nel tempo. (Carrié et al., 2018; Hawkes et al., 2022; Ivošević et al., 2021; McCune et al., 2023; Pettorelli et al., 2011; Rhodes et al., 2022). Questo studio mira ad analizzare l'evoluzione delle dinamiche storiche della sirfidofauna nell'area dell'Abetaia Ranuzzi Segni, nei pressi di Castiglione dei Pepoli. Esso sottolinea un habitat unico per la sua posizione in area mediterranea e le sue condizioni climatiche peculiari. Sin dagli anni Cinquanta, questa area è stata infatti oggetto di spedizioni internazionali durante le quali scienziati olandesi hanno condotto campionamenti botanici ed entomologici, confrontando i dati sulle precipitazioni e le temperature con le stazioni meteorologiche del Nord Europa e riscontrando forti analogie (Dijkstra et al., 1958). Successivamente, sono state condotte ulteriori spedizioni, tra cui una nel 1968 da parte di un'altra squadra olandese (Van Der Goot, 1967), seguite da monitoraggi italiani tra la fine degli anni Ottanta e i primi anni Novanta. Nel periodo 2023-24, sono ancora in corso campionamenti italiani che si concluderanno con la raccolta completa dei dati.

## Materiali e Metodi

### *Campionamento entomologico*

Lo studio della sirfidofauna ha avuto luogo nell'abetina Ranuzzi Segni, che si trova ad una quota di 950 metri s.l.m. a sud di Castiglione dei Pepoli. Questo biotopo è caratterizzato principalmente da boschi di abete bianco (*Abies alba*), faggio (*Fagus sylvatica*) e castagno (*Castanea sativa*). I campionamenti di sirfidi sono stati svolti mediante l'utilizzo di retino entomologico, e sono stati svolti tra il 1989 e il 1994 (Burgio & Daccordi, 1997). I campioni, una volta raccolti, sono stati portati in laboratorio per la preparazione e l'identificazione mediante utilizzo di stereoscopio e chiavi dicotomiche. Nel corso del 2023 e del 2024 i campionamenti sono svolti con la stessa tecnica.

### *Analisi meteorologiche di temperatura e precipitazioni*

I dati giornalieri di temperatura (T) e precipitazioni (P) dal 1989 al 2023 sono stati scaricati dal portale open source ARPAE della regione Emilia-Romagna (<https://datismc.arpae.it/opendata/eraclito/timeseries/mappa.html>) ed elaborati per ottenere medie annuali.

Le medie annuali di T e le P cumulate annue, sono state analizzate mediante il test non parametrico di Mann-Kendall, il quale è in grado di rilevare la presenza di un trend significativo di aumento o diminuzione dei parametri meteorologici e ambientali in esame. Il test è stato eseguito con il software R studio versione 4.3.2. utilizzando le funzionalità del pacchetto Kendall (McLeod, 2005) il livello di significatività è stato impostato a 0.05.

### *Calcolo NDVI*

L'NDVI è stato ottenuto mediante l'utilizzo della piattaforma open source Google Earth Engine (GEE), dalla quale sono state estratte le immagini provenienti dai satelliti Landsat 5 (per i dati dal 1989 al 2011) e Landsat 7, 8 e 9 (per i dati dal 2012 al 2023). Inizialmente, è stata definita la regione di interesse (ROI), circoscritta ad un buffer di 3 km con il centroide posizionato presso il rifugio Ranuzzi Segni. L'intervallo temporale considerato è stato selezionato in base alla fenologia della sirfidofauna, concentrandosi sui mesi primaverili ed estivi (da marzo ad agosto). Successivamente, alle immagini satellitari è stato applicato un algoritmo di *cloud masking* per individuare e rimuovere le immagini parzialmente o completamente oscurate dalle nuvole al momento del passaggio del satellite. Successivamente è stato applicato l'algoritmo per il calcolo dell'NDVI utilizzando la media come riduttore. Le immagini satellitari ottenute da questa procedura sono state sovrapposte, generando un *composite*, ovvero un'immagine unica che raccoglie molteplici informazioni relative alla ROI nel corso del tempo. In seguito, le immagini dei *composite* dei singoli anni sono state importate nell'ambiente QGIS (versione 3.28.2), dove è stata impostata una colorazione a falsi colori. Questo ha permesso di evidenziare le aree associate a terreni non vegetati o scarsamente vegetati, caratterizzate da valori NDVI più bassi, rappresentate in rosso. Le zone con tonalità di verde intermedie sono associate a terreni vegetati mediamente o di transizione, mentre le aree con sfumature di verde brillante indicano una vegetazione densa, come ad esempio le foreste di latifoglie; le tonalità di verde scuro, invece, corrispondono ad aree occupate da conifere (Figura 1). I pixel all'interno della ROI sono stati quindi campionati singolarmente, estraendo il valore di NDVI corrispondente.

## Risultati

I campionamenti entomologici degli anni '90 e del 2023 hanno evidenziato un calo del numero di specie di alcuni generi fitofagi (in particolare *Eumerus*) e un aumento di specie appartenenti a generi come *Cheilosia*.

L'analisi del trend di T ha evidenziato un significativo aumento delle T medie annuali dal 1989 al 2023 (test Mann-Kendall,  $p < 0,001$ ). Le T medie annuali passano infatti da una media di 11°C ad una media di 12.8°C (Figura 2).



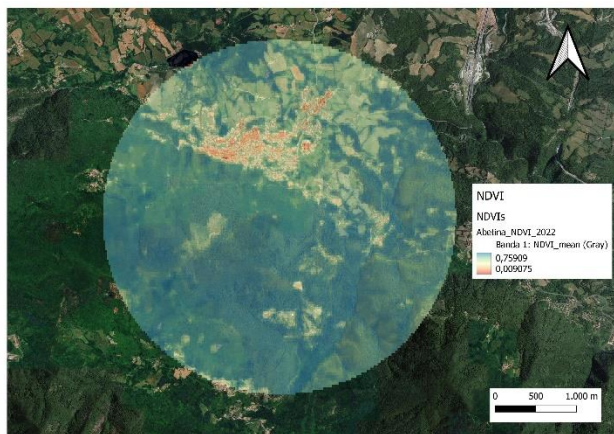


Fig. 1 – La mappa dell'area circostante il rifugio Ranuzzi Segni è delineata entro un buffer con un raggio di 3 km. Le aree evidenziate in rosso indicano valori bassi di NDVI, come ad esempio quelle che si trovano nel centro abitato di Castiglione dei Pepoli. Le zone caratterizzate da varie tonalità di verde, invece, rappresentano aree con diversi gradi di densità vegetativa.

Fig. 1 – The map of the area surrounding the Ranuzzi Segni refuge is outlined within a buffer with a radius of 3 km. The areas in red indicate low NDVI values, such as those found in the town of Castiglione dei Pepoli. Areas characterized by various shades of green represent areas with different degrees of vegetative density.

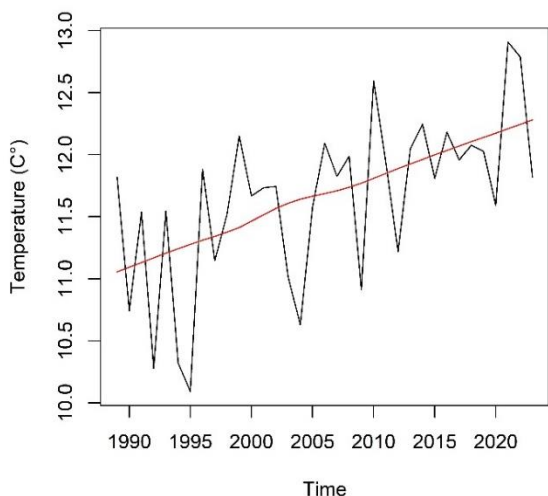


Fig. 2 – Plot che mostra l'andamento crescente delle temperature medie annue dell'aria nel periodo analizzato. La linea rossa indica il trend significativo.

Fig. 2 – Average annual air temperatures in the analyzed period. The red line shows the significant increasing trend.

L'analisi parallela delle P annuali non ha rilevato alcuna significatività ( $p=1$ ), evidenziando l'assenza di un trend (in positivo o in negativo) ed evidenziando tuttavia anni caratterizzati da precipitazioni medie annuali più scarse (2007) e anni con precipitazioni medie annuali più abbondanti rispetto alla media (2013 e 2014). (Figura 3).

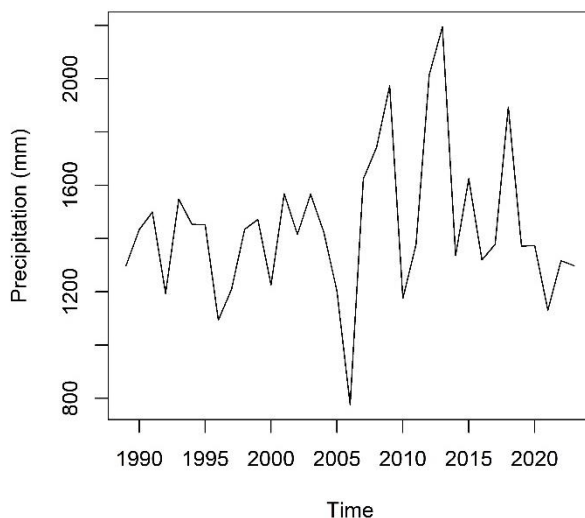


Fig. 3 – Precipitazioni cumulate annue del periodo analizzato. Non si riscontra un andamento significativo nel tempo.

Fig. 3 – Annual cumulative precipitation of the analyzed period. There is no significant trend over time.

Infine, i valori di NDVI campionati all'interno della ROI sono stati categorizzati in base ai range di valori dei pixel del raster come segue:

- -1 - 0,2 = no vegetazione,
- 0,3 - 0,4 = vegetazione scarsa,
- 0,5 - 0,6 = vegetazione media,
- 0,6 - 0,7 = vegetazione densa,
- > 0,7 = foresta.

Tra i risultati ottenuti è interessante notare l'andamento variabile di queste categorie nel corso del tempo: in particolare qui esaminiamo le frequenze della categoria vegetazione media, che all'interno della ROI costituisce la categoria maggiormente rappresentata, e corrisponde ad aree aperte, con prati e vegetazione bassa, le quali presentano valori molto alti tra il 1989 e i primi anni '90, ovvero gli anni dei primi campionamenti, mentre si assesta su frequenze più basse negli anni successivi.

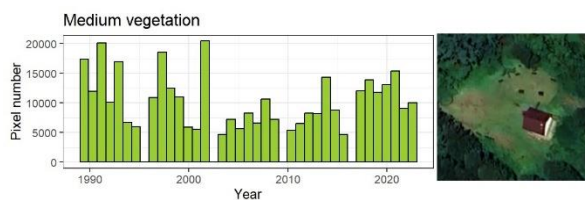


Fig. 4 – Istogramma che mostra la frequenza dei pixel con valori di NDVI ascrivibili alle sopracitate categorie vegetazione media. A destra un esempio di area aperta, caratterizzata dalla presenza di prato, che ricade nel range di media vegetazione.

Fig. 4 – Histogram showing the frequency of pixels with NDVI values for the category average vegetation. On the right, an example of an open area, characterized by the presence of lawn, which falls within the medium vegetation range.

Le frequenze della categoria vegetazione densa, invece, nella ROI corrispondono ad aree con copertura arborea densa presentano frequenze più alte nell'ultimo periodo (Figura 5).

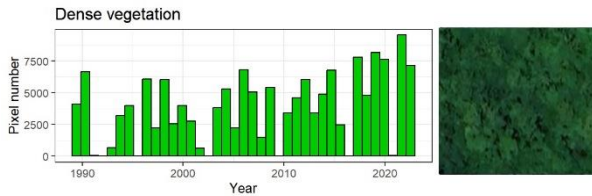


Fig. 5 – Istogramma che mostra la frequenza dei pixel con valori di NDVI ascrivibili alla categoria vegetazione densa. A destra un esempio di area a copertura arborea densa, totalmente occupata dalle chiome degli alberi, che ricade nel range di vegetazione densa.

Fig. 5 – Histogram showing the frequency of pixels with NDVI values in the dense vegetation category. On the right, an example of an area with dense tree cover, totally occupied by the crowns of trees, which falls within the range of dense vegetation.

Le frequenze afferenti alla categoria foreste, d'altro canto, presentano un andamento altalenante presentano frequenze tendenzialmente più alte nel periodo centrale e attestandosi su frequenze più basse negli ultimi anni (Figura 6).

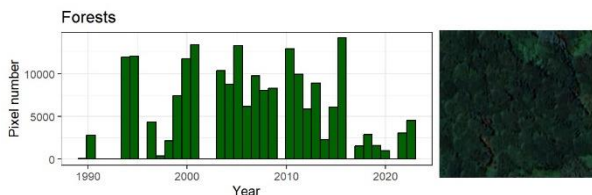


Fig. 6 – Istogramma che mostra la frequenza dei pixel con valori di NDVI ascrivibili alla categoria vegetazione densa. A destra un esempio di area occupata da foresta di conifere, caratterizzata da chiome verde scuro.

Fig. 6 – Histogram showing the frequency of pixels with NDVI values in the dense vegetation category. On the right, an example of an area occupied by coniferous forest, characterized by dark green foliage.

## Conclusioni

I risultati preliminari di questo studio suggeriscono una possibile relazione tra le variabili climatiche ed ambientali e cambiamenti di comunità della sirfidofauna. L'incremento delle temperature medie, che potrebbe aver generato delle fluttuazioni delle frequenze delle varie classi di NDVI, potrebbe aver avviato una serie di cambiamenti ambientali in grado di influenzare e modellare la comunità di sirfidi che popola tali aree. Un aumento delle frequenze di NDVI ascrivibili ad aree di vegetazione densa, e una diminuzione delle frequenze riconducibili a vegetazione media, potrebbe significare che le aree meno densamente vegetate, un tempo occupate da prati o zone di transizione tra prati e foreste (ecotoni) hanno lasciato il posto ad aree a maggiore densità vegetativa, limitando così l'areale dei sirfidi le cui larve

possiedono dieta fitofaga. La contrazione di aree di foresta di conifere potrebbe avvenire in risposta alle temperature crescenti. Con la stagione di campionamento del 2024, i risultati preliminari finora ottenuti e discussi verranno implementati e le ipotesi precedentemente formulate saranno soggette a verifica.

## Bibliografia

- Barendregt, A., Zeegers, T., van Steenis, W., & Jongejans, E. (2022). Forest hoverfly community collapse: Abundance and species richness drop over four decades. *Insect Conservation and Diversity*, 15(5), 510–521. <https://doi.org/10.1111/icad.12577>
- Burgio, G., & Daccordi, M. (1997). Ditteri Sirfidi dell'abetina di Castiglione dei Pepoli. *Bollettino Del Museo Regionale Di Scienze Naturali*, 15(1), 63–73.
- Carrié, R., Lopes, M., Ouin, A., & Andrieu, E. (2018). Bee diversity in crop fields is influenced by remotely-sensed nesting resources in surrounding permanent grasslands. *Ecological Indicators*, 90, 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.054>
- Dijkstra, J., van der Goot, V. S., & Theowald, B. (1958). Biologische excursie naar Castiglione dei Pepoli, juli 1957. *De Levende Natuur*, 61(9), 211–215.
- Doyle, T., Hawkes, W. L. S., Massy, R., Powney, G. D., Menz, M. H. M., & Wotton, K. R. (2020). Pollination by hoverflies in the Anthropocene: Pollination by Hoverflies. In *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 287, Issue 1927). Royal Society Publishing. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0508>
- Hawkes, W. L. S., Walliker, E., Gao, B., Forster, O., Lacey, K., Doyle, T., Massy, R., Roberts, N. W., Reynolds, D. R., Özden, Ö., Chapman, J. W., & Wotton, K. R. (2022). Huge spring migrations of insects from the Middle East to Europe: quantifying the migratory assemblage and ecosystem services. *Ecography*, 2022(10). <https://doi.org/10.1111/ecog.06288>
- Ivošević, B., Lugonja, P., Brdar, S., Radulović, M., Vujić, A., & Valente, J. (2021). Uav-based land cover classification for hoverfly (Diptera: Syrphidae) habitat condition assessment: A case study on mt. stara planina (Serbia). *Remote Sensing*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/rs13163272>
- McCune, F., Normandin, É., Gervais, A., Mazerolle, M. J., & Fournier, V. (2023). Syrphid fly response to urban heat islands varies with functional traits. *Journal of Insect Conservation*, 27(5), 693–705. <https://doi.org/10.1007/s10841-023-00490-y>
- McLeod, A. I. (2005). Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test. *R Package Kendall*, 602, 1–10. <http://www>.
- Pesaresi, S., Mancini, A., & Casavecchia, S. (2020). Recognition and characterization of forest plant communities through remote-sensing NDVI time series. *Diversity*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/D12080313>

- Pesaresi, S., Mancini, A., Quattrini, G., & Casavecchia, S. (2020). Mapping mediterranean forest plant associations and habitats with functional principal component analysis using Landsat 8 NDVI time series. *Remote Sensing*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/rs12071132>
- Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jedrzejewska, B., Lima, M., & Kausrud, K. (2011). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Unforeseen successes in animal ecology. In *Climate Research* (Vol. 46, Issue 1, pp. 15–27). <https://doi.org/10.3354/cr00936>
- Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., & Kunin, W. E. (2010). Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 25, Issue 6, pp. 345–353). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007>
- Rhodes, M. W., Bennie, J. J., Spalding, A., French-Constant, R. H., & Maclean, I. M. D. (2022). Recent advances in the remote sensing of insects. *Biological Reviews*, 97(1), 343–360. <https://doi.org/10.1111/brv.12802>
- Settele, J., Bishop, J., & Potts, S. G. (2016). Climate change impacts on pollination. In *Nature Plants* (Vol. 2, Issue 7). Palgrave Macmillan. <https://doi.org/10.1038/NPLANTS.2016.92>
- Sommaggio, D., Speight, M., & Corazza, C. (2019). *I Ditteri Sirfidi nella bioindicazione della biodiversità. I Sirfidi, il database Syrph the Net e una chiave dicotomica ai generi dei Sirfidi italiani*. <https://www.researchgate.net/publication/331345654>
- Van Der Goot, V. S. (1967). Italian Syrphidae (Diptera). *Entomologische Berichten*, 29(1), 89–96.

# PORTAL OF REGIONAL CLIMATE PROJECTIONS FOR NORTH-EASTERN ITALY: A NOVEL TOOL FOR ADAPTATION IN AGRICULTURE AT LOCAL SCALE

## PIATTAFORMA PROIEZIONI CLIMATICHE PER IL NORD-EST: UN NUOVO STRUMENTO PER L'ADATTAMENTO IN AGRICOLTURA A SCALA LOCALE

Giovanni Massaro<sup>1\*</sup>, Valentina Gallina<sup>2</sup>, Andrea Cicogna<sup>2</sup>, Fabio Zecchini<sup>1</sup>, Francesco Rech<sup>1</sup>, Giorgio Resci<sup>3</sup>, Irene Delillo<sup>1</sup>, and Stefano Micheletti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ARPAV – Dipartimento Regionale Sicurezza del Territorio, U.O. Meteorologia e Climatologia, via G. Marconi 55, 35037, Teolo (PD)

<sup>2</sup> ARPA FVG – SOC Osmer, Funzione Clima Dati e Monitoraggio, via Natisone 43, 33057, Palmanova (UD)

<sup>3</sup> INKODE soc. coop., via P. Gobetti 101, 40129, Bologna (BO)

\* [giovanni.massaro@arpa.veneto.it](mailto:giovanni.massaro@arpa.veneto.it)

### Abstract

A novel tool called *Piattaforma proiezioni climatiche per il Nord-Est* (PPCNE, available at <https://clima.arpa.veneto.it>) was set up by a collaboration between the Arpa from Veneto and Friuli Venezia Giulia regions with the technical support of INKODE Soc. Coop. and fundings by PNRR-PNC. PPCNE proposes climate projections for the North-Eastern Italy elaborating 11 climate indicators: mean, minimum, maximum temperature, tropical nights, summer days, frost days, heat-wave duration, precipitation, precipitation above 95th percentile, consecutive dry days, snow days. These projections are provided in terms of maps and timeseries for different scenarios, with the possibility of downloading data for specific points of interest. This local climate change database can represent the starting point for evaluating the climate change impacts in agriculture, especially with respect to water resource and irrigation management and planning, in an adaptation strategy perspective.

### Parole chiave

Proiezioni climatiche, Nord-Est Italia, caldo, siccità, adattamento

### Keywords

Climate projections, North-East Italy, heat, drought, adaptation

### Introduzione

L'area mediterranea è un *hot spot* del cambiamento climatico dove i rischi climatici sono più forti rispetto ad altre regioni, a causa dei pericoli climatici più accentuati (ad esempio aumento della temperatura, diminuzione delle precipitazioni estive) e della sua peculiare vulnerabilità territoriale (Giorgi and Lionello, 2008; Ali *et al.*, 2022). Il trend di aumento della temperatura media annuale per il periodo 1993-2022 rilevato dalle Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (Arpa) delle Regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia, sostanzialmente omogeneo e statisticamente significativo su tutto il territorio regionale, è in media compreso tra +0.5°C e +0.6 °C per decennio rispetto ai +0.4 °C per decennio stimato per le terre emerse e per lo stesso periodo dalla National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2023). La valutazione del cambiamento climatico e della sua variabilità su scala regionale è cruciale per stimare i potenziali impatti dei cambiamenti climatici in futuro, per lo sviluppo di strategie di adattamento e per valutare l'importanza delle azioni di mitigazione (IPCC, 2022).

Alcuni pericoli climatici come l'aumento delle temperature stagionali, la diminuzione delle precipitazioni estive e l'aumento delle ondate di calore possono comportare degli impatti diretti sull'agricoltura e sulle produzioni alimentari

(MASE, 2023). Ad esempio, l'aumento delle temperature medie stagionali può comportare (Arpa FVG, 2018):

- variazione del panorama colturale: la maggiore disponibilità termica potrà consentire l'introduzione di specie e/o varietà tipiche di climi più caldi a scapito di altre;
- variazione delle fitopatie e aumento della pressione parassitaria: temperature medie maggiori potranno favorire determinate fitopatie a scapito di altre (specie nelle crittogame) e la diffusione degli insetti;
- diminuzione produttiva delle principali colture agricole: aumento della respirazione e concomitante riduzione della stagione di crescita;
- aumento dei danni da gelata: anticipo del risveglio vegetativo primaverile e conseguente maggiore sensibilità ai ritorni di freddo.

La diminuzione delle precipitazioni estive può determinare:

- riduzione delle disponibilità idriche: aumento delle richieste irrigue o diminuzione delle produzioni in caso di risorse idriche limitate;
- variazione panorama colturale: la minore disponibilità idrica potrà determinare la sostituzione di alcune specie o varietà con altre maggiormente tolleranti allo stress idrico e l'eventuale abbandono di alcuni terreni non più vocati;

- riduzione delle sostanze umiche del suolo: diminuzione della produttività e aumento dei costi di produzione per il ripristino delle condizioni fisico/chimiche dei suoli.

Infine, l'aumento della durata delle ondate di calore e degli estremi climatici può provocare:

- aumento dei danni da agenti fisici: aumento delle perdite di produzione dovute a forti piogge, all'incremento della dimensione media della grandine (Manzato et al. 2024), ai colpi di vento, al calore eccessivo ecc.;

- riduzione della produttività zootecnica: gli animali di interesse zootecnico saranno esposti ad effetti sia indiretti (es. crescita e qualità dei foraggi, disponibilità idrica, sopravvivenza di agenti patogeni o dei loro vettori), che diretti (es. un maggior rischio di stress da caldo durante il periodo estivo).

Appare necessario una quantificazione a livello locale dei pericoli climatici e dei possibili impatti nei vari settori socio-economici e in particolare in agricoltura.

Inoltre, lo sviluppo di una strategia di adattamento regionale necessita della caratterizzazione dello stato attuale del clima e degli scenari futuri su scala regionale. La disponibilità di dati e analisi del clima regionale può costituire una base dati omogenea 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).

A questo scopo, un nuovo strumento chiamato Piattaforma proiezioni climatiche per il Nord-Est (PPCNE disponibile all'indirizzo <https://clima.arpa.veneto.it>) è stato sviluppato grazie ad una collaborazione tra l'Arpa del Veneto e del Friuli Venezia Giulia con il supporto tecnico di INKODE SOC. COOP e finanziamenti PNRR-PNC.

PPCNE propone le proiezioni climatiche per l'Italia nord-orientale elaborando 11 indicatori climatici: temperatura media, minima, massima, notti tropicali, giorni caldi, giorni di gelo, durata dell'ondata di calore, precipitazione, precipitazione superiore al 95° percentile, giorni secchi, giorni di neve. Tali proiezioni vengono fornite in termini di mappe e serie temporali, per diverse scale temporali e scenari, con la possibilità di estrarre e scaricare dati per aree o punti di interesse specifici. Alcuni di questi indicatori possono essere utilizzati come proxy di impatti specifici per il settore dell'agricoltura e della produzione alimentare.

## Materiali e Metodi

Per ciascun indicatore sono calcolati i valori medi annuali e trentennali in termini di valore assoluto atteso o di variazione del valore atteso nel futuro rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 (anomalia). Vengono considerati due periodi futuri: 2021-2050 (futuro prossimo) e 2071-2100 (futuro lontano). Gli indicatori sono calcolati su base stagionale o annuale. Vengono presi in considerazione tre diversi percorsi di concentrazione rappresentativa (RCP) (IPCC, 2013): RCP2.6 (forte mitigazione dei gas serra), RCP4.5 (scenario intermedio di stabilizzazione), RCP8.5 (nessuna mitigazione, il cosiddetto *business-as-usual*).

Per questi scenari PPCNE elabora - con un downscaling statistico basato sui dati provenienti dalle reti di stazioni meteorologiche regionali - delle proiezioni utilizzando 5 diversi modelli climatici e una media di ensemble come migliore proiezione per il futuro (Giorgi, 2005). Questi modelli sono stati selezionati tra i modelli climatici regionali (RCM) del progetto EURO-CORDEX 0.11 degs (Jacob *et al.*, 2014). Essi rappresentano lo stato dell'arte dei modelli climatici regionali nell'area europea in termini di risoluzione spaziale e riproducono in modo accurato la climatologia dell'area regionale di interesse nel periodo di riferimento (Arpa FVG, 2018). In tal modo si è ottenuto il dataset seguente di modelli climatici regionali: EC-EARTH\_CCLM4-8-17 (Climate Limited-area Modelling Community); EC-EARTH\_RACMO22E (Royal Netherlands Meteorological Institute); EC-EARTH\_RCA4 (Swedish Meteorological and Hydrological Institute); HadGEM2-ES\_RACMO22E (Royal Netherlands Meteorological Institute); MPI-ESM-LR\_REMO2009 (Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Max Planck Institute for Meteorology).

Il metodo del *linear scaling* (Leander and Buishand, 2007) è stato utilizzato per correggere le variabili di precipitazione e temperatura a livello giornaliero e per ottenere un downscaling statistico elementare. Per le precipitazioni è stato utilizzato il dataset del progetto ArcCIS (Pavan *et al.*, 2019), che fornisce una griglia delle precipitazioni giornaliere sull'Italia centro-settentrionale con un passo di griglia di circa 5 km. Per la temperatura è stata costruita una griglia di temperatura massima e minima mensile di 500 m con un processo di regressione multilineare - che tiene conto dell'altezza, della distanza dalla costa, della morfologia e della pendenza del terreno - partendo da misurazioni giornaliere provenienti dalle reti meteorologiche regionali nel periodo 1976-2005 (Massaro *et al.*, 2022). Il linear scaling è stato applicato a tutti gli indicatori basati su valore assoluto e agli indicatori di anomalia basati su soglia fissa. La dimensione della griglia viene così infittita a 500 m e 5 km, rispettivamente, per gli indicatori basati sulla temperatura e sulle precipitazioni, rispetto a quella originaria di 11 km.

## Risultati e Discussione

Grazie alla PPCNE si può provare che esiste una forte differenza nel segnale di cambiamento climatico nel Nord-Est Italia tra lo scenario a basse emissioni RCP2.6 e lo scenario ad alte emissioni RCP8.5. Si possono poi dedurre alcuni impatti specifici per il settore dell'agricoltura e della produzione agraria, considerando gli indicatori di temperatura, precipitazione, giorni consecutivi secchi e durata delle ondate di calore, di cui questi sono proxy.

Nello scenario senza mitigazione delle emissioni di gas serra (RCP8.5) l'area alpina sarà quella più colpita in termini di aumento della temperatura media rispetto alle aree pianeggianti e costiere, con un aumento nella temperatura media in primavera atteso di oltre +4 °C nel 2071-2100 rispetto al 1976-2005 (Fig. 1).



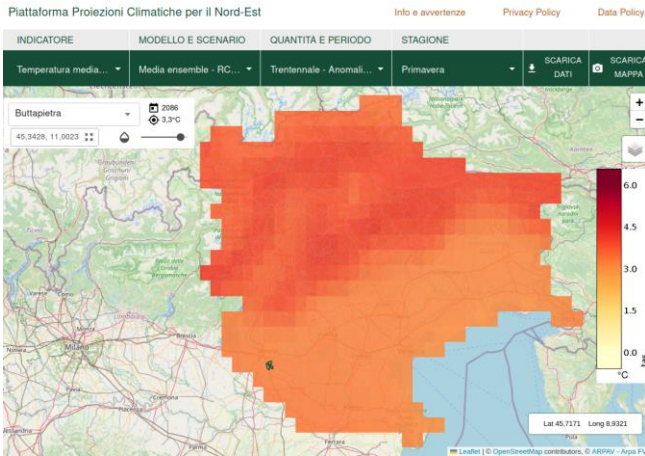


Fig.1 - Distribuzione geografica dell'anomalia di temperatura media (unità: °C) in primavera per il periodo 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 nello scenario RCP8.5 ottenuta dalla media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati statisticamente. Nel comune selezionato di Buttapietra (VR) si osserva un aumento di +3.3°C nella temperatura media primaverile. Fonte: <https://clima.arpa.veneto.it>

Fig.1 - Geographical distribution of mean temperature anomaly (units: °C) in spring for the 2071-2100 compared to the reference period 1976-2005 in the RCP8.5 scenario obtained by ensemble mean of 5 statistically downscaled EURO-CORDEX RCMs. In the selected municipality of Buttapietra (VR) there is an increase of about +3.3°C. From <https://clima.arpa.veneto.it>

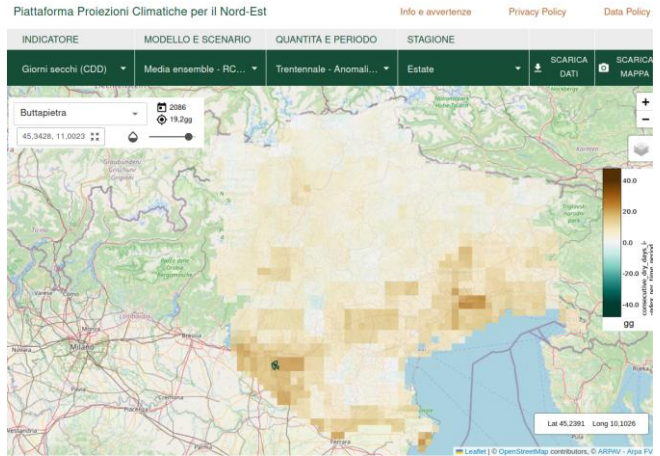


Fig.3 - Distribuzione geografica dell'anomalia di giorni consecutivi secchi (unità: giorni/anno) in estate per il periodo 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 nello scenario RCP8.5 ottenuta dalla media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati statisticamente. Nel comune selezionato di Buttapietra (VR) si osserva un aumento di circa +19 giorni/anno nella durata dei giorni secchi. Fonte: <https://clima.arpa.veneto.it>

Fig.3 - Geographical distribution of consecutive dry days (units: number of days per year) in summer for the 2071-2100 compared to the reference period 1976-2005 in the RCP8.5 scenario obtained by ensemble mean of 5 statistically downscaled EURO-CORDEX RCMs. In the selected municipality of Buttapietra (VR) there is an increase of about 19 days/year. From <https://clima.arpa.veneto.it>

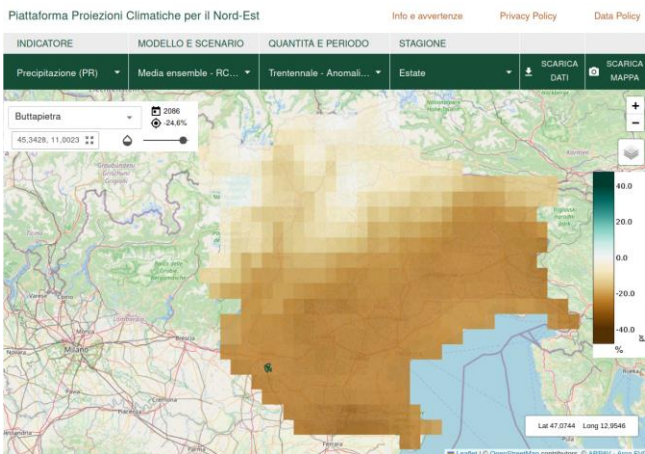


Fig.2 - Distribuzione geografica dell'anomalia di precipitazione (unità: %) in estate per il periodo 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 nello scenario RCP8.5 ottenuta dalla media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati statisticamente. Nel comune selezionato di Buttapietra (VR) si osserva una diminuzione di -25% nella precipitazione media estiva. Fonte: <https://clima.arpa.veneto.it>

Fig.2 - Geographical distribution of mean precipitation anomaly (units: %) in summer for the 2071-2100 compared to the reference period 1976-2005 in the RCP8.5 scenario obtained by ensemble mean of 5 statistically downscaled EURO-CORDEX RCMs. In the selected municipality of Buttapietra (VR) there is a decrease of about -25%. From <https://clima.arpa.veneto.it>

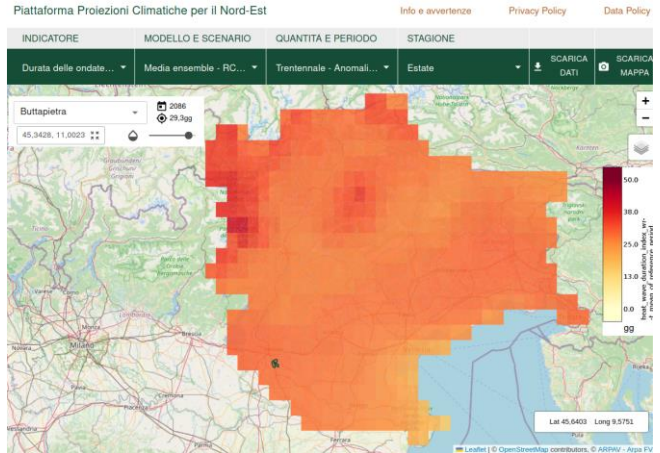


Fig.4 - Distribuzione geografica dell'anomalia di durata delle ondate di calore (unità: giorni/anno) in estate per il periodo 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 nello scenario RCP8.5 ottenuta dalla media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati statisticamente. Nel comune selezionato di Buttapietra (VR) si osserva un aumento di circa +29 giorni/anno nella durata delle ondate di calore. Fonte: <https://clima.arpa.veneto.it>

Fig.4 - Geographical distribution of heatwave duration index anomaly (units: number of days per year) in summer for the 2071-2100 compared to the reference period 1976-2005 in the RCP8.5 scenario obtained by ensemble mean of 5 statistically downscaled EURO-CORDEX RCMs. In the selected municipality of Buttapietra (VR) there is an increase of about +29 days/year. From <https://clima.arpa.veneto.it>



Le aree di pianura saranno le più colpite in termini di diminuzione delle precipitazioni estive (fino a -30%, Fig. 2) e aumento della durata dei periodi secchi (fino a +25 giorni/anno, Fig. 3). Le zone della pianura centrale e le aree alpine saranno le più colpite per quanto riguarda la durata delle ondate di calore, fino a +35 giorni/anno (Fig.4). Se invece si considera lo scenario previsto dall'Accordo di Parigi (RCP2.6) per il periodo 2071-2100 si avrà rispettivamente: un aumento della temperatura media di circa +1°C, una variazione non significativa delle precipitazioni estive e della durata dei periodi secchi; un contenuto aumento di +3 giorni/anno della durata delle ondate di calore.

Se si considera, a titolo di esempio, un'area di interesse per il settore agricolo e agroalimentare come Buttapietra (VR), lo scenario RCP8.5 indica un aumento nella temperatura media primaverile di circa +3.3°C, una diminuzione nelle precipitazioni estive del -25%, un aumento di +19 giorni/anno nella durata dei periodi secchi e un aumento di +29 giorni/anno nella durata delle ondate di calore. La temperatura media estiva è stimata aumentare da circa 23°C del periodo di riferimento 1976-2005 fino a 28°C di fine secolo (Fig. 5).

Queste e molte altre informazioni possono essere ottenute dalla PPCNE selezionando specifici indicatori, scenari di emissione, periodi temporali e aree.

## Conclusioni

Il valore aggiunto della PPCNE è che i dati delle simulazioni regionali sono stati adattati alle specifiche caratteristiche climatiche del territorio, utilizzando i dati delle reti di stazioni meteorologiche regionali, e rendendo quindi accessibili le informazioni su base comunale. Questo approccio consente di tenere conto delle caratteristiche orografiche e geografiche di ogni singolo comune; ciò è ancora più importante per regioni come il Veneto e il Friuli-Venezia Giulia, dove nel giro di poche decine di chilometri si passa da un clima tipicamente mediterraneo a uno con caratteristiche continentali o alpine.

Il database sui cambiamenti climatici su scala locale disponibile con la PPCNE può rappresentare il punto di partenza per valutare gli impatti dei cambiamenti climatici in una specifica area per vari settori socio-economici da parte delle autorità locali e delle parti interessate coinvolte in una prospettiva di strategia di adattamento. L'aumento delle temperature medie stagionali e della durata dei periodi secchi estivi atteso con lo scenario senza mitigazione delle emissioni, la diminuzione delle precipitazioni estive e l'aumento della durata delle ondate di calore potranno avere delle ripercussioni sull'agricoltura, la produzione alimentare e, più nello specifico, sulla gestione e pianificazione della risorsa idrica e dell'irrigazione.

In uno sviluppo futuro, la PPCNE integrerà la climatologia storica proveniente dai dati delle stazioni e nuovi indicatori climatici specifici per particolari settori come quello dell'agricoltura, insieme a una misura dell'incertezza

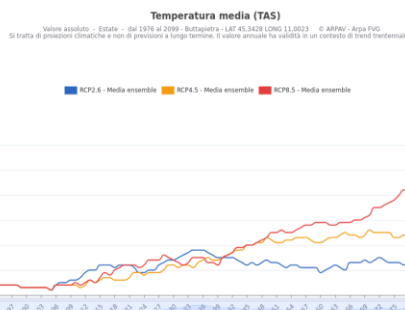


Fig.5 – Serie annuale della temperatura media (unità: °C) in estate a Buttapietra (VR) dal 1976 al 2100: media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati statisticamente nello scenario. Gli anni 1976-2005 rappresentano lo “storico” del modello; dal 2006 i modelli sono forzati con i diversi “scenari” climatici. E’ stata applicata una media mobile di 11 anni. Fonte: <https://clima.arpa.veneto.it>

Fig.5 - Mean temperature (units: °C) in summer at Buttapietra (VR), timeseries from 1976 to 2100: ensemble mean of 5 statistically downscaled EURO-CORDEX RCMs in RCP2.6 (blue line), RCP4.5 (yellow line), RCP8.5 (red line). The 1976-2005 is the historical configuration; from 2006 to 2100 the models are forced with different climate scenarios. A 11-years moving average has been applied to each timeseries.

From <https://clima.arpa.veneto.it>

associata alle proiezioni, attualmente presente solo con la presenza di molteplici simulazioni modellistiche.

## Bibliografia

- Ali E., Cramer W., Carnicer J., Georgopoulou E., Hilmi N.J.M., Le Cozannet G., and Lionello P., 2022: Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2233–2272, doi:10.1017/9781009325844.021.
- Arpa FVG, 2018. 1.2 Variabilità climatica futura, Proiezioni climatiche in FVG Gallina e Giorgi.
- Giorgi F., 2005. Climate change prediction. *Climatic Change*, 73(3), 239-265.
- Giorgi F., and Lionello P., 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and planetary change*, 63(2-3), 90-104.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- IPCC, 2022: Summary for Policymakers [Pörtner H.-O. , Roberts D.C., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Tignor M., Alegría A., Craig M., Langsdorf S. , Löschke S., Möller V., Okem A.(eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.
- 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.
- Manzato A., Fasano G., Cicogna A., Sioni F., Pucillo, A. 2023. Are the relationships between environmental parameters and storm observations climate-change invariant? *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (under review)
- Leander R., and Buishand T. A., 2007. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332(3-4), 487-496.
- MASE, 2023. Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici.
- Massaro G., Gallina V., Cicogna A., Zecchini F., Rech F., Dalan F., Ferrario M.E., Micheletti S., and Lionello P., 2022. Proceedings of the 2a Conferenza Nazionale sulle Previsioni Meteorologiche e Climatiche.
- NOAA National Centers for Environmental information, *Climate at a Glance: Global Time Series*, published June 2023, retrieved on July 4, 2023 from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>
- Pavan V., Antolini G., Barbiero R., Berni N., Brunier F., Cacciamani C., ... and Malaspina T. T., 2019. High resolution climate precipitation analysis for north-central Italy, 1961–2015. *Climate Dynamics*, 52(5), 3435-3453.

# ANALYSIS OF 2000-2023 TIME SERIES OF REMOTELY SENSED DATA AND IMPLICATIONS FOR CROPS IN LOMBARDY

## ANALISI DI SERIE STORICHE 2000-2023 DI DATI TELERILEVATI E IMPLICAZIONI PER LE COLTIVAZIONI LOMBARDE

Paolo Gallo<sup>1</sup>, Lorenzo Craveri<sup>1\*</sup>, Tommaso Porro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ERSAF - Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e le Foreste - Dipartimento Agricoltura Via Pola,12 MILANO

\* lorenzo.craveri@ersaf.lombardia.it

### Abstract

Avoiding water stress, improving crop growth and, more generally, the health of the crop are some of the primary concerns of every farmer. Satellite observation of the Earth has for several years now made it possible to "take snapshots" of plants and soil, evaluating different physiological aspects of the plant. This information is generally used in crop scouting to adapt management practices and to make decisions that lead to greater productivity and sustainability. In this work, the aim was to study remote sensing data on a broad spatial and temporal scale as a proxy for the productive potential of crops, or the biomass production of wild vegetation in order to both observe trends and anomalies within the Lombardy region, but also to assess whether environmental and climatic conditions are adequate to support the photosynthetic activity of the vegetation present. 24 years of satellite observations were correlated with regional agricultural yield statistical series to try to highlight the main implications for agriculture in Lombardy.

### Parole chiave

Telerilevamento, stress idrico, colture, NDVI, evapotraspirazione

### Keywords

Remote sensing, water stress, crops, NDVI, evapotranspiration

### Introduzione

Il telerilevamento si può definire come il rilievo e lo studio di oggetti e fenomeni attraverso l'uso di strumenti a bordo di piattaforme, distanti (*non in diretto contatto*) dall'elemento osservato, in grado di misurarne in particolare l'energia elettromagnetica emessa o riflessa. La principale sorgente di eccitazione energetica utilizzata per illuminare la superficie terrestre è la radiazione solare. Quando la radiazione solare attraversa l'atmosfera una frazione dell'energia irraggiata viene assorbita, riflessa e/o trasmessa dagli oggetti.

Il telerilevamento in agricoltura è una scienza applicata con finalità diagnostico-investigative che permette di ricavare informazioni, qualitative e quantitative, sulle colture poste a distanza da un sensore mediante misure di radiazione elettromagnetica (Di Gennaro et al., 2019).

L'osservazione della Terra da satellite consente, quindi, di "scattare delle istantanee" delle piante e del suolo, stimando, ad esempio, il deficit traspirativo, l'umidità del suolo, lo stato di benessere generale della pianta in base al "vigore" della coltura. La conoscenza di questi dati può essere di supporto per alcune scelte dell'agricoltore (*irrigazione, fertilizzazione, previsioni di resa ecc.*). La parte epigea della vegetazione, coltivata o spontanea, rappresenta l'interfaccia con l'atmosfera. Se si riesce ad esempio a definire la domanda evapotraspirativa di una coltura, o della vegetazione naturale, si possono ottenere informazioni dirette sullo stato di stress o di benessere della pianta. Al fine di avere un dataset significativo sia su scala spaziale che temporale sono stati impiegati 23 anni di dati satellitari (2001-2023) ottenuti dai sensori Modis a bordo dei satelliti Aqua e Terra sul territorio Lombardo. Modis, acronimo

di **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer**, è un sensore multispettrale che acquisisce immagini della Terra in trentasei bande spettrali, che coprono un intervallo di lunghezze d'onda da 0,4 a 14,4  $\mu\text{m}$ . Si tratta di sensori che riescono ad acquisire dati su una banda più ampia dei satelliti Landsat e Sentinel ma con una risoluzione inferiore. Oltre ad un maggiore numero di bande al quale corrisponde uno spettro di osservazione più ampio, possiedono una profondità storica superiore ad altre costellazioni, consentendo di ricostruire serie temporali pluriennali di oltre vent'anni. Modis, inoltre, mette a disposizione a chiunque una serie di prodotti che si possono definire "ready to use", come ET0 (*Evapotraspirazione reale*), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*), PPN (*Produzione Primaria Netta*) frutto di algoritmi condivisi con la comunità scientifica e dell'integrazione di dati satellitari provenienti da altre costellazioni come quelli meteorologici.

Nel presente studio si è cercato di evidenziare le principali implicazioni sulla conoscenza di 2 specifici prodotti Modis NDVI, ET0, che possono e potranno avere per l'agricoltura lombarda. Questi indici sono stati presi in considerazione non solo per il loro importante significato in ambito agricolo ma anche perché si è voluto valutare e confrontare con dati di campo sia un indice che deriva da un semplice rapporto tra bande (NDVI) e sia uno (ET0) che deriva da un complesso algoritmo (*basato sull'equazione di Penman-Monteith*) e quindi integrazione tra più variabili tutte misurate da satellite. Nel dettaglio si è voluto approfondire se i 2 indici telerilevati, nonostante la risoluzione non di dettaglio (250 metri) possono essere utilizzati come proxy del fabbisogno,

dello stress idrico e della resa agronomica di alcune importanti colture presenti nel territorio lombardo, in generale per fornire informazioni utili per supportare la modellazione delle colture e come modelli predittivi.

Ad ulteriore supporto della nostra indagine è la costante richiesta, da parte della Commissione Europea, di utilizzare le più moderne tecniche a disposizione per il supporto alla moderna agricoltura per lo sviluppo della cosiddetta Agricoltura 4.0.

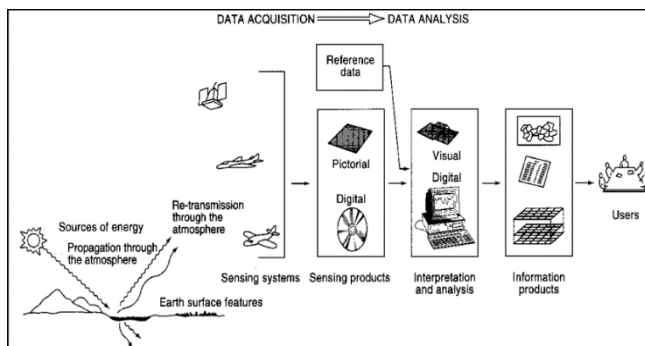


Fig.1 – Gli elementi principali del telerilevamento. (Lillesand and Kiefer, 1994)

Fig.1 – Elements of remote sensing (Lillesand and Kiefer, 1994).

## Materiali e Metodi

Il work flow utilizzato nel presente studio può essere suddiviso nei seguenti 4 step:

1. Download ed elaborazione di 23 anni di dati satellitari;
2. Creazione di maschere di aree agricole significative per il territorio lombardo in cui negli ultimi 23 anni non si siano verificati cambi di uso del suolo;
3. Indagini statistiche delle rese agricole per le colture individuate negli ultimi 23 anni;
4. Analisi delle possibili correlazioni tra gli indici vegetazionali derivati da satellite e le statistiche delle rese agricole.

### Step n°1

Mediante l'applicazione web **Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEEARS)** sono stati scaricati su tutto il territorio lombardo i prodotti in formato raster georeferenziato **NDVI (MOD13C1 CMG)** e **ET0 (MOD16A2GF/A3GF)** derivati dai dati di osservazione dei sensori Modis, e successivamente processati e scalati ogni 16 giorni per l'indice NDVI e ogni 8 giorni per ET0. Entrambi i prodotti sono stati scaricati per il periodo che va dal primo gennaio 2001 al 31 dicembre 2023.

Tutti i raster sono stati oggetto di una prima elaborazione automatica con lo scopo di rimuovere i pixel che presentano valori al di fuori dei range di validità e per bilanciare il fattore di scala.

Per ciascuno dei 2 prodotti è stato costruito un geodatabase multidimensionale in grado di gestire la variabile tempo che è stata associata ai raster quando sono stati inseriti all'interno delle 2 banche dati.

Tramite algoritmi di aggregazione dai 2 geodatabase sono stati prodotti i seguenti raster multidimensionali:

- NDVI medio per ciascun mese e per ciascun anno dal 2001 al 2023
- NDVI massimo per ciascun mese e per ciascun anno dal 2001 al 2023
- NDVI medio per il periodo maggio-settembre per ciascun anno dal 2001 al 2023
- NDVI medio per il periodo aprile-agosto per ciascun anno dal 2001 al 2023
- NDVI massimo per il periodo aprile-agosto per ciascun anno dal 2001 al 2023
- NDVI massimo per il periodo maggio-settembre per ciascun anno dal 2001 al 2023
- ET0 complessivo per ciascun mese e per ciascun anno dal 2001 al 2023
- ET0 complessivo per il periodo aprile-agosto per ciascun anno dal 2001 al 2023
- ET0 complessivo per il periodo maggio-settembre per ciascun anno dal 2001 al 2023

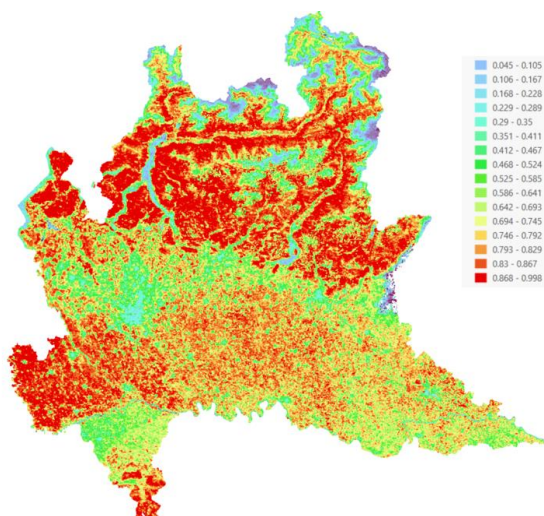


Fig.2 – Mappa dei valori massimi dell'indice NDVI luglio 2022

Fig.2 – Map of max value of NDVI index July 2022

### Step n°2

Al fine di valutare la possibile correlazione tra l'indice NDVI, l'ET0 e la resa agraria nel periodo 2001-2023 sono state scelte due colture, mais (*granella+ceroso*) e riso per la loro importanza dal punto di vista estensivo e una, la vite, per la sua importanza economica.

Poiché la superficie coltivata può cambiare di anno in anno a causa di differenti fattori, tra cui la pressione antropica o l'avvicendamento, per ciascuna delle 3 colture in esame si è cercato, utilizzando differenti dataset di dati spaziali di Land-use, di mascherare le sole aree che durante il periodo 2001-2023, si suppone siano state sempre coltivate con la medesima coltivazione.

Per il riso e la vite è stato eseguito un intersect sui seguenti strati informativi:

- Dusaf 1 (anno 1999)
- Dusaf 2 (anno 2003)

- Dusaf 3 (anno 2007)
- Dusaf 4 (anno 2012)
- Dusaf 5 (anno 2015)
- Dusaf 6 (anno 2017)
- Dusaf 7 (anno 2021)

Mentre per la mappatura delle aree coltivate a mais (informazione non contenuta nei Dusaf) sono stati impiegati:

- Piano colturale grafico 2010
- Piano colturale grafico 2015
- Piano colturale grafico 2018
- Piano colturale grafico 2021
- Piano colturale grafico 2022
- Piano colturale grafico 2023

### Step n°3

Per le tre colture oggetto di studio sono stati raccolti i dati statistici per gli anni 2001-2023 inerenti alle rese agricole ufficiali di ISTAT presenti anche negli archivi di Regione Lombardia. Dai dati, dopo opportuna selezione e omogeneizzazione, è stata ricavata la resa per ettaro, parametro che è stata confrontato con i dati satellitari.

### Step n°4

All'interno delle maschere create su ciascuna cultura è stato analizzato l'andamento dell'indice NDVI e della ET0. Nello specifico si è studiata la loro variazione annuale nel periodo che mediamente si estende dalla semina al raccolto, tra maggio e settembre per il riso e tra aprile ed agosto per il mais e la vite.

Per studiare la relazione tra i dati ottenuti e i dati annuali delle rese agricole è stato calcolato il **coefficiente di determinazione R<sup>2</sup>**, mentre per valutare le anomalie nelle serie annuali dei dati sono stati calcolati gli **indici di anomalia SAI**.

### Conclusioni

Il monitoraggio della produzione agricola può aiutare nella pianificazione e previsione dei rendimenti dei raccolti, soprattutto di questi tempi, poiché l'agricoltura si trova ad affrontare condizioni climatiche mutevoli, siccità a lungo termine e brevi periodi di precipitazioni. La resa dei prodotti agricoli è essenziale per la sicurezza alimentare globale e il monitoraggio continuo dovrebbe fornire informazioni sulle minacce alla produzione. Una stima accurata e quanto più tempestiva possibile della resa è molto importante per una corretta politica commerciale, in particolare sulle commodities.

In questo articolo si è voluto misurare la capacità per alcuni prodotti satellitari "ready to use" con risoluzione non spinte (250 metri) di stimare la resa ma anche il fabbisogno idrico di alcune delle culture più importanti in Lombardia su un numero di anni climatologicamente significativi.

I dati telerilevati evidenziano un andamento interannuale con fluttuazioni sempre più rilevanti nel corso degli ultimi 23 anni, e una tendenza di evapotraspirazione in aumento per riso e vite mentre in leggera diminuzione per il mais. Tutte e 3 le colture studiate mostrano forti anomalie negative nel

2003, nel 2006 e nel 2022 seppure con valori molto differenti tra loro (vedi Fig.3).

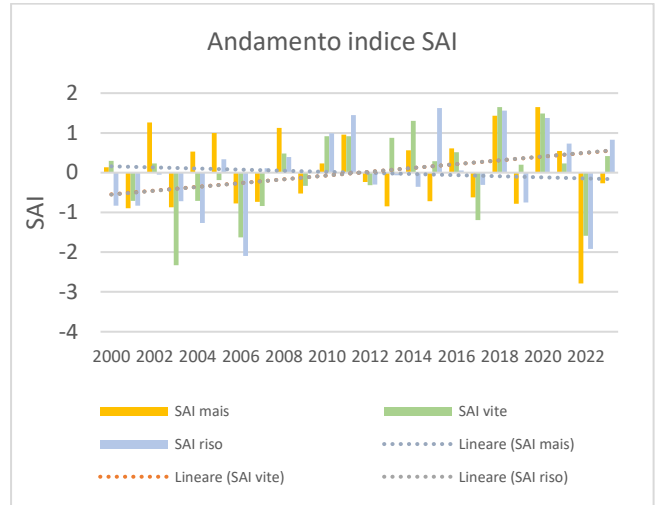
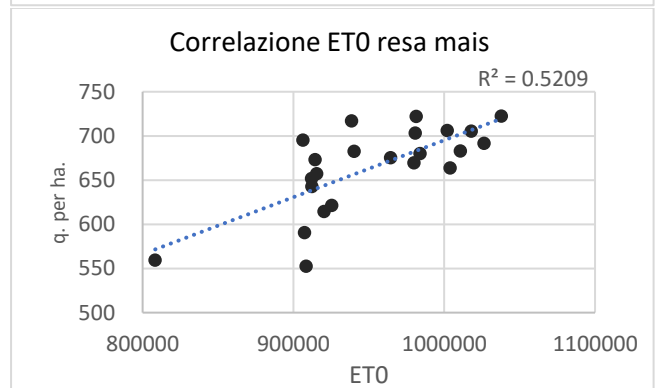
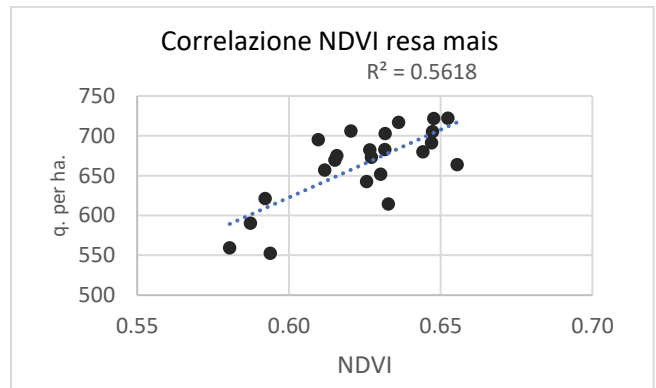


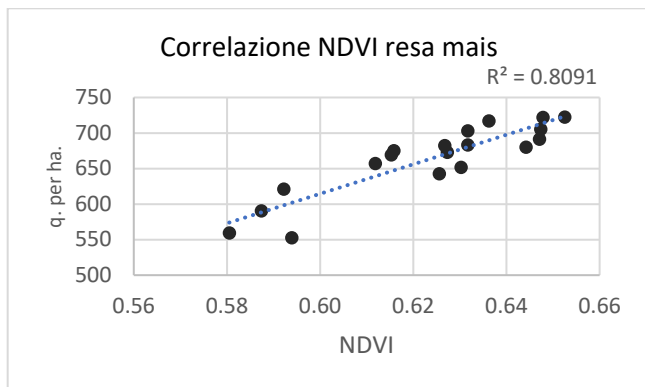
Fig.3 – Il grafico mostra l'andamento dell'indice SAI calcolato sui valori di ET0 dal 2000 al 2023 per le 3 colture studiate. Sono ben evidenti le anomalie negative del 2003, 2006 e del 2022.

Fig.3 – The plot shows the trend of SAI ET0 index from 2000 to 2023 for the 3 studied crops. Are very clear 2003, 2006, 2022 anomalies.

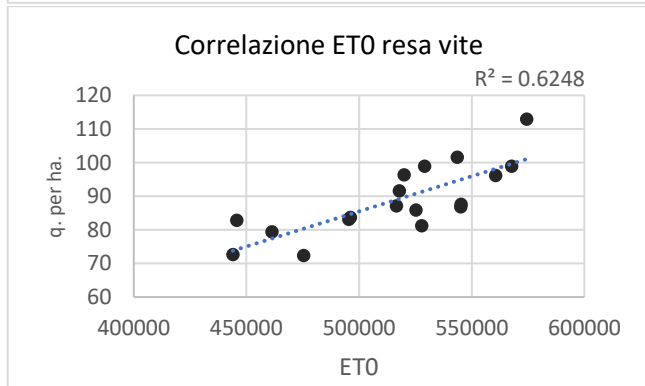
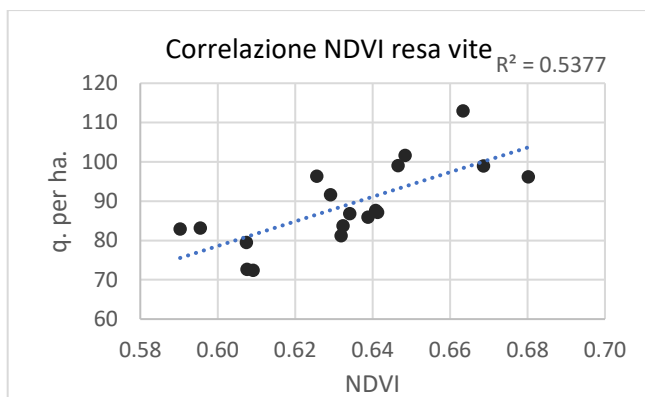
I risultati mostrano per il mais che i cambiamenti di resa si riflettono in variazioni sensibili dei valori di NDVI R<sup>2</sup>=0,56 e ET0 R<sup>2</sup>=0,52.



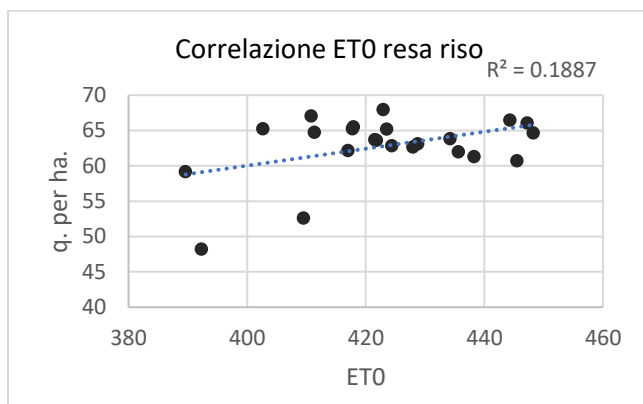
Se non vengono presi in considerazione gli anni “outlier” (2001-2005-2011-2017) la correlazione si fa più robusta NDVI  $R^2 = 0,81$  in questo modo è possibile stimare con una buona precisione quanto mediamente in Lombardia la resa di mais varia ad un aumento o diminuzione di 0,1 nel valore dell’indice NDVI.



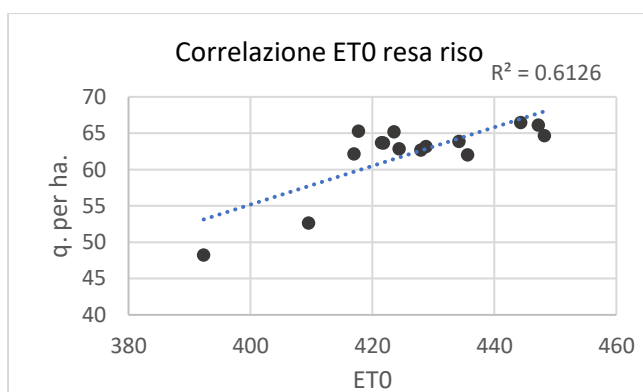
Un’accuratezza simile a quella del mais è stata riscontrata nello studio delle aree coltivate a vigneto.



Le medesime analisi, tuttavia, non mostrano una correlazione ugualmente significativa per il riso, NDVI  $R^2 = 0,12$ , ETO  $R^2 = 0,18$  dove si riscontrano i rapporti più deboli o, in alcuni casi, ambigui a causa di un numero maggiore di correlazioni negative.



La ragione di tali relazioni incoerenti può essere legata a molti fattori, tra cui il particolare ciclo vegetativo, tutto ciò suggerisce la necessità di studi più dettagliati. La correlazione si fa più robusta se non vengono presi in considerazione gli anni “outlier” (2003-2004-2006-2009-2010-2011-2012-2019).



I risultati ottenuti dimostrano in modo inequivocabile che i dati satellitari MODIS possono contribuire a migliorare l'accuratezza della previsione della resa di alcune importanti colture a livello regionale e fornire robuste informazioni sul fabbisogno e il consumo idrico delle colture. Sono tuttavia ancora necessarie ulteriori ricerche per convalidare e rafforzare le equazioni nei diversi scenari meteorologici, migliorando la “robustezza” della relazione tra le variabili utilizzando dati ausiliari e informazioni puntuali.

### Bibliografia

- Sharma, A., Jain, A., Gupta, P., & Chowdary, V. (2020). Machine learning applications for precision agriculture: A comprehensive review. *IEEE Access*, 9, 4843-4873.
- Grisso, R. D., Alley, M. M., McClellan, P., Brann, D. E., & Donohue, S. J. (2005). Precision farming. a comprehensive approach.
- Ban et al., 2016. Using MODIS data to predict regional corn yields *Remote Sens.*, 9 (1) (2016), p. 16
- Becker-Reshef et al., 2010. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data.



- Remote Sens. Environ., 114 (2010)
- Belward and Valenzuela, 1991. Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries  
Kluwer Academic, Dordrecht, the Netherlands (1991)
- Bognár et al., 2011. Yield forecasting for wheat and corn in Hungary by satellite remote sensing. Int. J. Remote Sens., 32 (17) (2011)
- He et al., 2018. Regional crop gross primary productivity and yield estimation using fused Landsat-MODIS data. Remote Sens., 10 (3) (2018)
- Huete et al., 2002 Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices Remote Sens. Environ., 83 (2002), pp. 195-213

# QUANTIFYING WATER AVAILABILITY IN AGRICULTURAL AREAS USING GEOFRAME: THE CASE OF THE NOCE RIVER BASIN

## VALUTAZIONE DELLA DISPONIBILITÀ IDRICA PER L'AGRICOLTURA CON IL FRAMEWORK GEOFRAME: IL CASO DEL BACINO DEL NOCE

Daniele Andreis<sup>1,3\*</sup>, Giuseppe Formetta<sup>2</sup>, Stefano Corradini<sup>1</sup>, Riccardo Rigon<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Fondazione Edmund Mach, San Michele all'Adige (Italy)

<sup>2</sup> Department of Civil, Environmental and Mechanical Engineering, University of Trento, Trento (Italy)

<sup>3</sup> Center Agriculture, Food and Environment (C3A), University of Trento, Trento (Italy)

\* daniele.andreis@fmach.it

### Abstract

The increasing frequency of droughts in Northern Italy has significantly impacted agriculture in recent years. A critical challenge in the near future is enhancing the ability to assess and predict freshwater availability at the district level for agricultural purposes, while addressing concurrent water needs. This paper uses a semi-distributed hydrological model to estimate the availability of water in the root zone over recent years, during which several droughts have occurred. The study area is the Trentino region, specifically the Noce River Basin, home to significant irrigated apple orchards. Results are preliminary and represent an initial step toward developing an open-source, cutting-edge modeling tool designed to support decision-making for better water allocation during drought periods.

### Parole chiave

Modellazione idrologica ad alta risoluzione; disponibilità idrica superficiale/sotterranea; carenza idrica;

### Keywords

High resolution hydrological modeling; surface/subsurface water availability quantification; water scarcity;

### Introduction

Agriculture needs water to maintain both production levels and quality, and so the primary sector is definitely the major consumer of the available freshwater (FAO, 2020; European Environment Agency, 2019). In the past, the Alpine Region was characterized by an abundance of freshwater, but nowadays, Global Warming and an increase of water demand by several sectors (mainly tourism and energy production) compete for the resource and decrease the amount of water available for agriculture (European Environment Agency, 2018; Beniston and Stoffel, 2014; Beniston, 2006; Di Piazza and Eccel, 2012; Crespi et al., 2020). Europe has experienced several droughts in the last years, and the agricultural sector has recorded damage of billions of euros (Knutzen et al., 2023). Therefore it is strategic to develop practices that allow for using the fewer available resources and, at the same time, deploy informatics and science to keep track of the water demand (FAO, 2013). This study aims to estimate water availability in the various reservoirs (e.g. snow water, root zone, groundwater) as a first step for the effective water management and the promotion of sustainable development of the region.

### Materials and Methods

#### Study area and Data

The area under study, the Noce River Basin, is located in the province of Trentino in northeastern Italy, at the southern edge of the Alps. The basin spans 1,367 km<sup>2</sup> with elevations ranging from a minimum of 210 m above sea level (asl) to a maximum of 3,769 m asl. It receives an average annual

precipitation of about 1,170 mm and maintains a mean temperature of 3.9°C (Bellin et al., 2016).

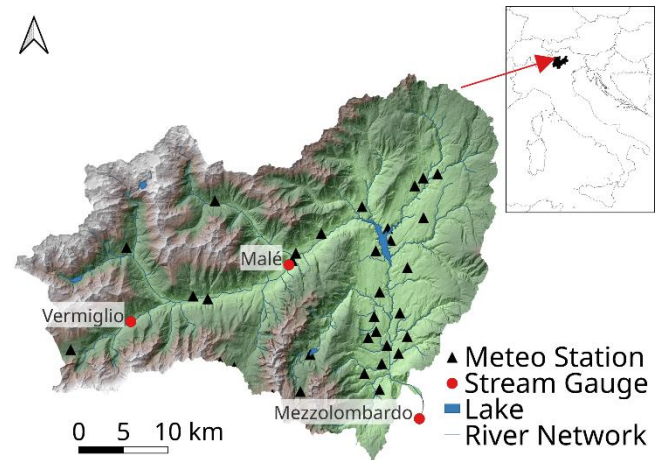


Fig.1 - Il bacino del fiume Noce con reticolo idrografico, idrometri e stazioni meteo.

Fig.1 - The Noce River Basin, with the river network and lake, the stream gauge and meteorological station.

It's an Alpine basin with several features that vary by zone and water usage:

- (i) The upper stream portion of the basin is characterized by the presence of glaciers that significantly influence the hydrological regime.
- (ii) Across the basin, several dams have been constructed for energy production. These dams significantly affect water discharge and play a crucial role in regulating water flow and supporting energy generation (Majone et al., 2016; Maran et

al., 2023; Stucchi et al., 2023). (iii) In the downstream part of the basin, agriculture is a key component of the local economy. Over 3,000 farms and more than 6,000 hectares of cultivated land, particularly intensive irrigated apple orchards, contribute significantly to the local GDP and employment (ISPAT - Istituto di Statistica della Provincia Autonoma di Trento, n.d.). The allocation and management of water rights in these districts are vital for balancing agricultural needs with other priorities (Zambotti, 2020).

(iv) The basin also hosts several well-known tourist destinations that attract visitors for both winter and summer holidays. Seasonal population fluctuations in these areas amplify the demand for freshwater resources for both domestic and recreational purposes (Favargiotti et al., 2022). The meteorological data used in this study, including precipitation and temperature, were collected from 37 meteorological stations, with elevations ranging from 200 m to 2300 m above sea level. These data were provided by Meteo Trentino (Meteotrentino, Provincia Autonoma di Trento-, n.d.) and Fondazione Edmund Mach (Fondazione Edmund Mach, 2022). Additionally, stream gauge data were obtained from the Ufficio Dighe of the Autonomous Province of Trento (Ufficio Dighe, Provincia Autonoma di Trento, n.d.). The period analyzed spans from January 1, 2017, to September 15, 2022, encompassing all utilized data. This time frame includes two significant storm events: the Vaia storm in October 2018 (Cavaleri et al., 2019), and the Alex Storm in October 2020 (Ginesta et al., 2023). It also covers a major drought that affected Northern Italy in 2019 and in 2022 (Toreti et al., 2022). The digital elevation model, derived from lidar data, is available online and was also provided by the Autonomous Province of Trento (Provincia Autonoma di Trento, n.d.).

### Methodologies

To conduct the analysis, several steps are required, most of which are accomplished using tools within the GEOframe environment (Formetta et al., 2014a). GEOframe is an open source framework developed for hydrological analysis and modeling; it contains several modules that can be combined to build a modeling solution tailored for any purpose. The initial step involves geomorphological analysis performed using the Horton Machine (Abera et al., 2014), which results in the delineation of the river network and the hydrological response units (HRUs) that comprise the basin. These HRUs were extracted with a threshold of 10 km<sup>2</sup>. The second step involves evaluating the environmental variables at representative points of the HRUs, using kriging for temperature and precipitation (Formetta et al., 2014b; Bancheri et al., 2018). For radiation and potential evapotranspiration, the GEOframe module was employed, utilizing the Priestley-Taylor formula (Priestley and Taylor, 1972; Bottazzi et al., 2021). For this study, the modularity of GEOframe facilitated the construction of a model by combining modules developed by Formetta et al. (2014b) for the snow compartment with modules initially developed by Bancheri (2017) for other compartments (canopy, root zone, groundwater) and update for this study. The result is a model

of the water budget of the river basin. This model incorporates several parameters that require optimization through calibration. Consequently, the time series data have been divided into three parts: the first as spinoff for the model, from 2017-01-01 to 2017-03-31, one for calibration, from 2017-04-01 to 2019-12-31, and one for validation, from 2020-01-01 to 2023-09-01. Spatially, the basin was divided into three sub-basins, one for each stream gauge, to facilitate a sequential calibration (Nkiaka et al., 2017). This calibration, based on measured discharge data, employed the 'Let us Calibrate' (LUCA) method (Hay and Umemoto, 2007), a strategy that utilizes the Shuffled Complex Evolution (SCE) global search algorithm. The Kling-Gupta Efficiency (KGE) (Gupta et al., 2009) served as the objective function. Due to the presence of a large dam, which significantly influences discharge, calibration was performed only at the two upper stream gauges in the last sub-basin (Avesani et al., 2021). Subsequently, the KGE and other goodness of fit metrics, such as the Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970) and its logarithmic form (NSE<sub>log</sub>) (Krause et al. 2005), were evaluated during the validation period. Additionally, the methods proposed by Azimi et al. (2023) and Addor et al. (2017) were also applied to evaluate predictive uncertainty. In addition to discharge data, the model produces several outputs characterizing all compartments, with the most important for agriculture being the actual evapotranspiration, which comprises the sum of evapotranspiration from the canopy and the root zone water storage.

### Results and Discussion

The model performs well in terms of the KGE, with values exceeding 0.8 for both calibration and validation phases—being a model generally considered good if the KGE value is greater than 0.75 (Kling et al., 2012). Additionally, the NSE consistently exceeds 0.5 (Moriassi et al., 2007) and according to the classification presented the modeling effort had good results. These results indicate not only a robust capture of peak discharge values but also an accurate assessment of low discharge levels.

As the model provides all the main variables of the hydrological cycle, it is possible to perform the water balance for each Hydrological Response Unit (HRU), as shown in Figure 2.

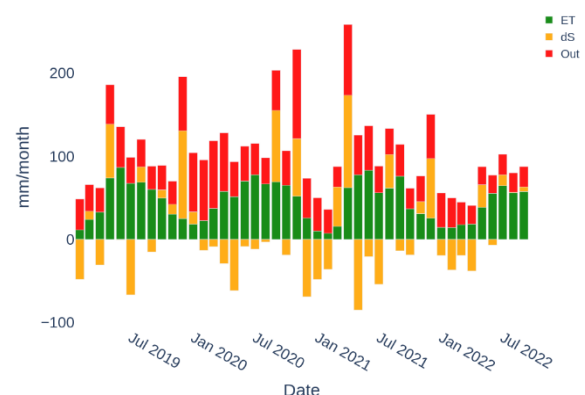


Fig.2 - Esempio di bilancio idrico mensile per una HRU espresso in millimetri per mese, evapotraspirazione (ET), variazione contenuto dei serbatoi (dS), portata in uscita (Out). Il valore positivo delle barre equivale alle precipitazioni. Il valore dS include le variazioni dovute alla neve.

Fig.2 – An example of a monthly water balance for an HRU, expressed in millimeters per month, evapotranspiration (ET), water content variation (dS), discharge (Out). The positive bars sum up the total precipitation and dS includes snow.

Within the analyzed time window, two severe droughts occurred, one in 2019 and another in 2022. Analysis of the mean root zone soil moisture values for August each year (as shown in Figure 3) reveals that these two years exhibited the lowest mean values. These droughts were caused by anomalies in precipitation; notably, the 2022 drought was particularly influenced by a more severe winter snow drought, similar to what was observed in the nearby Po River basin (Avanzi et al., 2024). This is evident in the very low discharge values observed during spring and summer, a period when the contribution of snowmelt to total discharge is typically predominant. The violin diagram illustrates distinct behaviors: the 2019 drought shows a spike oriented towards a positive anomaly, whereas the 2022 drought trends towards a negative one.

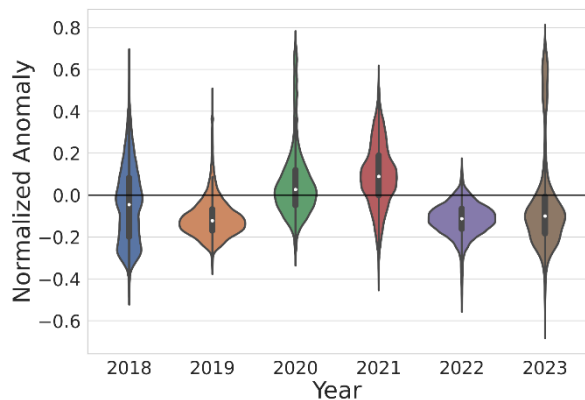


Fig.3 - Distribuzione delle anomalie normalizzate del contenuto d'acqua nella root zone in agosto.

Fig.3 - Distribution of the normalized anomaly of the root zone water content for August.

These differences are also reflected in the spatial distribution of the anomaly, which is quite different in the 2 years, as seen in figure 4 and 5.

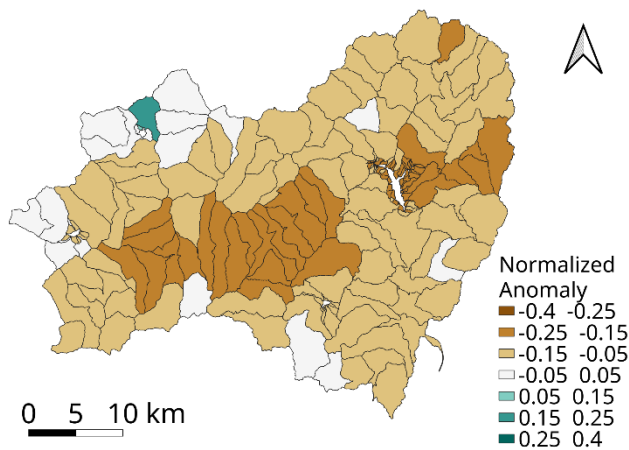


Fig.4 - Media delle anomalie normalizzate del mese di Agosto 2019 per il contenuto d'acqua nella root zone nelle HRUs.

Fig.4 - Mean normalized anomaly of the root zone water content for august 2019 for each HRUs .

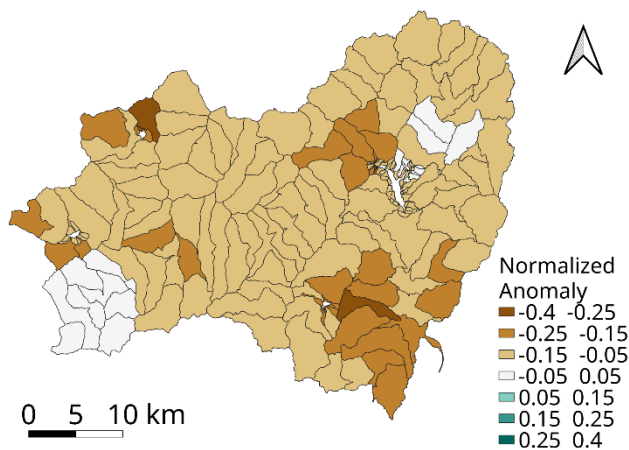


Fig.5 - Media delle anomalie normalizzate del mese di Agosto 2022 per il contenuto d'acqua nella root zone nelle HRUs.

Fig.5 - Mean normalized anomaly of the root zone water content for august 2022 for each HRUs .

## Conclusions

In this paper, we present the preliminary results of a water availability analysis conducted using the GEOframe framework on the Noce Basin, focusing on water availability for agriculture. This tool provides an estimation of the water balance for each HRU with satisfactory precision as determined by the discharge prediction. These outputs can be used for various purposes. From an irrigation perspective, this analysis represents an initial step towards estimating water needs within an irrigation district. The next steps will include validating the data against ground-based measurements (e.g., cosmic ray neutron sensor, time domain reflectometer) and remote sensing data. We will also attempt to refine the HRU to focus on areas of high interest.

## References

- Abera W., Antonello A., Franceschi S., Formetta G., Rigon R., 2014. The uDig spatial toolbox for hydro-geomorphic analysis.
- Addor N., Newman A.J., Mizukami N., Clark M.P., 2017. The CAMELS data set: catchment attributes and meteorology for large-sample studies. *Hydrology And Earth System Sciences*, 21: 5293–5313. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-21-5293-2017>.
- Avanzi F., Munerol F., Milelli M.M., Gabellani S., Massari C., Giroto M., Cremonese E., Galvagno M., Bruno G., Morra U., Rossi L., Altamura M., Ferraris L., 2024. Winter snow deficit was a harbinger of summer 2022 socio-hydrologic drought in the Po Basin, Italy. *Communications Earth & Environment*, 5(1). doi:<https://doi.org/10.1038/s43247-024-01222-z>.
- Avesani D., Galletti A., Piccolroaz S., Bellin A., Majone B., 2021. A dual-layer MPI continuous large-scale hydrological model including Human Systems. *Environmental Modelling and Software*, 139: 105003–105003. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105003>.
- Azimi S., Massari C., Formetta G., Barbetta S., Tazioli A., Fronzi D., Modanesi S., Tarpanelli A., Rigon R., 2023. On understanding mountainous carbonate basins of the Mediterranean using parsimonious modeling solutions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(24): 4485–4503. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-27-4485-2023>.
- Bancheri M., 2017. A flexible approach to the estimation of water budgets and its connection to the travel time theory. Available at: <http://eprints-phd.biblio.unitn.it/2679/> [Accessed 27 May 2021].
- Bancheri M., Serafin F., Bottazzi M., Abera W., Formetta G., Rigon R., 2018. The design, deployment, and testing of kriging models in GEOframe with SIK-0.9.8. *Geoscientific Model Development*, 11(6): 2189–2207. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-11-2189-2018>.
- Bellin A., Majone B., Cainelli O., Alberici D., Villa F., 2016. A continuous coupled hydrological and water resources management model. *Environmental Modelling & Software*, 75: 176–192. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.013>.
- Beniston M., 2006. Mountain Weather and Climate: A General Overview and a Focus on Climatic Change in the Alps. *Hydrobiologia*, 562(1): 3–16. doi:<https://doi.org/10.1007/s10750-005-1802-0>.
- Beniston M., Stoffel M., 2014. Assessing the impacts of climatic change on mountain water resources. *Science of The Total Environment*, 493: 1129–1137. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.122>.
- Bottazzi M., Bancheri M., Mobilia M., Bertoldi G., Longobardi A., Rigon R., 2021. Comparing Evapotranspiration Estimates from the GEOframe-Prospero Model with Penman–Monteith and Priestley–Taylor Approaches under Different Climate Conditions. *Water*, 13(9): 1221. doi:<https://doi.org/10.3390/w13091221>.
- Cavaleri L., Barbariol F., Bertotti L., Besio G., Ferrari F., 2022. The 29 October 2018 storm in Northern Italy: Its multiple actions in the Ligurian Sea. *Progress in Oceanography*, 201: 102715. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pocan.2021.102715>.
- Crespi A., Borghi A., Facchi A., Gandolfi C., Maugeri M., 2020. Spatio-temporal variability and trends of drought indices over Lombardy plain (northern Italy) from meteorological station records (1951–2017). *Italian Journal of Agrometeorology*, (2): 3–18. doi:<https://doi.org/10.13128/ijam-1101>.
- Di Piazza A., Eccel E., 2012. Analisi di serie giornaliere di temperatura e precipitazione in Trentino nel periodo 1958-2012. Provincia Autonoma di Trento, p. 88.
- European Environment Agency, 2018. Water use in Europe — Quantity and quality face big challenges. Available at: <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2018-content-list/articles/water-use-in-europe-2014> [Accessed 20 May 2021].
- European Environment Agency, 2019. Water use in Europe by economic sector, 2017. Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/annual-and-seasonal-water-abstraction-7#tab-dashboard-02> [Accessed 5 Jun. 2021].
- FAO, 2013. CLIMATE SMART AGRICULTURE. Available at: <http://www.fao.org/3/i3325e/i3325e.pdf> [Accessed 23 Feb. 2020].
- FAO, 2020. The State of Food and Agriculture 2020. doi:<https://doi.org/10.4060/cb1447en>.
- Favargiotti S., Pasquali M., Chioni C., Pianegonda A., 2022. Water Resources and Health Tourism in Val di Sole: Key Elements for Innovating with Nature in the Italian Inner Territories. *Sustainability*, 14(18): 11294. doi:<https://doi.org/10.3390/su141811294>.
- Fondazione Edmund Mach, 2022. Available at: <https://fmach.it> [Accessed 23 Apr. 2024].
- Formetta G., Antonello A., Franceschi S., David O., Rigon R., 2014a. Hydrological modelling with components: A GIS-based open-source framework. *Environmental Modelling & Software*, 55: 190–200. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.019>.
- Formetta G., Kampf S.K., David O., Rigon R., 2014b. Snow water equivalent modeling components in NewAge-JGrass. *Geoscientific Model Development*, 7(3): 725–736. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-7-725-2014>.
- Ginesta M., Yiou P., Messori G., Faranda D., 2022. A methodology for attributing severe extratropical cyclones to climate change based on reanalysis data: the case study of storm Alex 2020. *Climate Dynamics*. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-022-06565-x>.
- Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 80–91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- Hay L.E., Umemoto M., 2007. Multiple-Objective Stepwise Calibration Using Luca. U.S. Geological Survey open



- file report/Open-file report.  
doi:<https://doi.org/10.3133/ofr20061323>.
- ISPAT - Istituto di Statistica della Provincia Autonoma di Trento, n.d. ISPAT - Annuario on-line. Available at: [https://statweb.provincia.tn.it/annuario/\(S\(mft1it55jlqth45wqpqxm55\)\)/default.aspx?t=ag](https://statweb.provincia.tn.it/annuario/(S(mft1it55jlqth45wqpqxm55))/default.aspx?t=ag) [Accessed 29 Mar. 2024].
- Kling H., Fuchs M., Paulin M., 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425: 264–277. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>.
- Knutzen F., Averbek P., Barrasso C., Bouwer L.M., Gardiner B., Grünzweig J.M., Hänel S., Haustein K., Johannessen M.R., Kollet S., Pietikäinen J.-P., Pietras-Couffignal K., Pinto J.G., Rechid D., Rousi E., Russo A., Suárez-Gutiérrez L., Wendler J., Xoplaki E., Gliksmann D., 2023. Impacts and damages of the European multi-year drought and heat event 2018–2022 on forests, a review. doi:<https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1463>.
- Krause P., Boyle D.P., Bäse F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5: 89–97. doi:<https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>.
- Majone B., Villa F., Deidda R., Bellin A., 2016. Impact of climate change and water use policies on hydropower potential in the south-eastern Alpine region. *Science of The Total Environment*, 543: 965–980. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.009>.
- Maran L., Schneider T., Andreus M., 2023. A multi-period analysis of a water management arena in the Italian Alps, circa 1951–2007: The territorialisation of environmental concerns. *Accounting History*, 28(4): 604–647. doi:<https://doi.org/10.1177/10323732231196939>.
- Meteotrentino, Provincia Autonoma di Trento- n.d. Previsioni meteorologiche della Provincia di Trento. Available at: <https://www.meteotrentino.it>.
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885–900. doi:<https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282–290. doi:[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Nkiaka E., Nawaz N.R., Lovett J.C., 2017. Effect of single and multi-site calibration techniques on hydrological model performance, parameter estimation and predictive uncertainty: a case study in the Logone catchment, Lake Chad basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(6): 1665–1682. doi:<https://doi.org/10.1007/s00477-017-1466-0>.
- Priestley C., Taylor R., 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Semantic Scholar*. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2).
- Provincia Autonoma di Trento n.d. Geocatalogo della Provincia Autonoma di Trento. Available at: [https://siat.provincia.tn.it/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/search?resultType=details&sortBy=relevance&fast=index&\\_content\\_type=json&from=1&to=20&any=dtm](https://siat.provincia.tn.it/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/search?resultType=details&sortBy=relevance&fast=index&_content_type=json&from=1&to=20&any=dtm) [Accessed 23 Apr. 2024].
- Stucchi L., Bocchiola D., Simoni C., Ambrosini S.R., Bianchi A., Rosso R., 2023. Future hydropower production under the framework of NextGenerationEU: The case of Santa Giustina reservoir in Italian Alps. *Renewable Energy*, 215: 118980–118980. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118980>.
- Toreti A., Bavera D., Navarro A., Cammalleri C., Jager de, Di Ciollo C., Essenfelder A.H., Maetens W., Magni D., Masante D., 2022. Drought in Europe august 2022. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 10: 264241.
- Ufficio Dighe, Provincia Autonoma di Trento n.d. Ufficio Dighe. Available at: <https://www.floods.it/public/homepage.php> [Accessed 23 Apr. 2024].
- Zambotti A., 2020. Un nuovo modello per l'agricoltura in Valle di Non, fra risparmio idrico e tutela ambientale. *Econ. Agro-Aliment.*, Franco Angeli: 1–16.

# NOVEL SOLUTIONS TO OPTIMISE IRRIGATION MANAGEMENT

## SOLUZIONI INNOVATIVE PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLA GESTIONE IRRIGUA

Paola Battilani<sup>1\*</sup>, Antonio Elia<sup>2</sup>, Luigi Ledda<sup>3</sup>, Luca Ridolfi<sup>4</sup>, Roberto Sacile<sup>5</sup>, Daniele Trincherò<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup> Università Cattolica del Sacro Cuore – Dipartimento di Scienze delle produzioni vegetali sostenibili (DIPROVES), Piacenza

<sup>2</sup> Università di Foggia – Department of Agriculture, Food, Natural Resources and Engineering (DAFNE), Foggia

<sup>3</sup> Università Politecnica delle Marche – Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali (D3A), Ancona

<sup>4</sup> Politecnico di Torino – Dipartimento di Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Torino

<sup>5</sup> Università di Genova – Dipartimento di Informatica, Bioingegneria, Robotica e Ingegneria dei Sistemi (DIBRIS), Genova

<sup>6</sup> Politecnico di Torino – Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni (DET) – iXem Labs, Torino

\* [paola.battilani@unicatt.it](mailto:paola.battilani@unicatt.it); [daniele.trincherò@polito.it](mailto:daniele.trincherò@polito.it)

### Abstract

Spoke 6, included in the National Research Center for Agricultural Technologies (Agritech) aims to introduce management models to support sustainability and resilience in agriculture, with a crucial role of water management. Several units are engaged in the acquisition of information, with field and greenhouse tests, both with traditional surveys, therefore observations and measurements in the studied environments, and with the use of sensors and remote data transfer. In parallel, models for optimizing irrigation in greenhouses and open fields are being developed or improved. Furthermore, a new hydrological model is being tested for the evaluation of crop irrigation needs at different spatio-temporal scales, with validation of the model against an independent data source on irrigation water use with national coverage. Data and models implemented will flow into a DSS for the management of irrigation both in the greenhouse and in the open field, with applications at national level.

### Parole chiave

Stress abiotici; irrigazione; sistemi di supporto alle decisioni; risparmio idrico; LoRa-WAN

### Keywords

Abiotic stress; irrigation; Decision support systems; water saving; LoRa-WAN

### Introduzione

Lo Spoke 6 del National Research Centre for Agricultural Technologies (Agritech) ha come obiettivo l'introduzione di modelli gestionali a favore di sostenibilità e resilienza nelle aziende agricole, argomento all'interno del quale la conoscenza del fabbisogno idrico ha un ruolo fondamentale. Nella gestione dell'irrigazione delle colture, un efficace sistema di supporto alle decisioni (DSS) è un programma software interattivo che supporta agricoltori, consulenti o amministratori nel prendere decisioni basate sui dati che implicano la sintesi di informazioni complesse e varie. In genere, i DSS incorporano uno o più modelli di simulazione per generare raccomandazioni che considerano fattori specifici della coltura e del sito come il clima, la data di semina, il tipo di terreno e le caratteristiche del sistema di irrigazione. Questi sistemi spesso includono strumenti di comunicazione per la gestione di input e output e sistemi di acquisizione dati. In particolare, la possibilità di integrazione dei DSS con l'Internet delle cose (IoT) rappresenta un'opportunità di trasformazione per l'automazione in agricoltura. Questa integrazione semplifica la raccolta dei dati, il processo decisionale, l'acquisizione dei dati basata su sensori e i meccanismi di feedback in tempo reale, favorendo pratiche di irrigazione più efficienti e precise.

In questo contesto, diverse unità operative partecipanti allo Spoke sono impegnate nello sviluppo di DSS per la gestione irrigua. L'unità Università Politecnica delle Marche ha allestito un campo sperimentale, abbinato ad una prova su scala aziendale, con quattro colture in rotazione (mais,

frumento, favino, girasole) per la verifica dell'**impatto** degli stress, in primis lo **stress idrico**, e raccogliere dati utili per ottimizzare in particolare l'irrigazione. L'unità Università di Foggia sta mettendo a punto un **sistema automatico di irrigazione** su colture orticole in pieno campo, integrandolo, tramite tecnologie LP-WAN, con un DSS già esistente (EcoFert). La stessa unità sta anche mettendo a punto un sistema di gestione automatica dell'irrigazione di piante in vaso, basato sulla misura dell'umidità del substrato con sensori capacitivi low-cost e attuatori a bassissimo consumo, con logica di gestione implementata su microprocessori locali, monitorati e controllati da remoto tramite trasmissioni con tecnologie LP-WAN. L'unità Università di Genova sta sviluppando un modello per l'**ottimizzazione dell'irrigazione per le serre**, attualmente applicato al basilico, collegato a misure ottenute da sensori di temperatura e umidità sia nell'aria sia in terreno raccolti da remoto tramite collegamenti LP-WAN. L'unità del Politecnico di Torino sta verificando un nuovo **modello idrologico** per la valutazione dei fabbisogni irrigui delle colture a diverse scale spazio-temporali, con validazione del modello rispetto a una fonte di dati indipendente sull'uso dell'acqua per l'irrigazione con copertura nazionale. I dati ottenuti da questi diversi approcci confluiranno in un DSS per la gestione dell'irrigazione sia in serra che in pieno campo applicabile su scala nazionale.

## Materiali e Metodi

### *Impatto stress idrico*

È in corso uno studio presso l'azienda sperimentale "Pasquale Rosati" dell'Università Politecnica delle Marche (43° 32' 24.5" N, 13° 22' 30.2" E, Agugliano, provincia di Ancona, Italia) iniziato nell'anno 2023. Il clima della zona è una variante oceanica submediterranea temperata. Il terreno è classificato Vertic Cambisols e presenta una tessitura franco-argillosa-limoso.

È stato stabilito uno schema di rotazione quadriennale, in cui il grano duro (var. Tyrex) viene alternato con girasole (Pioneer ibrido P64HE144), fava (var. Prothabat) e mais (Pioneer ibrido P0937), secondo la rotazione comune delle colture in zona. La sperimentazione ha previsto la realizzazione di due aree sperimentali: a) prova in parcelloni, b) prova di calibrazione. Sono stati allestiti tre parcelloni associati ad altrettante pratiche di gestione agronomica: business-as-usual (BAU), convenzionale implementata (CI) e zero stress (ZS). BAU segue pratiche agricole standard, mentre CI implementa pratiche convenzionali secondo le normative regionali. ZS mira a ridurre al minimo gli stress biotici e abiotici durante tutto il ciclo colturale implementando strategie di irrigazione, fertirrigazione e difesa a calendario. Entrambi gli approcci gestionali BAU e ZS sono necessari per valutare il potenziale produttivo delle colture, identificando il divario tra le rese effettive e quelle potenziali, al fine di migliorare il processo produttivo. La prova di calibrazione è costituita da due campi adiacenti, ciascuno di 1 ha, gestiti secondo l'approccio BAU. I due campi adiacenti seguono la stessa rotazione quadriennale applicata alla sperimentazione nei parcelloni. La scelta di tale area (1 ha) è stata dettata dalla necessità di acquisire un numero sufficiente di immagini satellitari per la validazione. Infatti, al fine di adattare i risultati del monitoraggio con droni condotto a livello di macro-appezzamento a scale più ampie (ad esempio, bacino, territoriale, regionale), è necessaria la validazione dei dati satellitari. La validazione viene eseguita attraverso la pianificazione di voli simultanei di droni sui campi sia della prova di calibrazione che della prova di macro-appezzamento.

All'inizio dello studio è stata effettuata l'analisi delle principali caratteristiche del suolo, includendo anche la capacità di scambio cationico e le costanti idrologiche. I dati meteorologici del sito sperimentale vengono registrati da una stazione meteorologica situata in situ. Il contenuto di umidità del suolo viene monitorato quotidianamente utilizzando una rete wireless di sensori capacitivi a basso costo. Ogni anno vengono selezionate dieci piante georeferenziate per ciascuna parcella e su queste viene stimata settimanalmente la fase fenologica utilizzando la scala BBCH (Lancashire et al., 1991). Lo stato fisiologico delle colture viene monitorato con un calendario temporale variabile (da mensile a settimanale, a seconda dello stadio fenologico) su tre piante georeferenziate. In particolare, viene misurata la traspirazione, la conduttanza stomatica, la temperatura fogliare e la fotosintesi netta (CIRAS-2, PP-Systems, Hertfordshire, Regno Unito). Il contenuto di clorofilla e la superficie fogliare vengono determinati utilizzando

rispettivamente lo SPAD-502 Minolta (Soil Plant Analysis Development) e un misuratore di area fogliare. Tutti i componenti della resa sono determinati per le 10 piante utilizzate per le valutazioni fenologiche.

La sperimentazione nei parcelloni viene monitorata da remoto utilizzando un drone DJI Matrice 600 Pro dotato di due telecamere multispettrali, Maya S2 e WV2. Le telecamere montate sul drone e quelle del satellite Sentinel-2 hanno la stessa configurazione spettrale, il che significa che hanno filtri sintonizzati approssimativamente sulle stesse lunghezze d'onda. I voli con droni, condotti durante le misurazioni fisiologiche e al momento della raccolta, vengono confrontati con i dati satellitari utilizzati per la validazione. Questi metodi valutano in modo completo le prestazioni agronomiche e le risposte fisiologiche nell'ambito di diversi approcci gestionali, facilitando un processo decisionale informato per pratiche agricole sostenibili.

### *Sistema automatico di irrigazione*

L'Università di Foggia ha l'obiettivo di mettere a punto dei sistemi di irrigazione automatizzati sia per colture di pieno campo che per colture in vaso, sfruttando la tecnologia LP-WAN (Low Power Wide Area Network) per implementare la comunicazione tra DSS, sensori e attuatori.

Per l'automazione in pieno campo, l'attuale DSS Ecofert/GesCoN è stato abbinato con dispositivi di campo che controllano sensori ed attuatori e consentono la gestione diretta dell'irrigazione, eliminando la necessità di intervento manuale. Attualmente calibrato per le colture di pomodoro (Conversa et al., 2015) e altre colture orticole, il DSS utilizza il metodo del bilancio idrico per stimare il fabbisogno idrico giornaliero delle colture. Questa stima considera sia il volume di terreno umido accessibile alle radici sia il movimento dell'acqua tra gli strati del suolo (Elia & Conversa, 2015; Elia et al., 2021). Inoltre, il DSS stima i fabbisogni azotati delle colture, fornendo raccomandazioni sulla gestione della fertirrigazione. Il sistema, supportato anche da dati climatici in tempo reale, storici o previsti, fornisce un grado di controllo giornaliero.

Relativamente all'automazione dell'irrigazione di piante in vaso ed in substrato torboso, è stata scelta una metodologia di gestione irrigua basata sulla misura dei livelli di umidità del substrato. A tal fine sono stati selezionati dei sensori capacitivi (SKU:SEN0193 v.2.0), sia per il loro basso costo, che per la compatibilità con i microprocessori più diffusi e la loro idoneità per ambienti remoti e isolati grazie al consumo energetico minimo (Placidi et al., 2020). Prima dell'implementazione, le prestazioni dei sensori sono state valutate confrontando le loro misurazioni con il metodo standard gravimetrico (Loconsole et al., 2023). È stato sviluppato un prototipo di controller per l'irrigazione in grado di differenziare, nel medesimo ambiente, fra settori con diverse esigenze irrigue. La gestione dell'irrigazione è affidata ad un DSS implementato direttamente sul microprocessore che attiva l'intervento nel settore quando l'umidità scende al di sotto di determinati livelli (*set-points*). Inoltre, il DSS trasmette i dati di umidità e gli eventi di irrigazione tramite LoRaWAN ad un server a scopo di

monitoraggio e controllo. L'interazione da remoto dell'utente con il dispositivo consente funzionalità quali la regolazione dei *set-points* d'intervento, la richiesta di una ricalibrazione della capacità idrica di campo dei sensori e l'attivazione di cicli di irrigazione supplementari ed altro ancora.

#### *Irrigazione in serra*

La gestione della risorsa idrica in ambiente confinato presuppone la conoscenza di diversi parametri ambientali, oltre alla temperatura e umidità del suolo, indispensabili per evitare carenze, ma anche eccessivi apporti di acqua con conseguenze negative sulle colture dovute a malattie. È necessaria una distribuzione capillare di sensori per la misura di temperatura e umidità ambientali, della velocità di aerazione e della bagnatura fogliare originata dalla traspirazione. A differenza di quanto avviene in campo aperto, in serra i sensori devono avere dimensioni sufficientemente piccole da non perturbare le normali operazioni gestionali. Inoltre, nonostante in serra sia spesso presente energia elettrica, i dispositivi di misura non possono essere cablati e quindi occorre adottare soluzioni a bassissimo consumo energetico che non necessitino di manutenzioni durante tutto l'arco temporale compreso tra semina e raccolta. Per tutti i motivi sopra elencati si è scelto di adottare una soluzione LP-WAN, anche se normalmente questo tipo di rete è adottato in spazi aperti di grandi dimensioni, grazie alla sua capacità di coprire distanze anche superiori ai 50 km. LP-WAN non è l'unica soluzione adottabile; ad esempio, si sarebbe potuto scegliere il BlueTooth Low Energy, che permette consumi energetici ancora più bassi, ma ha una copertura limitata a qualche decina di metri. Effettivamente, il limite relativo alla distanza potrebbe essere superato adottando una configurazione mesh, ma questa innalza significativamente i consumi energetici e richiede l'inserimento di sistemi di sincronizzazione. Al contrario, una soluzione LP-WAN consente la copertura di tutta la serra, anzi, di un insieme di serre, con un unico ricevitore, al quale tutti i sensori possono collegarsi senza ripetizioni intermedie. Inoltre, i ricevitori LP-WAN lavorano in modalità cooperativa: ogni dispositivo può ricevere dati da tutti i sensori in range, creando implicitamente condizioni di ridondanza. Tra tutte le soluzioni LP-WAN disponibili, si è scelta la rete LoRaWAN, basata sullo standard trasmissivo LoRa. Questa soluzione permette la creazione e manutenzione di una rete autonoma, che non necessita di operatori esterni. Inoltre, i nodi sensore adottano uno schema adattativo, riducendo lo *spreading factor* in condizioni di vicinanza. Questo fa sì che la rete offra il massimo rendimento energetico. Ancora, lo standard LoRAWAN consente la gestione della conferma di messaggio, grazie alla quale è possibile massimizzare la robustezza e affidabilità del dato. Infine, LoRaWAN offre la possibilità di esercitare controlli automatici di integrità del dato ricevuto e di adottare cifratura, cosa che la rende molto più performante di altri sistemi LP-WAN basati su tecnologia UltraNarrowBand. I sensori sono stati realizzati adottando un'interfaccia radio unificata con microcontrollore integrato prodotta da Murata, modello CMWX1ZZABZ-093, che comprende un microcontrollore STM32L e una

radio LoRa SX1276. A questa unità sono stati interfacciati un sensore di temperatura e umidità dell'aria prodotti da Sensirion modello SH31, sensori di temperatura e umidità del terreno prodotti da DeltaOhm, modello HD3910.1.A.5, a due o tre elettrodi, sensori di vento prodotti da Navis, modello WSS 100/REED e infine sensori di bagnatura fogliare capacitivi a doppia faccia, realizzati dal Politecnico di Torino per gli scopi di progetto (Filipescu et al, 2024).

#### *Richiesta acqua per irrigazione su scala territoriale*

Il Politecnico di Torino si è focalizzato sull'obiettivo di colmare il *gap* esistente a livello di modelli di stima delle esigenze idriche tra quelli molto dettagliati - da utilizzare su singoli campi e con molte informazioni note - o quelli molto semplificati, adatti a descrivere aree estese ma che implicano ipotesi idrologiche piuttosto approssimative. In questo contesto, è stato proposto un nuovo modello, che affina una precedente versione (Tuninetti et al., 2015), che possa essere facilmente applicato su aree regionali/nazionali ma, allo stesso tempo, riproduca tutti i processi idrologici fondamentali in modo fisico. Il modello (denominato WaterCROP) è del tipo "bucket" e descrive l'equilibrio idrologico di un volume di terreno tra la superficie del suolo e la profondità delle radici. Questo volume cambia la sua profondità durante la stagione in seguito alla crescita della coltura e in particolare delle radici. I processi idrologici sono modellati su scala oraria e su scala spaziale, che va dal campo alla regione/paese. In particolare, la traspirazione viene progressivamente ridotta quando il contenuto di acqua nel suolo scende al di sotto del valore critico di stress della vegetazione. L'infiltrazione è modellata in base alle caratteristiche idro-pedologiche del suolo e dipende in modo non lineare dal contenuto di acqua nel suolo: è massima quando il suolo è saturo e si azzerava quando viene raggiunta la capacità del campo. Il deflusso superficiale si verifica quando il terreno è in condizioni sature.

La richiesta irrigua viene valutata quotidianamente come quantità d'acqua necessaria per evitare di raggiungere un determinato livello di stress idrico della vegetazione. Questo stress può essere completamente evitato (in questo caso ci sarà la massima richiesta di irrigazione) o consentito entro livelli definiti. Il modello fornisce quindi l'andamento temporale, su scala oraria, del contenuto idrico del suolo, dell'evapotraspirazione, dell'infiltrazione, del deflusso e dell'intercettazione per l'intera durata della stagione colturale.

Una volta nota la domanda di acqua irrigua in campo, è possibile risalire alla domanda di acqua alla fonte tenendo conto del particolare sistema di irrigazione adottato. Infatti, sistemi diversi hanno efficienze idriche diverse, che vanno dal caso dell'irrigazione per scorrimento a quello dell'irrigazione a pioggia. In questo modo è possibile valutare l'impatto della produzione agricola sulle risorse idriche locali o regionali.

Il modello può essere utilizzato anche per realizzare scenari, ad esempio, considerando diversi regimi di precipitazione e/o evapotraspirazione dovuti ai cambiamenti climatici o diversi metodi di irrigazione e comprensione del loro impatto sulla gestione e pianificazione delle risorse idriche regionali.

## Risultati e discussione

### *Impatto stress idrico*

Lo studio dell'impatto dello stress idrico è stato svolto solo nell'anno 2023. Le prime osservazioni hanno consentito di rilevare importanti differenze in tutti i parametri misurati. I dati sono in corso di elaborazione, ma si ritiene che l'impostazione della prova garantirà l'ottenimento di dati cruciali per valutare l'impatto della gestione colturale sugli stress, in particolare lo stress idrico.

### *Sistema automatico di irrigazione*

Anche le prove relative al sistema automatico di irrigazione sono state svolte per il solo 2023. Pertanto, i dati sono in corso di elaborazione e dovranno essere integrati con le prove attualmente in corso per l'automazione completa dell'irrigazione su pomodoro da trasformazione e con dati ottenuti in studi precedenti. In particolare, prove sul campo condotte in precedenza in aziende agricole commerciali hanno dimostrato che GesCoN/EcoFert DSS riduce efficacemente il consumo di acqua e azoto, traducendosi in significativi vantaggi economici per i coltivatori (Elia et al., 2022). L'adattabilità del sistema è stata confermata anche dalla sua riuscita applicazione a Filadelfia, USA (Zhang et al., 2022).

### *Ottimizzazione dell'irrigazione in serra*

Sul tema dell'irrigazione in serra, fino ad ora l'obiettivo principale è stato quello di mettere a punto la rete di sensori, individuando quelli più rilevanti, e di costruire il sistema di raccolta automatica e trasmissione dati. Tutto questo al fine di sviluppare un sistema *digital twin* per l'ottimizzazione della gestione dell'irrigazione, da collegare in seguito ad un sistema di ottimizzazione energetica. Quindi, in questo caso, i primi dati saranno raccolti nell'annata 2024.

### *Richiesta acqua per irrigazione su scala territoriale*

Relativamente all'impiego del modello WaterCROP su scala territoriale, è stato sviluppato un esempio di utilizzo del modello proposto, ovvero la valutazione della domanda irrigua (a scala comunale in tutta Italia) della coltura di mais. L'irrigazione è stata ipotizzata in modo tale che la vegetazione non sia mai sottoposta a stress idrico (su un arco temporale giornaliero). L'anno considerato è il 2010, essendo l'ultimo anno per il quale sono disponibili tutti i dati (censimento delle colture, tipologia di irrigazione, ecc.) necessari per la modellizzazione. La stima prevede una richiesta variabile tra 0 e 820 mm/anno a seconda delle zone di coltivazione e fornisce un'interessante panoramica nazionale evidenziando le zone a maggiore richiesta idrica del paese. Questa stima, confrontata con la disponibilità idrica stimata, consente di evidenziare gli eventuali squilibri tra disponibilità idrica e richiesta per irrigazione.

## Conclusioni

I risultati ottenuti nello studio relativo all'impatto dello stress idrico, condotti in uno specifico areale di coltivazione (provincia di Ancona) forniranno dati fondamentali per

definire le esigenze idriche in pieno campo per le colture considerate. La raccolta di dati con osservazioni e misurazioni, abbinate alle rilevazioni da remoto, consentiranno di ridurre in futuro il coinvolgimento di operatori per utilizzare invece dati accolti da remoto, più facilmente interfacciabili con i DSS. Lo studio potrà poi essere replicato in alte aree geografiche caratterizzate da diversi climi e caratteristiche del suolo, come pure da differenti colture in rotazione. Questi dati raccolti in pieno campo saranno confrontati ed integrati con quanto ottenuto con l'applicazione del sistema automatico di irrigazione e contribuiranno a rifinire le soglie di intervento. In aggiunta, le applicazioni del sistema automatico a colture in vaso saranno integrate con le attività di ottimizzazione delle irrigazioni in serra. Ciò che accomuna tutti questi studi è l'impegno ad organizzare un sistema di raccolta e trasmissione dati con il sistema LoRa-WAN, che di fatto costituisce una rete che unisce tutte le diverse aree geografiche e le diverse tipologie di studi a favore di un DSS versatile, in fase di sviluppo, che potrà rispondere alle varie esigenze e richieste, incluso il collegamento al modello WaterCROP. Pertanto, il risultato non sarà solo l'ottimizzazione dell'irrigazione nelle diverse tipologie di gestione delle colture, ma anche un più razionale impiego delle risorse idriche a livello nazionale.

## Ringraziamenti

Studio condotto nell'ambito del Centro Nazionale Agritech, finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU (PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR) – MISSIONE 4 COMPONENTE 2, INVESTIMENTO 1.4 - D.D. 1032 17/06/2022, CN00000022). I punti di vista e le opinioni espresse sono tuttavia solo quelli degli autori e non riflettono necessariamente quelli dell'Unione europea o della Commissione europea. Né l'Unione Europea né la Commissione Europea possono essere ritenute responsabili per essi.

Gli autori ringraziano Nike Chiesa, Giulia Conversa e Chiara Rivosecchi che hanno collaborato all'attività di ricerca qui documentata.

## Bibliografia

Lancashire, P.D., Bleiholder, H., van den Boom, T., Langeluddeke, P., Stauss, R., Weber, E., & Witzemberger, A. (1991). A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Annals of Applied Biology*, 119, 561-601.

Conversa G., Bonasia A., Di Gioia F., & Elia A. (2015). A decision support system (GesCoN) for managing fertigation in vegetable crops. Part II—model calibration and validation under different environmental growing conditions on field grown tomato. *Front. Plant Sci.*, 6. 495.

Elia A., & Conversa G. (2015). A decision support system (GesCoN) for managing fertigation in open field vegetable crops. Part I—methodological approach and description of the software. *Front. Plant Sci.* 6. 319.



- Elia A., La Rotonda, P., Lazzizzera, C., & Conversa, G. (2021). Validation of the new modeling for soil water relations and N soil dynamics of the GesCoN DSS: A new release. *Acta Hortic.*, 1311, 469-476.
- Placidi, P., Gasperini, L., Grassi, A., Cecconi, M., & Scorzoni, A. (2020). Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. *Sensors*, 20, 3585.
- Loconsole D., Elia M., Montesano F., De Lucia B., Cristiano G., Conversa G., & Elia A. (2023). Calibrazione ed efficienza di sensori di umidità del suolo a basso costo utilizzati per il controllo dell'irrigazione in vaso e in substrati a base di torba. *Acta Italus Hortus*, 29, 33-34.
- Filipescu, Elena, Giovanni Paolo Colucci, and Daniele Trincherò (2023). "Advances in Design and Construction of Leaf Wetness Sensors." In 2023 IEEE Conference on AgriFood Electronics (CAFE), 128–131. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10291759/>
- Elia A., Lazzizzera C., La Rotonda P., & Conversa G. (2022). Agronomical effects and response of growers in the application of the GesCoN DSS at the commercial farm scale. *Acta Hortic.*, 1335, 643-650.
- Zhang H., He L., Francesco Di Gioia F., Daeun Choi D., Elia A., & Heinemann P. (2022). LoRaWAN based Internet of Things (IoT) System for Precision Irrigation in Plasticulture Fresh-market Tomato. *Smart Agricultural Technology*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100053>.
- Tuninetti, M., Tamea, S., D'Odorico, P., Laio, F. & Ridolfi, L. (2015). Global sensitivity of high-resolution estimates of crop water footprint. *Water Res. Resour.*, 51(10), 8257-8272.

# PROJECTING THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON SOYBEAN PRODUCTION AND WATER REQUIREMENTS

## PROGETTARE GLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLA PRODUZIONE DI SOIA E SUL FABBISOGNO IDRICO

Wilfredo B. Barrera Jr.<sup>1,2\*</sup>, Carmelo Maucieri<sup>3</sup>, Maurizio Borin<sup>3</sup>, Francesco Morbidini<sup>3</sup>, Tjaša Pogačar<sup>4</sup>, Marko Flajšman<sup>4</sup>, Leonardo Verdi<sup>1</sup>, Anna Dalla Marta<sup>1</sup>, Roberto Ferrise<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Agricultural, Food, Environmental and Forestry Sciences and Technologies (DAGRI), University of Florence, Piazzale delle Cascine 18, 50144 Florence, Italy

<sup>2</sup> Department of Science, Technology, and Society, University School for Advanced Studies IUSS Pavia, Palazzo del Broletto, Piazza della Vittoria 15, 27100 Pavia, Italy

<sup>3</sup> Department of Agronomy, Food, Natural Resources, Animals and Environment (DAFNAE), University of Padua, Agripolis Campus, Viale dell'Università 16, Legnaro, PD, Italy

<sup>4</sup> Department of Agronomy, Biotechnical Faculty, University of Ljubljana, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenia

\* wilfredojr.barrera@unifi.it

### Abstract

Soybean is primarily cultivated in rainfed conditions thus, its production is challenged by uncertainties of future climate. The impacts of climate change on soybean yield, water productivity (WP), crop water requirements (CWR), and net irrigation requirements (NIR) were investigated in this study. Simulations using AquaCrop model were conducted in two locations in Italy (Castelfranco and Cesa) and one in Slovenia (Ljubljana) for three future time periods and Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) under rainfed and irrigated conditions. The preliminary findings showed predominantly negative impacts of climate change on soybean grain yield under rainfed conditions which were more drastic in Castelfranco and Cesa than in Ljubljana. In the context of climate change and water scarcity, the initial findings showed that irrigating soybean at 50% soil water depletion could be a viable adaptation strategy to increase its performance while at the same time conserving irrigation volume.

### Parole chiave

requisiti di irrigazione delle colture, scenari di emissione, *Glycine max* L., impoverimento idrico del suolo, produttività idrica

### Keywords

crop irrigation requirements, emission scenarios, *Glycine max* L., soil water depletion, water productivity

### Introduction

Meeting the nutritional needs of the growing global population, especially with rising socioeconomic status, will necessitate additional sources of calories, particularly protein (Messina, 2022). Soybean (*Glycine max* L.) is among the top four crops responsible for producing almost two-thirds of the world's agricultural calories. It serves as the primary global food protein source and plays a crucial role in producing high-quality vegetable protein for animal-based food production (Ray et al., 2013). The escalating global demand for soybean is propelled by factors such as population growth, heightened food requirements, and changing dietary patterns (Durodola and Mourad, 2020; Ray et al., 2013).

The European Union (EU) heavily relies on soybean imports with approximately 12.42 million tonnes annually (FAOSTAT, 2024). To address this issue, the European Parliament (EP) recently adopted the European Protein Strategy resolution (EP, 2023). The resolution calls for the development of a sustainable protein strategy, aiming to boost the profitability and competitiveness of soybean and other protein crops cultivation within the EU. Therefore, soybean stands as a promising resource to meet future global demands for energy and protein (Messina, 2022).

Soybean is one of the major crops severely affected by water scarcity and heat stress in Europe (Toreti et al., 2022). In addition, it is predominantly cultivated under rainfed conditions. Thus, gaining a comprehensive understanding of the effects of climate change on soybean cultivation has become imperative for ensuring sustainable production because rainfed agriculture is increasingly vulnerable to the adverse effects of climate change.

Irrigation is a viable option to reduce the vulnerability of soybean cultivation to the impacts of climate change. Currently, supplemental irrigation is now increasingly used to boost soybean yield (FAO, 2023). To understand crop water and irrigation requirements, water-driven crop simulation models (CSMs) are important tools.

One notable example of water-driven CSM is AquaCrop. Several authors used AquaCrop to assess the impacts of climate change on soybean production employing different emission scenarios and GCMs (Araji et al., 2018; Durodola and Mourad, 2020; Sharafati et al., 2022). However, investigations in Europe at the local scale has been limited because most studies are concentrated in major soybean producing regions.

The EU advocates for science-based strategies to boost the production of soybean and other protein crops within the EU. In this regard and in view of the above research gaps, the general objective of this study is to simulate and project the

impacts of climate change on soybean grain yield, water productivity (WP), CWR, and net irrigation requirements (NIR).

## Methods and data

### Generation and downscaling of future climate data

The observed data were extracted from the AGRI4CAST observational dataset specifically from the grid cell nearest to the respective geographical coordinates of two locations in Italy (Castelfranco and Cesa) and one location in Slovenia (Ljubljana).

The observed data was utilized to train the LARS-WG 7.0 (Semenov and Barrow, 2002) to generate 300 years of synthetic local-scale daily meteorological data such as minimum ( $T_{\min}$ ) and maximum ( $T_{\max}$ ) temperature, rainfall, and potential evapotranspiration ( $ET_o$ ) of the study sites for the baseline period (1981–2010) and three future time periods such as near future (2041–2060), mid-future (2061–2080), and far future (2081–2100), three emission scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5), and three GCMs (ACCESS-ESM1-5, HadGEM3-GC31-LL, and MRI-ESM2-0).

The  $ET_o$  was calculated day-by-day using the Hargreaves equation (Eq. 1) as described in “FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56” (Allen et al., 1998). The calculated  $ET_o$  was then directly imported into the model.

$$ET_{o,Har} = H_A \times R_e(T + 17.8) \times \Delta T^{H_E} \text{ (Eq.1)}$$

where  $H_A$  and  $H_E$  are standard values ( $H_A = 0.0023$  and  $H_E = 0.5$ ),  $R_e$  is the water equivalent of the terrestrial radiation ( $\text{mm d}^{-1}$ ),  $T$  is the mean temperature ( $(T_{\max} + T_{\min})/2$  °C) and  $\Delta T$  is the difference between maximum and minimum temperature.

### AquaCrop model and input parameters

The AquaCrop version 7.0 was used for the simulations. The model requires several input parameters including climate, field management, soil, and crop characteristics.

In each location, the generated daily weather data by LARS-WG were used as climate input in AquaCrop. Specifically, from the 300 years of climatic data, a total of 100 years were randomly chosen to represent the climate of the baseline period and each future time period under SSPs and GCMs. The average  $\text{CO}_2$  concentration (366.38 ppm) used for the baseline period simulations was obtained from Meinshausen et al. (2017). Whereas, the average  $\text{CO}_2$  concentrations of the three emission scenarios according to future time periods were obtained from Meinshausen et al. (2020).

For simulations under irrigated conditions, irrigation files were created considering four different levels of soil water depletion in the soybean effective root zone (ERZ) such as 25%, 50%, 75%, and 100%. No irrigation files were created for rainfed simulations since it is the default in AquaCrop.

Soil profile files were created using the soil characteristics of the sites to simulate the retention of water in the ERZ and soil water movement (Raes et al., 2022). However, the water

table was not considered with the assumption that its depth and quality had negligible effects.

A crop file was created for each location and the non-conservative and cultivar-specific parameters were adjusted and parametrized using the phenological and relevant field data from the 2022 and 2023 soybean field experiments in Castelfranco and Cesa, and 2015 and 2016 in Ljubljana (Flajšman et al., 2019).

### Model application

After all input variables and parameters were prepared, packaged project files were created for each location to successively simulate the performance of soybean for the baseline period and future time periods according to SSPs and GCMs. The simulations were performed under various irrigation strategies as previously mentioned, based on the growing cycle of soybean in each location which was May 20 to October 4 in Castelfranco, June 16 to October 6 in Cesa, and May 19 to October 3 in Ljubljana under GDD mode and with initial condition of the soil water profile set at field capacity. The sowing dates were kept constant and the conditions at the end of each simulation period were not considered as initial conditions for the next simulation to avoid confounding effects.

## Results and discussion

### Impacts of climate change on soybean yield

The highest yield was projected in Ljubljana ranging from 2730 to 6523  $\text{kg ha}^{-1}$ . In Castelfranco, the average yield range from 1629 to 5954  $\text{kg ha}^{-1}$ . In Cesa, yield ranges from 839 to 4026  $\text{kg ha}^{-1}$  (Fig. 1–3). Climate change tends to have a detrimental impact in Ljubljana, both under irrigated and rainfed conditions as shown by decreased yield among SSPs compared to the baseline. In Castelfranco and Cesa, yield tends to be higher in SSPs compared to the baseline period, except in rainfed conditions.

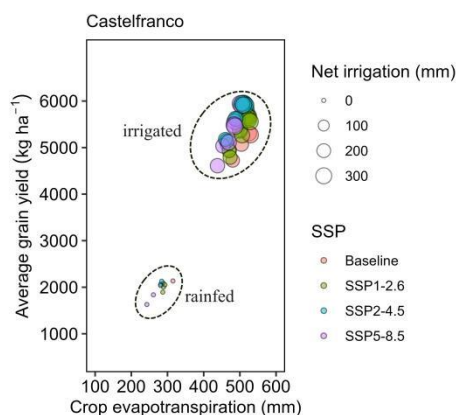


Fig. 1- Average soybean grain yield and water requirements in Castelfranco across SSPs.

Fig. 1- Resa media di granella di soia e fabbisogno idrico a Castelfranco negli SSP

Overall, SSP5-8.5 showed a consistent decline in yield in all locations from near to far future. In contrast, all locations showed increased yield under SSP2-4.5 from near to mid

future while decrease from mid to far future except in Castelfranco. Under SSP1-2.6, the increase is only projected from the near to mid future in Cesa, with a decline anticipated in Castelfranco and Ljubljana. In the same emission scenario, a slight reduction is expected from mid to far future in all locations. These findings align with recent global agricultural climate impact projections indicating soybean productivity decline towards the end of the century, notably under SSP5-8.5 (Jägermeyr et al., 2021).

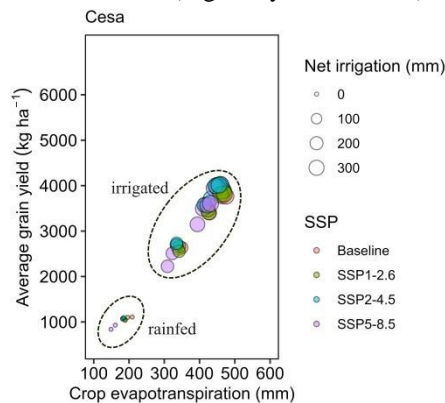


Fig. 2 - Average soybean grain yield and water requirements in Cesa across SSPs.

Fig. 2 - Resa media di granella di soia e fabbisogno idrico a Cesa negli SSP

In Castelfranco and Ljubljana, reducing the soil water depletion to 50% showed higher yield compared to other irrigation strategies, although slightly higher biomass was observed at 25% RAW. Conversely, in Cesa, the 25% RAW showed the best performance in terms of biomass and yield. The findings align with the expected decrease in biomass and yield when depleting RAW in ERZ due to reduced transpiration resulting from water stress (Raes, 2023; Steduto et al., 2012; Zhang et al., 2023).

#### Impacts of climate change on soybean water requirements

In all locations, SSPs have lower  $ET_c$  than the baseline (Fig. 1–3) which conformed with the expectation that the  $CO_2$  fertilizing effects due to increased  $CO_2$  levels, slightly reduces crop transpiration (Raes, 2023).

The  $ET_c$  varies between locations and was highest in Ljubljana ranging from 347 to 582 mm followed by Castelfranco (243–529 mm) and Cesa (149–475 mm). The  $ET_c$  followed the same pattern across locations which is lowest under rainfed conditions. Under irrigated conditions,  $ET_c$  increases as the soil water depletion decreases and was highest at 25% RAW.

The WP in Castelfranco ( $6.5\text{--}11.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) and Ljubljana ( $5.7\text{--}11.7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) was higher than Cesa ( $5.2\text{--}10.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ). In AquaCrop, WP is calculated by dividing dry grain yield by  $ET_c$  (Raes, 2023). Thus, due to the higher yield potential of Castelfranco and Ljubljana (Fig. 1 and 3), they registered higher WP than Cesa. The WP more or less follows the trend of soybean yield and was higher in SSPs compared to the baseline. Across locations, the WP was lowest under rainfed conditions whereas under irrigated

conditions, all locations showed the same pattern of highest WP at 50% RAW, lowest WP at 100% RAW.

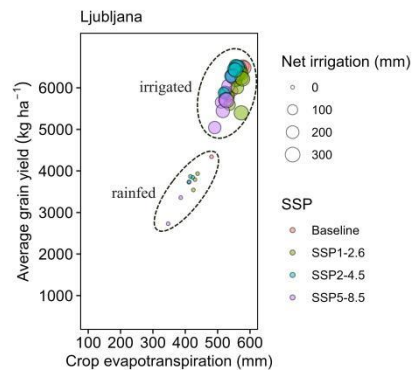


Fig. 3-Average soybean grain yield and water requirements in Ljubljana across SSPs.

Fig. 3 – Resa media di granella di soia e fabbisogno idrico a Lubiana nei diversi SSP

Due to reduced cumulative rainfall in Castelfranco and Cesa, they registered higher NIR than Ljubljana ranging 192–333 mm and 155–362 mm, respectively. Consequently, the NIR of Ljubljana was lower (106–303 mm) due to the considerable amount of rainfall. In all locations, the SSPs have higher NIR compared with the baseline (Fig. 1–3) indicating that climate change will facilitate increased irrigation in the future. Considering irrigation strategies, the NIR follows the same trend as  $ET_c$ . The highest NIR was observed at 25% RAW whereas the lowest at 100% RAW.

## Conclusions

This study projected the impacts of climate change on the yield and water requirements of soybean in Castelfranco, Cesa, and Ljubljana under rainfed conditions and irrigated conditions considering various percentage of RAW depletion in the ERZ. In the future, the increasing temperature and  $CO_2$  and changing rainfall distribution will redefine soybean production in these three locations.

Under rainfed conditions, the impacts of climate change on soybean performance were negative with magnitude higher in Castelfranco and Cesa than Ljubljana due to higher temperatures and reduced rainfall. Under irrigated conditions, the impacts of climate change in Castelfranco and Cesa were generally positive in the near (2041–2060) and mid future (2061–2080) under SSP2-4.5 and SSP1-2.6. In all locations, the elevated  $CO_2$  compensates for the negative effects of increased temperature and decreased rainfall on soybean performance under the three SSPs. However, the shift of temperature from beneficial to detrimental under the fossil fuel-dominated development path (SSP5-8.5) will lead to negative consequences on soybean production in the far future (2081–2100).

## Acknowledgements

This article and associated research were conducted as part of the Italian inter-university PhD program in Sustainable Development and Climate Change.

## Bibliography

- Araji, H.A., Wayayok, A., Bavanic, A.M., Amirid, E., Abdullaha, A.F., & Daneshiane, J. (2018). Impacts of climate change on soybean production under different treatments of field experiments considering the uncertainty of general circulation Models. *Agricultural Water Management*, 205, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.023>
- Durodola, O.S., & Mourad, K.A. (2020). Modelling the impacts of climate change on soybeans water use and yields in Ogun-Ona River. *Agriculture*, 10, 593. doi:10.3390/agriculture10120593
- European Parliament. (2023). Report from the Committee on Agriculture and Rural Development and the European Parliament: European protein strategy (2023/2015(INI)). European Parliament.
- Falkenmark, M., & Rockström J. (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 3, 129–132.
- Food and Agriculture Organization (FAO) (2023). <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/soybean/en/> Retrieved on October 11, 2023.
- Food and Agriculture Organization Statistics (FAOSTAT) (2024). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Retrieved on April 03, 2024.
- Jägermeyr, J., et al. (2021). Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nat. Food*, 2, 873–885. doi:10.1038/s43016-021-00400-y
- Meinshausen et al. (2017). Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling (CMIP6). *Geosci. Model Dev.*, 10, 2057–2116. doi:10.5194/gmd-10-2057-2017
- Meinshausen et al. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3571–3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>.
- Messina, M. (2022) Perspective: Soybeans can help address the caloric and protein needs of a growing global population. *Front. Nutr.*, 9, 909464. doi: 10.3389/fnut.2022.909464
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2022). Chapter 2 : Users guide. AquaCrop version 7.0. Reference Manual. Food Agricultural Organization (FAO), Rome, Italy, pp. 2-372.
- Raes, D. (2023). Book I : Understanding AquaCrop. Food Agricultural Organization (FAO), Rome, Italy, pp. 1-52.
- Ray, D.K., Mueller, N.D., West, P.C., & Foley, J.A. (2013). Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. *PLoS ONE* 8(6), e66428. doi:10.1371/journal.pone.0066428
- Semenov, M.A., & Barrow, E.M. (2002). A stochastic weather generator for use in climate impact studies:A LARS-WG User Manual. Hertfordshire, UK: Harpenden.
- Sharafati, A., Tayyebi, M.M., Pezeshki, E., & Shahid, S. (2022). Uncertainty of climate change impact on crop characteristics: a case study of Moghan plain in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 603–620. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04074-9>
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D. (2012). Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper Nr. 66. Rome, Italy
- Toreti, A., Bavera, D., Acosta Navarro, J., Cammalleri, C., de Jager, A., Di Ciollo, C., Hrst Essenfelder, A., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Niemeyer, S., Spinoni, J. (2022). Drought in Europe August 2022, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/264241, JRC130493
- Zhang, T., Zuo, Q., Ma, N., Shi, J., Fan, Y., Wu, X., Wang, L., Xue, X., Ben-Gal, A. (2023). Optimizing relative root-zone water depletion thresholds to maximize yield and water productivity of winter wheat using AquaCrop. *Agricultural Water Management* 286, 108391. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108391>

# TERRITORIAL WATER BALANCES IN FVG: A TOOL FOR THE EVALUATION OF SOIL WATER CONTENT, SOIL PRACTICABILITY AND POSSIBLE OCCURRENCE OF MYCOTOXINS IN MAIZE

## BILANCI IDRICI TERRITORIALI IN FVG: UNO STRUMENTO PER LA VALUTAZIONE DELLO STATO IDRICO DEI SUOLI, DELLA PERCORRIBILITÀ E DELLA POSSIBILE PRESENZA DI MICOTOSSINE NEL MAIS

Andrea Cicogna<sup>1\*</sup>, Sofia Tuzzi<sup>1</sup>, Roberto Medeossi<sup>1</sup>, Elena Ermacora<sup>1</sup>, Stefano Barbieri<sup>2</sup>, Valentino Volpe<sup>2</sup>, Mariangela Sandra<sup>2</sup>, Lara Manzoni<sup>2</sup>, Linda Stel<sup>2</sup>, Valentina Caron<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ARPA-FVG – S.O.C. Osmer, Via Natisone, 43, 33057 Palmanova (UD) - \*[andrea.cicogna@arpa.fvg.it](mailto:andrea.cicogna@arpa.fvg.it)

<sup>2</sup> ERSa-FVG – Servizio fitosanitario e chimico, ricerca, sperimentazione e assistenza tecnica - Via Sabbatini, 5, 33050 Pozzuolo del Friuli UD

### Abstract

Since 2017 the Regional Agency for Environment Protection (ARPA FVG) and the Regional Agency for Rural Development (ERSA FVG) of Friuli Venezia Giulia (Italy), under the framework of a cooperation agreement, have been developing a water balance tool on a territorial basis covering an area of about 375.000 ha and reachable through Internet (<https://agrics.regione.fvg.it/agricsweb/sam>). The water balance calculations rely on pedological information layers, land use information (arable crops: maize, soybean, barley, wheat, orchards, vineyards and grassland) and are driven by daily meteorological data. Different irrigation strategies and scenarios are taken into account: no irrigation and a 3, 6, 9, 12 and 15 days irrigation schedule. The tool provides information not only related to the water balance of the soil, but also forms the basis for two further digital applications. The first one (IPS) is concerned with a practicability index of bare soil, useful for the farmers to plan on-field agronomic interventions. The second one (IPM) deals with the possible occurrence of mycotoxins in maize due to fungi contaminations which severity is correlated to high temperatures and water imbalance stress of the cultivation.

### Parole chiave

Friuli Venezia Giulia, bilancio idrico territoriale, micotossine, percorribilità terreni

### Keywords

Friuli Venezia Giulia, territorial water balance, mycotoxins, soil practicability

### Introduzione

Dalla fine degli anni '90 in Friuli Venezia Giulia si è iniziato a sviluppare bilanci idrici estesi a livello territoriale.

Le prime implementazioni erano immaginate principalmente per l'irrigazione guidata senza l'utilizzo di supporti GIS (Gani *et al.* 2000). I bilanci idrici venivano elaborati giornalmente per una ventina di località facendo riferimento a colture standard (mais, soia, vite). In ogni località i bilanci idrici erano calcolati considerando le colture, i diversi tipi di terreno e varie ipotesi di strategia irrigua (nessuna irrigazione, ultima irrigazione effettuata da 5, da 10 e da 15 giorni). Prima della diffusione capillare di Internet le informazioni erano veicolate tramite il sistema teletext di un'emittente locale.

A partire dal 2002 è stato possibile disporre di layer meteorologici con cadenza giornaliera e/o oraria per applicazioni agrometeorologiche georiferite dedicate alla difesa della vite (Dietrich *et al.* 2022, Cicogna *et al.* 2022).

L'introduzione nel 2008 di un layer pedologico esteso alla pianura e alle colline della regione Friuli Venezia Giulia ha consentito l'elaborazione di mappe climatiche di deficit idrico e di giorni di stress idrico per colture standard quali mais, soia, erbaio, vite (Cicogna *et al.* 2008).

Dal 2017, grazie a una convenzione tra ARPA FVG (Agenzia regionale per l'ambiente) e ERSa FVG (Agenzia

regionale per lo sviluppo rurale) nell'ambito del progetto *AgriCS (Agricoltura, Conoscenza, Sviluppo)* di cui alla sotto-misura 1.2 del PSR 2014-2020 della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, è stato messo a disposizione del sistema agricolo Friuli Venezia Giulia un bilancio idrico territoriale accessibile su una piattaforma Internet dedicata (<https://agrics.regione.fvg.it/agricsweb/sam>).

Lo strumento del bilancio idrico territoriale è oggi utilizzato, oltre che per la restituzione giornaliera dello stato idrico dei terreni, anche quale base per lo sviluppo di altre due applicazioni.

La prima riguarda un indice sintetico della percorribilità dei terreni nell'ipotesi di suolo nudo, di grande utilità per le aziende agricole nel programmare i propri interventi agronomici in campo; il secondo riguarda la stima della possibile presenza di micotossine (aflatossine e fumonisine) che desta grande preoccupazione per la maicoltura regionale. Temperatura e stato di nutrizione idrico del cereale sono due parametri importanti per la moltiplicazione dei funghi responsabili della produzione di micotossine (generi *Aspergillus* e *Fusarium*).

Un indice sintetico che stimi la possibile presenza delle micotossine a partire dalla temperatura dell'aria e dallo stato idrico dei terreni può essere utile implementato in una



piattaforma che dispone di tali informazioni a livello territoriale.

## Materiali e Metodi

### *Bilancio Idrico Territoriale AgriCS*

Il bilancio viene eseguito giornalmente su circa un milione e mezzo di pixel di 50 x 50 m ed esplora circa 375.000 ha della pianura, del Carso e dell'area collinare della regione. Vengono utilizzati i seguenti strati informativi e dati di input:

#### *Dati meteorologici*

Ogni giorno, a partire dai dati raccolti della rete meteorologica regionale, vengono prodotti dei grigliati (500 x 500 m) di pioggia ed evapotraspirazione di riferimento.

I dati di pioggia misurati nelle stazioni sono eventualmente integrati con le misure di stima effettuate sulla base dei dati rilevati da Radar (Cicogna *et. al* 2013). L'evapotraspirazione di riferimento (ET<sub>o</sub>) viene calcolata come proposto da Hargreaves & Samani (1985).

#### *Dati pedologici*

Per i dati pedologici si fa riferimento al Sistema informativo pedologico dell'ERSA <https://www.ersa.fvg.it/cms/aziende/servizi/suolo/Carta-suoli.html>

L'area considerata è divisa in 222 unità cartografiche; in ognuna di esse è identificato un tipo di suolo principale (quello percentualmente più rappresentativo) e uno o due suoli secondari.

Nel presente lavoro per ogni unità cartografica sono stati individuati:

- la riserva idrica utile massima (AWC), determinata come media ponderata dei valori di riserva dei diversi suoli presenti nell'unità cartografica tenendo conto della frequenza relativa di ognuno;
- la profondità, anch'essa determinata come media ponderata delle profondità dei diversi suoli dell'unità cartografica;
- il contributo idrico da falda (Fa); tale grandezza, espressa come mm/giorno, è stata stimata sulla base della granulometria dei terreni e della profondità della falda freatica (determinata al momento del rilevamento pedologico) con delle funzioni di *pedotransfer* proposte da Drissen (1986);
- velocità di percolazione. In questo modello di bilancio idrico tale grandezza varia dai 10 mm/giorno nei terreni più pesanti agli 80 mm/giorno nei terreni particolarmente sabbiosi.

#### *Ruscigliamento*

Viene espresso attraverso il coefficiente di ruscigliamento (C<sub>i</sub>), ovvero la frazione della pioggia che viene persa dal terreno per ruscigliamento superficiale; in questo modello viene stimato come sola funzione della pendenza.

#### *Culture, coefficienti culturali e stima dello stress idrico*

I bilanci idrici vengono calcolati su vegetazione spontanea e su colture agrarie.

Utilizzando la carta di uso del suolo (Moland) vengono identificate le zone del territorio coltivate, quelle

caratterizzate da boschi, le brughiere, i prati spontanei, quelle edificate insieme ad altri usi.

Nelle zone con vegetazione spontanea viene calcolato il bilancio idrico senza ipotizzare alcuna irrigazione.

Nelle zone coltivate viene calcolato il bilancio idrico considerando anche una possibile pratica irrigua.

Nelle rimanenti zone del territorio il bilancio idrico non viene calcolato.

Nelle zone interessate da colture agrarie il bilancio idrico viene computato su cereali autunno vernini, mais, soia, prato, frutteti e vite.

Il modello tiene conto dell'approfondimento radicale: le colture seminate hanno una profondità di radici variabile, che aumenta dal giorno di semina (5-10 cm) fino a un massimo di 50 cm, se non altrimenti limitata dalla profondità del suolo.

In genere la profondità radicale delle colture arboree è pari alla profondità del terreno, ma ai fini del presente bilancio idrico, anche in presenza di terreni molto profondi, la profondità radicale per i frutteti e vite è assunta pari a 80 cm.

La stima delle esigenze evapotraspirative delle colture (ET<sub>c</sub>) viene ricavata moltiplicando l'evapotraspirazione di riferimento (desunta dai dati meteorologici) per un coefficiente culturale (K<sub>c</sub>), variabile nel corso della stagione, che tiene conto delle caratteristiche morfo-fisiologiche delle diverse specie e della loro fase di sviluppo (fenologia).

Per tener conto di eventuali condizioni non ottimali di disponibilità idrica nel suolo e quindi al fine di riprodurre situazioni di stress, l'evapotraspirazione culturale viene ridotta in modo proporzionale al contenuto d'acqua nel terreno se presente in quantità limitanti. In questo modo si ottiene l'evapotraspirazione reale della coltura (ET<sub>r</sub>).

#### *Output del Bilancio Idrico Territoriale AgriCS*

I termini in uscita del Bilancio Idrico Territoriale disponibili giornalmente sulla piattaforma *AgriCS* sono 4:

- La riserva idrica. La quantità totale di acqua contenuta nel terreno esplorato dalla profondità dell'apparato radicale delle colture (mm).
- La percentuale della riserva idrica. Il rapporto percentuale tra la quantità massima teorica contenuta dal terreno (CIM: Capacità Idrica Massima) e la quantità realmente presente nel terreno per la profondità dell'apparato radicale (%).
- La riserva idrica facilmente utilizzabile (mm).
- La durata della riserva idrica facilmente utilizzabile (giorni). Il bilancio Idrico Territoriale *AgriCS* effettua una stima in giorni della durata della riserva facilmente utilizzabile (RFU) e quindi dell'inizio della comparsa dello stress idrico. Tale stima è condotta assumendo che nei giorni futuri non si verificherà alcun evento piovoso.

La restituzione grafica di questi termini in uscita viene rappresentata con mappe a falsi colori.

#### *Scenari colturali e scenari irrigui.*

Sulle zone coltivate vengono calcolati diversi bilanci idrici ipotizzando 6 scenari colturali. Nel primo scenario tutte le zone coltivate vengono assunte come destinate ai cereali autunno vernini, nel secondo al mais, nel terzo alla soia e a seguire ai frutteti, alla vite inerbata e non inerbata.

Inoltre vengono ipotizzati 6 scenari irrigui: irrigazione mai effettuata, irrigazione effettuata 3, 6, 9, 12 o 15 giorni prima. L'entità dei volumi irrigui ipotizzata nel calcolo è pari a quella in grado di riportare i terreni alla capacità di campo.

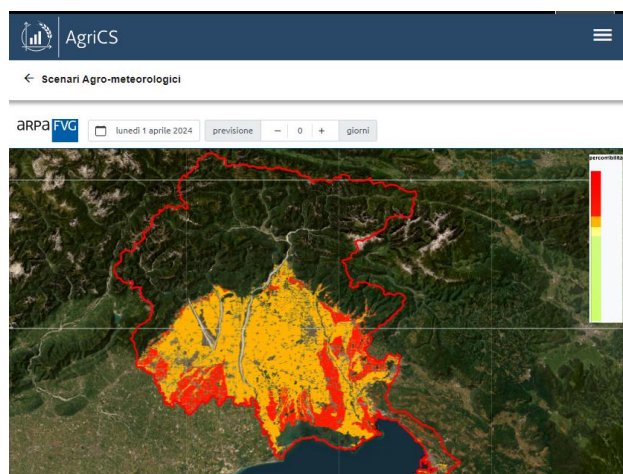


Fig. 1. Piattaforma AgriCS: esempio di una mappa di percorribilità dei terreni

Fig.1 AgriCS ICT platform: example of a soil practicability map

### Valutazione di percorribilità dei suoli

Un'applicazione particolare derivata dal bilancio idrico territoriale è l'indice di percorribilità dei suoli (IPS). Tale indice stima il contenuto percentuale di acqua nel terreno e lo associa alla possibilità più o meno elevata di entrare in campo senza provocare compattamento e degrado della struttura del suolo. Per il calcolo territoriale di tale indice vengono effettuati i bilanci idrici nell'ipotesi di suolo nudo. In tali condizioni il consumo evapotraspirativo è molto limitato e l'allontanamento dell'acqua dal terreno avviene

principalmente per percolazione e ruscellamento, specie durante il periodo invernale. Vengono esaminati i primi 30 cm del terreno e, in funzione della percentuale di acqua contenuta nel suolo rispetto alla Riserva Utilizzabile, vengono individuate quattro classi di percorribilità:

- *Rossa - entrata in campo sconsigliata*: in questo caso il contenuto d'acqua calcolato per i primi 30 cm del suolo è superiore al 105% della Riserva Utilizzabile.
- *Arancio - entrata in campo con prudenza*: in questo caso il contenuto d'acqua, calcolato per i primi 30 cm del suolo, è compreso tra il 95 e il 105% della Riserva Utilizzabile (RU).
- *Gialla - entrata in campo con pochi problemi*: in questo caso il contenuto d'acqua, calcolato per i primi 30 cm del suolo, è compreso tra l'85 e il 95% della RU.
- *Verde - entrata in campo senza problemi*: in questo caso il contenuto d'acqua calcolato per i primi 30 cm del suolo è compreso tra il 75 e l'85% della RU.

### Valutazione della possibile presenza di micotossine nella granella di mais

Le fumonisine e le aflatossine rappresentano le principali forme di micotossine che interessano il mais anche nelle condizioni colturali del Nord Italia (Locatelli et al. 2022).

Nell'ambito del progetto AgriCS è stato proposto un indice agrometeorologico che stima l'andamento stagionale della possibile presenza di micotossine (aflatossine e fumonisine) nella coltura del mais, denominato per brevità IPM (*indice di possibile presenza micotossine*).

L'IPM cumulato dell'intera stagione viene calcolato come media degli IPM giornalieri durante il cosiddetto *periodo sensibile*, ovvero il periodo di maggiore sensibilità, compreso tra la fioritura e la maturazione fisiologica del mais, fasi fenologiche calcolate in termini di sommatorie termiche dei gradi giorno ( $^{\circ}\text{DD}$ ).

La possibile presenza giornaliera di micotossine è espressa in termini percentuali variando da 0 (nessuna possibile presenza) a 100% (massima possibile presenza).

L'IPM tiene conto unicamente dell'effetto normalizzato, in un intervallo da 0 a 1, dello stato idrico della coltura e della temperatura dell'aria. Nell'indice a entrambe le due componenti è stato assegnato un peso del 50%.

Nella Figura 2 e 3 sono riportati i grafici normalizzati dell'incidenza di queste due variabili sull'IPM giornaliero rispettivamente di aflatossine e fumonisine.

Tali funzioni sono state ricavate da dati presentati in letteratura (Reyneri et al.

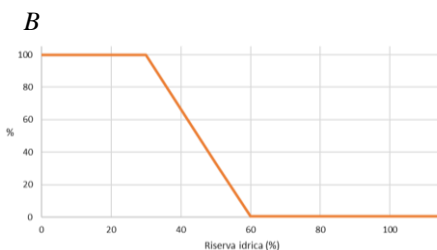
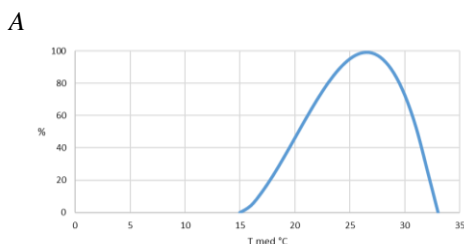


Fig. 2: Aflatossine: grafici di incidenza di temperatura (A) e percentuale di riserva idrica (B)

Fig. 2 Aflatoxins: normalized incidence of air temperature (A) and of water reserve percentage (B)

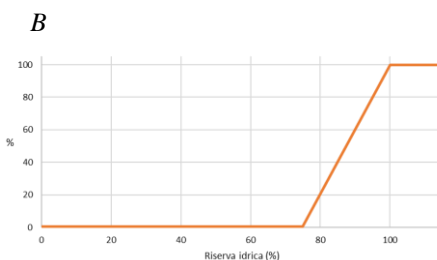
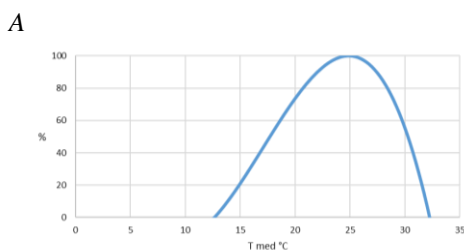


Fig. 3: Fumonisine: grafici di incidenza di temperatura (A) e percentuale di riserva idrica (B)

Fig. 3 Fumonisin: normalized incidence of air temperature (A) and of water reserve percentage (B)



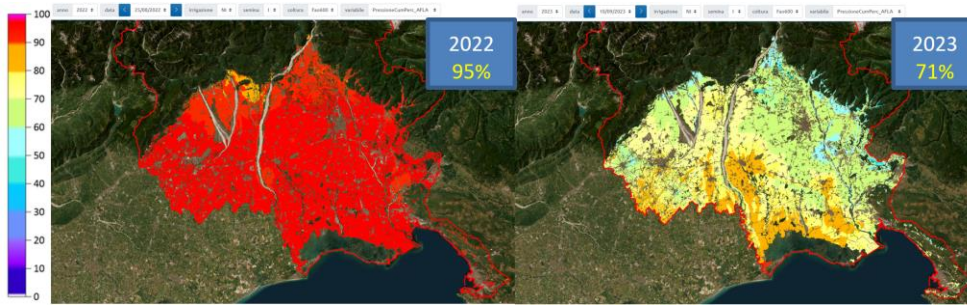


Fig. 4: Confronto anni a possibile presenza più alta e più bassa, aflatoxine, non irrigato (2019-2023)  
 Fig. 4 Comparison among years with higher and lower possible occurrence, aflatoxins, non-irrigated (2019-2023)

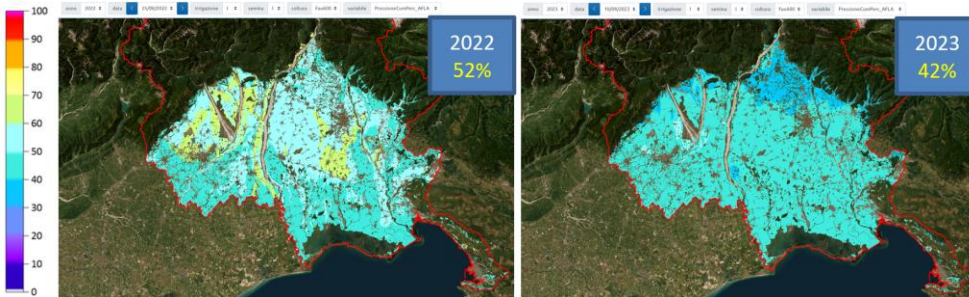


Fig. 5: Confronto anni a possibile presenza più alta e più bassa, aflatoxine, irrigato (2019-2023)  
 Fig. 5 Comparison among years with higher and lower possible occurrence, aflatoxins, irrigated (2019-2023)

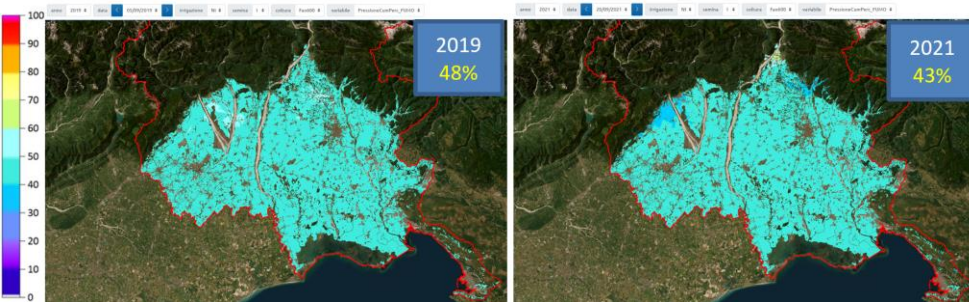


Fig. 6: Confronto anni a possibile presenza più alta e più bassa, fumonisine, non irrigato (2019-2023)  
 Fig. 6 Comparison among years with higher and lower possible occurrence, fumonisins, non-irrigated (2019-2023)

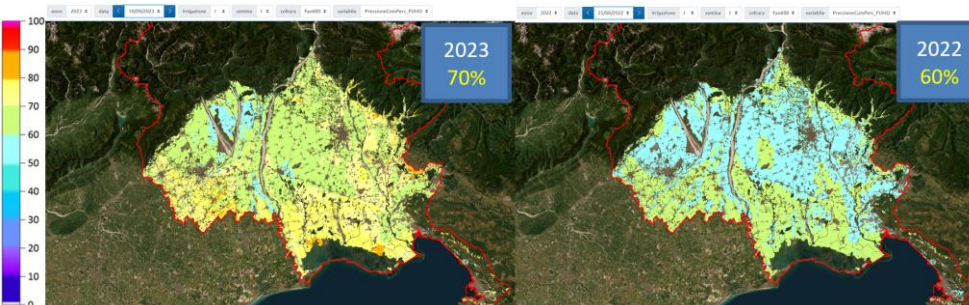


Fig. 7: Confronto anni a possibile presenza più alta e più bassa, fumonisine, irrigato (2019-2023)  
 Fig. 7 Comparison among years with higher and lower possible occurrence, fumonisins, irrigated (2019-2023)

2010, Salvacion *et al.* 2015). Le evidenze sperimentali testimoniano in particolare il ruolo esercitato dagli stress idrici e delle alte temperature nella contaminazione del mais in aflatoxine (Kebede *et al.* 2012).

L'IPM viene elaborato tenendo conto dei seguenti parametri:

**Stress idrico:** nel caso dell'analisi territoriale è ricavato dalla mappa del bilancio idrico, tenendo conto anche di un'eventuale irrigazione con turno di 7 giorni o di assenza di irrigazione della coltura;

**Uso del suolo:** dove viene modellizzato l'andamento della fenologia delle diverse classi FAO di mais (300, 400, 500, 600, 700) sulla base dell'epoca di semina (precoce, intermedia, tardiva) per individuare il periodo sensibile e facendo riferimento al calcolo dei °DD;

**Temperatura:** si concretizza nei valori giornalieri registrati nel corso della stagione.

L'analisi territoriale dell'IPM è rappresentata graficamente con mappe a falsi colori sulla sezione "Scenari agrometeorologici" della piattaforma AgriCS.

Le diverse possibili elaborazioni sono visualizzate selezionando i parametri con opportuni menù tendina.

Nel corso della stagione, le mappe vengono prodotte progressivamente ogni 5 giorni a partire dal primo giorno di sensibilità (inizio fioritura).

Dopo aver selezionato i parametri desiderati, viene visualizzata la mappa tematizzata con l'IPM cumulato calcolato per ogni

pixel della mappa. Inoltre, è disponibile anche la media dell'IPM di tutti i pixel.

## Risultati e discussione

Rispetto un lavoro così ampio e che tratta di temi per molti versi consolidati, è utile limitare l'illustrazione dei risultati di alcune analisi relative all'indice di possibile presenza di micotossine (IPM). L'efficacia di tale indice a livello territoriale, viene qui illustrata in termini di IPM cumulato (aflatossine e fumonisine) per l'intero *periodo sensibile* (dalla fioritura alla maturazione fisiologica) per gli anni 2019-2023 su tutto il territorio vocato regionale (figg. 4 -7). In particolare, sono state elaborate le mappe relative agli IPM cumulati a fine *periodo sensibile*, sia per le aflatossine che per le fumonisine, in condizioni non irrigate e irrigate, per la classe FAO 600, data di semina intermedia. Si riportano gli anni di possibile presenza con valore di IPM cumulato più alto e più basso all'interno del periodo 2019-2023.

Con riferimento al tipo di mais esaminato (FAO 600 - semina intermedia), il *periodo sensibile* in termini di sommatorie termiche va da 800 a 1550 °DD. Nelle diverse annate, questo intervallo di °DD si verifica da inizio - metà luglio a fine agosto - metà settembre.

La percentuale che viene riportata in corrispondenza di ogni mappa è la media di tutte le percentuali di IPM cumulato nell'area di pianura alla fine del *periodo sensibile*.

I grafici evidenziano come nell'arco di una stagione ci possa essere una forte variabilità territoriale in termini di possibile presenza di micotossine. Essa può essere spiegata principalmente dal diverso andamento delle piogge (es: temporali estivi) o dalla diversa tipologia di terreno (es: suoli sciolti dell'alta pianura a scarsa capacità di ritenzione idrica). L'analisi dell'IPM cumulato per le aflatossine in condizioni non irrigate (Figura 5), evidenzia come il 2023 presenti la percentuale media più bassa al termine del *periodo sensibile* (71%) rispetto ai 5 anni esaminati. La distribuzione territoriale dell'IPM, tuttavia, non è omogenea in tutto il Friuli Venezia Giulia variando dal 40% al 90%, a seconda della zona considerata.

## Conclusioni

Nel presente lavoro sono state illustrate le caratteristiche del bilancio idrico territoriale per il Friuli Venezia Giulia sviluppato nel progetto *AgriCS*. Tale strumento rappresenta l'evoluzione di un lavoro che in regione è iniziato nella seconda metà degli anni '90 ed è utilizzato in via prioritaria per la restituzione giornaliera dello stato idrico dei terreni.

Da questo calcolo base è stato derivato un indice di percorribilità dei suoli (IPS). Un'ulteriore applicazione derivata è il calcolo di indici sintetici territoriali di possibile presenza da aflatossine e fumonisine (IPM).

I risultati ottenuti nelle diverse condizioni meteorologiche e pedologiche sembrano essere coerenti con quanto atteso in maniera empirica dal giudizio di esperti o dei portatori di interesse a livello regionale. Al momento pertanto l'indice potrebbe rappresentare un utile strumento di rappresentazione territoriale della possibile presenza di

micotossine nel mais nel corso della stagione influenzata da fattori abiotici, di interesse per i decisori o per definire la vocazionalità territoriale della coltivazione del mais. Per una applicazione più puntuale dell'IPM sono comunque necessarie ulteriori validazioni sia ampliando il confronto con misure di contaminazione effettivamente rilevate sulla granella di mais in diverse sperimentazioni regionali che un'analisi più specifica del comportamento dell'indice nei vari areali. Possibili sviluppi di questi indici riguardano l'inclusione di ulteriori variabili che possono modulare lo sviluppo fungino quali ad esempio la riduzione della pressione infettiva in seguito a trattamenti "anti-piramide e/o con "funghi antagonisti".

## Ringraziamenti

Lo sviluppo della piattaforma *AgriCS* è stato finanziato dalla sotto-misura 1.2 del PSR 2014-2020 della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia



PROGRAMMA DI SVILUPPO RURALE  
DELLA REGIONE AUTONOMA  
FRIULI VENEZIA GIULIA



## Bibliografia

- Cicogna A., Barbieri S., Michelutti G., Bianco D. 2018 Carte di deficit idrico e giorni di stress idrico in Friuli Venezia Giulia. Atti del convegno AIAM 2008. - Italian Journal of Agrometeorology, 2008, 1, 106-107
- Cicogna A., Salvador M., Micheletti St., 2013 Integrazione di dati radar e dati di misure a terra per la creazione di mappe di pioggia Atti del convegno AIAM 2013, 75-76
- Dietrich, S., Alilla, R., Cicogna, A., Fabbo, R., Gani, M., Giovanardi, R., Orlandini, S., Sandra, M., Severini, M., Maracchi, G. - 2002 Using remotely sensed data for leaf wetness duration measurement. Acta of EGS Nice France, 21-26 April 2002, 2002
- Driessen P.M. (1986) - The water balance of the soil. Van Keulen H., Wolf J. (Eds). Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Pudoc, Wageningen, 479 pp.
- Gani, M., Cicogna, A., Centore M., 2000 - Evoluzione e prospettive dell'offerta agrometeorologica in Friuli-Venezia Giulia: dieci anni di bilanci idrici Atti del convegno AIAM 2000 - Domanda e offerta di agrometeorologia in Italia, 2000, 144-157
- Hargreaves, G.H. & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1(2):96-99.
- Kebede, K., Abbas, H.K., Fischer, D.K., and Bellaloui, N. (2021). Relationship between aflatoxin contamination and physiological responses of corn plants under drought and heat stress. Toxins 2021, 4, 1385-1403.
- Locatelli, S. Scarpino, V., Lanzanova, C., Romano, E, and Reyneri, A. (2022). Multi-mycotoxin long-term monitoring survey on north-italian maize over an 11-year period (2011–2021): The occurrence of regulated, masked and emerging mycotoxins and fungal metabolites. Toxins 2022, 14(8), 520
- Reyneri A., Bruno G., D'Egidio M.G., Balconi C. (a cura di), 2015. Linee guida per il controllo delle micotossine nella granella di mais e frumento. Ministero delle politiche agricole, alimentari e forestali – Dip.to delle politiche competitive, della qualità agroalimentare, ippiche e della pesca - Piano cerealicolo nazionale, 2010.
- Salvacion, Arnold R., Ireneo B. Pangga, and Christian Joseph R. Cumagun, 2015 Assessment of mycotoxin risk on corn in the Philippines under current and future climate change conditions. Reviews on environmental health 30.3 (2015): 135-142.

# METHODOLOGY FOR THE IDENTIFICATION OF CLIMATIC INDICES AT REGIONAL LEVEL WITHIN GIS APPLIED TO THE DEVELOPMENT OF AN ALTERNATIVE CROP - THE CASE OF HOP

## METODOLOGIA PER L'INDIVIDUAZIONE D'INDICI CLIMATICI A LIVELLO REGIONALE ALL'INTERNO DEL GIS APPLICATA ALLO SVILUPPO DI UNA COLTURA ALTERNATIVA – IL CASO DEL LUPPOLO.

Eliana Paola Tonelli<sup>1\*</sup>, Uta Biino<sup>1</sup>, Vanna Maria Sale<sup>1</sup>, Marta Rosa Salvati<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> ERSAF – Ente Regionale per il Servizio all'Agricoltura e alle Foreste

<sup>2</sup> ARPA Lombardia – Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente

\* eliana.tonelli@ersaf.lombardia.it

### Abstract

ERSAF supports and promotes policies aimed at the economic development of the Lombard agricultural sector, including actions to support alternative crops compared to the main crops of the regional agricultural system; among these hops, towards which ERSAF has directed studies and analysis aimed at the possibility of creating a supply chain for its professional cultivation. These studies have produced the map of soil aptitude for intensive hop cultivation and further climate suitability maps derived from the analysis of climate data (temperature, precipitation, evapotranspiration) for the calculation of specific indices which consider the specific needs of hops in its phenological stages of growth, which together with the pedological aptitude, allow an overall evaluation of the suitability of the Lombardy territory. This work is dedicated to the representation of the specific climatic indices for hops.

### Parole chiave

Mappe di vocazionalità, calcolo di indici climatici, fabbisogno irriguo, luppolo, filiere agricole alternative.

### Keywords

Suitability maps, calculation of climate indices, irrigation needs, hop, alternative agricultural crops.

### Introduzione

Lo studio delle risorse del territorio è basilare per l'implementazione di politiche mirate allo sviluppo economico del settore agricolo regionale, il cui sostegno e promozione sono parte della "mission" di ERSAF secondo il suo statuto. In quest'ottica l'Ente, tra le altre cose, esplora mediante studi e indagini sul campo, la possibilità di promuovere e incentivare coltivazioni alternative rispetto alle principali colture del sistema agricolo lombardo (le cosiddette "filieri minori").

Dal 2020, con l'avvio, in collaborazione con l'Università degli Studi di Parma e la società Timesis Srl, di un progetto sperimentale sul *terroir* del luppolo, sono stati effettuati studi e analisi mirati alla possibilità di uno sviluppo di tale coltura, soprattutto a beneficio delle aree marginali del territorio lombardo o come opportunità di diversificazione colturale alla luce del grande impulso che sta avendo il settore brassicolo artigianale.

Il presente studio riguarda l'elaborazione di specifici indici climatici che, unitamente all'analisi di attitudine pedologica parallelamente realizzata, consentano in futuro una valutazione di vocazionalità del territorio alla coltivazione professionale del luppolo per lo sviluppo di una filiera brassicola regionale. Tale studio, realizzato in sinergia con il settore della ricerca (University of Parma – Dept. Food and Drug) per applicare al meglio le conoscenze fin qui acquisite sulle caratteristiche fisiologiche, biologiche ed esigenze edafiche del luppolo, ha incluso l'analisi delle temperature

giornaliere (minime/massime), potenzialmente limitanti in tutte le sue fasi di crescita e delle precipitazioni medie annue che, in associazione con l'analisi del fabbisogno idrico nella fase vegetativa (legato alla effettiva disponibilità di acqua valutata in relazione alle esigenze specifiche della pianta), permette di prevedere la necessità di irrigazione della coltura, ed ha portato all'elaborazione delle "mappe di *suitability* climatica regionale".

### Materiali e Metodi

Tramite analisi di dati multidimensionali in ambiente GIS si è cercato di delineare una metodologia per comprendere i vari fattori limitanti la crescita del luppolo, a partire dallo studio delle variabili climatiche. La variabilità delle precipitazioni è un fattore chiave per l'agricoltura, poiché influisce direttamente sulla disponibilità di acqua per le colture e quindi sulla produttività agricola. Per questo motivo, è essenziale la conoscenza approfondita dei modelli di precipitazione nella regione e delle loro variazioni spaziali e temporali. Il GIS (*Geographic Information System*) consente di integrare e analizzare informazioni provenienti da diverse fonti, come stazioni meteorologiche, immagini satellitari e modelli climatici, oltre a creare mappe tematiche e visualizzare i dati in modo chiaro e intuitivo.

Con l'analisi dei dati multidimensionali in ambiente GIS si possono identificare le aree della regione più soggette a fenomeni meteorologici estremi, come forti piogge o siccità, per valutarne le ricadute potenziali sull'agricoltura. Queste



informazioni possono essere utilizzate per adattare le pratiche agricole alle variazioni climatiche minimizzando il rischio di perdita di suolo fertile e di produttività.

Per lo studio delle variabili climatiche si è fatto riferimento a dataset provenienti da fonti:

1. ArCIS: precipitazioni giornaliere su griglia 5kmx5km, ottenute dalle misure pluviometriche giornaliere della rete ex-SIMN e delle reti meteorologiche regionali (Pavan et al., 2019);
2. ARPA Lombardia: analisi su grigliato regolare 1.5km x 1.5km di: temperatura media oraria derivata dall'interpolazione delle misure di temperatura a 2 metri della rete di monitoraggio meteorologico regionale della Lombardia per il periodo 2001-2021 (Uboldi et al., 2008).
3. ARPA Lombardia: Stima giornaliera su grigliato regolare dell'evapotraspirazione potenziale derivata dall'interpolazione ottimale delle misure meteorologiche orarie della rete di monitoraggio meteorologico regionale per il periodo 2005-2021 (Lussana et al., 2010).

I tre dataset vengono raccolti e aggiornati attraverso le misurazioni specifiche delle centrali meteorologiche distribuite nel territorio di riferimento (vedi Fig 1 e Fig 2).

Per ottenere un'omogeneizzazione nella rappresentazione, tutti i dati sono stati proiettati nello stesso Sistema di Coordinate di Riferimento (CRS).

Per il nostro studio è stato utilizzato il sistema di riferimento proiettato geocentrico: WGS84, UTM 32N, sistema ufficiale della Regione Lombardia dal 2009.



Fig.1 – distribuzione geografica delle stazioni pluviometriche ArcCIS.

Fig.1 – Localization of the ArcCIS meteorological stations for northern Italy.

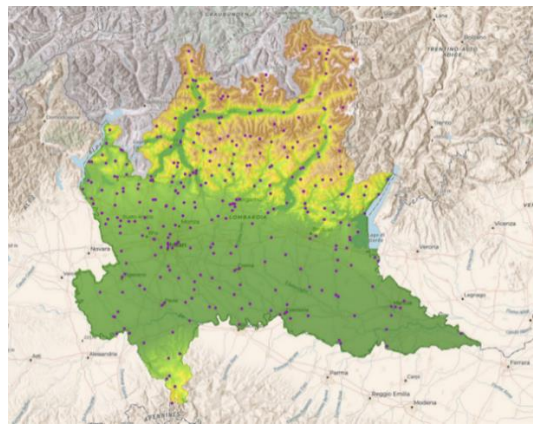


Fig.2 – Distribuzione delle stazioni automatiche della rete di monitoraggio meteorologico regionale di ARPA Lombardia nel 2021.

Fig.2 – ARPA Lombardia's mesoscale meteorological network in 2021.

### Gestione dei dati multidimensionali

Per l'elaborazione degli indici climatici di precipitazione cumulata annua, temperatura e fabbisogno idrico specifici per il luppolo si è considerata una serie storica strutturata in file raster multidimensionali di 20 anni per i dataset 1 e 2 (dal 1° gennaio 2001 al 31 dicembre 2021) e di 16 anni per il dataset 3 (dal 1° gennaio 2005 al 31 dicembre 2021).

Per facilitare l'elaborazione del dataset 1 (dati di precipitazione), è stato preliminarmente creato un unico dataset multidimensionale a partire dai dataset disponibili (organizzati in decenni, quinquenni e singolo anno) per coprire l'intero periodo considerato.

La procedura di preparazione dei dataset 2 (temperatura) e 3 (evapotraspirazione) è stata più complessa in quanto, per ogni cella del grigliato, si sono preliminarmente aggregati a livello giornaliero i dati orari della temperatura dell'aria, disponibili in un'unica serie storica per il periodo 2001-2021; quindi, sempre per ogni cella del grigliato, è stato identificato il valore di temperatura minima e massima giornaliera. I dati così ottenuti, organizzati in singoli file testuali giornalieri (per un totale di 7560 file per le temperature e 5760 file per l'ET0) sono stati quindi importati in due dataset multidimensionali (uno per variabile climatica) all'interno del GIS. I dati sono stati elaborati e classificati per ottenere gli indici climatici limitanti utili alla caratterizzazione della vocazionalità climatica della regione per la coltivazione del luppolo.

Gli specifici indici basati su precipitazione, temperatura ed evapotraspirazione, sono elencati di seguito:

- **A:** Precipitazioni annuali (cumulata media annua periodo 2001 – 2021).
- **B:** Indice fabbisogno idrico fase vegetativa (marzo-agosto) periodo di riferimento 2005 – 2021 (calcolato tramite analisi precipitazione, ET0 e Kc specifico della coltura).
- **C:** Indice attitudine per le CV “fresche” (numero di giorni  $\geq 30$  °C per il periodo giugno – agosto).



- **D:** Indice limitazione produttività causata da alte temperature (numero di giorni con temperatura massima > 35 °C per il periodo giugno – agosto).
- **E:** Indice limitazione crescita causata da basse temperature (numero di giorni con temperature < 8 °C per il periodo aprile -maggio)
- **F:** Indice limitazione fioritura causata da basse temperature – numero di giorni con temperature minime < 5 °C nel mese di giugno.

Tab.1 – Classi di vocazionalità attribuite per gli indici climatici limitanti per la coltivazione professionale del luppolo.

Tab.1 - Suitability classes attributed for the limiting climatic indices for the professional cultivation of hops.

CLASSI ►	Unità di misura	S1 suoli molto adatti	S2 suoli moderatamente adatti	S3 suoli poco adatti	N1 suoli temporaneamente non adatti	N2 suoli permanentemente non adatti
<b>A</b>	mm	>1500	1500-1200	1200-900	490 - 900	<490
<b>B</b>	mm	>=1200	<1200-800	800-300	600-300	<300
<b>C</b>	n° gg	<10	<15	<20	<25	>25
<b>D</b>	n° gg	<=5	<= 10	<=15	<=20	>20
<b>E</b>	n° gg	<5	5-10	10-15	15-20	>20
<b>F</b>	n° gg		<1			>= 1

Le mappe seguenti illustrano, per ognuno degli indici individuati, le classi di vocazionalità climatica del territorio lombardo alla coltivazione del luppolo.

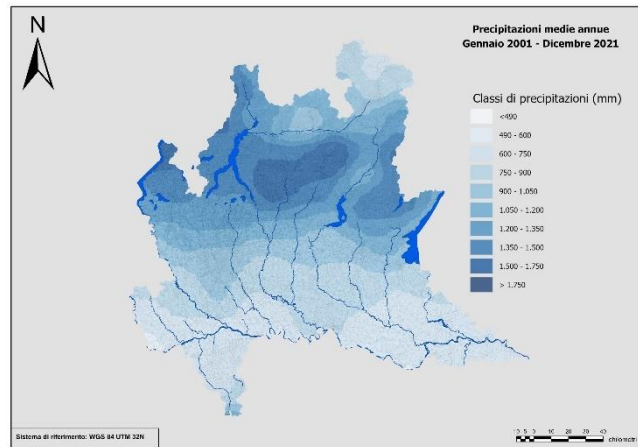


Fig.3 –Indice climatico A - Precipitazione cumulata media annua per il periodo marzo – agosto 2001/2021.

Fig.3 – Climatic index A - Average annual cumulative precipitation for the period March – August 2001/2021

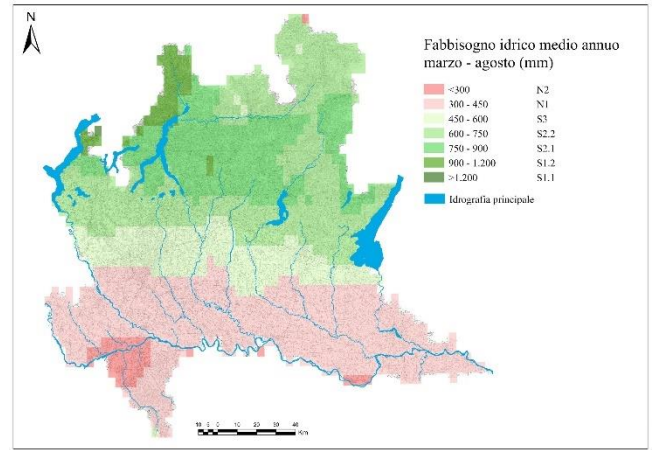


Fig.4 – Indice climatico B - Rappresentazione del fabbisogno irriguo per tutta la fase vegetativa del luppolo (Kc medio).

Fig.4 – Climatic index B - Representation of irrigation needs for the entire vegetative phase of hops (average Kc).

### L'importanza dell'evapotraspirazione (ET0)

L'evapotraspirazione assume un ruolo significativo nel determinare il fabbisogno idrico e nella regolazione della temperatura delle piante al fine di impedirne l'eccessivo riscaldamento, potenzialmente dannoso per la loro crescita e sviluppo, e prevenire lo stress idrico.

Inoltre, l'analisi dell'evapotraspirazione potenziale durante le diverse fasi fenologiche, rapportata alle effettive disponibilità idriche, è essenziale anche nel determinare le esigenze irrigue delle colture.

Il luppolo richiede una fornitura costante di acqua per soddisfare i suoi elevati tassi di traspirazione; a causa del suo rapido accrescimento e dei volumi di vegetazione che sviluppa, la carenza di disponibilità irrigua interferisce negativamente con la sua crescita, causandone la riduzione di resa, in termini di quantità prodotta, e di qualità.

La collaborazione col gruppo di ricerca dell'Università degli Studi di Parma – Dipartimento di Scienza degli Alimenti e del Farmaco (Prof. Tommaso Ganino e Prof.ssa Margherita Rodolfi) ha permesso di individuare il fabbisogno idrico del luppolo nelle diverse fasi fenologiche (vedi Tab. 2), attraverso la stima preliminare di Kc (indice specifico di evapotraspirazione). Tale valore Kc è stato definito utilizzando sia dati di letteratura (Rossini F et al, 2021) sia dati empirici (Ganino e Rodolfi, commento personale).

Tab.2 – Descrizione delle fasi fenologiche del luppolo.

Tab.2 -Description of the phenological phases of hop.

Fasi fenologica ↓	Periodo →		mesi corrispondenti da considerare	n gg relativi
	Kc	gg cumulati		
Primo germoglio che emerge dal suolo	0,55	0-59	marzo-aprile	61
Formazione primo paio di germogli laterali	0,75	60-89	maggio	31
Allungamento tralci al tetto dell'impianto	0,85	90-104	1 -14 giugno	15
Emergenza delle infiorescenze	1,05	105-134	15-giugno-14 luglio	30
Fine fioritura e inizio formazione coni	1,00	135-159	15 luglio-8 agosto	24
Sviluppo completo dei coni	0,90	160-179	9-31 agosto	19
	<b>Kc medio</b>		<b>totale giorni</b>	<b>180</b>

Sono quindi stati predisposti i dati raster della precipitazione cumulata media annua e dell'evapotraspirazione (ET0) annua, da cui sono stati derivati i sottoinsiemi di dati, relativi

ad ogni fase di crescita fenologica, ovvero allo specifico periodo temporale corrispondente, stimando il relativo fabbisogno idrico mediante la seguente formula:

$$Fb_i = Pcum_i - (ET0_i * Kc_i)$$

dove:

$i$  = fase fenologica del luppolo

$Fb$  = fabbisogno della coltura

$Pcum$  = pioggia cumulata media

$ET0$  = evapotraspirazione potenziale

$Kc$  = indice specifico di evapotraspirazione del luppolo

Il calcolo del fabbisogno idrico ha consentito di realizzare le mappe di attitudine per le diverse fasi fenologiche evidenziando per ogni area della regione i quantitativi idrici da apportare, per consentire il buon sviluppo della pianta.

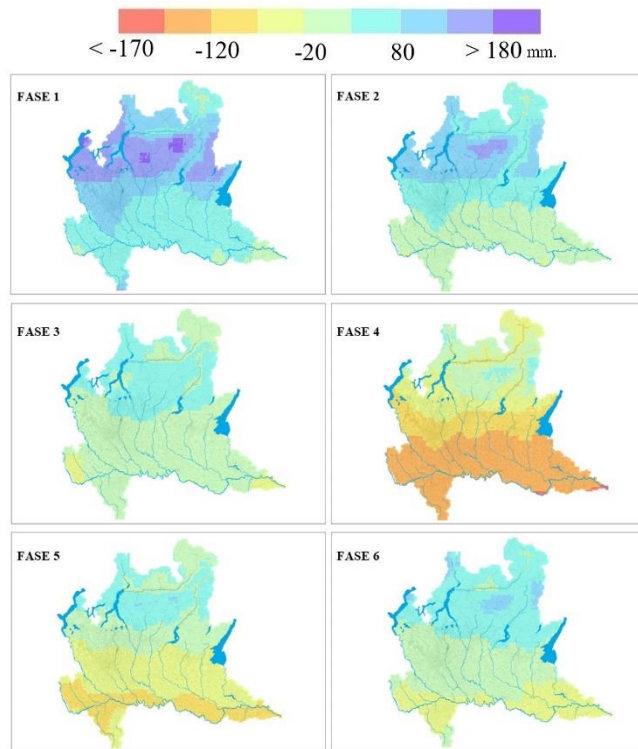


Fig.5 - Rappresentazione del fabbisogno irriguo del luppolo per fase fenologica in mm H<sub>2</sub>O.

Fig.5 – Representation of hop irrigation requirements by phenological phase (H<sub>2</sub>O mm).

### Indici di limitazione da temperatura

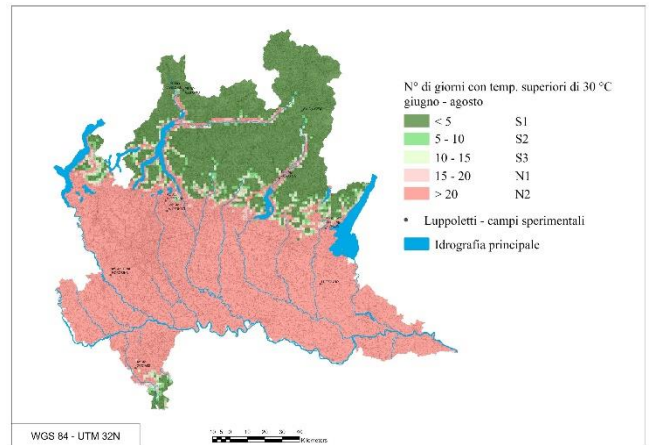


Fig.6 – Indice climatico C - Indice di attitudine per le “CV fresche”.

Fig.6 – Climatic index C - Aptitude index for “fresh CVs”.

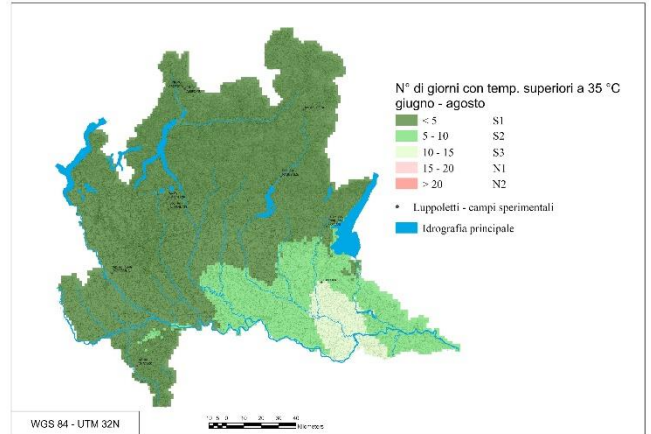


Fig.7 – Indice climatico D - Limitazione produttività a causa di alte temperature.

Fig.7 – Climatic index D - Productivity limitation due to high temperatures.

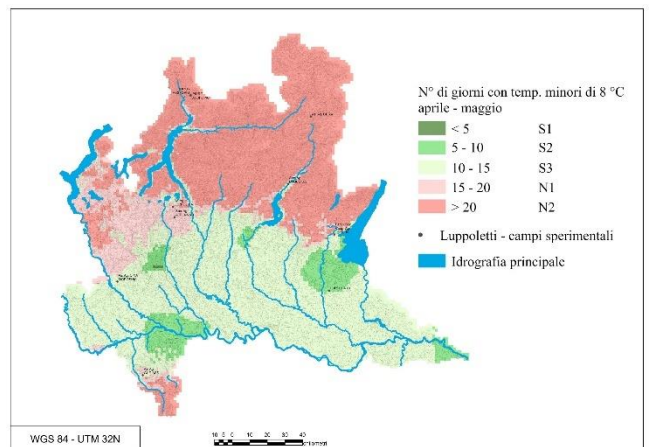


Fig.8 – Indice climatico E - Limitazione crescita dovuta alle basse temperature.

Fig.8 – Climatic index E - Growth limitation due to low temperatures.

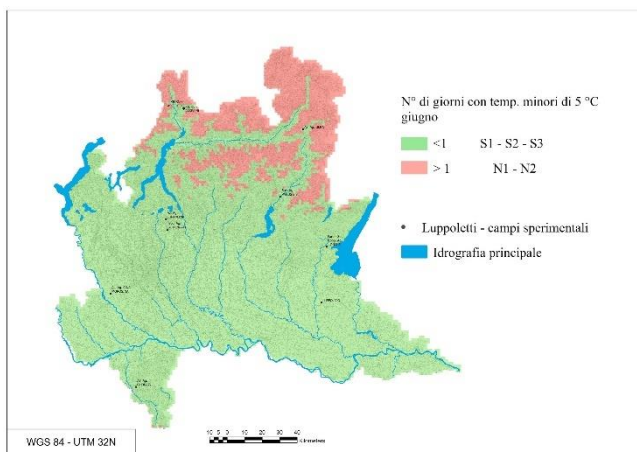


Fig.9 – **Indice climatico F** - Limitazione nello sviluppo della fioritura del luppolo dovuta alle gelate tardive.

Fig.9 – **Climatic index F** - Limitation in the development of hop flowering due to late frosts.

## Risultati e Discussione

Dai risultati evidenziati nelle mappe emerge che la precipitazione cumulata media annua (Fig. 3) risulta insufficiente per buona parte delle aree collinari e di pianura o fondovalle. La precipitazione cumulata media annua della sola fase vegetativa marzo-agosto (non rappresentata) risulta insufficiente per tutto il territorio lombardo, al di fuori delle aree di alta montagna. Il fabbisogno idrico medio derivato dalla sottrazione tra le precipitazioni e l'evapotraspirazione specifica per il luppolo (fig.4) indica la necessità di un apporto idrico esterno per garantire il buon sviluppo della coltura. Le fasi fenologiche più critiche risultano l'emergenza delle infiorescenze e tutta la fase di fioritura (fig. 5). Inoltre, va sottolineato che i dati rappresentati non considerano il tipo di suolo, il quale costituisce certamente una variabile aggiuntiva non trascurabile per stimare correttamente il fabbisogno irriguo per la coltivazione professionale del luppolo.

Relativamente alle limitazioni da temperatura, emerge come tutta la pianura, prima collina e fondovalle non siano idonei per le cultivar fresche (Fig. 6), mentre la limitazione per la resa a causa di alte temperature estive riguarda principalmente la pianura del settore orientale (Fig. 7). Le basse temperature primaverili (Fig. 8) possono risultare limitanti per alcune zone collinari, pedemontane e montane (il luppolo vegeta bene fino ai 1000 m slm), mentre le gelate tardive che possono danneggiare la fioritura riguardano le sole aree montane (Fig. 9).

Dal punto di vista della metodologia utilizzata le mappe di vocazionalità climatica del territorio alla coltivazione del luppolo realizzate presentano alcune limitazioni.

In primo luogo, si ritiene che la lunghezza delle serie temporali considerate sia molto probabilmente insufficiente per una robustezza statistica, sia considerando la rapida evoluzione del fenomeno del cambiamento climatico in atto. Si segnala inoltre la possibile limitata accuratezza e/o bias dei risultati nelle zone di confine regionale, per mancata acquisizione del dato di temperatura al di fuori della regione,

ed in alcune zone, per il possibile malfunzionamento in alcuni periodi nell'arco temporale considerato. Inoltre, il fenomeno delle precipitazioni può avere una variabilità spaziale molto elevata anche nell'ambito di distanze limitate e non risulta pertanto rappresentata in modo realistico dal numero di centraline disponibili sul territorio. Pertanto, mentre la spazializzazione degli indici derivati dalla temperatura presenta un buon grado di affidabilità (salvo sui confini), quella relativa al fabbisogno irriguo sconta la problematica sopra evidenziata e necessita certamente di ulteriori approfondimenti.

## Considerazioni Finali e Sviluppi futuri

L'analisi climatica realizzata da ERSAF, in collaborazione con Università di Parma e ARPA Lombardia, ha evidenziato limitazioni di resa per temperature non adeguate nelle diverse fasi di crescita della pianta (rischio di gelate tardive o alte temperature estive) e per rischio di deficit idrico.

È stata altresì valutata, con riscontro positivo, l'affidabilità della metodologia di calcolo degli indici a partire da *raster* multidimensionali rispetto a quelli calcolati da ARPA Lombardia (file ASCII) mediante l'utilizzo di *software* statistici, a partire dai medesimi dataset.

Infine, in relazione al calcolo del fabbisogno irriguo, si considera utile un confronto con i risultati di ET potenziale derivabili dalle immagini satellitari (MODIS) che presentano da un lato una risoluzione spazio – temporali differente rispetto ai dati misurati dalle centraline, ma che dall'altro non considerano il Kc specifico del luppolo.

In relazione al luppolo, ERSAF, in collaborazione con Università di Parma, Timesis S.r.l, ha svolto, in parallelo all'analisi climatica, l'analisi integrata delle caratteristiche del suolo e della topografia, che ha permesso di individuare a scala regionale (1:250.000) le aree territoriali con diversa attitudine pedologica alla sua coltivazione. L'integrazione fra l'attitudine climatica e quella pedologica, al momento non ancora disponibile, permetterà di elaborare la mappa della vocazionalità del territorio lombardo alla coltivazione del luppolo.

## Bibliografia

- V. Pavan, *et al.* (2019). High resolution climate precipitation analysis for north-central Italy, 1961–2015. *Climate Dynamics*, 52, 3435-3453.
- Francesco Uboldi, Cristian Lussana, Marta Salvati (2008). Three-dimensional spatial interpolation of surface meteorological observations from high-resolution local networks. *Meteorological Applications*, 15, 331–345.
- C. Lussana, F. Uboldi (2010). Reference crop evapotranspiration estimate using high-resolution meteorological network's data. *Advances in Science and Research*, 3, 113–118.
- F. Rossini, *et al.* (2021). Hops (*Humulus lupulus* L.) as a Novel Multipurpose Crop for the Mediterranean Region of Europe: Challenges and Opportunities of Their Cultivation. *Agriculture* 2021, 11, 484. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060484>. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/overview-of-multidimensional-raster-data.htm>



# SHORT-TERM EFFECTS ON THE PHYSICAL AND HYDRAULIC PROPERTIES OF A SANDY SOIL AMENDED WITH COMPOST, VERMICOMPOST AND BIOCHAR

## EFFETTI A BREVE TERMINE SULLE PROPRIETÀ FISICHE E IDRAULICHE DI UN SUOLO SABBIOSO AMMENDATO CON COMPOST, VERMICOMPOST E BIOCHAR

Mirko Castellini\*, Luisa Giglio

Council for Agricultural Research and Economics–Research Center for Agriculture and Environment (CREA–AA), Via C. Ulpiani 5, 70125 Bari, Italy  
\* mirko.castellini@crea.gov.it

### Abstract

Intensive agriculture can be one of the main causes for loss fertility and soil degradation. It was widely proven that soil amendments have beneficial effects on water availability and soil quality resulting in higher crop yields. However, despite the large literature available on this topic, relatively little information exists on the short-medium term effects of soil amendments on the physical and hydraulic properties of the soils. In this laboratory investigation, the short-term effect (< 1 year) of different soil amendments (i.e., biochar, compost and vermicompost) was evaluated, and the impact on main physical and hydraulic properties of a sandy soil quantified. Small plastic boxes (15 l) were filled with air-dried soil/amendments mixtures at 4.8% proportion by weight, to evaluate: i) the water retention curve at the beginning/end of investigation, and ii) the saturated soil hydraulic conductivity ( $K_s$ ) at the beginning/middle/end of investigation. To account for the possible impact of antecedent soil water content on hydrodynamic soil properties, two standardized soil water contents at the time of measurements, i.e., very low ( $\theta_{i,d}$  equal to  $0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) and near to field capacity ( $\theta_{i,w}$  equal to  $0.22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) were also considered.

After 10 months of trial, main results showed a general reduction in water retention of the amended soils, also because of reducing the larger pores. This finding was confirmed by the reduction in saturated hydraulic conductivity, both in the very short-term (4 months) and at the end of the investigation (10 months). In general, the  $K_s$  estimate was found to depend on the initial soil water content, given that significantly higher  $K_s$  values were obtained starting from almost dry soil conditions. For the considered amendment rate and experiment duration, no substantial differences were detected among soil improvers, although both types of compost produced slightly better water retention near to water saturation.

The research provided useful information to deepen our knowledge of the short-medium term effects of amendments on the physical and hydraulic properties of the soil. However, further research is needed in this context to evaluate the effects of implementing an increasing amount of soil amendments and quantify their actual effectiveness over time, with the aim of optimizing water resources in agriculture.

### Parole chiave

Ammendanti del suolo, ritenzione idrica del suolo, conducibilità idraulica

### Keywords

Soil amendments, soil water retention, hydraulic conductivity

### Introduzione

L'utilizzo di ammendanti è consigliato per migliorare ritenzione idrica dei suoli, soprattutto per quelli a tessitura sabbiosa (Lal, 2009; Bondì et al., 2022). Tuttavia, nonostante le possibili molteplici implicazioni, spesso rilevanti per l'ottimizzazione della risorsa idrica dei suoli agricoli, numerosi specifici effetti indotti dall'ammendamento dei suoli restano ancora poco esplorati, ed informazioni più dettagliate sono necessarie. Ad esempio, specifici approfondimenti sull'effetto di breve-medio termine dell'uso di compost sulle proprietà fisiche e idrauliche fisico di un terreno argilloso sono stati riportati da Castellini et al (2022). Gli autori hanno verificato che gli effetti dell'aggiunta di compost sulla conducibilità idraulica del

suolo saturo svanivano dopo circa undici mesi dal trattamento. Bondì et al. (2022) hanno valutato l'affidabilità di alcuni indicatori di qualità fisica del suolo e l'effetto sui parametri di distribuzione delle dimensioni dei pori per quantificare l'efficacia dell'ammendamento con compost in un suolo franco-sabbioso. Essi hanno evidenziato che l'aggiunta di compost alterava efficacemente il sistema di distribuzione dei pori del suolo e gli indicatori di qualità fisica associati, con conseguenti possibili effetti positivi sull'idrologia del suolo e, più in generale, sui servizi ecosistemici. Castellini et al. (2024) hanno valutato l'impatto dell'uso del vermicompost su suoli con diversa granulometria. In generale, la ricerca ha consentito di individuare l'influenza dovuta alla classe di tessitura del suolo. Da un punto di vista pratico per le applicazioni in campo agronomico, è stato evidenziato come indicatori

legati all'acqua disponibile per le piante (*PAWC*) possano aumentare significativamente al crescere della concentrazione di vermicompost solo nei terreni a tessitura grossolana.

Le ricerche riportate possono pertanto avere importanti implicazioni per una più accurata calibrazione delle quantità di ammendante da implementare nei suoli agricoli e per quantificarne la reale efficacia nel tempo, ma ulteriori approfondimenti sono necessari nell'ottica dell'ottimizzazione della tecnica dell'ammendamento nelle varie condizioni applicative.

In questa indagine sperimentale è stato valutato l'impatto di breve termine (< 1 anno) di diversi tipi di ammendanti (biochar, compost e vermicompost) su un suolo sabbioso, in una prova controllata di laboratorio. L'effetto dell'ammendamento è stato valutato sulle principali proprietà fisiche e idrauliche del suolo, includendo curva di ritenzione idrica, curva di infiltrazione, conducibilità idraulica a saturazione e variabili derivate. L'effetto del contenuto idrico al momento delle misure di infiltrazione (quasi secco o alla capacità di campo) è stato considerato per tenere conto del possibile effetto di umidità iniziale del suolo sulla stima delle proprietà idrodinamiche.

## Materiali e Metodi

La ricerca è stata condotta nel biennio 2021-2022 su un suolo sabbioso (classificazione USDA) prelevato in un'azienda privata del metapontino (Ginosa, Taranto), con contenuto in argilla e sabbia pari, rispettivamente, al 16 e 71%. Per informazioni dettagliate sul suolo si prega di fare riferimento a Castellini et al. (2024), mentre per la caratterizzazione degli ammendanti utilizzati si rimanda alle pubblicazioni di Castellini et al. (2024) e Leogrande et al. (2024), rispettivamente per vermicompost e compost-biochar.

Il suolo è stato essiccato all'aria, setacciato ad un diametro di 2 mm e caratterizzato dal punto di vista chimico (Castellini et al., 2024). Un totale di otto cassette di plastica per alimenti di 15 l ciascuna (dimensioni interne di 36.5x26.5x15 cm<sup>3</sup>) sono state utilizzate per i quattro trattamenti con replica (controllo, biochar, compost e vermicompost) (Fig.1a). Ciascuna cassetta è stata riempita con la medesima quantità di suolo-ammendante (18 kg). In particolare, ad eccezione del controllo non ammendato, nelle restanti 6 cassette è stata aggiunta una prefissata quantità dei tre ammendanti (biochar, compost e vermicompost) pari al 4.8% in peso; ciò ha fornito termini di confronto anche rispetto a precedenti ricerche condotte con lo stesso suolo (Castellini et al., 2024).

Per ciascun trattamento, è stata determinata la curva di ritenzione all'inizio (T0) ed alla fine (dopo dieci mesi, T10) della ricerca, applicando metodi standard di laboratorio (Bondi et al., 2024).

La conducibilità idraulica alla saturazione,  $K_s$  è stata determinata in tre epoche, T0, T4 (dopo 4 mesi) e T10, a partire da due condizioni iniziali di umidità del suolo, ovvero secco all'aria ( $\theta_{i,d} = 0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) e corrispondente alla capacità idrica di campo ( $\theta_{i,w} = 0.22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ). Il raggiungimento di  $\theta_{i,d}$  è stato accelerato con l'ausilio di un

ventilatore (Fig.1b), mentre  $\theta_{i,w}$  è stato raggiunto versando 1.5 l di acqua per cassetta (stagione primaverile estiva) o, in alternativa, esponendo le stesse a piogge naturali (autunno-inverno). Per evitare alterazioni locali della superficie del suolo durante la fase di bagnamento artificiale, l'acqua è stata versata direttamente su un disco poroso poggiato sulla superficie della cassetta (Fig.1c). Il contenuto idrico del suolo è stato determinato con sonde capacitive (Fig.1d). Di conseguenza, due determinazioni di  $K_s$  sono state ottenute per ciascuna delle 3 epoche (T0, T4 e T10) a seconda del contenuto idrico di partenza delle cassette ( $\theta_{i,d}$  e  $\theta_{i,w}$ ). Il valore di  $\theta_{i,w}$  è stato raggiunto dopo 14 gg in T0 e 7 gg in T4 e T10.

La conducibilità idraulica alla saturazione è stata determinata applicando il metodo semplificato *SSBI* a partire dall'analisi della fase quasi stazionaria della curva di infiltrazione ottenuta da esperimenti del tipo beerkan (Bagarello et al., 2017). La prova di infiltrazione beerkan è stata condotta utilizzando un cilindro metallico di piccole dimensioni (5 cm di diametro e 5 cm in altezza) in cui sono stati versati, consecutivamente, 20 volumi idrici di 16 cc ciascuno, così da stabilire un tirante idrico di circa 0.8 cm. Per la stima di  $K_s$  è stato utilizzato un valore tabellare del parametro  $\alpha^* = 0.036 \text{ mm}^{-1}$ , caratteristico dei suoli con scarsa capillarità (Castellini et al., 2021).

La curva di ritenzione idrica è stata parametrizzata col modello di van Genuchten (vG) utilizzando l'interfaccia web del software SWRC-Fit di Seki (2007), mentre la  $K_s$  è stata determinata con il foglio di calcolo "open source" disponibile alla pagina web: <https://bestsoilhydro.net/other/>. Di conseguenza, i) per ciascuna curva di ritenzione idrica del suolo, sono stati ottenuti i parametri del modello vG ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ) con cui sono stati calcolati alcuni indicatori di qualità fisica del suolo, tra cui acqua disponibile, capacità di aerazione, ecc. (Castellini et al., 2024); ii) per fini di confronto, per ciascuna curva di infiltrazione è stato determinato il tempo necessario per raggiungere le condizioni di flusso quasi-stazionario ( $t_s$ ), la corrispondente profondità di infiltrazione  $I(t_s)$  e la durata totale dell'esperimento ( $t_{end}$ ).

La distribuzione di frequenza è stata assunta di tipo normale per la curva di ritenzione e per gli indicatori da essa derivata; viceversa, è stata assunta come log-normale per la conducibilità idraulica (Reynolds et al., 2009). Per ciascuna variabile considerata nella ricerca, il confronto tra i valori medi è stato eseguito secondo un *test-t* a due code, mentre per l'analisi temporale è stato applicato il *test di Tukey (THSD-test)*. In tutti i casi, è stato considerato un livello di significatività  $p = 0.05$ .



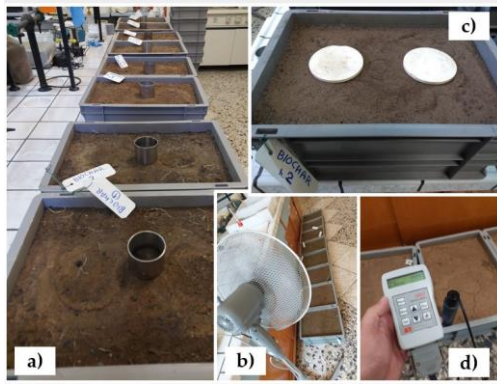


Fig.1 - Immagini delle cassette durante le prove di infiltrazione in laboratorio (a), con dettagli delle fasi di essiccazione forzata (b), di bagnamento (c), e del monitoraggio del contenuto idrico del suolo (d) phases.

### Risultati e Discussione

Per motivi di sintesi, si riportano i risultati principali relativi solo agli effetti su ritenzione idrica e conducibilità idraulica a saturazione. In generale, l'aggiunta di ammendanti non ha determinato un significativo incremento della ritenzione idrica al T0, seppure un effetto meno trascurabile sia stato osservato in seguito all'utilizzo del biochar (Fig.2). Indipendentemente dall'ammendante utilizzato, infatti, l'apporto di ammendante al suolo sabbioso ha determinato un incremento del contenuto idrico a saturazione di  $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , o un incremento di  $0.01\text{-}0.02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  corrispondente alla capacità idrica di campo e punto di appassimento. Tuttavia, tale effetto degli ammendati non è risultato significativo ad un *test-t*.

Indipendentemente dal materiale utilizzato, il confronto tra i suoli ammendati all'inizio (T0) ed alla fine (T10) della sperimentazione ha evidenziato una generale riduzione della ritenzione idrica misurata, con differenze significative ad un *test-t* per dati appaiati (Fig.2). Ciò indica una possibile generale riduzione della porosità del suolo, soprattutto per la classe dei pori di maggiore dimensione (macropori). Tale effetto non è stato riscontrato per il suolo di controllo (dati non riportati in grafico). Tuttavia, nonostante fosse generalmente attesa una maggiore velocità di degradazione di COM e VER rispetto a BIO, la riduzione media della ritenzione idrica nell'intervallo dei valori misurati (5-100 cm di potenziale matriciale) è risultata confrontabile tra compost e biochar ( $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ). L'effetto ammendante del compost è risultato intermedio tra vermicompost e biochar, ed il confronto tra le curve di ritenzione modellizzate al T0 è sintetizzato in Fig.3.

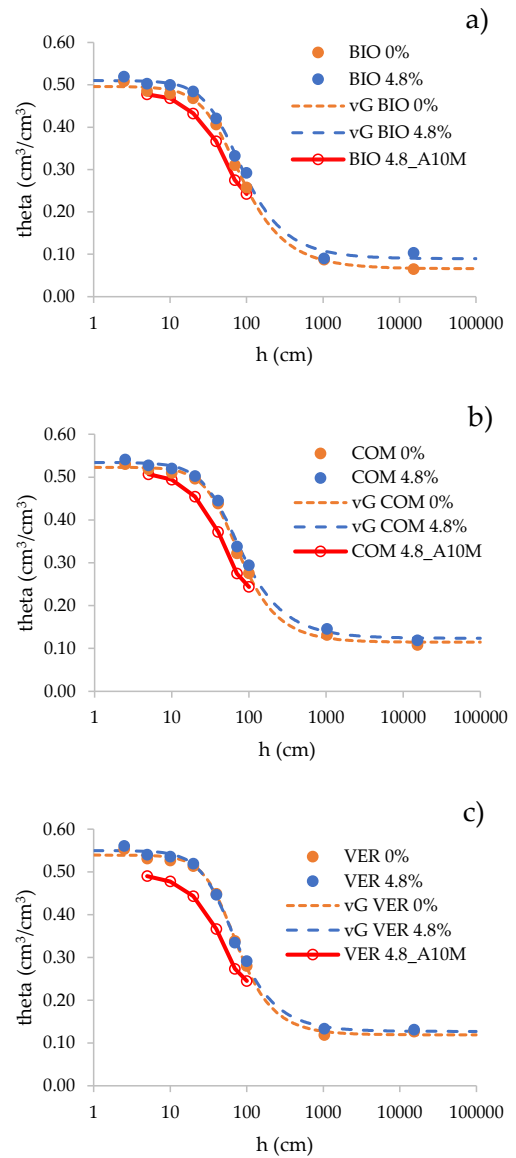


Fig.2 - Curve di ritenzione idrica corrispondenti all'ammendamento del suolo con biochar (a), compost (b) e vermicompost (c), alle due concentrazioni (0 e 4.8%). In tratteggio sono state riportate le curve interpolanti le misure sperimentali ottenute con il modello vG. Le misure ripetute dopo 10 mesi (A10M) sono evidenziate in rosso.

Fig.2 - Water retention curves corresponding to soil amendment with biochar (a), compost (b) and vermicompost (c), at the two considered rates (0 and 4.8%). The curves interpolating the experimental measurements obtained with the vG model are shown in dashed lines. Measurements repeated after 10 months (A10M) are showed in red.

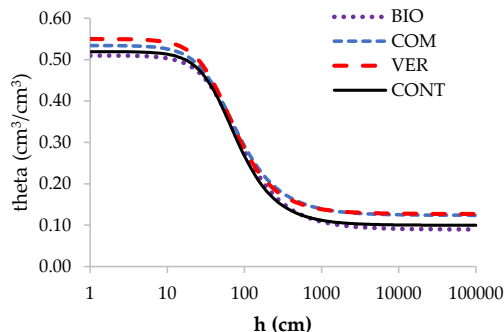


Fig.3 - Effetto ammendante di biochar (BIO), compost (COM) e vermicompost (VER) rispetto al suolo non ammendato (CONT).

Fig.3 - Amendment effect of biochar (BIO), compost (COM) and vermicompost (VER) compared to non-amended soil (CONT).

Il confronto in termini di curva di distribuzione di frequenza empirica di  $K_s$  riportato in Fig. 4 evidenzia che per i suoli ammendati, indipendentemente dall'epoca di misura (T0, T4 o T10), la conducibilità idraulica a saturazione è risultata più elevata in condizioni di suolo inizialmente secco ( $\theta_{i,d}$  pari  $0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) rispetto a condizioni iniziali più umide e pari alla capacità di campo ( $\theta_{i,w}$  pari  $0.22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ). Aggregando i dati disponibili, i valori di  $K_s$  ottenuti in condizioni di suolo secco sono risultati essere 6.4 volte più elevati di quelli ottenuti in condizioni di suolo umido all'inizio dell'esperimento; tali differenze sono risultate significative al *test-t*. In accordo con la rilevata riduzione della ritenzione idrica, anche la  $K_s$  si è ridotta nel tempo (Fig.4). È stata infatti osservata una riduzione massima della  $K_s$  di un fattore 1.7 (T0-T10), e riduzioni di un fattore 1.2 e 1.4, rispettivamente nei primi 4 (T0-T4) e successivi 6 mesi (T4-T10) di sperimentazione. Tali differenze non sono tuttavia risultate significative al *test-THSD*.

## Conclusioni

Nella ricerca è stato valutato l'effetto di breve termine dell'ammendamento di un suolo sabbioso con biochar, compost e vermicompost, ad una concentrazione corrispondente a circa 19 t/ha. Dopo 10 mesi dall'inizio della prova sperimentale, è stata osservata una generale riduzione della ritenzione idrica dei suoli ammendati, anche per l'effetto di riduzione dei pori di maggiore dimensione. Tale effetto è stato confermato dalla riduzione della conducibilità idraulica a saturazione, sia nella data di misura intermedia (4 mesi) che in quella finale (a 10 mesi dall'inizio della ricerca). In generale, la stima delle  $K_s$  è risultata dipendente dal contenuto idrico iniziale del suolo, dato che valori significativamente più elevati della  $K_s$  sono stati ottenuti partendo da condizioni di suolo quasi secco. Con riferimento alla dose di ammendante utilizzata e per la durata della sperimentazione, non sono state rilevate differenze sostanziali dovute al tipo di materiale utilizzato, seppure i due compost abbiano determinato una migliore ritenzione

dell'acqua nelle condizioni di quasi saturazione del suolo sabbioso considerato; tale effetto, corrispondente all'intervallo di circa 0-20 cm di potenziale matriciale, precede la fase di rapido svuotamento dei pori di maggiori dimensioni.

La ricerca ha fornito utili indicazioni per approfondire le conoscenze degli effetti di breve-medio termine indotte dall'ammendamento sulle proprietà fisiche e idrauliche del suolo. Ulteriori ricerche in questo contesto sono tuttavia necessarie per valutare gli effetti di crescenti dosi di ammendamento del suolo e quantificarne l'effettiva efficacia nel tempo, e nell'ottica di ottimizzare la tecnica nelle diverse condizioni applicative.

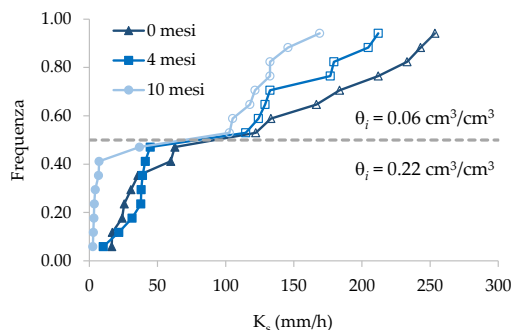


Fig.4 - Distribuzione di frequenza empirica della conducibilità idraulica alla saturazione ( $K_s$ ) corrispondente a tre date di campionamento (0, 4 e 10 mesi). La linea tratteggiata discrimina gli esperimenti condotti in condizioni iniziali di suolo quasi secco ( $\theta_i=0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) o prossimo alla capacità idrica di campo ( $\theta_i=0.22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ).

Fig.4 - Empirical frequency distribution of saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) corresponding to three sampling dates (0, 4 and 10 months). The dotted line discriminates the experiments conducted starting from dry ( $\theta_i=0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) and close to field capacity ( $\theta_i=0.22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) initial soil conditions.

## Ringraziamenti

La ricerca è stata condotta e divulgata col supporto finanziario del progetto "Water4AgriFood, Miglioramento delle produzioni agroalimentari mediterranee in condizioni di carenza di risorse idriche", PNR 2015-2020", finanziato dal MIUR, PON ARS01\_00825 "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 e del progetto Genforagris "Fenotipizzazione di genotipi di olivo resistenti a Xylella fastidiosa e messa a punto di un modello di gestione agronomica ad elevata sostenibilità", Finanziato dal MASAF D.M. n. 664538 del 28/12/2022. Gli autori desiderano ringraziare il Dott. Antonio Preite per il contributo sperimentale fornito nella ricerca.

## Bibliografia

- Bagarello, V., Di Prima, S., & Iovino, M. (2017). Estimating saturated soil hydraulic conductivity by the near steady-state phase of a Beerkan infiltration test. *Geoderma*, 303, 70–77.
- Bondì, C., Castellini, M., & Iovino, M. (2022). Compost Amendment Impact on Soil Physical Quality Estimated from Hysteretic Water Retention Curve. *Water*, 14, 1002.
- Castellini, M., Di Prima, S., Moret-Fernández, D., & Lassabatere, L. (2021). Rapid and accurate measurement methods for determining soil hydraulic properties: A review. *J. Hydrol. Hydromech.* 69, 121–139.
- Castellini, M., Diacono, M., Preite, A., & Montemurro, F. (2022). Short- and Medium-Term Effects of On-Farm Compost Addition on the Physical and Hydraulic Properties of a Clay Soil. *Agronomy*, 12, 1446.
- Castellini, M., Bondì, C., Giglio, L., & Iovino, M. (2024). Impact of vermicompost addition on water availability of differently textured soils. Submitted on *Heliyon*.
- Lal, R. (2009). Challenges and opportunities in soil organic matter research. *Eur. J. Soil Sci.*, 60 (2), 158–169.
- Leogrande, R., Vitti, C., Castellini, M., Garofalo, P., Samarelli, I., Lacolla, G., Montesano, F.F., Spagnuolo, M., Mastrangelo, M., & Stellacci, A.M. (2024). Residual Effect of Compost and Biochar Amendment on Soil Chemical, Biological, and Physical Properties and Durum Wheat Response. *Agronomy*, 14(4), 749.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., & Yang, X.M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152, 252–263.
- Seki, K. (2007). SWRC fit-A nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 4, 407–437.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PERFORMANCE ON MACHINE-LEARNING-BASED IRRIGATION SYSTEM VERSUS TRADITIONAL METHODS FOR BROAD BEANS

## VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DI UN SISTEMA DI IRRIGAZIONE BASATO SUL MACHINE-LEARNING RISPETTO AD UN APPROCCIO TRADIZIONALE: UN CASO STUDIO SU FAVINO

Andrea Martelli<sup>1\*</sup>, Davide Rapinesi<sup>1</sup>, Itzel Inti Donati<sup>1</sup>, Leonardo Verdi<sup>2</sup>, Anna Dalla Marta<sup>2</sup>, Filiberto Altobelli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CREA (Research Centre for Agricultural Policies and Bioeconomy, Rome, Via Barberini 36, Italy)

<sup>2</sup> DAGRI (Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry - University of Florence, Piazzale delle Cascine 18, Florence Italy)

\*[andrea.martelli@crea.gov.it](mailto:andrea.martelli@crea.gov.it)

### Abstract

Legumes are pivotal for fostering sustainable and competitive farming systems. However, enhancing their economic viability requires innovative strategies to boost yields and optimize resource use such as water. The advent of IoT in agriculture, propelled by technologies such as machine learning (ML), is revolutionizing precision irrigation. In this study in central Italy, it's explored a ML-based decision support systems (DSS) for optimizing support irrigation of broad beans (*Vicia Faba* var. Minor). Over two years (2021-2022), two irrigation strategies—ML-DSS and a traditional method (based on  $ET_c$  computed) were compared, alongside varying seeding densities (40, 50, and 60 plants per square meter). The study aimed to assess broad bean responses to irrigation management and seeding density impacts on yield. Irrigation positively impacted growth and yield compared to rainfed conditions. ML-DSS exhibited the highest average yield in terms of WP ( $8.41 \text{ Kg mm}^{-1}$ ). This result was similar to the ETC method ( $7.97 \text{ kg mm}^{-1}$ ) confirming the positive fallout of the ML-DSS approach. Initially, seeding densities showed no effect but boosted yield in the second year (2.88 to  $3.97 \text{ t/ha}$ ) when increasing plants density. ETC and ML-DSS with 60 plants/ $\text{m}^2$  showed the best results, while non-irrigated conditions favored 50 plants/ $\text{m}^2$ . Support irrigation fostered higher and more consistent yields over time. In general, the ML-based systems showed similar results with the ETC approach. However, during those periods with extremely high temperature, ML-DSS approach showed some criticisms in terms of water productivity.

### Parole chiave

Produttività dell'acqua; favino; ML-DSS; intelligenza artificiale

### Keywords

Water Productivity; Broad Bean; ML-DSS; artificial intelligence

### Introduction

Legumes, such as broad beans (*Vicia faba* L. var. minor), play an important role in agriculture as a source of protein for animal feed and especially as an improving soil fertility crop. Its inclusion in crop rotations is advantageous due to the Biological Nitrogen Fixation (BNF) by symbiotic bacteria *Rhizobium*, reducing the need for inorganic N-fertilizers (Aschi *et al.*, 2017). Additionally, broad beans cultivation attracts pollinators, and the new CAP (Common Agricultural Policy) emphasizes legumes' role in eco-schemes (Runge *et al.*, 2022). However, broad bean cultivation in Italy has declined over the years in favor of soybean cultivation (FAOSTAT, 2022). Comparing soybean (*Glycine Max* L.) to broad beans, soybean offers a higher protein content into the seeds, but its cultivation requires significant input, including water (Quinn *et al.*, 2019). In this regard, broad bean can be an alternative (Gatta *et al.*, 2013) in terms of adaptation to climate change, especially in the

Mediterranean area. In this perspective, it is assumed that it will be necessary to support the production of broad bean through resilient genotypes and through careful management of the water availability (Almamari and Altaweel, 2023; Karkanis *et al.*, 2018). Several studies, have shown that irrigation on broad beans significantly improves yields and their stability, increasing seed weight (Olle *et al.*, 2019; Zeleke and Nendel, 2019; Dudek *et al.*, 2018; Ouji *et al.*, 2017; Di Paolo *et al.*, 2015). In Italy, where irrigation is not usual for broad beans, climate change requires a new approach. This study aims to assess the impact of irrigation on the growth and yield of broad beans, comparing a machine learning decision support system (ML-DSS) and irrigation methods based on the evapotranspiration ( $ET_c$ ) in combination with three different seeding densities. In particular, the study aims to improve the sustainability and competitiveness of broad bean cultivation in a changing agricultural environment.

## Materials and methods

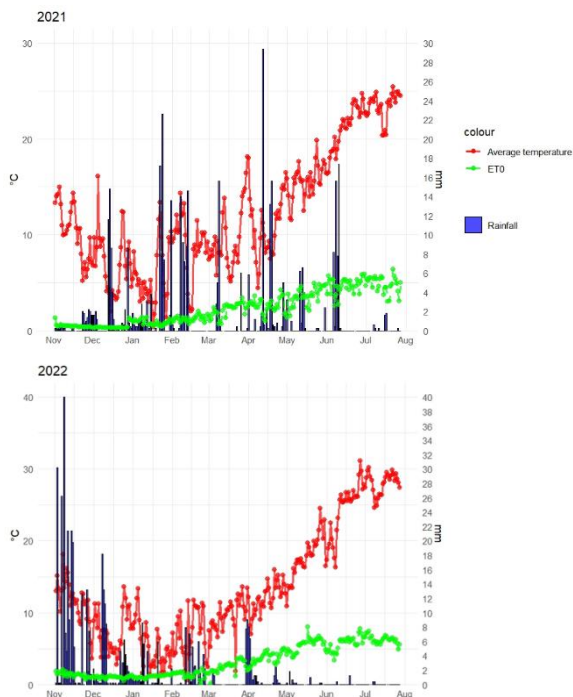
An open-field trial was conducted in La Storta (Rome, Italy: 41°57'55.9" N 12°20'23.3"E) which is characterized by dry-warm summers and with precipitations that are concentrated in winter and spring. Meteorological data from 2010 to 2020 revealed average annual temperatures of 14.90 °C and an annual rainfall of 941.42 mm, with most rain falling between October and March. Soil analysis indicated a clay loam texture, rich in organic matter (2.61 %) and with a favorable C/N ratio (10.1). The trial utilized a split-plot design, comparing two irrigation methods and three seeding densities (40, 50 and 60 plants per square meters) against a rainfed control group. Broad bean (*Chiaro di Torrelama var.*) was sown in November and harvested in July. Pre-sowing fertilization was carried out using triple perphosphate (title: 46%). Weed control didn't required chemical intervention. Irrigation was performed via sprinkler irrigation, with the goal of replenishing 100% of daily crop evapotranspiration ( $ET_c$ ). In particular, two irrigation management methods were employed: a method, programmed irrigation once the calculated crop evapotraspiration ( $ET_c$ ) minus rainfall accumulation has reached the threshold of 40 mm and another based on ML-DSS approach. The latter utilized IoT technologies and machine learning algorithms to predict soil water balance. Climatic data, collected using an automatic weather station, were utilized to compute various parameters such as relative precipitation index (RPI) and potential evapotranspiration ratio (P/ET). These indicators provided insights into moisture conditions throughout the growing seasons. At harvest, Dry Biomass per plant ( $DB_{plant}$ ) and per plot (TDB), stems height and yield per plant ( $Y_{plant}$ ) and per plot (TY) were measured. The yield productivity of water (TYWB) and biomass (DBWP) and the Harvest Index (HI) were calculated on the basis of these measurements. Statistical analysis, including *two-way* ANOVA, assessed the impact of irrigation management and seeding density on yield and growth parameters. The discussion examines the results of the analysis of variance (ANOVA) in the following order: year, irrigation treatment, seeding density and finally their interactions (Treatment x Seeding Density).

## Results and discussions

In the two experimental years, significant variations were observed in maximum average temperatures and rainfall distribution (Figure 1).

Specifically, the average temperature in the first year was 12.40 °C, ranging from -0.16 to 26.36 °C, while in the second year, it was 13.57 °C, ranging from - 6.09 to 40.50 °C. Examining hydroclimatic variables (Table 1) from November to July for each experimental year, total rainfall was similar (408 mm in 2020/21 and 476 mm in 2021/22) but notable differences were observed in rainfall distribution (Fig. 1). In the first year, the month with the highest rainfall was January, with 87.4 mm, while in the second it was November with 267 mm fallen

Fig.1 – Andamento climatico dei due anni sperimentali.  
Fig.1- Climate trends over the experiment.



Tab.1 – Dati e parametri climatici mensili.

Tab.1 – Monthly Climatic data and parameters.

	Year 2020/21	Nov.	Dec.	Jen.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Tot/ Avg
Temperature avg [°C d <sup>4</sup> ]	10,35	6,98	5,60	8,96	9,53	10,88	15,59	21,15	23,43	12,50	
Max temperature [°C]	15,3	16,53	13,82	15,11	18,85	18,66	20,53	25,55	26,36	18,97	
Min temperature [°C]	4,41	1,33	-0,17	1,24	4,34	3,47	10,87	15,56	19,45	6,72	
Rainfall [mm]	15,85	61,00	87,40	56,00	30,40	79,20	24,80	49,60	4,60	408,85	
E0 [Avg. mm d <sup>-1</sup> ]	0,43	0,37	0,82	1,23	2,11	2,63	3,6	4,68	4,82	2,30	
RPI	-90%	-31%	-2%	-45%	-70%	34%	-65%	-77%	-87%	-44%	
P/ET	1,25	5,23	3,4	1,62	0,49	1	0,22	0,35	0,03	1,51	
	Year 2021/22	Nov.	Dec.	Jen.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Tot/ Avg
Temperature avg [°C d <sup>4</sup> ]	11,75	7,32	5,27	7,13	9,51	12,05	17,75	24,37	27,97	13,68	
Max temperature [°C]	25,68	19,28	15,68	17,61	22,8	24,57	26,79	39	37,78	25,46	
Min temperature [°C]	-1,4	-3,79	-6,09	-4,98	-0,79	-0,48	3,03	11,06	17,18	1,52	
Rainfall [mm]	267	83,4	33,4	39,79	20,2	26,2	4,4	1,60	0,80	476,8	
E0 [Avg. mm d <sup>4</sup> ]	1,33	0,99	1,08	1,36	2,44	3,69	5,5	5,67	6,22	3,14	
RPI	75%	-6%	-62%	-61%	-80%	-57%	-94%	-94%	-98%	-34%	
P/ET	6,9	2,69	0,99	1,03	0,46	0,23	0,02	0,01	0	1,37	

Comparing both years with historical data, significant decreases were noted in terms of rainfall: -44% in 2020/21 and -34% in 2021/22. These results confirmed the already recognized and concerning negative trend in rainfall, particularly during the crucial months for the optimal development of crops and yield production. In comparison, the monthly P/ET values (Table 1) indicate a limited water availability for the crop in some months, particularly noticeable in 2021/22. This is attributable to the higher temperature recorded since April of the second year that has determined an increment in terms of the daily reference evapotranspiration. Figure 2 shows the comparison between the trend of the reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) and cumulative rainfall curves, from March to July for both experimental years.

The surge in the amount of water lost by reference evapotranspiration in relation to rainfall indicates a stress



condition for the crop in the second year. In the first year, however, the amount of water lost by evapotranspiration was significantly reduced. The calculation of ET balance showed the following values for irrigation treatment studied: 488.00 mm, 526.10 and 524.00 for Rainfed, ETC, and ML-based treatments in the 2020/21 crop cycle; and 556.00 mm, 716.90 and 671.00 mm respectively in the 2021/22 crop cycle.

Analysis of variance (ANOVA) (Tab. 2) recorded a significant effect ( $p$  value  $< 0.001$ ) of the “Year” on Total Dry Biomass (TDB), Dry biomass per plant ( $DB_{plant}$ ), Total Yield (TY), Yield per plant ( $Y_{plant}$ ) and Water Productivity (WPDB and WPTY).

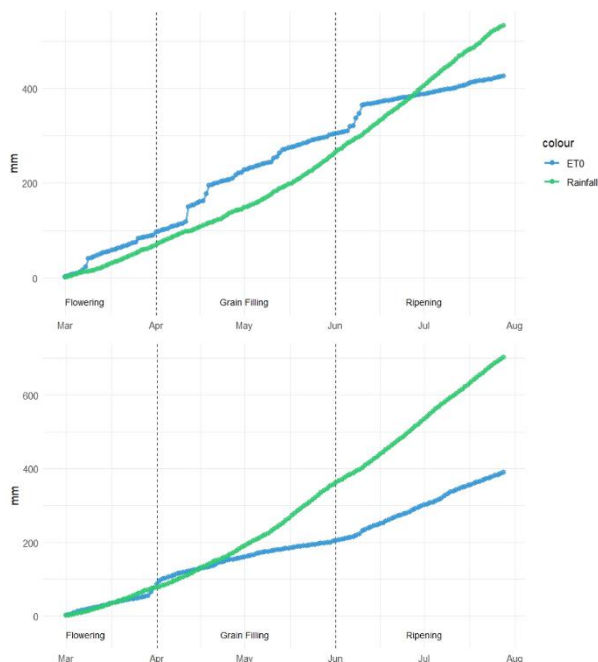


Fig.2 - Trend delle precipitazioni cumulate e dell'acqua persa per evapotraspirazione dalla fioritura alla maturazione dei legumi.

Fig.2 - Trend of cumulative rainfall and water lost by evapotranspiration from flowering to legumes ripening.

The effect of the year on the parameters studied was also recorded in similar studies on broad bean (Di Paolo *et al.*, 2015).

In the first experimental year, TDB was in average greater than in the second experimental year (7.03 and 4.99 t/ha respectively) and Total Yield (TY) decreased from 4.18 to 3.35 t/ha in average. This negative effect may be due to the adverse climatic conditions in the second year in terms of drought. In fact, the monthly P/ET ratio values measured in the second year - from April (correspondent at flowering phenological phase) to May (correspondent at filling of the grain) – shown values close to 0, indicating insufficient rainfall compared to the considerable evapotranspiration, as shows in Figure 2.

It is known that temperature influences evapotranspiration by affecting leaf stomatal conductance.

In this regard, an increase in temperature significantly affects the growth and yield of the plant as demonstrated by Guoju *et al.*, 2017.

Tab.2 – Risultati ANOVA

Tab.2 – ANOVA results

	$Y_{plant}$	TDB	TY	$DB_{plant}$	Height Stems	HI	DBWP	TYWP
Year	***	***	***	***	ns	*	***	***
Treatments	***	***	***	***	***	**	***	***
Seeding Density	ns	***	*	ns	*	**	***	*
Treatments x Density	ns	“.”	ns	ns	**	ns	“.”	ns
Treatments	***	***	***	***	**	***	***	***
Seeding Density	*	***	***	ns	ns	ns	***	***
Treatments x Density	*	*	***	“.”	**	***	*	***

$Y_{plant}$ : Yield per plant; TDB: Total Dry Biomass; TY: Total Yield;  $DB_{plant}$ : Dry Biomass per plant; HI: Harvest Index; DBWP: Dry Biomass Water Productivity; TYWP: Total Yield Water Productivity.

The effect of Irrigation “Treatment” (Table. 3) on yield (TY and  $Y_{plant}$ ), dry biomass (TDB and  $DB_{plant}$ ) and Water Productivity (WPDB and WPTY) was significant ( $p < 0.001$ ) for both experimental years. In terms of yields (TY), comparing irrigated treatments (ETC and ML-DSS) with rainfed, it was recorded an average increase of + 36% (4.95 t/ha vs 3.19 t/ha in 2020/2021) and + 46 % (4.13 t/ha vs 2.22 t/ha in 2021/2022). These results confirm the considerable effect of supplemental irrigation to increase broad bean’s yields. Di Paolo *et al.*, in a study conducted in Italy, recorded an increase of yield of 23 % from irrigated broad beans in respect to rainfed approach (3.1 t/ha vs 2.4 t/ha) while a study conducted in Syria by Oweis *et al.*, 2005 recorded an increase of + 45% in similar conditions. In other hand, there are not recorded significant difference comparing ETC vs ML-DSS on  $Y_{plant}$  (8.90 vs 9.42 g/plant) and TY (4.42 vs 4.66 t/ha). Regarding DBWP and TYWP, it was observed that the water productivity of WPDB was influenced by the “Treatment” especially in the second year. In the first year, ML-DSS shown higher values of WPDB (15.5  $kg \cdot mm^{-1}$ ) while no significant difference were recorded between ETC (11.7  $kg \cdot mm^{-1}$ ) and rainfed (10.5  $kg \cdot mm^{-1}$ ). In the second year ETC shown higher values (8.10  $kg \cdot mm^{-1}$ ) than rainfed (7.16  $kg \cdot mm^{-1}$ ) and ML-DSS (6.41  $kg \cdot mm^{-1}$ ). No significantly differences were recorded from the analysis of TYWP between ETC (7.97  $kg \cdot mm^{-1}$ ) and ML-DSS (8.41  $kg \cdot mm^{-1}$ ) considering both experimental year. In the 2021/22 ETC was more efficient (6.30  $kg \cdot mm^{-1}$ ) than ML-DSS (6.00  $kg \cdot mm^{-1}$ ) and non-irrigated treatment (2.44  $kg \cdot mm^{-1}$ ). In both experimental years,  $Y_{plant}$  decreased when plant density increased, ranging from 9.69 g (40 plants per square meters) to 7.69 g (60 plant per square meters) in the first year, and from 7.22 g (40 plants per square meters) to 6.62 g (60 plants per square meters) in the second year. On the contrary, TY increased significantly in the first ( $p < 0.05$ ) and second year ( $p < 0.001$ ) when the number of plants per square meters raised (Table.3): from 3.87 to 4.61 t/ha in 202/2021 and from 2.88 to 3.97 t/ha in 2021/2022. On

average, seeding density increased significantly TYWP and DBWP from 7.75 kg · mm<sup>-1</sup> (40 plants) to 11.52 kg · mm<sup>-1</sup> (60 plants).

*Tab.3 – Effetto dei regimi irrigui e della densità di semina sui parametri produttivi idrici e della coltura.*

*Tab.3 – Effect of irrigation regimes and seeding density on crop and water productivity parameters.*

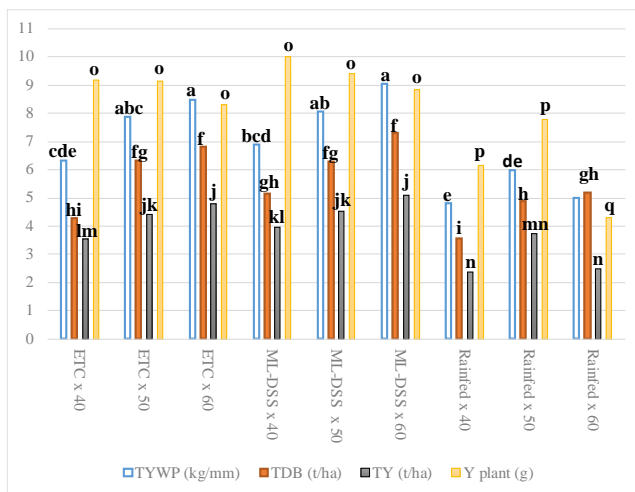
Irrigation treatment and seeding density	Y <sub>plant</sub> (g)	TY (t/ha)	TDB (t/ha)	DB <sub>plant</sub> (g)	Hight Stems	HI	TYWP (kg mm <sup>-2</sup> )	DBWP (kg mm <sup>-2</sup> )
Year 2020-2021								
Irrigation Treatment								
ETC	9.74 a	4.80 a	6.15 b	12.3 b	95.2 b	0.446 a	11.7 b	9.14 a
ML-DSS	10.35 a	5.10 a	8.17 a	16.3 a	102.3 a	0.396 b	15.5 a	9.71 a
Rainfed	6.54 b	3.19 b	5.12 c	10.3 c	94.2 b	0.390 b	10.5 b	6.54 b
Seeding Density								
40 plants mq	9.69 a	3.87 a	5.02 b	-	99.8 a	0.442 a	9.74 b	7.51 b
50 plants mq	9.24 a	4.62 a	6.87 a	-	97.7 ab	0.403 ab	13.36 a	8.96 a
60 plants mq	7.69 b	4.61 b	7.55 a	-	94.2 b	0.387 b	14.63 a	8.92 a
Year 2021-2022								
Irrigation Treatment								
ETC	8.07 a	4.03 a	5.44 a	10.85 a	97.3 a	0.432 b	8.10 a	6.3 a
ML-DSS	8.48 a	4.23 a	4.30 b	8.72 b	96.1 ab	0.501 a	6.41 c	6.0 a
Rainfed	4.55 b	2.22 b	3.98 b	7.95 b	93.1 b	0.364 c	7.16 b	2.44 b
Seeding density								
40 plants mq	7.22 a	2.88 c	3.64 c	-	-	-	5.75 c	4.50 c
50 plants mq	7.27 a	3.63 b	4.76 b	-	-	-	7.50 b	5.68 b
60 plants mq	6.62 b	3.97 a	5.32 a	-	-	-	8.42 a	6.13 a
All years								
Irrigation Treatment								
ETC	8.90 a	4.42 a	5.79 a	11.56 a	96.2 b	0.439 a	9.90 b	7.97 a
ML-DSS	9.42 a	4.66 a	6.24 a	12.53 a	99.2 a	0.449 a	10.98 a	8.41 a
Rainfed	5.55 b	2.71 b	4.55 b	9.12 b	93.7 b	0.377 b	8.82 c	5.68 b
Seeding density								
40 plants mq	8.45 a	3.38 b	4.33 c	-	94.2 b	0.440 a	7.75 c	6.01 b
50 plants mq	8.25 a	4.12 a	5.82 b	-	97.4 a	0.417 ab	10.43 b	7.72 a
60 plants mq	7.15 b	4.29 a	6.43 a	-	97.4 a	0.408 b	11.52 a	7.93 a

NOTE: If two or more means share the same grouping symbol then we cannot show them to be different.

But we also did not show them to be the same. F<sub>anno</sub>, DBWP (SE: 0.39) IF<sup>2</sup> anno TYWP (SE: 0.131), Y<sub>plant</sub>: Yield per plant; TDB: Total I Biomass; TY: Total Yield; DB<sub>plant</sub>: Dry Biomass per plant; HI: Harvest Index; DBWP: Dry Biomass Water Productivity; TYWP: Total Yie Water Productivity

No significant interaction (*Treatment x Seeding density*) was found in the first year, unlike in the second year. Figure 3 summarizes the results of the two experimental years. In details, *ML-DSS x 50 plants* and *ML-DSS x 60 plants* shown the best results in terms of Total Yield: 5.23 t/ha and 4.84 t/ha in the first and second year respectively.

In other hand, Post-hoc Turkey's reveals that *ETC x 40 plants* and *ML-DSS x 40 plants* (3.07 t/ha vs 3.36 t/ha) no significantly differ, as well as *ETC x 50 plants* with *ML-DSS 50 plants* (4.00 t/ha vs 3.99 t/ha) and *Rainfed x 40 plants* with *Rainfed x 60 plants* (2.37 t/ha vs 2.47 t/ha). However, regarding TYWP, it have to be noted that in the first year the *ML-DSS x 60 plants* exceeds *ML-DSS x 50 plants* (10.59 kg · mm<sup>-1</sup> vs 9.96 kg · mm<sup>-1</sup> respectively) and that in the second year the *ML-DSS x 60* remains higher (7.52 kg · mm<sup>-1</sup>) also in terms of water productivity on all other treatments. Taking into account the data in the individual groups and considering the three combinations of seeding density (40, 50 and 60) with the irrigation treatments, it is useful to report that under the rainfed conditions, seeding density from 50 to 60 plants per square meter significantly represses the total yields and productivity of the water in both years (on average from 6.00 to 5.02 kg · mm<sup>-1</sup> for water productivity and from 3.75 to 2.47 t/ha for TY).



*Fig.3 – Valori medi di produttività dell'acqua (TYWP), biomassa secca (TDB) e granella per pianta (Y<sub>plant</sub>).*

*Fig.3 - Average values of water productivity (TYWP), total yield (TDB) in dry biomass and grain and yield (Y<sub>plant</sub>).*

## Conclusions

The results obtained have shown that irrigation on broad beans is able to increase the yields per hectare compared to rainfed conditions. Comparing ETC and ML-DSS approach, there are no significant differences, although on average the ML-DSS treatment with seeding density of 60 plants per square meter has the best results in terms of total yield and water productivity. It has also been observed that in irrigated treatments the increase in sowing density results in a decrease in yield per plant, which is compensated by the increase in the number of plants per square meter. However, this does not happen in rainfed conditions, where the seeding density from 50 to 60 depresses the yield per plant and the total yield per hectare. In addition, results showed that the irrigation ML-DSS allowed a water saving of 6.40 % in the second year.

## References

- Ashi R., Aubert M., Riah-Anglet W., Nèlieu S., Dubois C., Akpa-Vinceslas M., Trinsoutrot-Gattin I., 2017. Introduction of Faba bean in crop rotation: Impacts on soil chemical and biological characteristics, *Applied Soil Ecology*, 120: pag. 219–228.
- Balko C., Torres A., Gutierrez N., 2023. Variability in drought stress response in a panel of 100 faba bean genotypes. *Front. Plant. Science*, 14: 1236147.
- Di Paolo E., Garofalo P., Rinaldi M., 2015. Irrigation and nitrogen fertilization treatments on productive and qualitative traits of broad bean (*Vicia faba* var. minor L.) in a Mediterranean environment. *Legume Research*, 38: pag 209-218.
- Dudek S., Tomaszewska R., Zarski J., 2018. Forecasting production effects of irrigated faba bean (*Vicia Faba* var Minor) depending on drought levels. *Agricultural sciences*, 2: pag. 77-81.
- Guoju X., Qiang Z., Jing W., Fenju Z., Chengke L., Fei M.,

- Juying H., Ming L., Xianping H., Zhengji Q., 2017. Influenced of increased temperature on the yield and quality of borad bean in semiarid regions of northwest China. *Plant Soil Environment*, 5: pag 220-225
- Meng Z., Liu Q., Zhang Y., Chen J., Sun Z., Ren C., Zhang., Cheng X., Huang Y., 2021. Nutritive value of faba bean (*Vicia faba* L.) as a feedstuff resource in livestock: A review.
- Ouji A., Naouari M., Mouelhi M., Ben Younes M., 2017. Yield and Yield Components of Faba bean (*Vicia faba* L.) as Influenced by Supplemental Irrigation under Semi-arid Region of Tunisia. *World Journal of Agricultural Research*, 1: pag. 52-57
- Oweis T., Hachum A., Pala M., 2005. Faba bean productivity under rainfed and supplemental irrigation in nothern Syria. *Agricultural Water Management*, 73: pag. 57-72.
- Runge T., Lohmann U., Schaller L., Todorova K., 2022. Implementation of Eco-schemes in Fifteen European Union Member States. 2022. *EuroChoises 0*: pag. 01-09.
- Sarkar S., Zaman A., 2017. Effect of irrigation on broad bean (*Vicia faba* L.) for improving growth, yield and water extraction pattern. *Legume Research*, 40: pag: pag-257-253.
- Singh A., Bharati R., Manibhushan N., Pedpati A., 2013. An assessment of faba bean (*Vicia faba* L.) current status and future prospect. *African Journal of Agricultural Research*, 8(50): pag. 6634-6641.
- Yazar A., Mart D., Colak Y., Kaya C., 2017. Yield Response of Faba Bean to Various Irrigation Strategies in the Mediterranean Region. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 7: pag 9-19
- Zelege K., Nendel C., 2019. Growth and yield response of faba bean to soil moisture regimes and sowing dates: Field experiment and modelling study. *Agricultural Water Management*, 213: pag. 1063-1077.

# COUPLING STEM WATER POTENTIAL AND SOIL WATER POTENTIAL ON IRRIGATED AND NOT IRRIGATED VINES. PRELIMINARY RESULTS FOR *Vitis Vinifera L. cv. Teroldego*

## MISURAZIONE AFFIANCATA DEL POTENZIALE IDRICO DEL FUSTO SU VITE IN REGIME IRRIGATO E NON. RISULTATI PRELIMINARI SU TEROLDEGO

Cecilia Mattedi<sup>1\*</sup>, Fabio Zottele<sup>1</sup>, Francesco Centurioni<sup>1</sup>, Amelia Caffarra<sup>2</sup>, Corradini Stefano<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> ITK, Clapiers, France

\* cecilia.mattedi@fmach.it

### Abstract

Improving wine quality necessitates precise control over plant water stress, which requires accurate scheduling of irrigation based on the plant's water status and the soil's water availability. The aim of this experiment is to monitor the water status of grapevines and soil in both irrigated and not-irrigated conditions to quantify differences in the plant's physiological response and yield. In addition, novel microtensiometer probes for measuring continuously the Stem Water Potential were tested for efficacy. These probes were coupled with a handcrafted tensiometer to monitor the Soil Water status and at the end of the season all the yield was analyzed to determine the main oenological parameters driving the final quality of the musts. Initial findings indicate that the microtensiometers gave effective estimates of the vines' water status, revealing rapid plant responses to water inputs and atmospheric changes. Notably for the experiment, soil moisture exceeded field capacity under irrigated vines before irrigation, suggesting potential water loss through deep percolation, and both the irrigated and not-irrigated vines were in water comfort for all the vegetative season without any detriment both in production and quality.

### Parole chiave

Agricoltura di precisione; irrigazione; potenziale idrico del fusto; potenziale idrico del suolo; microtensimetri

### Keywords

Precision agriculture; irrigation; stem water potential; soil water potential; microtensimeters

### Introduction

Wine quality can be improved by moderate plant water stress during maturation (Van Leeuwen et al., 2009; Gambetta, 2016; Mirás-Avalos and Araujo, 2021). In irrigated vineyards, the level of water stress can be regulated by optimizing irrigation timing and quantity. However, to do so, a precise knowledge of plant and soil water status is needed at each moment. This can be

complicated, as many factors come into play affecting the soil-plant-atmosphere continuum. Soil water content depends on atmospheric variables which determine water inputs and evaporation, on its water holding capacity and the presence of plant cover. Plant water status depends on soil available water and evapotranspiration.

The standard method for plant water status monitoring in research is the measurement of the leaf water potential, usually performed with pressure chambers (Deloire et al., 2020). However, appropriate sampling relies on the operator itself, which is responsible to ensure proper sampling technique (Levin, 2019). Microtensimeters are a viable alternative to perform non-invasive and remote monitoring of stem water potential, which is considered an equally viable method to assess the water status of grapevine (Choné, 2001; Williams and Araujo, 2002; Lakso et al., 2022). Furthermore, the high sampling rate of these sensors allows the continuous measurement of the plant parameters (Lakso et al., 2022). The primary objectives of this study are to investigate the effects of irrigated and non-irrigated conditions on the dynamics of plant water status, as well as on grape quality and yield. To achieve this, we monitored stem water potential using microtensiometer probes and

simultaneously measured soil water content using tensiometers.

## Materials and Methods

### *Experimental site*

The study area is located in Novali, close to Mezzolombardo, in the Trentino-Alto Adige region (Italy) ( $46^{\circ}12'35.172''\text{N}$   $11^{\circ}6'36.187''\text{E}$ ) at about 215 m above sea level. Placed at the bottom part of a valley in the central part of the Alps, the landscape morphology ranges from sub-flat to flat. The soil's parent material is made up of gravels and sands of mixed lithology, mainly calcium carbonate. The cultivated variety is Teroldego, an autochthonous grape variety, grafted onto Teleki 5C rootstock to maintain the vigor, and managed using the "pergola doppia" training system. Row and vine spacing are 5 m x 0.5 m. The vineyard is oriented from North-East to South-West.

Following the USDA classification, the soil is loamy, rich in rock fragments, cobbles, gravel, and shallow (about 80 cm deep). The anthropic horizon is rich in organic carbon (1.3 %) with a depth of 30 cm. The growth of the vines' root system is limited to 50 cm of soil depth due to alluvial rocks and pebbles, so sensibly reducing the average root depth reported by the literature (Allen, 2000).

The irrigation setup consists in a single drip line and the output of the emitters is  $2.2 \text{ l h}^{-1}$ . The irrigation is managed by the local irrigation association. The irrigation schedule consists in 4 h of irrigation given to the vine from 11 A.M. to 3 P.M. on 24<sup>th</sup> and 28<sup>th</sup> June 2023 and on 1<sup>st</sup>, 5<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> July 2023 so that the total amount of water declared by the Irrigation Association is  $8.8 \text{ l d}^{-1}$  except for July 1<sup>st</sup>, when an amount of  $7.7 \text{ l d}^{-1}$  of water per emitter was provided.

### *Climatic framework*

Meteorological measurements were provided by the nearest meteorological station by Fondazione Edmund Mach (name: Mezzocorona Novali, station ID: 45). It is located approximately 700 m South of the experimental site at a similar elevation (216 m a.s.l.) with data recorded since 1999.

The climate of the site can be described as Oceanic type (Do) following the Köppen–Trewartha climate classification (Trewartha and Horn, 1980). The average air temperature during the vegetative season of 2023 is equal to  $20.18 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and

identifies a particularly warm growing season with respect to the climatological mean ( $19.6 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ ). The cumulative precipitation occurred during the growing season is equal to 729.6mm and is far above the median of cumulative precipitation over the series ( $535.0 \pm 123.0 \text{ mm}$ ). However, between April and June 2023, 270.6 mm of precipitation were recorded, which is very close to the median of the previous years for the same time period ( $241.8 \pm 43.1 \text{ mm}$ ). Vapor Pressure Deficit (VPD) was calculated with the formulas from Monteith and Unsworth (2008):

$$e_s = 0.61078 \exp[17.27 T(T + 237.3)^{-1}]$$

$$\text{VPD} = e_s(1 - 0.01 \text{ RH})$$

being T and RH the air temperature and the relative humidity of the air respectively.

### *Vines' water status measurements*

For this study, two mature and healthy representative vines were chosen. One of them was treated as usual, and the other one was kept without irrigation.

The vines' water status was measured with FloraPulse microtensiometers (Lakso et al., 2022), which allowed continuous monitoring of stem water potential ( $\Psi_{stem}$ ). On 2023, May 25<sup>th</sup>, a total of 4 probes were installed, two on the irrigated vine and two on the not irrigated one. On each vine, one probe was installed in the lower part of the stem (40 cm from the ground) and one on the higher part (80 cm from the ground). Each microtensiometer was embedded into the trunk, within the xylem tissue, and it equilibrated with the vine within 2 days of installation. Stem Water Potential values of the not-irrigated vine ( $\Psi_{stem,not \text{ irr}}$ ) were recorded every 20 min, wirelessly transmitted via telemetry and displayed on the FloraPulse user interface. Instead, the two probes on the irrigated vine were connected to a CR1000 datalogger (Campbell Scientific Inc.), and values ( $\Psi_{stem,irr}$ ) were recorded every 15 min.

For this study, due to the malfunctioning of one of the probes on the not-irrigated vine and of the data logger on the irrigated one, only the measures of  $\Psi_{stem}$  from the 1<sup>st</sup> to 15<sup>th</sup> of July are used.

### *Soil moisture measurements*

To monitor the matric tension ( $\Psi_{soil}$ ), two tensiometers were installed on June, 20<sup>th</sup>. Each tensiometer was crafted following the procedure explained by Thalheimer (2013). One of them was installed next to the irrigated vine and the other one next to the not-irrigated vine. Both tensiometers



were connected to the same CR1000 data logger used to measure the stem water potential of the irrigated vines. The values of  $\Psi_{soil}$  were recorded with a time interval of 15 min. Given the limiting depth for the root zone, in order to determine the soil moisture the installation depth of tensiometers was around 30 cm. Furthermore, each tensiometer was installed under the drip line and between two drippers.

### Grape quality and vine balance

No canopy regulation was applied to the two selected vines after the late-winter pruning in order to maintain all the new biomass produced during the vegetative season. The vines were harvested on September 25<sup>th</sup> and all the grapes were weighed ( $W_g$ ), bagged and refrigerated. During the same day, the following oenological properties of the must were analyzed: sugar content, pH, total acidity, malic acid, tartaric acid, Yeast Assimilable Nitrogen (YAN) and Potassium ( $K^+$ ). To estimate the vine balance, the Ravaz index (Ravaz and Sicard, 1903) was calculated for each vine using the following formula:

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

where  $W_b$  is the weight of the biomass grown during the vegetative season, collected and weighed on 2024 January, 11<sup>th</sup>.

## Results and discussion

### Stem water potential and soil moisture

The graphs in Fig.1 show plant and soil water status, with the blue lines representing the irrigated regime ( $\Psi_{stem,irr.}$ ,  $\Psi_{soil,irr.}$ ) and the red lines the not-irrigated regime ( $\Psi_{stem,not irr}$  and  $\Psi_{soil,not irr}$ ).

Above is plotted the time-series of the FloraPulse microtensiometers installed in the upper part of the vines' trunk: for the data analysis, the values of lower microtensiometers were discarded due to the malfunctioning of one of the probes and only the values recorded for the higher probes have been used for consistency. In the graph below is plotted the evolution of the signal of the two tensiometers, together with the amount of precipitation (black bars). The blue vertical stripes mark the time intervals in which the irrigation was on.

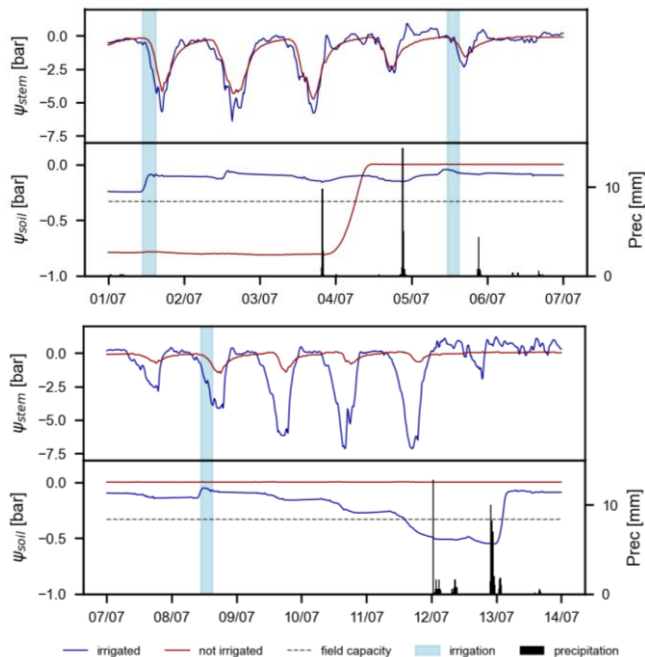


Fig.1 - Time series of  $\Psi_{stem}$ , and  $\Psi_{soil}$  of irrigated (blue) and not irrigated (red) vines for the first week (above) and the second week (below). Field capacity of the soil is reported with the dashed line, precipitation denoted with the dark bars. Blue vertical stripes mark the periods when irrigation is applied.

Fig.1 - Andamento di  $\Psi_{stem}$  e  $\Psi_{soil}$  della vite irrigata (in blu) e di quella non irrigata (in rosso) durante la prima settimana (grafico in alto) e durante la seconda settimana (grafico in basso). La linea tratteggiata indica la capacità di campo del terreno, la precipitazione è rappresentata dalle barre nere mentre le strisce blu indicano i periodi di irrigazione.

During the first week (from July 1<sup>st</sup> to July 7<sup>th</sup>) the two microtensiometers have similar qualitative trends. At pre-dawn  $\Psi_{stem}$  is in equilibrium with the tension state of the soil ( $\Psi_{soil}$ ) (Williams and Araujo, 2002), with values close to 0 bars. The gradual increase of air temperature and the decrease of RH in the morning caused the gradual fall of  $\Psi_{stem}$  in both vines. This corresponds to an increase of  $\Delta\Psi_{stem}$  along the soil-plant-atmosphere continuum (Bonan, 2019) and is associated to a stronger water flow and higher leaf transpiration rate (Choné, 2001). The lower peaks of  $\Psi_{stem,irr}$

range between  $-5.5$  bar and  $-7.5$  bar, but after the occurrence of precipitation and irrigation they do not fall below  $-2.5$  bar. After a consistent precipitation event occurred on July 13<sup>th</sup> the values recorded by the probes oscillate around 0 bar.

During the first week, the values of  $\Psi_{stem,not\ irr}$  follow  $\Psi_{stem,irr}$ , but the daily minimum value of  $\Psi_{stem,not\ irr}$  is slightly lower in magnitude. The signal weakens starting from July 7<sup>th</sup>, and it approaches 0 bar after July 12<sup>th</sup>. This does not imply that the water flow in the stem ceases, since a negative  $\Delta\Psi_{stem}$  is however observed. This could be the effect of stomatal closure, which is one of the mechanisms that plants activate in order not to lose significant amounts of water vapor through transpiration and to reduce the risk of cavitation into the xylem (Tombesi et al., 2016; Buckley, 2019).

The tensiometer of the irrigated vine records  $\Psi_{soil,irr}$  value around  $-0.25$  bar on the first day of the analysis, and its signal clearly reacts to the water inputs: it increases rapidly when irrigation is applied and when precipitation occurs. The line pattern on July 2<sup>nd</sup> suggests that some irrigation was applied, although no communication was given by the Irrigation Association.  $\Psi_{soil,irr}$  gradually falls below the  $-33$  kPa threshold during the dry period after the irrigation of July 8<sup>th</sup>. It is important to notice that, during the first week, irrigation was applied even though  $\Psi_{soil,irr}$  was above field capacity. An excess of water input in the soil enhances the probability of gravitational water flowing through percolation and if the water exceeds the root zone it becomes no longer available for root uptake and so is basically wasted. Looking at the tensiometer of the non irrigated vine, a low value of  $\Psi_{soil,not\ irr}$  is recorded on July 1<sup>st</sup> ( $\Psi_{stem,not\ irr} = -0.79$  bar): the soil was dry as no precipitation occurred since the installation day (June 20<sup>th</sup>). It kept almost a constant value until the occurrence of the first precipitation on July 4<sup>th</sup>, then it rapidly increased and stabilized at a value around 0 bars. This is probably due to a malfunctioning of the probe.

Even in the periods with no irrigation and no precipitation, neither  $\Psi_{stem,irr}$  nor  $\Psi_{stem,not\ irr}$  reached values that could be associated with severe stress for the vines (Deloire et al., 2020). However, two microtensiometers per vine could have allowed the calculation of the gradient of  $\Psi_{stem}$  in each plant, so providing a more complete overview of the magnitude of the water fluxes in the plant.

Exploratory analysis of the measures of  $\Psi_{stem}$  for both the irrigated and not irrigated vines show that for some hours during the day  $\Psi_{stem,irr} > \Psi_{stem, n.irr}$  and vice versa. One

hypothesis is that an environmental threshold exists to activate this switching behavior. A preliminary analysis identifies VPD, air temperature and the global solar radiation ( $R_s$ ,  $\text{MJ m}^{-2}$ ) as the main driver of this threshold-triggered behavior, but for a statistical confirmation more data should be collected.

Only thanks to the continuous measurement of the microtensiometers, correlations were found between  $\Psi_{stem}$  and the variation of these atmospheric variables, with different lag times dependent on the considered atmospheric variable (1:00 h lag time for air temperature and VPD, and about 4:00 h for global solar radiation).

#### *Oenological analysis and vine balance*

The results of the oenological analysis of the harvested grapes show no substantial differences between the irrigated and not-irrigated vines in terms of sugar content, pH and potassium (Tab.1). The irrigated vines show lower values for all the components of the acidity and the Yeast Assimilable Nitrogen (YAN). The yield of the irrigated vine,  $W_g = 12.99$  kg is 29% higher than the yield of the not-irrigated one, with a higher weight of the dry biomass ( $W_b = 1.98$  kg, +17%) with respect to the not-irrigated vine. For the irrigated vine the  $I_{rav}$  resulted 6.5 while for the not-irrigated vine it was equal to 5.7; in both irrigation regimes values were in the range of an optimal productive-vegetative balance (Howell, 2001). However, with only one replication for the experimental treatment (irrigated vs. not-irrigated) these values should be taken with extreme caution.

## **Conclusions**

In order to optimize the water resource, the soil-plant-atmosphere continuum should be considered in irrigation scheduling: coupling the microtensiometers embedded in the vines with the tensiometers in the soil greatly assists in this regard.

The preliminary results of this vegetative season show that the microtensiometer probes are a promising technology to continuously track  $\Psi_{stem}$  shedding new light on how both soil and plants rapidly react to water inputs and changes in the atmospheric conditions, with easier tasks to perform with respect to measurements taken with the pressure chamber (Deloire et al., 2020) and widening new perspectives on how to interpret the coupled measures of  $\Psi_{stem}$  and  $\Psi_{soil}$  (Williams and Araujo, 2002).

Tab.1 - Oenological characterization of the grapes in both irrigated and not irrigated musts. YAN stands for Yeast Assimilable Nitrogen.

Tab.1 - Risultati delle analisi enologiche dei mosti della vite irrigata e non-irrigata. YAN rappresenta l'azoto prontamente assimilabile (APA).

	Irrigated	Not irrigated
<b>Sugar content</b>	230.82 ± 12.61 g l <sup>-1</sup>	240.44 ± 3.93 g l <sup>-1</sup>
<b>pH</b>	3.22 ± 0.01	3.37 ± 0.15
<b>Total acidity</b>	8.11 ± 0.61 g l <sup>-1</sup>	9.80 ± 1.53 g l <sup>-1</sup>
<b>Malic acid</b>	3.28 ± 0.37 g l <sup>-1</sup>	4.46 ± 0.10 g l <sup>-1</sup>
<b>Tartaric acid</b>	6.08 ± 0.15 g l <sup>-1</sup>	6.43 ± 0,37 g l <sup>-1</sup>
<b>YAN</b>	115.67 ± 7.23 mg l <sup>-1</sup>	188.33 ± 20.21 mg l <sup>-1</sup>
<b>K<sup>+</sup></b>	2.15 ± 0.05 g l <sup>-1</sup>	2.95 ± 0.17 g l <sup>-1</sup>

The microtensiometer probes showed that both the irrigated and not-irrigated vine never reached values of Stem Water Potential associated to water stress levels (Deloire et al., 2020), being in water comfort for all the vegetative season despite the differences in irrigation water input.

In some cases, the tensiometers showed that the soil below the irrigated vine was steadily above the threshold of -33 kPa, an estimation of the field capacity (Nemes et al., 2011), even before being irrigated. For higher values of this pressure head, a gravity-driven flux of water could onset and water potentially could be lost through deep percolation if it infiltrates beyond the root zone and so, wasted.

Exploratory analyses show a lagged correlation between  $\Psi_{stem}$  and the meteorological variables, while the relation between  $\Psi_{stem,irr.}$  and  $\Psi_{stem,not irr.}$  seem to show a time-to-event behavior linked to a “stimulus” driven by VPD and  $R_s$ .

Oenological analysis of the harvested grapes show an increase of the total acidity and higher Yeast Assimilable Nitrogen for the vine that received less water during the vegetative season. A reduction of the yield has been observed for the not-irrigated vine (9.39 kg, -29%). However, the calculation of the Ravaz Indexes confirmed that both vines were in optimal productive-vegetative balance.

Although these preliminary results are not generalizable due to the lack of experimental replicates, we are considering expanding the experiment to include more vines to gather a more comprehensive vegetative and productive dataset by the end of the next growing season.

## Acknowledgements

We extend our deepest gratitude to Danilo Caset who generously provided the grapevines for our experiment, adapting agricultural practices to accommodate our 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 Michael Santiago, Terrence Jones and Maryrose Lund of the Florapulse Co. staff for all their technical support.

## References

- Allen R.G. (Ed), 2000. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, repr. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Bonan G.B., 2019. Climate change and terrestrial ecosystem modeling. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom; New York, NY.
- Buckley T.N., 2019. How do stomata respond to water status? *New Phytologist*, 224 (1): 21–36.
- Choné X., 2001. Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status. *Annals Of Botany*, 87 (4): 477–83.
- Deloire A., Pellegrino A., Rogiers S., 2020. A few words on grapevine leaf water potential. *IVES Technical Reviews, Vine And Wine*,
- Gambetta G.A., 2016. Water Stress and Grape Physiology in the Context of Global Climate Change. *Journal Of Wine Economics*, 11 (1): 168–80.
- Howell G.S., 2001. Sustainable Grape Productivity and the Growth-Yield Relationship: A Review. *American Journal Of Enology And Viticulture*, 52 (3): 165–74.
- 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.
- Levin A.D., 2019. Re-evaluating pressure chamber methods of water status determination in field-grown grapevine (*Vitis* spp.). *Agricultural Water Management*, 221: 422–9.
- Mirás-Avalos J., Araujo E., 2021. Optimization of Vineyard Water Management: Challenges, Strategies, and Perspectives. *Water*, 13 (6): 746–78.
- Monteith J.L., Unsworth M.H., 2008. *Principles of environmental physics*, 3rd ed. Elsevier, Amsterdam Paris.
- Nemes A., Pachepsky Y.A., Timlin D.J., 2011. Toward Improving Global Estimates of Field Soil Water Capacity. *Soil Science Society Of America Journal*, 75 (3): 807–12.
- Ravaz L., Sicard L., 1903. Sur la brunissure de la vigne. *Les Comptes Rendus De L'Academie Des Sciences*, 136: 1276–8.
- Thalheimer M., 2013. A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. *Journal Of Agricultural Engineering*, 44 (3): 114–9.
- Tombesi S., Poni S., Palliotti A., 2016. Stress idrico in *Vitis vinifera*: variabilità delle risposte fisiologiche intraspecifiche e loro potenziale sfruttamento nella mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici. *Italus Hortus*, 23 (1): 45–53.
- 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.
- Williams L.E., Araujo F.J., 2002. Correlations among Predawn Leaf, Midday Leaf, and Midday Stem Water Potential and their Correlations with other Measures of Soil and Plant Water Status in *Vitis vinifera*. *Journal Of The American Society For Horticultural Science*, 127 (3): 448–54.

# DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ESTIMATING THE WATER REQUIREMENTS OF THE MAIN PIEDMONT AGRICULTURAL CROPS

## MESSA A PUNTO DI UN METODO DI STIMA DEI FABBISOGNI IDRICI DELLE PRINCIPALI COLTURE AGRARIE PIEMONTESE

Irene Vercellino<sup>1\*</sup>, Stefano Barbero<sup>2</sup>, Emanuele Possiedi<sup>3</sup>, Federico Spanna<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Regione Piemonte – Dir. Agricoltura e cibo Settore Fitosanitario e servizi tecnico-scientifici Sez. Agrometeorologia

<sup>2</sup> 3a S.r.l. – Via Le Chiuse 68, 10144 Torino

<sup>3</sup> Regione Piemonte – Dir. Agricoltura e cibo infrastrutture, territorio rurale, calamità naturali in agricoltura

\* [irene.vercellino@regione.piemonte.it](mailto:irene.vercellino@regione.piemonte.it)

### Abstract

The aim of this work is to develop a method for estimating the water demand of the main agricultural crops cultivated in Piedmont. This method would help in managing and optimizing the use of water resources at various scales: regional, municipal, of drainage basin and Consortium. In order to achieve this objective it was necessary to set up the agrometeorological database of Piedmont, the geographical database of land use and the agricultural crop database, and a software developed specifically for this purpose. The estimated water demand represents a starting point for the calculation of irrigation demand and consequently for the sizing of the infrastructures for water collection.

### Parole chiave

Coefficienti colturali, Evapotraspirazione, fabbisogni idrici, Bacino idrografico

### Keywords

Crop coefficients, Evapotranspiration, Water demand, Drainage basin

### Introduzione

L'incremento delle temperature su tutto il territorio regionale ha causato un aumento dell'evapotraspirazione colturale e di conseguenza delle necessità idriche e irrigue delle colture agrarie. Anche la riduzione della piovosità sta ulteriormente aggravando il problema.

Se i valori delle superfici irrigabili e irrigate possono essere facilmente reperiti in letteratura, lo stesso non si può dire dei volumi idrici complessivamente richiesti dal comparto irriguo (Bacini e Consorzi).

In quest'ottica, la Regione Piemonte, nell'ambito del programma InvestEu istituito con Reg. UE 2021/523 finalizzato alla promozione dello Sviluppo Sostenibile, e nell'ambito del Progetto MountResilience N° 101112876 – HORIZON-MISS-2022- CLIMA-01 — Research and Innovation actions in support of the implementation of the Adaptation to Climate Change Mission”, sta perseguendo una missione di gestione e ottimizzazione dell'utilizzo della risorsa idrica, finalizzata alla valutazione ed identificazione di interventi, tra cui la realizzazione di infrastrutture irrigue e nuovi invasi. Per il raggiungimento di questo obiettivo, il primo passo consiste nello stimare i fabbisogni idrici delle principali colture agrarie presenti sul territorio piemontese.

### Materiali e metodi

Il calcolo del fabbisogno idrico è stato integrato all'interno del software Agrometeostat, sviluppato per la sezione Agrometeorologia del Settore Fitosanitario e Servizi tecnico scientifici della Regione Piemonte. Agrometeostat è un software multiplatforma scritto in Python, con struttura

modulare, utilizzato per gestire database di tipo SQL contenente dati meteorologici ed elaborare calcoli statistici di varia natura. Il modulo per i fabbisogni idrici è in grado di calcolare evapotraspirazione potenziale, curve dei coefficienti colturali, evapotraspirazione colturale, e conseguenti fabbisogni idrici per date superfici agricole.

Agrometeostat utilizza come dati di input le seguenti banche dati:

1. meteorologica
2. geografica sull'uso del suolo
3. colturale

#### Banca dati meteorologica

Il software è stato interfacciato con i dati provenienti da 87 delle 140 stazioni agrometeorologiche appartenenti alla RAM (Rete AgroMeteorologica del Piemonte) scelte in base alla rappresentatività territoriale. A ciascuna stazione sono stati associati i Comuni con caratteristiche climatiche e orografiche simili. I dati di temperatura, umidità relativa, pioggia e bagnatura fogliare sono disponibili in serie storiche dal 2000 e sono aggiornati quotidianamente.



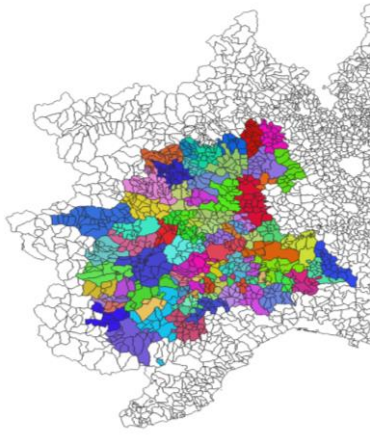


Fig.1 - Associazione dei Comuni scelti con le 87 stazioni AgroMeteorologiche rappresentative del territorio.

Fig.1 - Association of the Municipalities chosen with the 87 AgroMeteorological stations representative of the territory.  
Banca dati geografica sull'uso del suolo

I dati inerenti i terreni e l'uso del suolo sono stati aggregati a tre livelli differenti:

1) A livello di aree idrografiche individuate nelle monografie del PTA Regione Piemonte 2007 (<https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/acqua/piano-tutela-delle-acque-pta-2007#>)

L'elaborazione è stata condotta utilizzando l'uso del suolo riclassificato, i fogli catastali dei comuni e le aree idrografiche del PTA 2007, attribuendo l'uso del suolo riclassificato secondo il Censimento agricoltura (Data Warehouse di Regione Piemonte 2020-2023 - <https://servizi.regione.piemonte.it/catalogo/anagrafe-agricola-piemonte-dati-sintesi>), ai fogli di mappa al di sotto dei 600 m e la relativa area idrografica.

2) A livello di Comune. Elaborazione simile a quella precedente, è stato utilizzato l'uso del suolo riclassificato, i fogli catastali dei comuni, attribuendo l'uso del suolo riclassificato secondo il Censimento agricoltura (Data Warehouse di Regione Piemonte 2020-2023 - <https://servizi.regione.piemonte.it/catalogo/anagrafe-agricola-piemonte-dati-sintesi>), ai fogli di mappa al di sotto dei 600 m.

3) A livello di Consorzio irriguo. L'elaborazione è stata effettuata utilizzando il GIS QGIS 3.22; lo shapefile del Piano Culturale Grafico di Regione Piemonte è stato incrociato con lo shapefile delle aree irrigate dai differenti Consorzi.

#### Banca dati culturale: curve Kc

I valori dei coefficienti culturali e la lunghezza delle quattro fasi di sviluppo, finalizzati alla costruzione delle curve Kc per tutte le essenze di interesse agrario presenti in Anagrafe Agricola del Piemonte, sono stati inizialmente tratti dal Quaderno FAO 56 per essere successivamente adattati alla realtà regionale attraverso un accurato lavoro di ricerca bibliografica e interviste ai principali Centri sperimentali e

di assistenza tecnica rappresentativi per ciascuna filiera produttiva diffusi sul territorio piemontese.

La metodologia utilizzata è codificata dalla F.A.O. ed è contenuta nella pubblicazione "Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – Irrigation and drainage Paper 56" e si basa sul calcolo dell'evapotraspirazione in condizioni standard delle colture secondo la seguente formula:

$$ET_{crop} = ET_0 * K_c$$

Dove:

**ET<sub>crop</sub> (mm)** = rappresenta il consumo idrico effettivo di una specifica coltura in una determinata fase di sviluppo in condizioni di disponibilità idrica ottimale (mm)

**ET<sub>0</sub> (mm)** = Evapotraspirazione di riferimento

**K<sub>c</sub>** = Coefficiente culturale

Ai fini di questo studio, l'evapotraspirazione di riferimento è stata calcolata con la seguente formula di Hargreaves (Hargreaves, 1994):

$$ET_0 = K_{Rad} (T + 17.8) \cdot \Delta T \cdot 0.5$$

Dove: T (°C) è la temperatura media giornaliera, ΔT (°C) la differenza tra temperatura massima e minima del giorno, Rad è la radiazione solare extraterrestre che può essere stimata utilizzando la latitudine in gradi e il giorno giuliano (Duffie and Beckman, 1980), K è un coefficiente empirico il cui valore standard è 0,0023 ma può essere calibrato localmente. Per mettere a punto tale metodologia, si è scelto di utilizzare come Bacino pilota il Bacino Varaita.

Tale area ha una discreta vocazione agricola, prettamente montana. Su 60.000 ha di superficie, 12.000 ha sono irrigati, prevalentemente a scorrimento superficiale ed infiltrazione laterale, e le principali colture sono così ripartite: granoturco 40%, foraggiere 20% e fruttiferi (melo) 20%.

#### Risultati

Implementando i Dataset nel software AgroMeteoStat, è stato possibile calcolare su base giornaliera, mensile o annua i fabbisogni idrici colturali per tutte le colture di interesse agrario:

- per 889 Comuni sparsi su tutto il territorio piemontese (Tabella 1 e 2)
- per il Bacino Varaita (bacino pilota) per gli anni 2020-2023
- per i seguenti Consorzi irrigui: Area di Monte, Bedale del Corso di Saluzzo, Bedale di Piasco, Canale Commenda, Canale del Molino di Scarnafigi, Molino di Lagnasco, Pasco di Moretta (Consorzi che derivano acqua dal Torrente Varaita) per gli anni 2018-2023.

A titolo esplicativo si riportano esempi per le tre tipologie di output:

### 1) Fabbisogni culturali a livello di Comune:

Tab.1 – Fabbisogni idrici annui espressi in mm per tutte le colture presenti nel Comune di Ghemme (NO)

Tab.1 – Annual water requirements expressed in mm for all crops grown in the Municipality of Ghemme (NO)

COLTURA	ETCROP (mm)			
	2020	2021	2022	2023
Granturco	606.98	594.67	689.41	604.47
Sorgo	455.07	-	-	-
Patata	-	-	-	592.04
Soia	605.47	593.53	688.44	605.55
Pomodoro da Mensa	-	-	-	609.65
Erba Medica	438.83	429.54	495.42	438.68
Vite	504.76	496.88	560.76	507.84
Melo Pero	748.08	741.25	828.11	759.24
Pesco	757.59	748.28	837.24	765.78
Susino	757.59	748.28	837.24	765.78
Ciliegio	748.08	741.25	828.11	759.24
Nocciolo	748.08	741.25	828.11	759.24
Prati Permanenti	1012.27	991.19	1109.51	1026.35

Moltiplicando il valore del fabbisogno idrico di ciascuna coltura con i relativi ettari si ottengono i valori di fabbisogni effettivi espressi in m<sup>3</sup> di acqua necessari alla stessa coltura durante il suo ciclo vegetativo.

Tab.2 – Fabbisogni idrici per ettaro e fabbisogni idrici totali: somma per tutte le colture presenti nel comune di Ghemme (NO).

Tab.2 – Water requirements per hectare, and total water requirements: sum for all crops present in the municipality of Ghemme (NO).

	SUPERFICI E ha	ETCROP TOT (mm)	ETCROP*ha (m <sup>3</sup> tot)
<b>2020</b>	383.4794	17265.72	2101131.363
<b>2021</b>	367.9739	17043.61	2015760.568
<b>2022</b>	415.14	17303.94	2564321.56
<b>2023</b>	390.6535	17679.54	2092437.72

Nella figura 2 viene riportato a titolo esemplificativo il confronto dell'andamento dell'evapotraspirazione giornaliera per mais da granella per gli anni 2020-2023 dal 1° aprile al 31 agosto nel Comune di Ghemme (NO).

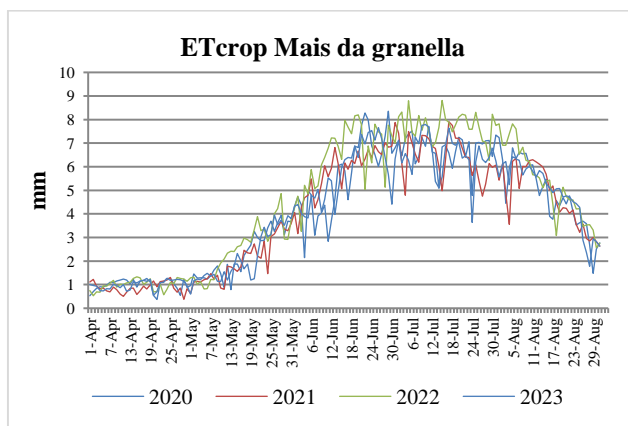


Fig.2 – Andamento annuale dell'evapotraspirazione giornaliera del mais da granella nel Comune di Ghemme (NO).

Fig.2 – Annual trend of grain corn evapotranspiration in the Municipality of Ghemme (NO).

### 2) Fabbisogni culturali a livello di Bacino (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O):

Gli output a livello di Bacino idrografico sono riportati su file excel all'interno dei quali ogni foglio rappresenta un Comune ricadente in quel Bacino e riporta i fabbisogni idrici di tutte le colture, rapportati alla relativa superficie coltivata con la specie in oggetto. All'interno dello stesso file è inoltre riportato il dato complessivo di bacino che deriva dalla somma dei singoli comuni per coltura (figura 3).

### 3) Fabbisogni culturali a livello di Consorzio (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O):

Anche in questo caso gli output sono riportati su file xls, ma i calcoli vengono fatti sulle superfici consortili (Figura 4).

month	CASTAGNO	MELO	PASCOLI	PATATA	PRATI PERMANENTI	ACTINIDIA	ORTI FAMILIARI	PIANTE AROMATICHE	PISELLO SECCO
2020-01	0	0	4568	0	99913	0	0	0	6969
2020-02	0	0	8251	0	173112	0	0	0	14707
2020-03	0	290664	11550	0	237632	240935	0	0	23440
2020-04	36689	931992	20240	1129	415214	419505	3227	21174	45477
2020-05	85808	1732486	27290	3388	549782	556870	4271	27376	50241
2020-06	97797	2624105	31136	6903	627001	748470	4885	31305	8423
2020-07	106431	3394353	33839	8178	683694	1031989	5284	34343	0
2020-08	96224	3101846	30467	6671	610961	1128561	4367	28132	0
2020-09	55124	2032854	19727	802	399102	805527	0	0	0
2020-10	5378	1071250	10388	0	210823	424236	0	0	4534
2020-11	0	588767	5812	0	118602	235667	0	0	5581
2020-12	0	116716	3512	0	71132	0	0	0	4053
2021-01	0	0	4048	0	85262	0	0	0	13060
2021-02	0	0	6479	0	136264	0	0	0	25602
2021-03	0	382077	13257	0	283980	249282	0	0	60797
2021-04	29819	814160	17066	914	353561	318706	1963	21402	86162
2021-05	81408	1772576	26635	3104	552112	494060	3042	31609	112073
2021-06	101065	2914371	33118	6875	691270	722153	3782	39419	20113
2021-07	104706	3539611	34138	7707	697532	933969	3893	39355	0
2021-08	91996	3140702	29960	6099	616016	993856	3140	32582	0
2021-09	53742	2114921	19828	737	415489	727884	0	0	0

Fig.3 - Stralcio dell'output relativo al Bacino Varaita riportante i fabbisogni idrici culturali per gli anni 2020-2021 (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O)

Fig.3 - Excerpt from the output relating to the Varaita Basin reporting the crop water requirements for the years 2020-2021 (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O)

month	GRANTURCO	ACTINIDIA	ALBICOCCO	ALTRI ERBAI	CASTAGNO	CLIEGIO	MELO
2021-01	0	0	0	127295	0	0	0
2021-02	0	0	0	194757	0	0	0
2021-03	0	233745	22249	417661	0	16506	346499
2021-04	306647	294238	34273	486321	6774	34480	725614
2021-05	857768	458568	73710	777961	18641	75636	1594446
2021-06	2234629	671471	115848	986618	23160	124663	2626033
2021-07	2468943	868239	130236	979277	23746	150845	3190041
2021-08	1856485	925443	113109	871126	20780	134017	2835702
2021-09	64490	682719	75805	601022	12270	91183	1925575
2021-10	0	382576	41965	345015	1201	51268	1080465
2021-11	0	167538	16713	150123	0	22325	472969
2021-12	0	0	0	120628	0	6853	145445

Fig.4 - Stralcio dell'output relativo al Consorzio bedale del corso di Saluzzo riportante i fabbisogni idrici colturali per il 2021 ( $m^3 H_2O$ ).

Fig.4- Excerpt from the output relating to the Consortium Bedale del Corso Saluzzo reporting the crop water requirements for 2021 ( $m^3 H_2O$ ).

## Conclusioni

Una volta testato il metodo, si procederà estendendo il calcolo su tutta l'area agricola piemontese. Inoltre, i dati dei fabbisogni idrici rappresentano il punto di partenza per il calcolo dei fabbisogni irrigui, utili sia per la gestione a breve termine di problematiche legate alla siccità o scarsità di acqua destinata all'irrigazione, sia per il dimensionamento di infrastrutture per la captazione delle acque.

## Bibliografia

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) "Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements." *Food Agricult. Organisation (FAO) – Irrigation and Drainage Paper 56*.
- Duffie and Beckman (1980) "Solar Engineering of Thermal Processes" New York, NY: Wiley.
- Hargreaves, G.H. (1994). "Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe." Departmental Paper, Dept. of Biol. And Irrig. Engrg., Utah State University, Logan, Utah.
- Linee Generali Di Assetto Idrogeologico E Quadro Degli Interventi Bacino Del Varaita, Autorità di Bacino del Fiume Po (pp. 174-175)
- Regione Piemonte - Direzione Pianificazione delle Risorse Idriche, Piano Di Tutela Delle Acque – AI05 Varaita Rev. 03/2007 (pp. 4-5)

# IRRITRE: TOOLS AND INFRASTRUCTURES FOR IRRIGATION IN TRENTINO (IT)

## *IRRITRE: INFRASTRUTTURA E STRUMENTI PER L'IRRIGAZIONE IN TRENTINO*

Alessandra Gattolin<sup>1</sup>, Fabio Antonelli<sup>2</sup>, Pietro Franceschi<sup>3</sup>, Francesca Paolucci<sup>4</sup>, Stefano Corradini<sup>5</sup>, Fabio Zottele<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup> Provincia Autonoma di Trento - Trento - Italy

<sup>2</sup> Fondazione Bruno Kessler - Digital Industry Center - OpenIoT Research Unit - Trento, Italy

<sup>3</sup> Fondazione Edmund Mach - Centro di Ricerca e Innovazione - Unità di Agricoltura Digitale - San Michele all'Adige - Italy

<sup>4</sup> Trentino Digitale S.p.A. - Innovazione e Divulgazione Tecnologica - Trento - Italy

<sup>5</sup> Fondazione Edmund Mach - Centro di Trasferimento Tecnologico - Agrometeorologia e Irrigazione - San Michele all'Adige - Italy

\*fabio.zottele@fmach.it

### **Abstract**

Sustainable water management in agriculture and the maintenance of current crop quantity and quality standards are pivotal elements of agricultural policy at global and local levels. One pressing issue is the concurrent use of water resources for irrigation alongside hydropower, tourism, industrial, and civil purposes. This issue is becoming increasingly urgent in the Alps due to changes in winter precipitation patterns, which affect summer water supplies. To monitor the water consumption for irrigation at provincial level, the Autonomous Province of Trento has established and leads the IRRITRE project in collaboration with Fondazione Bruno Kessler, Fondazione Edmund Mach, and Trentino Digitale S.p.A. for the technological aspects. The initiative was launched in the Summer of 2023 and aims to provide the public administrators with real-time monitoring tools to track agricultural water usage. Additionally, it will equip Irrigation Consortia with an irrigation advisory system to optimize water consumption and irrigation automation at hydraulic valve level by using Artificial Intelligence. The project incorporates the creation of the digital infrastructure and the deployment of humidity probes in the soil. Currently, IRRITRE is being piloted in three significant agricultural areas of the Trentino region—cultivated with grapevines, apples, and olives—with plans to expand to other irrigation consortia.

**Parole chiave:** irrigazione, LoRA, sensori di umidità del terreno, consiglio irriguo

**Keywords:** irrigation, LoRA, soil moisture probes, irrigation advisory system

### **Introduction**

Agriculture is nowadays one of the main sectors affected by Climate Change. The increasing temperatures and the imbalance of the yearly water regime are posing serious problems in terms of water use efficiency for the maintenance of crop production and high yield quality standards (Malhi et al., 2021). In the Province of Trento the high added value of primary productions, particularly in wine grapes and apples, are a crucial aspect of the primary sector to be preserved. Moreover, another pressing issue is the concurrent use of water resources for irrigation alongside hydropower, tourism, industrial, and civil purposes.

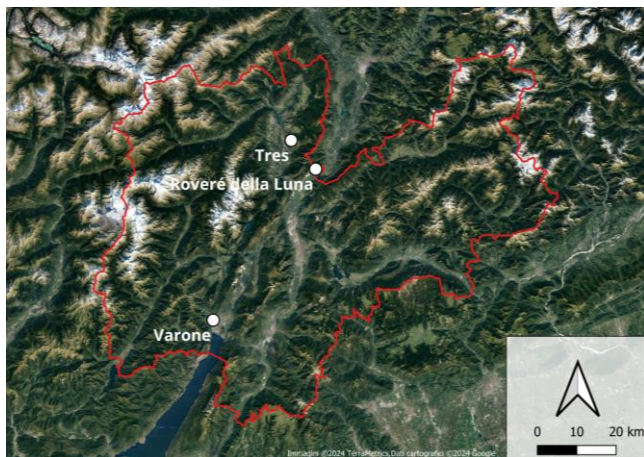
Precision Agriculture aims to rationalize the input of resources for plant nutrition and protection against biotic and abiotic stresses, in order to overcome the water consumption issue by enhancing a more efficient use of the water resource, Precision Irrigation practices in water management should be steered and implemented at regional level and enforced to the irrigation consortia depending on the local environmental characteristics, and the cultivated crops (Bwambale et al., 2022).

The irrigation strategy known as Deficit Irrigation which views the soil-atmosphere-plant system as a continuum, has already been implemented in both viticulture and fruit cultivation (Unesco, 2015). This approach has proven not only to sustain yield levels but also to enhance several aspects of quality (Van Leeuwen et al., 2009; Liao et al., 2021). Through careful management of water stress, Deficit Irrigation can optimize the trade-offs between resource use and crop quality, offering a sustainable solution to resource-intensive agricultural practices (FAO, 2002).

The Internet of Things technology (IoT) offers nowadays low cost and powerful tools for the real time crop monitoring, collection of data and automation of agricultural processes (Quy et al., 2022) At crop level soil moisture instruments give a picture of the amount of humidity in the soil (Thalheimer, 2013), meteorological data describe the actual status of the atmosphere and plant tensiometers give an overview of the water status of the plants (Lakso et al., 2022). Using IoT applications, this information is collected in real time, through LoRa modulation, and stored in TD's

data center, facilitating a more complete analysis in the perspective of crop monitoring.

The setup of a distributed network of sensors and data collectors facilitates the development of the automation of irrigation at hydraulic valve-level using Artificial Intelligence with the goal of both monitoring the irrigation water consumption and preserving the top-quality standards of primary production.



*Fig.1: Map of the Autonomous Province of Trento (red contour) and location of the three selected irrigation consortia (white dots): Tres, Roveré della Luna and Varone. (Base map: Imagery ©2024 TerraMetrics, Map Data ©2024 Google)*

*Fig.1: Mappa della Provincia Autonoma di Trento (linea rossa) e dei tre consorzi irrigui scelti come aree pilota del progetto (punti bianchi): Tres, Roveré della Luna e Varone. (Base map: Immagini ©2024 TerraMetrics, Dati cartografici ©2024 Google)*

## Materials and methods

The IRRITRE project was launched in the Summer of 2023 and it is led by The Autonomous Province of Trento (PAT), in partnership with Fondazione Edmund Mach (FEM), Fondazione Bruno Kessler (FBK) and Trentino Digitale (TD). The project is aimed to offer a decision support tool to irrigation consortia for the management of irrigation scheduling following the effective water needs of the crops. To achieve the set goals the selected areas were infrastructured with a digital wireless network (LoRaWAN) in order to collect and send the data in real time to the operational entities. We decided to choose three different facilities particularly vocationed for the main cultivated cultures in Trentino: “Piana Rotaliana” for wine and grape production, “Val di Non” for apples and “Garda Trentino” for olive for olive oil, as shown in Fig.1. In each of these areas, different kinds of soil moisture probes were installed,

varying both in the physical principles of measurement and in the manufacturers' brands. Also, we installed flowmeters on the valves and on the drip lines to calculate the water volume utilized during irrigation. Furthermore, we used meteorological data collected by FEM agrometeorological stations in the surroundings to improve the results and to facilitate the water needs calculation. The collected data coming from the soil probes and the atmospheric variables have been used to formulate the irrigation advice thanks to the SWAB model (Soil Water Atmosphere advanced Budget), which integrates water requirements of crops, soil types, and meteorological conditions. The measures and the irrigation advice will be available on a digital interface (developed by TD) where the irrigation consortia will be able to see the daily irrigation advice and the daily measured water consumption.

## Results and discussion

In the first year of the IRRITRE project, we conducted a comprehensive analysis to effectively develop the infrastructure across three chosen irrigation consortia, each distinguished by its type of cultivation (Fig.1). The orchards of “Consorzio di Miglioramento Fondiario di Tres”, located in Val di Non, are dedicated exclusively to apple production, while the “Consorzio Irriguo di Roveré della Luna” focuses on viticulture. Both had a previously installed sensor infrastructure for measuring irrigation flow and soil moisture due to prior projects. In orchards, the use of tensiometers for soil moisture measurement proved effective. However, in the conoidal areas of the vineyards in Piana Rotaliana, these instruments were less effective, necessitating the deployment of alternative sensors (both resistive and capacitive) to better monitor soil water availability for grapevines.

The third pilot site, the “Consorzio di Miglioramento Fondiario e Irriguo del Varone” presents a greater complexity due to its heterogeneous agricultural production with the irrigation sectors that differ from homogeneous cultivated areas. Olive trees were selected as the reference crop here, but no dedicated irrigation water distribution valves are entirely devoted to olive cultivation, making it challenging to evaluate the appropriateness of the water distributed versus the water needs of the plants. Additionally, this consortium lacked an existing network for measuring soil moisture, relying instead on measurement points installed individually by farmers using various technologies and suppliers. This site was particularly challenging due to the conflicting demands on water resources, especially from tourism, municipal needs for land protection, and agriculture.



A critical development in the project has been the creation of a data communication infrastructure based on LoRa technology, which could potentially be extended throughout the province for multiple uses. Previous experiences at the Roverè della Luna and Tres consortia have shown good performance; however, these were based on individual projects and had not been tested for scalability. Therefore, the goal for the first year was to design a scalable network suitable for multiple applications, not just agriculture.

## Conclusions

With the objective of monitoring the water consumption for irrigation at a regional level and providing a decision-support system to rationalize water consumption at a local level, the Province of Trento launched the IRRITRE project. In these initial months, three facilities (irrigation consortia) were selected to deploy the project's infrastructure, which includes a network of soil sensors for monitoring soil moisture and a LoRa communication network for data transmission. This setup facilitates the automation of irrigation at hydraulic-valve level by the use of Artificial Intelligence. These initiatives mark a significant advancement in managing agricultural water resources effectively and sustainably within the region.

## References

- Bwambale E., Abagale F.K., Anornu G.K., 2022. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260: 107324.
- FAO (Ed), 2002. Deficit irrigation practices. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- 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.
- Liao Y., Cao H.-X., Xue W.-K., Liu X., 2021. Effects of the combination of mulching and deficit irrigation on the soil water and heat, growth and productivity of apples. *Agricultural Water Management*, 243: 106482.
- Malhi G.S., Kaur M., Kaushik P., 2021. Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability*, 13 (3): 1318.
- Quy V.K., Hau N.V., Anh D.V., Quy N.M., Ban N.T., Lanza S., Randazzo G., Muzirafuti A., 2022. IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges. *Applied Sciences*, 12 (7): 3396.
- Thalheimer M., 2013. A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. *Journal Of Agricultural Engineering*, 44 (3): 114–9.
- Unesco (Ed), 2015. Water for a sustainable world. UNESCO, Paris.
- 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.
- Bwambale E., Abagale F.K., Anornu G.K., 2022. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving

# THE IMPORTANCE OF THE RADIATION SHIELD FOR AIR TEMPERATURE MEASUREMENT IN PRECISION AGRICULTURE

## L'IMPORTANZA DELLO SCHERMO ANTI RADIAZIONI PER LA MISURA DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA NELL'AGRICOLTURA DI PRECISIONE

Marcellino Salvador<sup>1</sup>, Stefano Perin<sup>2</sup>, Alex Stevanin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ARPA FVG

<sup>2</sup> SIAP+MICROS S.p.A.

\* indirizzo mail dell'autore di riferimento: sales@siapmicros.com

### Abstract

Current technology allows us to have highly accurate and reliable temperature sensors. This high accuracy can be compromised by poor quality 'radiation shields' that can alter the measurement by inducing errors that can exceed 1 °C or more. Recently, a number of operators sensitive to this issue have studied and proposed 'radiation shields', which minimize measurement errors, of a quality that is decidedly superior to the average of the products installed in recent decades in Italy. Siap+Micros is the first Italian operator to challenge the international leaders in the sector, having developed a very high-quality device whose performance has been proven by several tests, especially in the most severe conditions (sun and poor ventilation).

In agrometeorology, accuracy in measuring air temperature is very important, especially for studying the effects of climate change in order to develop adaptation and mitigation strategies.

### Parole Chiave

Temperatura dell'aria, Schermo solare, Schermatura radiazioni solari, Incertezza nella misura della temperatura dell'aria.

### Keywords

Air temperature, Radiation shields, Sun screens, Uncertainty in air temperature measurement.

### Introduzione

La WMO n.8 "Guide to Instruments and Methods of Observation, Volume I -Measurement of Meteorological Variables" (edizione 2021) ci indica che "Per scopi meteorologici, le temperature vengono misurate per una serie di media. La variabile più comunemente misurata è la temperatura dell'aria (a varie altezze). ... Il WMO (1992) definisce la temperatura dell'aria come "la temperatura indicata da un termometro esposto all'aria in un luogo riparato dalla radiazione solare diretta". Sebbene questa definizione non possa essere utilizzata come definizione della grandezza termodinamica stessa, è adatta alla maggior parte delle applicazioni".

In questo contesto non ci si vuole soffermare sulla definizione di temperatura dell'aria in senso stretto o sulle caratteristiche dei trasduttori che oggi hanno raggiunto un alto livello di qualità e di affidabilità, quanto piuttosto sulla modalità di misura della temperatura dell'aria e più in particolare della modalità di schermatura dalla radiazione solare.

Infatti, nei sensori per la misura della temperatura dell'aria, gli schermi dei sensori sono, oltre che il supporto meccanico degli stessi, anche la protezione rispetto a tutto ciò che può alterare la corretta misura della temperatura dell'aria ed in particolare: la radiazione solare, l'irraggiamento esterno in generale (il terreno, le nubi, la neve al suolo, ecc.) e le precipitazioni.

Inoltre occorre considerare che il vento è di fondamentale importanza nella misura della temperatura dell'aria: in caso di vento debole o assente e contemporanea presenza di forte

radiazione solare è molto difficile impedire che gli schermi si surriscaldino, alterando lo stato del misurando che viene a contatto con il trasduttore nella camera di misura.

Partendo da questa considerazione è agevole comprendere che lo schermo ideale è quello che, di giorno, mantiene al suo interno la temperatura più bassa, riuscendo comunque a seguire rapidamente le eventuali variazioni di temperatura dell'aria e perciò a misurare adeguatamente tale parametro.

In questo contesto vogliamo analizzare in particolare gli schermi passivi o autoventilati (che sono la tipologia di protezione più utilizzata in tutto il mondo) e in particolare le performance che hanno nelle condizioni ambientali più gravose per uno schermo non ventilato per termometri sono:

- forte radiazione solare
- assenza di vento
- forte irraggiamento dal suolo o da altri elementi.

### Le tolleranze sulle misure

Per l'uso climatologico la tolleranza è 0.1 K nei valori medi; oppure fino ad un massimo di 0.3 K per gli estremi in un uso prettamente meteorologico e 0.2 K come tolleranza normale in stazioni sinottiche.

**ANNEX 1.A. OPERATIONAL MEASUREMENT UNCERTAINTY REQUIREMENTS AND INSTRUMENT PERFORMANCE REQUIREMENTS**

(See explanatory notes at the end of the table numbers in the top row indicate column numbers.)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Variable	Range	Reported resolution	Mode of measurement/ observation	Required measurement uncertainty	Instrument time constant	Output averaging time	Achievable measurement uncertainty	Remarks
<b>1. Temperature</b>								
1.1 Air temperature	-80 °C to 60 °C	0.1 K	I	0.3 K for $\leq -40$ °C 0.1 K for $> -40$ °C and $\leq 40$ °C 0.3 K for $> 40$ °C	20 s	1 min	0.2 K	Achievable uncertainty and effective time constant may be affected by the design of the thermometer solar radiation screen. Time constant depends on the airflow over the sensing element
1.2 Extremes of air temperature	-80 °C to 60 °C	0.1 K	I	0.5 K for $\leq -40$ °C 0.3 K for $> -40$ °C and $\leq 40$ °C 0.5 K for $> 40$ °C	20 s	1 min	0.2 K	
1.3 Sea-surface temperature	-2 °C to 40 °C	0.1 K	I	0.1 K	20 s	1 min	0.2 K	
1.4 Soil temperature	-50 °C to 50 °C	0.1 K	I		20 s	1 min	0.2 K	

WMO fa anche differenziazioni di CLASSE delle stazioni per le misure di temperatura: dalla classe A (0.2 K) alla B (0.6 K) o alla C (fino a 1.0 K), oltre 1 K Classe D dove non c'è limite all'errore. (WMO n.8-2021 – Annex 1.G.)

**Table 1. Criteria for Measurement Quality Classification**

Measurand	Class A	Class B	Class C	Class D
Air temperature	0.2 K [1a]	0.6 K [1a]	1.0 K [1a]	
Relative humidity	2% RH [1b]	5% RH [1b]	10% RH [1b]	
Atmospheric pressure	0.2 hPa [1a]	1.0 hPa [1a]	2.0 hPa [1a]	
Wind speed and gust	Greater of 1 m/s or [1b] 5% [2b]	Greater of 2 m/s or [1b] 10% [2a]	Greater of 5 m/s or [1b] 15% [2b]	
Starting threshold	$\leq 0.5$ m/s [2b]	$\leq 1.0$ m/s [2b]	$\leq 2.5$ m/s [2b]	
Wind direction	5° [2a]	10° [2b]	15° [2b]	
Liquid precipitation amount (daily accumulated)	Greater of 1 mm or [1a] 2% [2a]	Greater of 3 mm or [1a] 5% [2b]	Greater of 5 mm or [1a] 10% [2b]	
Liquid precipitation intensity	Greater of 0.2 mm/h [1b] or 5% [2a]	Greater of 0.5 mm/h [1b] or 10% [2b]	Greater of 2 mm/h [1b] or 15% [2b]	Greater than Class C or unknown
Starting threshold	0.1 mm/h [1c]	0.3 mm/h [1c]	1.0 mm/h [1c]	
Direct solar irradiance	1% + 3 W/m <sup>2</sup> [3a]	2% + 7 W/m <sup>2</sup> [3a]	6% + 15 W/m <sup>2</sup> [3a]	
Global solar irradiance	2% + 15 W/m <sup>2</sup> [3a]	3% + 30 W/m <sup>2</sup> [3a]	8% + 55 W/m <sup>2</sup> [3a]	
Diffuse solar irradiance	2.5% + 15 W/m <sup>2</sup> [3a]	4% + 30 W/m <sup>2</sup> [3a]	10% + 55 W/m <sup>2</sup> [3a]	
Sunshine duration (daily integrated)	Greater of 0.1 h or 2% [2a]	Greater of 0.5 h or 5% [2b]	Greater of 1.0 h or 10% [2b]	
Sunshine duration threshold	120 W/m <sup>2</sup> ± 10% [2d]	120 W/m <sup>2</sup> ± 20% [2c]	120 W/m <sup>2</sup> ± 30% [2d]	

Notes:  
 1 Classifications for other measurands from the *Manual on the WMO Integrated Global Observing System* (WMO-No. 1160), Attachment 5.1, are not yet defined, due to a lack of shared knowledge on the subject or a reference.  
 2 The sources for the values in the table can be found in the following publications:  
 [1a] OSCAR/Requirements, using the lowest uncertainty of all application areas;  
 [1b] OSCAR/Requirements, using the nominal middle uncertainty of application areas;  
 [1c] OSCAR/Requirements, extrapolated to currently available technology;  
 [2a] Annex 1.A;  
 [2b] Annex 1.A, extrapolated to currently available technology;  
 [2c] Chapter 8 of the present volume;  
 [2d] Chapter 8 of the present volume, extrapolated to currently available technology;  
 [3a] ISO 9060:2018.

Sintetizzando poniamo come il valore di 0.3 °C sia la massima tolleranza ammessa per il corretto rilievo della temperatura dell'aria in una stazione per uso METEOROLOGICO SINOTTICO e CLIMATOLOGICO; per altre stazioni NON sinottiche, né climatologiche, l'errore di temperatura > di 1.0 °C, non può essere accettato, come indica lo stesso WMO per le stazioni automatiche remote (Table Annex 1.A.).

**Gli schermi alle radiazioni (WMO n.8, 2.5)**

*“... il materiale plastico a bassa conducibilità termica è ampiamente utilizzato per i suoi semplici requisiti di manutenzione. Il materiale a bassa conducibilità termica deve essere utilizzato se il sistema si basa sulla ventilazione naturale*

*Le prestazioni di uno schermo (comportamento di risposta ed effetti microclimatici che introducono distorsioni*

*indesiderate) dipendono principalmente dalla sua progettazione, nella quale si deve fare attenzione a garantire sia la protezione dalle radiazioni che una sufficiente ventilazione. Fin dall'inizio delle misurazioni della temperatura meteorologica, sono stati progettati tipi di schermi molto diversi tra loro. In seguito all'introduzione delle misure di temperatura effettuate nelle AWS, la varietà di questi modelli è aumentata in modo significativo (vedi WMO, 1998a). A causa delle differenze nelle applicazioni specifiche, nel grado di automazione e nella climatologia, è difficile raccomandare un tipo specifico di design adatto alle misurazioni a livello mondiale.*

Uno standard internazionale (ISO/DIS 17714) definisce i tipi di schermi più importanti e descrive i metodi per determinare o confrontare le prestazioni degli schermi (ISO, 2007).

Poiché lo schermo antiradiazioni può contribuire notevolmente al bilancio di incertezza delle misure di temperatura, è necessario valutare e calcolare l'effetto di diverse situazioni meteorologiche (ad esempio, il sorgere del sole dopo una notte serena, la formazione di brina o neve all'interno e all'esterno, la condensazione all'interno e all'esterno e l'effetto delle precipitazioni liquide)”.  
 Tutto ciò premesso, il seguito della presente trattazione evidenzia i diversi comportamenti degli schermi solari, a ventilazione naturale, presi in esame rispetto alle diverse condizioni meteo ambientali a cui sono esposti, non senza alcune sorprese.

**Materiali e Metodi**

*Le premesse:*

- Il dispositivo più critico nella misura della temperatura dell'aria è costituito dalla schermatura solare, “radiation shield” come universalmente chiamata nel mondo che ha la funzione di fornire il supporto e la protezione alla sonda di misura ma che non deve indurre alterazioni al “misurando”, l'aria, senza condizionamenti se non quelli naturali del sito dove si vuole eseguire il rilievo.
- Le condizioni più critiche per la misura sono quelle dove l'irraggiamento è massimo e quindi in condizioni di cielo sereno e assenza o poco vento, evidenziando che l'irraggiamento dipende anche del suolo e dal suo stato, sia di giorno che di notte (soprattutto in presenza di neve). Non si trascurino, inoltre, la possibilità di effetti psicrometrici di raffreddamento per evaporazione data da vento sulla strumentazione. Merita specificare come l'errore più comune di uno schermo sia quello indotto dal riscaldamento sotto l'azione del sole e che non di rado può portare a errori davvero significativi di misura. Tuttavia certi errori di misura avvengono anche in assenza di sole se la schermatura non protegge dall'irraggiamento, in particolare verso il terreno. Errori che possono arrivare a circa 1°C e sulla neve anche oltre (delta riferito alle schermature utilizzate per la comparazione).
- Si tratta di errori non accettabili in campo professionale e/o scientifico, ma neanche in campo operativo e che

assumono il loro massimo peso probabilmente intorno agli 0 °C e cioè nel punto del passaggio di stato tra acqua e ghiaccio dove pochi decimi fanno la differenza nei più svariati campi/settori operativi, dall'agricoltura e frutticoltura, alla viabilità stradale, alla produzione e gestione neve per scopi turistici, ecc. La precisione della misura non è quindi una questione di "lana caprina" e può avere dei risvolti importanti "sul campo e nell'immediato", oltre che dal punto di vista del monitoraggio climatico e scientifico.

- Le regole WMO forniscono una guida "sicura" entro cui muoversi. Anche se appaiono piuttosto "severe" vanno rispettate e consentono di classificare le stazioni dalla "classe A" (errore 0,2 K) alla C (1 K) minimo consentito in una stazione meteo-climatica (rif. WMO n. 8-2021, ANNEX 1.G. Measurement quality classifications for surface observing stations on land). Come da considerare c'è anche il tempo di risposta o "costante di tempo" perché una misura non sia solo accurata ma anche "pronta" e quindi in grado di seguire le variazioni tempestivamente.

#### *Dalle premesse all'operatività investigativa in campo*

Sulla base delle premesse, per testare comportamento, pregi e difetti in condizioni paritetiche meteorologiche e di elemento sensibile impiegato, si sono allestiti campi prove in siti e posizionamento conformi ai dettami WMO. L'analisi dei dati in diversi siti e condizioni meteorologiche ha portato alla consapevolezza che anche i prodotti di riferimento internazionale di aziende leader, pur evidenziando performance molto buone, in alcune condizioni faticano a rispettare i requisiti indicati dal WMO.

#### *La sfida ingegneristica.*

Preso atto delle criticità e dei requisiti obiettivo indicati dalla WMO ci si è posti l'obiettivo di realizzare uno schermo di tipo "passivo" che non avesse punti deboli in nessuna condizione meteorologica, tali da portare a errori di misura che eccedessero le tolleranze ammesse dal WMO e quindi. Secondariamente identificare anche il metodo per poterlo dichiarare conforme alla più stringente normativa WMO per l'utilizzo anche in stazioni di classe A (+/- 0,2/0,3°C di tolleranza). Occorre infatti non dimenticare che gli schermi passivi rappresentano la stragrande maggioranza di quelli impiegati nel mondo per il rilievo della temperatura, utilizzati nelle reti di misura di riferimento presso quasi tutti gli enti meteorologici nazionali accreditati presso la WMO. Particolare l'attenzione è stata posta rispetto alla condizione di maggiore criticità per uno schermo passivo: condizioni di cielo sereno e ventilazione scarsa o assente. Per questo è stato concepito uno schermo della tipologia "gill radiation plate", la più diffusa al mondo data la conformazione "classica" di schermo a piatti di base, ma con accorgimenti tecnico-ingegneristici e fisici che hanno spinto le prestazioni del prodotto a livelli di performance molto elevati in grado di superare anche le aspettative iniziali.

Tra il laboratorio e il campo prove. Allo scopo si è proceduto con una progettazione accurata delle forme e profili e ad un uso attento dello schermo, mentre in parallelo, per ogni step di sviluppo, veniva monitorato in uno o più campi prova in

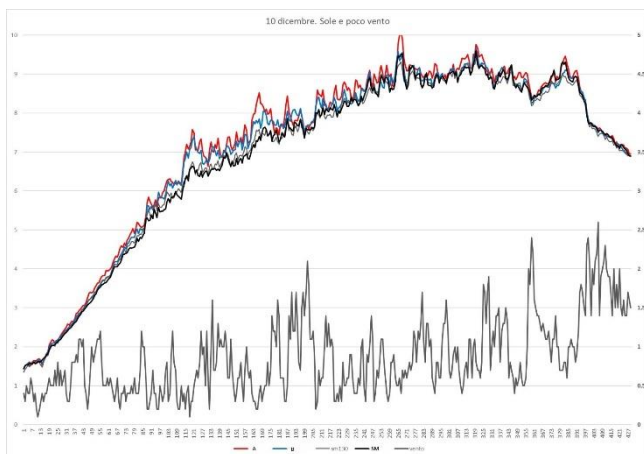
comparazione con le migliori schermature presenti sul mercato. Ovviamente particolare cura è stata rivolta alle prestazioni dello schermo nelle condizioni più gravose sopracitate e quindi massimizzando la performance in situazione di vento debole o assente pur mantenendo le migliori performance in tutte le condizioni di orario, stagionalità e condizioni meteo. In breve tempo, facendo talvolta un passo avanti e, perché no, anche uno indietro si è arrivati al prodotto finale, in grado di rispondere al meglio alle varie condizioni meteorologiche con prestazioni sostanzialmente in linea agli altri con vento sensibile o forte, ma con prestazioni superiori con venti molto deboli o assenza totale di ventilazione. Gli ottimi risultati ottenuti, il grande gap prestazionale raggiunto in condizioni di scarsa ventilazione e le soluzioni tecnologiche adottate sono stati tali da consentire di brevettare questo nuovo schermo solare che si distingue in modo netto dagli altri per essere in qualche modo immune dagli errori più significativi rilevati nella comparazione.

Le prove in campo – il collaudo scientifico. I test sono stati condotti in siti diversi, dalla pianura alla montagna, dalla primavera all'inverno, con strumentazione posta su prato o su neve, ma sempre in conformità alle linee guida WMO per le caratteristiche dei siti e la collocazione sei sensori e quindi i rilievi sono stati fatti posizionando gli strumenti tra 1,5 e 2 m di altezza dal suolo, in campo libero e rispettando per ogni strumento un'adeguata apertura non solo del sito ma anche rispetto agli altri strumenti impiegati nel confronto. Si è rilevato infatti che al di sotto di una certa distanza (circa 2 m) l'allineamento degli strumenti con vento in linea portava ad interazioni che alteravano le prestazioni ottenibili invece in campo completamente libero dello strumento.

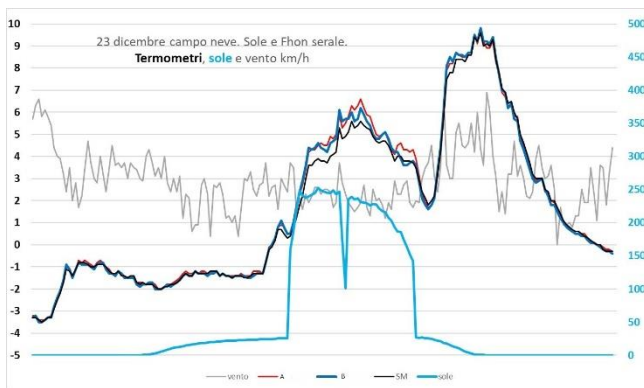
In considerazione della precisione richiesta per l'analisi climatologica anche al fine dello studio e monitoraggio del cambiamento climatico e come richiamato da recenti articoli scientifici (ACTA PHYSICA POLONICA A No. 4 Vol. 132-2017 A Temperature Error Correction Method for a Thermometer Screen, J. Yang\* and Q.Q. Liu), la necessità è di avere una qualità del dato medio giornaliero con livello di precisione del centesimo di grado centigrado e le discrepanze rilevate dagli scienziati o ricercatori in campo meteorologico e/o climatico tra i dati a livello globale può avere come causa l'utilizzo di schermature poco efficienti. Ciò ovviamente non inficia minimamente la questione del cambiamento climatico, dato che per decenni la strumentazione in uso è rimasta spesso la stessa. Oggi però possiamo disporre di uno strumento estremamente semplice e pratico per ridurre, se non addirittura azzerare, l'errore nella misura della temperatura dell'aria. una grandezza fondamentale per il monitoraggio in generale e per il cambiamento climatico in particolare, da impiegare con facilità in tutto il mondo per un vero monitoraggio sinottico scevro da errori, di facile ed economica gestione ma di grande affidabilità e precisione. Nei grafici che seguono si evidenziano i casi più significativi del comportamento delle schermature utilizzate nella comparazione.

## Risultati e Discussione

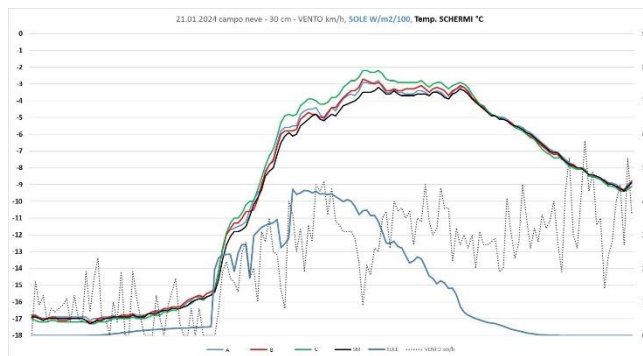
Nel seguito sono proposti i risultati in forma grafica, relativi alla sperimentazione descritta nei paragrafi precedenti:



Il grafico evidenzia la comparazione dei dati relativi alla giornata del 10/12/2023, caratterizzata da cielo sereno e prevalenti condizioni di bava di vento secondo la scala di Beaufort (tra 0,3 e 1,5 m/s). Il test mostra chiaramente come, in corrispondenza dei picchi minimi di vento, le schermature commerciali utilizzate per la comparazione (A e B) non siano in grado di dissipare il calore irradiato rispetto alla schermatura Smart Cellino (nel grafico identificata dalla linea nera SM). In alcune rilevazioni la differenza si avvicina ad 1 °C.

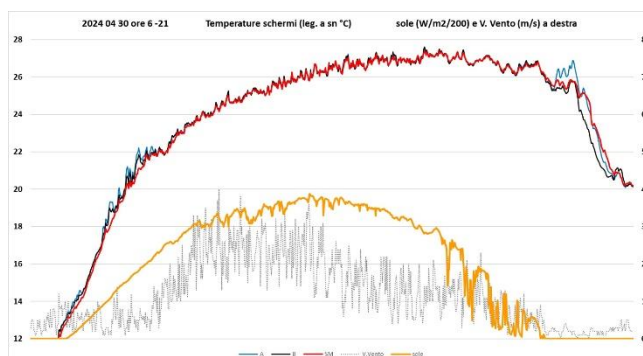


Questo secondo grafico evidenzia il comportamento della schermatura Smart Cellino nel campo prove allestito sulla neve. Molto interessante il comportamento della schermatura (linea nera nel grafico) sia nella fase diurna in cui misura temperature con un delta di 0,5-1 °C inferiore rispetto ai modelli commerciali, probabilmente grazie ad una migliore schermatura rispetto alla radiazione riflessa.

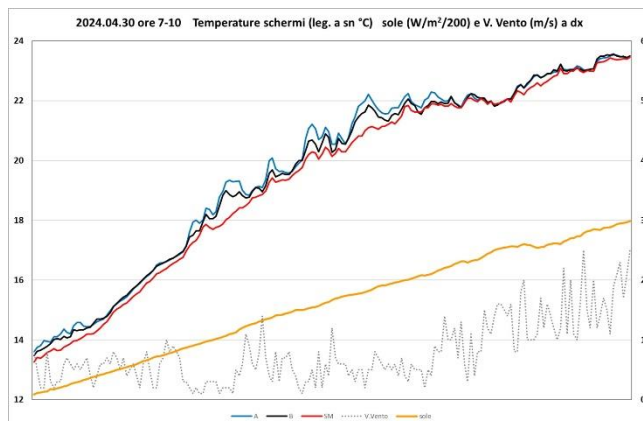


Questo terzo grafico riporta il comportamento dello schermo Smart Cellino in campo prove caratterizzato dalla presenza di fondo innevato (30 cm). In questo caso è particolarmente evidente come, anche in condizioni di bava di vento e di cielo sereno, le differenze rispetto ai campioni comparativi arrivino ad oscillare da 0,5 a 1 °C.

I grafici successivi si riferiscono ad una giornata primaverile caratterizzata da cielo sereno e buona ventosità nella fascia centrale della giornata. In primis la giornata completa e di seguito il particolare delle fasi in cui si sono evidenziati i maggiori scostamenti.



Il grafico sopra è riferito alla comparazione nell'arco dell'intera giornata h 6-21.



Il grafico qui sopra è un dettaglio della mattinata tra le 7 e le 10 che evidenzia come lo Smart Cellino nel momento in cui il vento cala fino quasi alla calma, pur rimanendo reattivo alle variazioni di temperatura dell'aria, risulta non essere



condizionato dalla radiazione solare, mantenendo una curva di crescita regolare senza outlier evidenti.

### **Bibliografia**

"Guide to Instruments and Methods of Observation, Volume I -Measurement of Meteorological Variables" CIMO Guide n. 8 - rel. 2021

ACTA PHYSICA POLONICA A No. 4 Vol. 132-2017 A Temperature Error Correction Method for a Thermometer Screen, J. Yang\* and Q.Q. Liu

# CROPS FROM SPACE: USING GOOGLE EARTH ENGINE AND GPP MODELS FOR REMOTE-SENSING-BASED CROP YIELD SPATIALIZATION

## COLTURE DALLO SPAZIO: L'USO DI GOOGLE EARTH ENGINE E MODELLI DI GPP PER LA SPAZIALIZZAZIONE DELLA RESA DELLE COLTURE BASATA SUL REMOTE-SENSING

Federico Carotenuto<sup>1\*</sup>, Beniamino Gioli<sup>2</sup>, Lorenzo Brilli<sup>2</sup>, Federica Rossi<sup>1</sup>, Camilla Chieco<sup>1</sup>, Daniela Famulari<sup>1</sup>, Marianna Nardino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la BioEconomia (CNR – IBE), Sede di Bologna, Via P. Gobetti, 101, 40129, Bologna (BO), Italy

<sup>2</sup>Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la BioEconomia (CNR – IBE), Sede di Firenze, Via G. Caproni, 8, 50145, Firenze (FI), Italy

\*[federico.carotenuto@ibe.cnr.it](mailto:federico.carotenuto@ibe.cnr.it)

### Abstract

This work leverages Google Earth Engine's (GEE) cloud computational power and vast remote sensing libraries to model crops' Gross Primary Productivity (GPP). This is a crucial variable for crop yield estimation that would normally require an eddy-covariance (EC) station to be measured. This work proposes a workflow that allows to spatialize GPP through the usage of multispectral satellite images and meteorological data coming from global reanalyses. The workflow is validated on a case study in the agricultural areas of Emilia-Romagna.

### Parole chiave

Agricoltura; GPP; Google Earth Engine; carbon farming; efficienza uso luce

### Keywords

Agriculture; GPP; Google Earth Engine; carbon farming; light use efficiency.

### Introduction

Chapin et al. (2006) define the Gross Primary Productivity (GPP) as “*the sum of gross C fixation by autotrophic C-fixing tissues per unit ground or water area and time*”. GPP therefore represents the flux of carbon into ecosystems via photosynthesis (Jung et al., 2008). For croplands GPP can be converted to yield via a harvest index (HI, Hay, 1995) and is therefore a key variable for both food security, agricultural resilience, and carbon farming. All these topics are key points for the European Union (EU) policies aiming to make food systems sustainable, environmentally friendly and to enhance food security globally. Specifically, carbon farming is integrated into the EU “*Farm to Fork Strategy*” aiming to manage fluxes of greenhouse gases and carbon storages to reach a climate-neutral economy by 2050 at the latest (COWI, 2021). In view of this, it is relevant to be able to reliably estimate GPP over various croplands with different management practices, to understand the potentiality of crops in mitigating climate change (Nardino, 2013). The CO<sub>2</sub> Net Ecosystem Exchange (NEE) of between surface and atmosphere as measured by the eddy-covariance (EC) technique is generally used as the gold standard to estimate GPP (Pei et al. 2022 and references therein). While there was a global effort in deploying an extensive network of EC sites across the world (e.g.: ICOS) it is unfeasible to think to be able to cover with such installations the whole variety of crops, climates, and management types. There is therefore a growing need for reliable GPP models able to estimate this

variable across Europe and the world. That's why the scientific community turned to satellite-based remote sensing (RS). Spaceborne sensors have quasi-global coverage, relatively short revisit times, and the ability of returning optical measurements that correlate with plant processes, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) which can correlate with the amount of absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR) (Myneni & Williams, 1994). One approach to RS GPP modeling is rooted in the light use efficiency (LUE) theory. In these models GPP depends on FAPAR which is estimated from RS data. This work employs the EC-LUE model (Yuan et al., 2007) leveraging the vast RS datasets and cloud computational capabilities of GEE following Yang et al. (2023) and Jaafar & Mourad (2021) to estimate the daily GPP of a tomato field in Emilia-Romagna at 10m resolution. Modeled GPP is compared with in-situ GPP measured via EC.

### Materials and Methods

#### *Study-site*

The study site description can be found in Nardino et al. (2023). Briefly, the field is located at the Acqua Campus experimental site of Canale Emiliano Romagnolo in the province of Bologna (Italy). The site includes three plots that were planted with industrial tomato (*cv. UG11239F1*) on the 23<sup>rd</sup> of May 2022 and harvested on the 24<sup>th</sup> of August 2022. An EC station was located inside the tomato fields (Figure

1) and was used to calculate GPP (for details about EC station and methodology refer to Nardino et al., 2023).



Fig.1- Plots with tomato crop (orange box) and position of the eddy covariance station (red cross).

Fig.1- Parcelle con coltura di pomodoro (riquadro arancione) e posizione della stazione di eddy covariance (croce rossa)

#### EC-LUE model

The EC-LUE (Yuan et al., 2007) model simulates the GPP as per the following equation (1):

$$GPP = FAPAR \cdot PAR \cdot \epsilon_{max} \cdot \min(Ts, Ws) \quad (1)$$

Where FAPAR is expressed following (2) and PAR following (3):

$$FAPAR = 1.24 \cdot NDVI - 0.168 \quad (2)$$

$$PAR = DSR \cdot \phi \quad (3)$$

FAPAR is a dimensionless number that when multiplied by PAR, represents the amount of PAR absorbed by vegetation (in MJ m<sup>-2</sup>). PAR is computed from the daily total Downward Solar Radiation (DSR, in MJ m<sup>-2</sup>) times a scaling factor ( $\phi$ ) indicating the amount of DSR which is in the PAR wavelengths (400-700 nm).  $\epsilon_{max}$  represents the maximum LUE for the tomato crop, which is the number of grams of carbon per MJ of absorbed PAR (gC MJ<sup>-1</sup>) in the absence of any kind of stress. Ts and Ws are non-dimensional factors between 0 and 1 which represent the thermal and water stress insisting on the vegetation and reducing  $\epsilon_{max}$ . The lower Ts and Ws, the higher the stress, and, in this model, the prevalent stress is considered as the limiting factor, therefore the minimum between Ts and Ws is chosen. Ts and Ws are function of the air temperature (in °C) and the sensible (H) and latent (LE) heat fluxes (in J m<sup>-2</sup>) as per (4) and (5):

$$Ts = \frac{(T - T_{min}) \cdot (T - T_{max})}{[(T - T_{min}) \cdot (T - T_{max})] - (T - T_{opt})^2} \quad (4)$$

$$Ws = \frac{LE}{LE + H} \quad (5)$$

In (4) T<sub>min</sub>, T<sub>max</sub> and T<sub>opt</sub> represent the minimum, maximum and optimal air temperature for photosynthetic activity.

In this study, NDVI has been obtained from Sentinel-2 satellites band 4 and band 8 (10 m resolution); while DSR,

T, LE and H have been obtained from the ERA5 Land meteorological reanalysis ( $\approx 11$  km resolution) (Muñoz Sabater, 2019). All pixels in Sentinel-2 images having a cloud probability greater than 65% and an NDVI value less than 0.25 (non-vegetated area) were excluded from computations.

The value of the fixed parameters  $\epsilon_{max}$ ,  $\phi$ , T<sub>min</sub>, T<sub>max</sub> and T<sub>opt</sub> have been optimized by minimizing the root mean square error (RMSE) between EC-LUE average GPP over the tomato plots and the GPP derived by EC measurements. The optimization was done via MATLAB's Optimization Toolbox starting from an initial guess of the parameters (Table 1) and then letting the optimization algorithm find the best value.

Table 1 – Initial estimate for the EC-LUE model parameters  
Tabella 1 – Stima iniziale per i parametri del modello EC-LUE

Parameter	Guess	Reference
$\epsilon_{max}$	2.33	Jaafar & Mourad, 2021
$\phi$	0.45	Klassen & Bugbee, 2005
T <sub>min</sub>	0	Yuan et al., 2007
T <sub>max</sub>	40	Yuan et al., 2007
T <sub>opt</sub>	20.33	Yuan et al., 2007

GEE has been used to obtain all the spectral and meteorological data and then to generate GPP maps once the optimal parameters were found.

## Results and Discussion

The optimization procedure yielded an RMSE of 2.94 gC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> between the average GPP modeled over the tomato fields and the GPP measured by EC. The overall trend between the modeled and measured GPP is shown in Fig.2

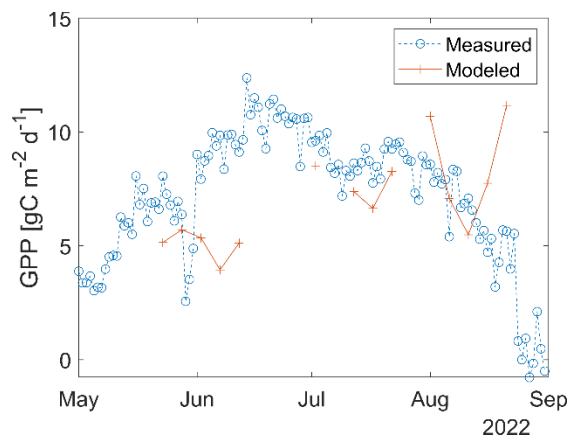


Fig. 2 – Measured (blue circles and dashed line) and modeled (orange crosses and line) GPP in the period between the 23<sup>rd</sup> of May and 24<sup>th</sup> of August 2022.

Fig. 2 – GPP misurato (cerchi e linea tratteggiata blu) e modellizzato (croci e linea arancione) nel periodo tra il 23 di Maggio e il 24 Agosto 2022.

Fig. 2 suggests that the EC-LUE model has some issues in following the trend of the measured GPP, but it is not possible to draw robust conclusions due to the small number of data points. The latter highlights one of the main issues with models based on optical RS sensors: depending on the period and the location, the presence of clouds can severely impact the amount of valid data. Nevertheless, the low RMSE highlights the potentiality of these kind of models in yielding good cumulative estimates of GPP and, when multiplied by an appropriate HI, crop yields. Similar small variations between EC estimates and RS GPP models were found by Yang et al. (2023), who used a revised EC-LUE model in the Qinghai Province of China and obtained an RMSE of  $12.31 \text{ gC m}^{-2}$  aggregated over 16 days. Figure 3 shows the huge appeal of RS GPP models, which lies in their spatialization capabilities. The topmost plot in Fig. 3 shows the tomato field as imaged by Sentinel-2 on the 17<sup>th</sup> of July 2022 using the bands in the red, green, and blue part of the spectrum. The middle plot in Fig. 3 shows the NDVI as derived by bands 4 and 8 of the satellite and the bottom plot the GPP as derived by the optimized EC-LUE model. Even at a 10 m resolution on a relatively small field, it is still possible to distinguish a certain spatial variability in the vegetation that is reflected in the NDVI and, consequently, in the modeled GPP. This is a crucial advantage of RS GPP model versus EC, as the eddy-covariance methods is only capable of integrating over its sampling footprint. Jaafar & Mourad (2021) implemented in GEE a GPP model taking with a more complex parameterization of the plant stresses, but the final spatial resolution is at 30 m, which might impact its usefulness on small fields. A further consideration needs to be done for the optimization procedure. Table 2 reports the optimal values found by the procedure for the various parameters.

Table 2 – Optimal values for the EC-LUE model parameters

Tabella 2 – Valori ottimali per i parametri del modello EC-LUE

Parameter	Optimal value
$\epsilon_{max}$	3.55
$\phi$	0.53
Tmin	10.72
Tmax	41.42
Topt	10.72

While parameters such as Tmax and  $\phi$  remains quite close to the initial guess and well within reasonable limits; parameters such as Tmin and Topt were quite distorted by the optimization procedure up to the point where their only difference is below 0.01.

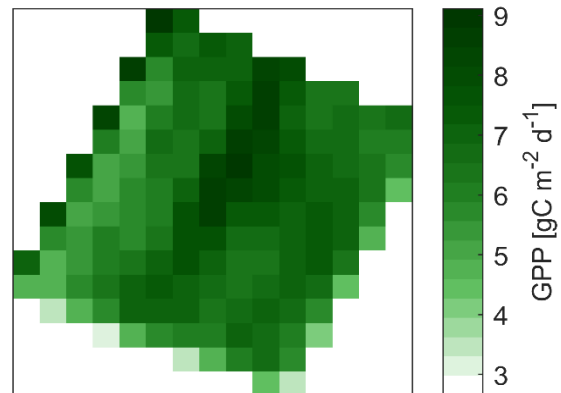
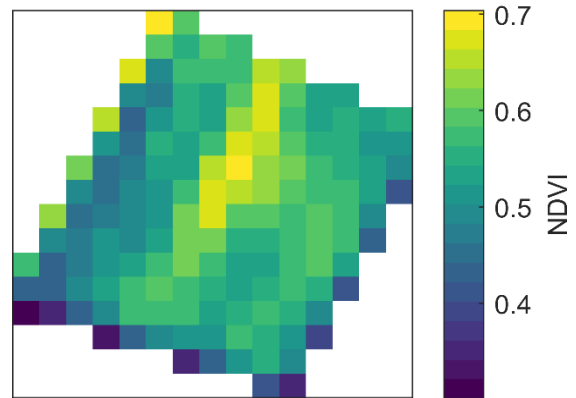
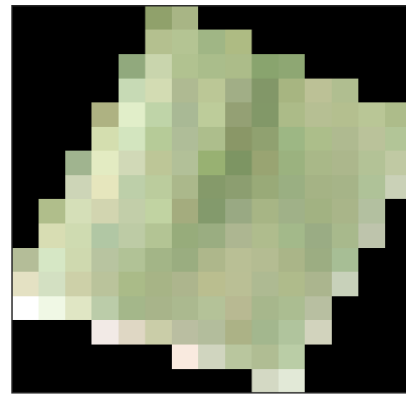


Fig. 3 – Tomato field as imaged by Sentinel-2 on the 17<sup>th</sup> of July 2022. Topmost plot shows the field in the visible wavelengths (red, green and blue), middle plot shows the NDVI and the bottom plot the GPP derived by the EC-LUE model.

Fig. 3 – Campo di pomodoro acquisito da Sentinel-2 il 17 Luglio 2022. Il grafico più in alto mostra il campo nelle lunghezze d'onda visibili (rosso, verde e blu), il grafico di mezzo l'NDVI e il grafico in basso il GPP derivato dal modello EC-LUE.

This might hamper the possibility to extend the optimized model to further cases but can be mitigated by either increasing the amount of data for the optimization or imposing stronger bounds at the expense of an increased model error.

## Conclusions

This paper presents a case study where GPP from a tomato field is modeled from spaceborne sensor and then compared with GPP measured in-situ with an EC tower. RS GPP models have a huge appeal to spatialize GPP and derive crop yield without increasing the labor and the instrumentation needed to obtain such results. In the present case study, the overall RMSE was quite satisfactory even if some issues are still present trend-wise. Major criticalities in the usage of satellite for these kinds of models are due to the presence of clouds that, especially on short periods, may greatly affect the amount of good data measured by optical sensors. Future developments might need to address the necessity to reliably gap-fill cloudy days. Finally, GPP models based on LUE rely on the estimation of parameters that quantify the maximum LUE and the impact of stressors on the vegetation. Optimization procedure vs. selected in-situ data might help in this sense, but care must be taken to keep the output of the optimization within reasonable values.

## Acknowledgements

The authors wish to thank CER for making the experimental site available and for their support during the eddy-covariance measurements.

## References

- Chapin, F.S., Woodwell, G.M., Randerson, J.T., Rastetter, E.B., Lovett, G.M., Baldocchi, D.D., Clark, D.A., Harmon, M.E., Schimel, D.S., Valentini, R., Wirth, C., Aber, J.D., Cole, J.J., Goulden, M.L., Harden, J.W., Heimann, M., Howarth, R.W., Matson, P.A., McGuire, A.D., Melillo, J.M., Mooney, H.A., Neff, J.C., Houghton, R.A., Pace, M.L., Ryan, M.G., Running, S.W., Sala, O.E., Schlesinger, W.H., & Schulze, E.-D. (2006). Reconciling Carbon-cycle Concepts, Terminology, and Methods. *Ecosystems*, 9, 1041–1050 (2006). DOI: 10.1007/s10021-005-0105-7.
- Jung, M., Verstraete, M., Gobron, N., Reichstein, M., Papale, D., Bondeau, A., Robustelli, M., & Pinty, B. (2008). Diagnostic assessment of European gross primary production. *Global Change Biology*, 14, 2349–2364. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01647.x.
- Hay, R.K.M. (1995). Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Annals of Applied Biology*, 126, 197–216. DOI: 10.1111/j.1744-7348.1995.tb05015.x.
- COWI, Ecologic Institute and IEEP (2021) Technical Guidance Handbook - setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU Report to the European Commission, DG Climate Action, under Contract No. CLIMA/C.3/ETU/2018/007. COWI, Kongens Lyngby.
- Nardino, M., Pernice, F., Rossi, F., Georgiadis, T., Facini, O., & Motisi D. (2013). Annual and monthly carbon balance in an intensively managed Mediterranean olive orchard. *Photosynthetica*, 51, 63–74.
- Pei, Y., Dong, J., Zhang, Y., Yuan, W., Doughty, R., Yang, J., Zhou, D., Zhang, L., & Xiao, X. (2022). Evolution of light use efficiency models: Improvement, uncertainties, and implications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 317, 108905. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.108905.
- Myneni, R.B., & Williams, D.L. (1994) On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 49(3), 200–211.
- Yuan, W., Liu, S., Zhou, G., Zhou, G., Tieszen, L. L., Baldocchi, D., Bernhofer, C., Gholz, H., Goldstein, A. H., Goulden, M. L., Hollinger, D. Y., Hu, Y., Law, B. E., Stoy, P. C., Vesala, T., & Wofsy, S. C. (2007). Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3), 189–207. DOI: 10.1016/j.agrformet.2006.12.001.
- Yang, F., He, P., Wang, H., Hou, D., Li, D., & Shi, Y. (2023). Long-term, high-resolution GPP mapping in Qinghai using multi-source data and google earth engine. *International Journal of Digital Earth*, 16(2), 4885–4905. DOI: 10.1080/17538947.2023.2288131.
- Jaafar, H., & Mourad, R. (2021) GYMEE: A Global Field-Scale Crop Yield and ET Mapper in Google Earth Engine Based on Landsat, Weather, and Soil Data. *Remote Sensing*, 13, 773. DOI: 10.3390/rs13040773.
- Nardino M., Anconelli S., Carotenuto F., Chieco C., Famulari D., Gentile S.L., Mari M., Solimando D., & Rossi F. (2023) Scambi di flussi di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O tra atmosfera e colture ortive: il caso del pomodoro. Proceedings of XXV Convegno Nazionale di Agrometeorologia, L'agrometeorologia per la gestione delle risorse e delle limitazioni ambientali in agricoltura, 14-16 Giugno 2023, Matera, Italy.
- Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI:10.24381/cds.68d2bb30.
- Klassen, S., & Bugbee, B. (2005). Shortwave Radiation. In *Micrometeorology in Agricultural Systems* (eds J.L. Hatfield and J.M. Baker). DOI: 10.2134/agronmonogr47.c3.



# RAINFALL-INDUCED SHALLOW LANDSLIDES PREDICTION THROUGH THE CRITERIA-1D AGRO-HYDROLOGICAL MODEL

## PREVISIONE DI FRANE SUPERFICIALI INDOTTE DA PIOGGIA TRAMITE IL MODELLO AGRO-IDROLOGICO CRITERIA-1D

Giada Sannino<sup>1,2\*</sup>, Fausto Tomei<sup>1</sup>, Marco Bittelli<sup>3</sup>, Massimiliano Bordini<sup>4</sup>, Claudia Meisina<sup>4</sup> e Roberto Valentino<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Struttura tematica Idro-Meteo-Clima, Arpa Emilia-Romagna, Bologna

<sup>2</sup> Università degli Studi di Parma – Dipartimento di Scienze Chimiche, della Vita e della Sostenibilità Ambientale

<sup>3</sup> Università degli Studi di Bologna – Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari

<sup>4</sup> Università degli Studi di Pavia – Dipartimento di Scienze della Terra e dell’Ambiente

\* gsannino@arpae.it

### Abstract

Because of global warming extreme rainfall events are expected to increase during the next years. Rainfall is considered to be the major triggering factor for shallow, translational landslides and thus also the frequency of these events will grow. The loss of fertile soil is an irreversible process and shallow landslides cause this phenomenon to occur on slopes, especially on hilly and mountainous agricultural settings. In this work, the implementation of a slope stability method for rainfall-induced shallow landslides in CRITERIA-1D is presented. CRITERIA-1D is an agro-hydrological model based on numerical solution of Richards’ equation for transient infiltration and redistribution processes. The model can simulate the presence and development of roots and canopies over time. The validation of the proposed model was conducted on the basis of data collected from an experimental slope located in a wine-growing area of Oltrepo pavese (Montuè). The application shows the efficacy of the proposed model in predicting the correct time of landslide occurrence.

### Parole chiave

Frane superficiali pluvio-indotte, colture, vegetazione, pendio, 1D, evapotranspirazione, LAI, radici

### Keywords

Rain-induced shallow landslides, vegetation, slope, 1D, evapotranspiration, LAI, roots

### Introduzione

L’occorrenza di eventi franosi, soprattutto di natura superficiale (1-2 m di profondità), ad opera di eventi climatici estremi o di precipitazioni anche di più bassa intensità, ma ravvicinate nel tempo, è un fenomeno che sta diventando sempre più frequente. Gli scenari futuri di riscaldamento globale prevedono con alta probabilità un aumento delle precipitazioni estreme e, dunque, è necessario poter predire correttamente e in anticipo gli eventi franosi (Gariano e Guzzetti, 2016).

Nei contesti agricoli collinari e montani è frequente avere sistemi colturali di pendio. La pendenza costituisce un fattore predisponente l’insorgenza di frane (Conforti e Ietto, 2021) e questi territori, da un punto di vista qualitativo, sono dunque soggetti al rischio di scivolamenti superficiali ad opera dalle precipitazioni.

Il diverso grado di vulnerabilità delle parcelle, dei versanti o dei territori interi dipende da diversi fattori, tra cui uno dei più influenti è l’uso del suolo (Meneses et al. 2019). I cambiamenti di destinazione d’uso o di coltura nel corso del tempo, unitamente alle scelte gestionali, possono infatti favorire o contrastare l’insorgenza di fenomeni franosi.

Anche se una frana è di tipo superficiale, ovvero che coinvolge profondità massime generalmente al di sotto dei 2-3 metri, i danni economici e ambientali conseguenti possono essere molto gravi, e tra essi è compreso il degrado del suolo ad opera dello scivolamento franoso, che rimuove i primi strati di terreno. È noto che la perdita di fertilità è un

fenomeno irreversibile, con conseguenze importanti a livello sia locale che globale, e proprio gli strati di suolo più superficiali sono i più importanti da questo punto di vista.

Generalmente, il meccanismo che provoca un evento franoso è l’accumulo di acqua all’interno del terreno che può avvenire a causa dell’incontro del fronte umido in infiltrazione con uno strato meno permeabile o di una barriera capillare quando l’acqua è in risalita, oppure quando l’intensità di pioggia è superiore alla velocità di infiltrazione del terreno, impedendo così il drenaggio naturale. La formazione di lenti sature nel terreno genera, di conseguenza, valori di potenziale idrico nulli o addirittura positivi, che sono quelli che generalmente provocano il distacco e lo scivolamento del terreno sovrastante lungo una superficie, che viene quindi detta “di scorrimento”.

La letteratura in materia di previsione di frane superficiali si occupa della modellazione della vegetazione solo da tempi relativamente recenti (Murgia et al. 2022), e molti aspetti di carattere soprattutto dinamico vengono ancora normalmente trascurati. Difatti, nella maggior parte dei modelli, comprendendo quelli che considerano processi idrologici transienti, la vegetazione è spesso considerata come un fattore statico, che quindi non cambia durante il tempo. CRITERIA-1D, invece, grazie alla sua natura di modello agro-idrologico, permette l’evoluzione nel tempo di radici e copertura vegetale, e può considerare anche le diverse fasi fenologiche sulla base dei reali dati meteorologici giornalieri. La struttura del modello permette inoltre di testare, a scala di pendio, diverse soluzioni colturali per

valutare quali potrebbero essere più efficaci nel contrastare fenomeni franosi dal momento che CRITERIA-1D può considerare simultaneamente la stratigrafia dei suoli e le relative parametrizzazioni idrologiche, l'eventuale contatto litologico, la pendenza del pendio in oggetto, la distribuzione radicale con la profondità e l'evoluzione del LAI nel tempo. Sulla base di dati giornalieri meteorologici forniti come dati di ingresso, il modello usa dapprima un anno di dati per simulare uno stato iniziale idrologico consistente, e dopo la simulazione restituisce una serie di risultati, tra cui il contenuto idrico ed il potenziale idrico a profondità scelte. Per quanto riguarda la stabilità del versante, CRITERIA-1D calcola a certe profondità scelte dall'utente il fattore di sicurezza, un indice quantitativo della stabilità che è strettamente legato allo stato idrico del terreno, considerando l'effetto idrologico di stabilità operato dalla vegetazione tramite l'attività traspirativa. Gli effetti idrologici sulla stabilità vengono raramente considerati negli altri modelli di stabilità dei versanti (Li and Duan, 2023), compreso anche l'effetto indotto dall'evapotraspirazione, che in CRITERIA-1D è modellato su base giornaliera.

In questo lavoro, il modello CRITERIA-1D è stato applicato ad un sito sperimentale collocato nell'Oltrepò Pavese, a Montuè, un'area vitivinicola, dove una frana è avvenuta tra il 28 febbraio ed il 2 marzo 2014 con una profondità di innesco di 100 cm. CRITERIA-1D è stato applicato confrontando una simulazione che considera suolo nudo (Scenario A) e una che considera la presenza di vegetazione (Scenario B).

I risultati ottenuti sottolineano l'importanza di modellare in dettaglio le piante e gli effetti idrologici della vegetazione sulla stabilità dei versanti e l'efficacia del modello nel predire il momento di insorgenza delle frane.

## Materiali e Metodi

### Il modello: Idrologia

CRITERIA-1D è un modello liberamente distribuito e sviluppato dal Servizio Idro Meteo Clima di Arpa (SIMC). Deriva dal modello tridimensionale CRITERIA-3D (Bittelli et al. 2010) ed è scaricabile al seguente link: <https://github.com/ARPA-SIMC/CRITERIA1D>. Il modello CRITERIA-1D risolve numericamente i flussi idrici del terreno tramite una versione monodimensionale della equazione di Richards in cui il dominio di calcolo è approssimato da una griglia di punti. In questo senso, l'equazione è equivalente all'equazione di bilancio di massa per un volume unitario che circonda ogni nodo (Equazione 1):

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} + q_i \quad \forall i \neq j \quad (1)$$

dove:

$V_i$  è il volume che circonda il nodo  $i$ -esimo [ $m^3$ ];  
 $Q_{ij}$  è il flusso tra nodi adiacenti  $i$  e  $j$  [ $m^3/s$ ];  
 $q_i$  è il flusso in ingresso al nodo  $i$ -esimo [ $m^3/s$ ];  
 $n$  è il numero totale dei nodi.

Per il calcolo del flusso  $Q_{ij}$  tra nodi adiacenti, CRITERIA-1D utilizza la legge di Darcy alle differenze finite (Equazione 2):

$$Q_{ij} = -K_{ij} S_{ij} \frac{(H_i - H_j)}{L_{ij}} \quad (2)$$

dove:

$K_{ij}$  è la conducibilità idraulica tra i nodi adiacenti  $i$  e  $j$ , ottenuta come media geometrica tra le conducibilità idrauliche  $K$  dei singoli nodi [ $m/s$ ];

$S_{ij}$  è l'area dell'interfaccia tra i nodi  $i$  e  $j$  [ $m^2$ ];

$H_i$  e  $H_j$  sono i potenziali idrici ai nodi  $i$  e  $j$ , ottenuti tramite la curva di ritenzione idrica [ $m$ ];

$L_{ij}$  è la distanza tra i nodi  $i$  e  $j$  [ $m$ ].

Oltre a calcolare l'infiltrazione e la conseguente percolazione verticale transiente su base giornaliera, CRITERIA-1D include nel bilancio idrico l'evaporazione del suolo, il drenaggio laterale, la risalita capillare e l'attività di assorbimento radicale da parte delle piante, sulla base delle esigenze traspirative della coltura, oltre ad un effetto di riduzione dell'infiltrazione causato dalla presenza di vegetazione. Entrambi i modelli tengono conto della stratigrafia del terreno grazie alla possibilità di determinare diversi orizzonti di spessori scelti, ognuno dei quali caratterizzato da una propria curva di ritenzione idrica. Nel caso di CRITERIA-1D, il modello scelto è quello di Van Genuchten-Mualem nella versione proposta da Ippisch et al. (2006) per il calcolo del grado di saturazione ( $S_e$ ) (Equazione 3) ed il modello proposto da Mualem (1976) per la curva di conducibilità idraulica ( $K$ ) (Equazione 4):

$$S_e = \begin{cases} \frac{1}{S_c} [1 + (\alpha h)^n]^{-m} & \text{if } (h > h_e) \\ 1 & \text{if } (h \leq h_e) \end{cases} \quad (3)$$

$$K = \begin{cases} K_s S_e^\tau * \left[ 1 - \frac{\left(1 - (S_e S_c)^{\frac{1}{m}}\right)^m}{1 - \left(1 - S_c^{\frac{1}{m}}\right)^m} \right]^2 & \text{if } (S_e < 1) \\ K_s & \text{if } (S_e \geq 1) \end{cases} \quad (4)$$

dove:

$h_e$  è il valore di entrata dell'aria, dipendente dalla tessitura del suolo [ $kPa$ ];

$S_e$  è il grado di saturazione [-];

$S_c = [1 + (\alpha h_e)^n]^{-m}$  è il grado di saturazione corrispondente al valore di ingresso dell'aria  $h_e$ ;

$\alpha$ ,  $\tau$ ,  $n$ ,  $m$  sono parametri di adattamento della curva di ritenzione idrica;

$K_s$  è la conducibilità idraulica in condizione di saturazione [ $cm/g$ ].

Nel modello CRITERIA-1D, ad ogni dato di input di pioggia e temperatura giornaliero corrispondono output idrologici di contenuto idrico e di potenziale idrico del terreno a diverse

profondità, oltre ad altri output legati ai fabbisogni idrici delle colture (ad esempio, la frazione di acqua disponibile).

### Modellazione della vegetazione

La presenza e crescita di una coltura in CRITERIA-1D viene considerata tramite la somma termica (in inglese, *growing degree days*, *GDD*). Quando la temperatura supera una certa soglia, la pianta può accumulare calore sotto forma di gradi giorno, i quali andranno a costituire un certo indice di area fogliare (*Leaf Area Index*, *LAI*) giornaliero. Le varie fasi fenologiche vengono modellate tramite la curva del LAI nel corso dell'anno, che può crescere e ridursi. La copertura vegetativa così determinata influenza anche il tasso di evaporazione dei primi strati di suolo.

Per quanto riguarda le radici, in CRITERIA-1D è possibile determinare un apparato radicale variabile con la profondità, espresso tramite la percentuale di suolo occupata da radici per ogni strato di terreno. Le distribuzioni radicali possibili sono: cilindrica, cardioide o la funzione gamma. Cambiando i parametri di queste distribuzioni si può approssimare l'apparato radicale reale della coltura considerata.

Ad ogni strato occupato da radici corrisponde in CRITERIA-1D un certo tasso di attività di assorbimento radicale (o *Root Water Uptake*, *RWU*), dipendente dalla reale temperatura dell'aria e dallo stato di umidità del terreno; difatti, quando questo è saturo o secco, la pianta blocca la sua attività traspirativa.

Il calcolo complessivo dell'evapotraspirazione giornaliera  $ET_0$  è basato sul modello di Hargreaves-Samani (1985) (Equazione 5):

$$ET_0 = 0.0023 \frac{Ra}{2.456} \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 17.78 \right) (T_{max} - T_{min})^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

dove:

0.0023 è un coefficiente empirico, pari a  $KT \cdot 0.0135$ .  $KT$  dipende dall'area geografica (in questa applicazione,  $KT = 0.17$ ), mentre 0.0135 è un coefficiente proposto dagli autori del metodo;

$Ra$  è la radiazione extraterrestre media globale dipendente dalla latitudine [ $MJ/m^2$  giorno];

$T_{max}$  e  $T_{min}$  sono, rispettivamente, la temperatura massima e minima giornaliera [ $^{\circ}C$ ];

17.78 è il fattore di conversione per lo 0 Fahrenheit.

### Metodo di calcolo della stabilità dei pendii

Dal momento che le frane superficiali indotte da pioggia coinvolgono strati di suolo che sono generalmente poco profondi rispetto alle lunghezze coinvolte, il metodo di calcolo tradizionalmente usato per modellare questi eventi franosi è quello del pendio indefinito (Figura 1).

La comunità scientifica concorda infatti nel ritenere che questo metodo sia il più coerente con i fenomeni di tipo traslativo, dal momento che il metodo utilizza una superficie di scivolamento di tipo planare. All'insorgere della frana, il blocco di terreno che viene assunto traslare lungo la superficie di scivolamento è considerato come rigido,

coerentemente al modello idrologico di CRITERIA-1D che si basa sullo stesso assunto per poter simulare i flussi idrici. Il metodo del pendio indefinito utilizza il calcolo del fattore di sicurezza (FS) come indice quantitativo della stabilità dei versanti. Grazie alla teoria dell'equilibrio limite, che individua uno stato critico di equilibrio dovuto all'equivalenza tra le forze esterne che sollecitano il corpo (il versante) e le forze interne che vi reagiscono, è possibile determinare se l'oggetto in questione è in condizioni di stabilità o meno. Nel caso di un pendio, il fattore di sicurezza può essere calcolato a diverse profondità per scoprire qual è la zona di innesco della frana in determinate condizioni o archi temporali. Lo stato critico di equilibrio è individuato quando il fattore di sicurezza è pari a 1, e al di sotto di questo valore si considera che, alla profondità di calcolo considerata, sia avvenuto il distacco e il versante sia quindi franato.

In CRITERIA-1D il fattore di sicurezza è calcolato sulla base dell'equazione di Lu e Godt (2008) che consente di rilevare l'insorgenza di instabilità anche in condizioni di parziale saturazione (quindi quando i potenziali idrici sono ancora negativi). Ciò è possibile grazie all'utilizzo di una variabile che quantifica gli effetti idrologici di instabilità dovuti alla capillarità e alle forze fisico-chimiche agenti nel terreno: il *suction stress*,  $\sigma^s$ .

Il fattore di sicurezza in CRITERIA-1D viene quindi calcolato giorno per giorno secondo le Equazioni 6 e 7:

$$FS = \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} + \frac{2c_{tot}}{\gamma H_{ss} \sin 2\beta} - \frac{\sigma^s}{\gamma H_{ss}} (\tan\beta + \cot\beta) \tan\phi' \quad (6)$$

$$\sigma^s = -\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} (u_a - u_w) \quad (7)$$

dove:

$\phi'$  è l'angolo di attrito interno del terreno [ $^{\circ}$ ];

$\beta$  è l'angolo di inclinazione del versante [ $^{\circ}$ ];

$c_{tot} = c' + c_r$  è la coesione totale del terreno [kPa], calcolata come somma algebrica tra la coesione efficace del terreno ( $c'$ ) e la coesione radicale dovuta all'azione di rinforzo operata dalle radici delle piante ( $c_r$ );

$\gamma$  è il peso unitario del terreno [ $kN/m^3$ ];

$H_{ss}$  è la profondità di calcolo [m];

$\sigma^s$  è il *suction stress* [kPa];

$\theta$  è il contenuto idrico attuale [ $m^3/m^3$ ];

$\theta_r$  è il contenuto idrico al punto di appassimento [ $m^3/m^3$ ];

$\theta_s$  è il contenuto idrico a saturazione [ $m^3/m^3$ ];

$(u_a - u_w)$  è la suzione del terreno, calcolata come differenza tra la pressione atmosferica  $u_a$  e la pressione dell'acqua nei pori  $u_w$  [kPa].

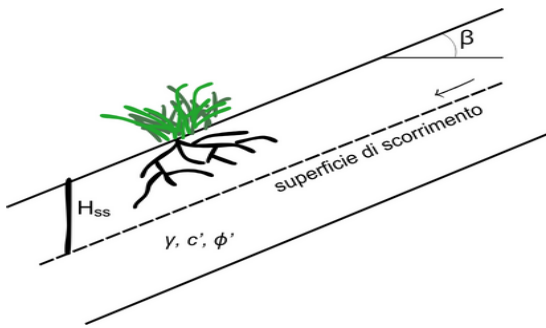


Fig.1 – Rappresentazione schematica del pendio indefinito. Nell'immagine:  $H_{ss}$  è la profondità di calcolo;  $\gamma$ ,  $c'$  e  $\phi'$  sono i parametri geomeccanici del suolo (rispettivamente, peso unitario, coesione efficace e angolo di attrito interno);  $\beta$  è l'angolo di inclinazione del versante

Fig.1 – Schematic representation of the infinite slope. Symbols in the figure represent:  $H_{ss}$  is the depth of interest;  $\gamma$ ,  $c'$  e  $\phi'$  are the geomechanical soil parameters (respectively, the unit weight, the effective cohesion and the friction angle);  $\beta$  is the slope angle.

Per quanto riguarda il contributo della vegetazione alla stabilità dei versanti, in CRITERIA-1D sia l'effetto idrologico, dovuto alla rimozione di acqua da parte della radici, sia l'effetto meccanico, quantificato come estensione additiva della coesione del suolo, possono essere considerati, quest'ultimo associato all'effettiva densità radicale di ogni strato di terreno, sia essa misurata o stimata. Il massimo contributo meccanico radicale alla stabilità è associato allo strato che presenta la più alta percentuale occupata da radici e, negli altri strati, questo termine si riduce proporzionalmente alla presenza effettiva di radici.

Data la forte natura empirica dei valori di rinforzo meccanico radicale in letteratura, dipendenti dalle proprietà specifiche dell'apparato radicale che presenta un'enorme variabilità, in questa applicazione solo l'effetto idrologico viene considerato, dal momento che esso ha una forte base fisica in CRITERIA-1D e che non sono stati effettuati scavi per la rilevazione dell'apparato radicale. Tramite questa scelta si può valutare l'efficacia di considerare l'effetto di rinforzo idrologico delle piante, molto spesso non considerato nei modelli di stabilità dei versanti

#### Area studio e descrizione simulazioni

Il pendio sperimentale, dotato di stazione meteorologica e di sensori per la misura del potenziale idrico e del contenuto idrico a diverse profondità, è situato in una località dell'Oltrepo pavese, Montuè, in cui la viticoltura costituisce il principale uso del suolo. La litologia e la pedologia del sito, oltre alle frane occorse nel tempo, sono rappresentate in Figura 2. Per un'estesa discussione sull'area studio e sulla stratigrafia, si rimanda al lavoro di Bordoni et al. (2015).

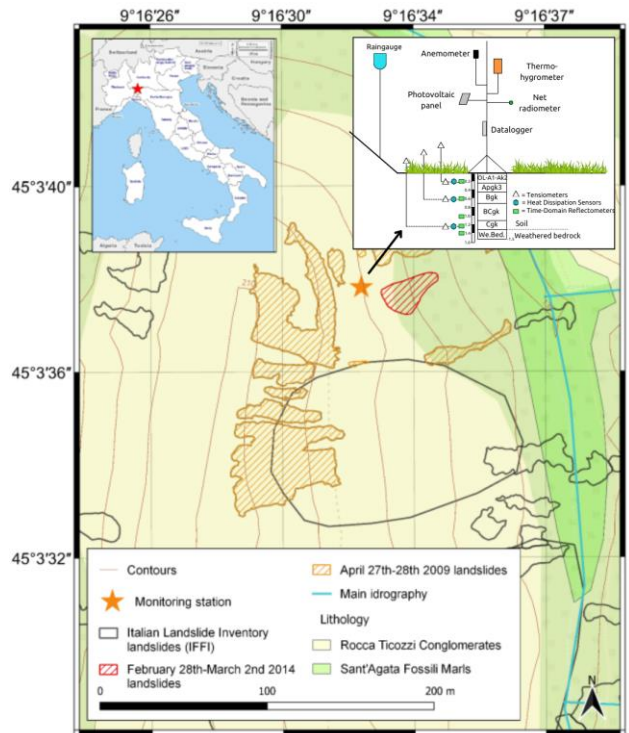


Fig.2 – Inquadramento dell'area di studio di Montuè e rappresentazione della stratigrafia e della stazione di monitoraggio

Fig.2 – Montuè study area with representations of soil stratigraphy and monitoring station

Come accennato, nel presente lavoro sono stati analizzati due scenari: il primo, denotato con lettera A, considera suolo nudo, mentre il secondo, denotato con lettera B, considera la presenza della vegetazione. Nella Tabella 1 sono elencati i parametri idrologici e meccanici del terreno usati in entrambe le simulazioni. I parametri legati alla vegetazione dello scenario B sono stati calibrati sulla base dei dati di campo di potenziale idrico e contenuto idrico, risultando in una profondità radicale massima di 1.3 m, una distribuzione radicale cardioide con massima percentuale di radici ad una profondità di 50 cm, ed un LAI che passa da un minimo di 0.5 in inverno, ad un massimo di 2.5 in tarda primavera-estate. Il periodo di copertura vegetale, che va da marzo ad ottobre inoltrato, è stato dedotto da immagini satellitari.

#### Risultati e Discussione

I risultati ottenuti per quanto riguarda la previsione della frana del 2014 a Montuè sono mostrati in Figura 3. I risultati ottenuti dimostrano che considerare la presenza di vegetazione, che nel caso di Montuè sul corpo frana è rappresentata da un bosco giovane di *Robinia Pseudoacacia L.*, migliora le prestazioni del modello in termini di efficienza, riducendo il numero di falsi eventi rilevati.

Tab.1 – Parametri usati per le simulazioni in CRITERIA-1D del caso del pendio sperimentale di Montuè.

FL=franco-limoso; FLA=franco-limoso argilloso;  
 $K_{sat}$ =conducibilità idraulica satura;  $\theta_r$ =contenuto idrico residuo;  $\theta_s$ =contenuto idrico a saturazione;  $c'$ =coesione apparente;  $\varphi'$ =angolo di attrito interno

Tab.1 – Parameters used for CRITERIA-1D simulation of Montuè experimental slope case.

Orizzonte	Profondità [cm]	Tessitura	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	$K_{sat}$ [m/s]	$\theta_r$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\theta_s$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$c'$ [kPa]	$\varphi'$ [°]
OL-A1-Ak2	0-22	FL	1.733	7E-06	0.12	0.39	0	31
Appk3	22-42	FLA	1.703	2E-06	0.13	0.40	0	31
Bgk	42-70	FLA	1.703	2E-06	0.15	0.44	0	33
BCgk	70-110	FLA	1.897	2E-06	0.10	0.41	0	33
Cgk	110-130	FL	1.861	7E-06	0.16	0.48	29	26
We.Bed	130-150	-	1.841	1E-07	0.12	0.41	29	26

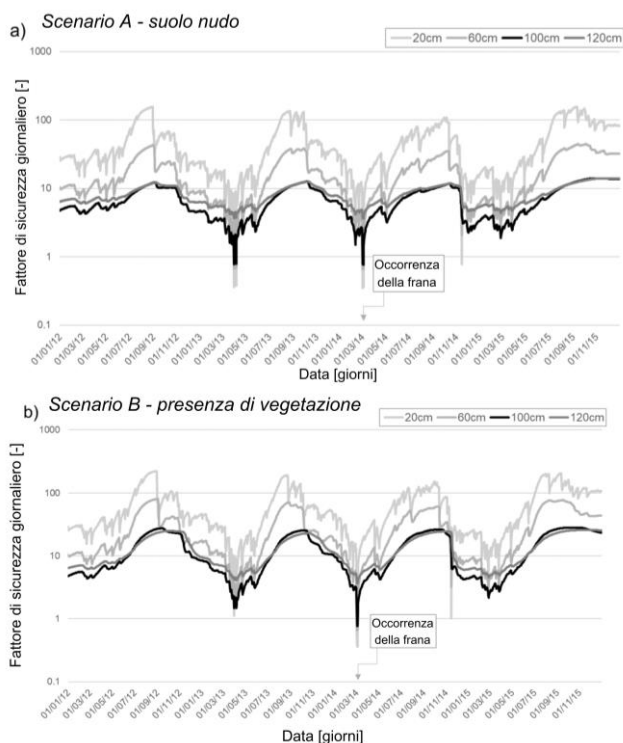


Fig.3 – Risultati per il calcolo del fattore di sicurezza giornaliero per due scenari distinti: A) suolo nudo; B) presenza di vegetazione.

Fig. 3 – Daily factor of safety for two scenarios: A) bare soil; B) vegetated slope.

I risultati per quanto riguarda contenuto idrico e potenziale idrico alle diverse profondità di cui si dispone di dati di campo, per brevità non sono mostrati, ma per lo scenario B sono nettamente più consistenti, soprattutto per le profondità maggiori. Dai risultati ottenuti per il fattore di sicurezza si evince che il modello simula correttamente la frana alla giusta profondità di 100 cm (linea nera di Figura 3) e nel giusto periodo, fornendo anche un'ipotesi sul giorno di innesco (1 Marzo 2014) che dai rilevamenti a terra non è stato possibile determinare.

## Conclusioni

In questo articolo è stata mostrata l'efficacia dell'utilizzo del modello agro-idrologico CRITERIA-1D come strumento di previsione per frane superficiali indotte da pioggia. I risultati ottenuti dal calcolo del fattore di sicurezza mostrano che la possibilità di modellare l'evoluzione nel tempo della vegetazione e dell'attività evapotraspirativa costituisce uno strumento valido per simulare correttamente l'insorgenza di frane nel tempo, riducendo anche il numero di falsi rilevati. Questo aspetto è di notevole importanza nella gestione territoriale, poiché indirizza meglio gli sforzi economici e decisionali. Il modello può essere utilizzato anche per testare diversi scenari agronomici, o soluzioni basate sulla natura (*Nature Based Solutions, NBSs*) sulla base di eventi climatici estremi occorsi o attesi.

## Ringraziamenti

Questa ricerca è stata cofinanziata dal Ministero per l'Università e la Ricerca (MUR) e il programma REACT-EU dell'Unione Europea.

Questo contributo viene presentato nell'ambito del Progetto ARCADIA (GA101112737) finanziato dal programma HORIZON Europe Innovation Actions

## Bibliografia

- Bittelli, M., Tomei, F., Pistocchi, A., Flury, M., Boll, J., Brooks, E. S., & Antolini, G. (2010). Development and testing of a physically based, three-dimensional model of surface and subsurface hydrology. *Advances in Water Resources*, 33(1), 106-122.
- Bordoni, M., Meisina, C., Valentino, R., Lu, N., Bittelli, M., & Chersich, S. (2015). Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: From the field monitoring to a simplified slope stability analysis. *Engineering Geology*, 193, 19-37.
- Conforti, M., & Ietto, F. (2021). Modeling shallow landslide susceptibility and assessment of the relative importance of predisposing factors, through a GIS-based statistical analysis. *Geosciences*, 11(8), 333.
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Ippisch, O., Vogel, H. J., & Bastian, P. (2006). Validity limits for the van Genuchten-Mualem model and implications for parameter estimation and numerical simulation. *Advances in water resources*, 29(12), 1780-1789.
- Li, Y., & Duan, W. (2023). Decoding vegetation's role in landslide susceptibility mapping: An integrated review of techniques and future directions. *Biogeotechnics*, 100056.
- Lu, N., & Godt, J. (2008). Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions. *Water resources research*, 44(11).
- Meneses, B. M., Pereira, S., & Reis, E. (2019). Effects of different land use and land cover data on the landslide susceptibility zonation of road networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(3), 471-487.
- Murgia, I., Giadrossich, F., Mao, Z., Cohen, D., Capra, G. F., & Schwarz, M. (2022). Modeling shallow landslides and root reinforcement: A review. *Ecological Engineering*, 181, 106671.



# INCREASE OF THE AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEM SENSITIVITY TO CLIMATE OSCILLATIONS OVER THE PAST SIXTY YEARS: A CASE STUDY FROM THE ABRUZZO REGION, CENTRAL ITALY

## *FLUTTUAZIONI CLIMATICHE E AUMENTO DELLA SENSIBILITÀ DEL SISTEMA PRODUTTIVO AGRICOLO NEGLI ULTIMI SESSANTA ANNI: UN CASE STUDY DALLA REGIONE ABRUZZO*

Vincenzo Guerriero <sup>1\*</sup>, Anna Rita Scorzini <sup>1</sup>, Bruno Di Lena <sup>2</sup>, Stefano Iulianella <sup>1</sup>, Mario Di Bacco <sup>1,3</sup>, Marco Tallini <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of L'Aquila, 67100 L'Aquila, Italy

<sup>2</sup> Abruzzo Region, Agriculture Directorate, Regional Agro-Meteorological Centre, Scerni, 66020 Chieti, Italy;

<sup>3</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, 50139 Florence, Italy

\* Corresponding author: vincenzo.guerriero@univaq.it

### Abstract

This study illustrates a detailed statistical analysis involving climatic conditions and crop yields over the time range 1952–2014, at a provincial scale in the Abruzzo Region, for wheat, olive, and grape:

- In the studied provinces, climate is moving from temperate towards temperate-arid, with an increase in drought intensity and persistence, starting from the 1980s;
- Statistics point out a rise in correlation between crop yields and climatic drought indices fluctuations, over the studied time range. Although the agricultural system shows a progressive yield growth, such increase should be interpreted as a sign of its rising sensitivity to climate stresses.

Crop production oscillations rise relevant sustainability issues, as (i) these highlight an inability of the productive system to maintain high performance even in unfavorable climatic conditions, (ii) yield fluctuations always represent a potential disturbing element of related market equilibria.

### Parole chiave

cambiamento climatico; resa agricola; trend climatico; agricoltura sostenibile; analisi di correlazione

### Keywords

climate change; crop yield; climatic trend; sustainability; correlation analysis

### Introduzione

Il cambiamento climatico solleva importanti questioni sulla sostenibilità, poiché esso presenta potenziali impatti economici e sociali di ampia portata, legati a fluttuazioni di rese agricole, volatilità di prezzi e costi di produzione di risorse alimentari anche essenziali, con conseguente impatto sulla loro disponibilità per la popolazione. In tale contesto, lo studio del clima locale assume una particolare importanza per una gestione ottimale del settore produttivo agricolo.

La regione mediterranea, inclusa l'Italia, si pone come un'area particolarmente suscettibile ai cambiamenti climatici attuali e futuri a causa della sua posizione di transizione tra il clima tropicale e quello temperato, insieme alla sua complessa orografia (e.g., Giorgi et al., 2008; Michaelides et al., 2018; Tuel & Eltahir 2020). In Italia centrale diversi studi hanno individuato trend climatici associati a aumenti significativi delle temperature medie e di quelle estreme (Scorzini & Leopardi, 2018; Aruffo & Di Carlo, 2019; Caporali et al., 2021; Curci et al., 2021). Tra i diversi indici usati come descrittori della condizione climatica (e.g., Plamer, 1965; McKee et al., 1993; Narasimhan & Srinivasan, 2005; Vicente-Serrano et al., 2010), lo Standardized Precipitation Index (SPI) e lo Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), sono tra quelli più frequentemente utilizzati (e.g., WMO 2016) e vari

studi hanno recentemente analizzato le possibili correlazioni di tali indici con anomalie nella resa delle colture in diverse regioni del mondo (e.g., Gunst et al., 2015; Potopova et al., 2016; Peña-Gallardo et al., 2018, 2019; Bezdán et al., 2019, Di Lena et al., 2018, 2022, e altri ancora). Nel presente studio conduciamo un'analisi di correlazione tra variabili climatiche e rese agricole a scala provinciale, con l'obiettivo di identificare le potenziali cause di variazioni nelle rese, attribuibili a variazioni climatiche (Guerriero et al., 2023). Ciò potrebbe fornire un quadro di conoscenze utile ai fini della pianificazione di adeguate misure di gestione del settore produttivo agricolo.

### Materiali e Metodi

L'analisi climatica qui illustrata è basata su serie temporali di dati tremo-pluviometrici mensili, forniti da Servizi Idrografici, registrati in 37 stazioni di rilevamento opportunamente selezionate e uniformemente distribuite sul territorio regionale, nel periodo che va dal 1952 al 2014.

I dati di produzione agricola utilizzati sono forniti dall'ISTAT e consistono di serie temporali, nel medesimo periodo, di valori annuali di superficie agricola impegnata e produzione totale, per le coltivazioni considerate. L'analisi climatica è stata condotta considerando separatamente la

serie trentennale nel periodo 1952-1982 e quella nel periodo 1983-2014. Per ogni trentennio, sono state condotte:

- Analisi del trend per temperature e precipitazioni giornaliere, tramite test non parametrico di Mann-Kendall,
- Classificazione climatica tramite climogrammi di Péguy,
- Calcolo degli indici SPI e SPEI a uno, tre e sei mesi, per diversi periodi dell'anno.

Analogamente al dato climatico, anche quello di resa agricola è stato trattato considerando separatamente i trend, nei due trentenni sopra menzionati. Le variazioni nel tempo delle rese delle colture dipendono da diversi fattori oltre al clima, come ad esempio nuove pratiche di gestione, nuove metodologie, meccanizzazione, etc. Questi hanno permesso un notevole incremento delle rese negli ultimi decenni. Al fine di rimuovere l'effetto di tali fattori non climatici e quindi isolare la variazione risultante dal clima, per le rese, sono stati calcolati i valori detrendizzati e standardizzati (e.g., Potopova et al. 2016). La detrendizzazione consiste nel considerare, per ogni valore annuale di resa, lo scarto (o residuo) rispetto al valore associato a una retta di regressione lineare (i.e., trend), definita nel proprio trentennio (1952-1982 o 1983-2014). Da tali residui si ottiene la Standardized

Yield Residual Series (SYRS) tramite la seguente variabile standardizzata:

$$SYRS = (r - m) / s,$$

dove  $r$  indica il residuo,  $m$  la media dei residui e  $s$  la loro deviazione standard. Si noti che l'uso della variabile standardizzata non implica l'assunzione di una particolare distribuzione probabilistica (e.g., Normale), ma rappresenta solo un metodo conveniente di adimensionalizzazione dei dati. Al fine di individuare le variazioni nel tempo della correlazione tra produzione agricola e indici climatici, è stata analizzata la correlazione statistica tra gli indici SPI e SPEI, calcolati su diversi mesi dell'anno, con le oscillazioni della resa agricola SYRS. La Fig. 1 illustra un esempio di analisi di correlazione con lo SPEI a un mese (SPEI1) di dicembre. Si evidenzia che l'obiettivo primario di questa analisi era quello di rilevare variazioni nei coefficienti di correlazione tra i due trentenni esaminati, piuttosto che valutarne esclusivamente l'entità. Pertanto, i valori di correlazione sono stati calcolati su diverse finestre temporali, ognuna con trent'anni di ampiezza, nel sessantennio considerato. Tali variazioni possono essere, quindi, interpretate come una misura della sensibilità del sistema produttivo agricolo agli stress climatici (Guerriero et al., 2023).

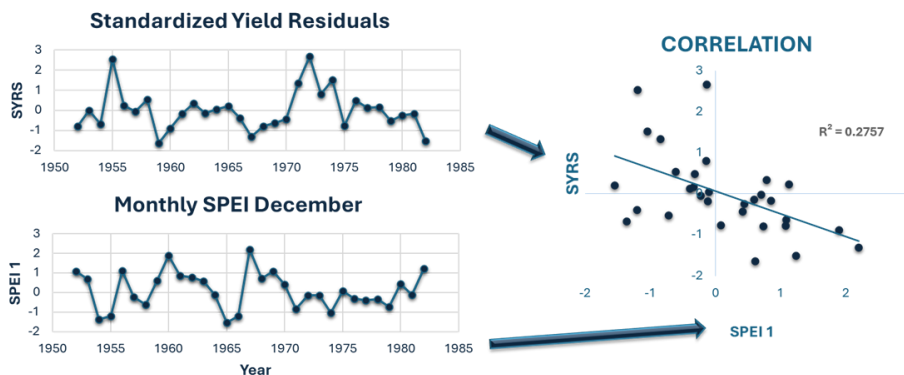


Fig.1 – Esempio di analisi di correlazione tra SYRS e SPEI a un mese (SPEI1) di dicembre, per il caso del grano coltivato in provincia di Teramo, nel primo trentennio (1952-1982).

Fig.1 – Example of correlation analysis between SYRS and SPEI one month (SPEI1), for wheat grown in Teramo province, in the time range 1952-1982.

## Risultati e Discussione

L'analisi climatica ha evidenziato che nella regione esaminata le temperature massime e minime giornaliere mostrano, nel secondo trentennio, un trend in aumento lento ma statisticamente significativo (significance > 10%, secondo il test di Mann-Kendall). Inoltre, il tipo di clima mostra un progressivo shift da temperato verso temperato-arido. La Fig. 2 illustra un esempio di trend di temperature giornaliere e di classificazione climatica secondo Péguy, e relativo shift, per la provincia dell'Aquila.

L'analisi di correlazione tra fluttuazioni di resa agricola e di indici climatici ha evidenziato un progressivo incremento del coefficiente di Pearson (in valore assoluto) nel tempo. La Fig. 3 illustra i risultati dello studio relativi al grano, coltivato

nella provincia di Pescara, e all'uva, in provincia di Chieti. In entrambi i casi, la correlazione è stata calcolata su cinque finestre temporali successive, con ampiezza di 30 anni. Le celle di colore chiaro (rosse o blu) denotano una correlazione probabilmente esistente, mentre quelle in rosso o blu scuro, una correlazione forte ed estremamente probabile. Si noti che la correlazione positiva o negativa non va confusa come indicativa di un impatto favorevole o meno del clima; una correlazione positiva (celle blu) sta ad indicare che la siccità è fattore limitante per la resa, mentre per le celle rosse, lo è un clima eccessivamente umido.

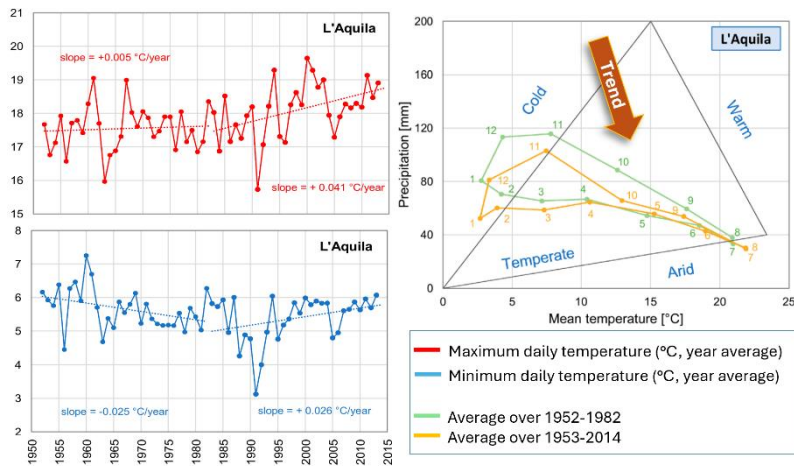


Fig.2 – Serie temporali delle temperature massime e minime giornaliere e classificazione climatica secondo Péguy, nei due trentenni considerati, per la provincia dell'Aquila. Le linee tratteggiate indicano i trend per ogni trentennio (da Guerriero et al., 2023, modificato).

Fig.2 – Time series of maximum and minimum daily temperatures and Péguy climate classification, in the two time ranges 1952-1982 and 1983-2014, for L'Aquila province. Dotted lines denote trendlines over thirty-year time ranges (from Guerriero et al., 2023, modified).

Va ricordato che lo scopo principale di questo studio è l'identificazione di variazioni sistematiche, nel tempo, della correlazione tra oscillazioni di produzione agricola e di indici climatici. In altre parole, non siamo interessati a individuare una correlazione positiva o negativa significativa per un indice specifico, ma piuttosto, a verificare se vi sia una variazione sistematica di valori di correlazione

statisticamente significativi, tra due distinti periodi di riferimento (e.g., tra il trentennio 1952-1982 e quello 1959-1989, e così via. Fig. 3). In termini pratici, ciò è evidenziato dal fatto che in Figg. 3a e 3b compaiono più celle colorate (in rosso o blu), e/o più celle in rosso e blu scuro, in una finestra temporale rispetto a quelle che la precedono.

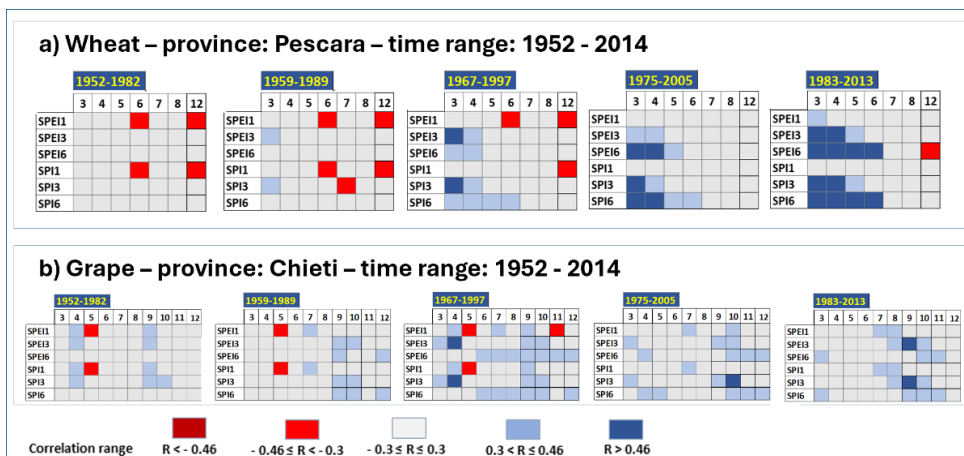


Fig.3 – Correlazione tra oscillazioni in resa agricola (SYRS) e indici SPI e SPEI, per grano (a) e uva (b), per le quattro province studiate e per cinque trentenni successivi. I valori (assoluti) di soglia di correlazione di 0,3 e 0,46 sono associati a una significatività statistica del 10% e dell'1%, rispettivamente. Un aumento del numero di celle colorate, e soprattutto di quelle rosso o blu scuro, denota una crescente correlazione tra oscillazioni in resa e quelle climatiche.

Fig.3 – Identified correlation coefficients between detrended crop yield (SYRS) and relevant SPI and SPEI indices for (a) wheat and (b) grape for the four studied provinces and for five sequential time ranges. The correlation thresholds (absolute) values of 0.3 and 0.46 are associated to statistical significance of 10% and 1%, respectively. An increase in the number of colored cells, and mainly of dark red or blue ones, denotes a growing correlation between crop and climatic oscillations.

Tale variazione sistematica dovrebbe essere interpretata come un'indicazione della resilienza del sistema di produzione agricola alle fluttuazioni climatiche (in questo caso, una maggiore sensibilità al clima). È utile sottolineare che, sebbene il sistema di produzione agricola considerato mostri una progressiva consistente crescita delle rese nel tempo, un aumento della frequenza e/o ampiezza delle oscillazioni di resa evidenzia, da un lato, un'incapacità del sistema stesso a mantenere alte prestazioni anche in condizioni climatiche sfavorevoli. Dall'altro lato, le fluttuazioni di resa agricola (anche quelle positive) rappresentano sempre un potenziale elemento di disturbo dei complicati equilibri di mercato esistenti tra i vari soggetti economici coinvolti, quali produttori agricoli, distributori a varie scale di dettaglio, investitori e speculatori, consumatori finali.

L'incremento sistematico di correlazione osservato merita sicuramente attenzione, poiché esso potrebbe sollevare importanti questioni di sostenibilità. Oscillazioni rilevanti di produzione agricola potrebbero causare temporanei aumenti dei prezzi al consumatore, compromettendo l'accesso da parte della popolazione a beni alimentari anche essenziali. Altri effetti indesiderati potrebbero essere, a titolo d'esempio, un incremento dei costi di produzione non compensato da variazione di prezzi finali, che metterebbe in sofferenza il settore produttivo, oppure fluttuazioni incontrollate delle quotazioni di prodotti agroalimentari sui mercati locali e/o internazionali.

## Conclusioni

Questa nota illustra i risultati di un'analisi statistica che coinvolge variabili climatiche e le rese agricole di grano, oliva e uva, nell'intervallo temporale 1952–2014 e su scala provinciale, nella Regione Abruzzo, come segue:

- Nelle province studiate, il clima sta passando da temperato a temperato-arido, con un aumento dell'intensità e della persistenza della siccità, a partire dagli anni '80;
- Le statistiche evidenziano un aumento della correlazione tra fluttuazioni nelle rese agricole e degli indici climatici, nell'intervallo di tempo studiato.

Sebbene il sistema produttivo agricolo mostri rese progressivamente crescenti, tale aumento di correlazione dovrebbe essere interpretato come un segno della sua crescente sensibilità agli stress climatici. Le conseguenti oscillazioni della produzione agricola pongono rilevanti questioni di sostenibilità, poiché (i) evidenziano l'incapacità del sistema produttivo di mantenere elevate prestazioni anche in condizioni climatiche sfavorevoli, (ii) le fluttuazioni di resa rappresentano sempre un potenziale elemento di disturbo dei relativi equilibri di mercato.

## Ringraziamenti

Questa ricerca è stata condotta nell'ambito del progetto "SICURA—CASA INTELLIGENTE DELLE

TECNOLOGIE PER LA SICUREZZA", finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) — Grant Id: C19C20000520004

## Bibliografia

- Aruffo, E.; Di Carlo, P. (2019). Homogenization of instrumental time series of air temperature in Central Italy (1930-2015). *Clim. Res.* 77, 193–204. <https://doi.org/10.3354/cr01552>.
- Bezdan, J.; Bezdan, A.; Blagojević, B.; Mesaroš, M.; Pejić, B.; Vranešević, M.; Pavić, D.; Nikolić-Đorić, E. (2019). SPEI-Based Approach to Agricultural Drought Monitoring in Vojvodina Region. *Water*, 11, 1481. <https://doi.org/10.3390/w11071481>.
- Caporali, E.; Lompi, M.; Pacetti, T.; Chiarello, V.; Faticchi, S. (2021). A review of studies on observed precipitation trends in Italy. *Int. J. Climatol.* 41, E1–E25. <https://doi.org/10.1002/joc.6741>.
- 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 region (Central Italy), 1930–2019. *Int. J. Clim.*, 41, 4414–4436. <https://doi.org/10.1002/joc.7081>.
- 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>.
- Di Lena, B.; Curci, G.; Vergni, L.; Farinelli, D. (2022). Climatic Suitability of Different Areas in Abruzzo, Central Italy, for the Cultivation of Hazelnut. *Horticulturae*, 8, 580. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070580>.
- Fioravanti, G.; Piervitali, E.; Desiato, F. (2019). A new homogenized daily data set for temperature variability assessment in Italy. *Int. J. Clim.*, 39, 5635–5654. <https://doi.org/10.1002/joc.6177>.
- Giorgi, F.; Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Glob. Planet. Change*, 63, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>.
- Guerriero, V.; Scorzini, A.R.; Di Lena, B.; Iulianella, S.; Di Bacco, M.; Tallini, M. (2023). Impact of Climate Change on Crop Yields: Insights from the Abruzzo Region, Central Italy. *Sustainability*, 15, 19, 14235. <https://doi.org/10.3390/su151914235>.
- Gunst, L.; Rego, F.M.C.C.; Dias, S.M.A.; Bifulco, C.; Stagge, J.H.; Rocha, M.S.; Van Lanen, H.A.J. (2015). Links between Meteorological Drought Indices and Yields (1979–2009) of the Main European Crops; Technical Report No. 36; DROUGHT-R&SPI Project; Wageningen, The Netherlands
- McKee, T.B.; Doesken, N.J.; Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, USA, 17–22; Volume 17, No. 22, pp. 179–183.

- Michaelides, S.; Karacostas, T.; Sánchez, J.L.; Retalis, A.; Pytharoulis, I.; Homar, V.; Romero, R.; Zanis, P.; Giannakopoulos, C.; Bühl, J.; et al. (2018). Reviews and perspectives of high impact atmospheric processes in the Mediterranean. *Atmospheric Res.*, 208, 4–44. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.022>.
- Narasimhan, B.; Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agric. For. Meteorol.*, 133, 69–88. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.012>.
- Palmer, W.C. *Meteorological Drought*; US Department of Commerce, Weather Bureau: Washington, DC, USA, 1965; Volume 30.
- Peña-Gallardo, M.; Vicente-Serrano, S.M.; Domínguez-Castro, F.; Beguería, S. (2019). The impact of drought on the productivity of two rainfed crops in Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 1215–1234. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1215-2019>.
- Peña-Gallardo, M.; Vicente-Serrano, S.M.; Domínguez-Castro, F.; Quiring, S.; Svoboda, M.; Beguería, S.; Hannaford, J. (2018). Effectiveness of drought indices in identifying impacts on major crops across the USA. *Clim. Res.* 2018, 75, 221–240. <https://doi.org/10.3354/cr01519>.
- Agric. For. Meteorol.*, 249, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.024>.
- Potopová, V.; Boroneanț, C.; Boincean, B.; Soukup, J. (2016). Impact of agricultural drought on main crop yields in the Republic of Moldova. *Int. J. Clim.*, 36, 2063–2082. <https://doi.org/10.1002/joc.4481>.
- Scorzini, A.R.; Leopardi, M. (2018). Precipitation and temperature trends over central Italy (Abruzzo Region): 1951–2012. *Theor. Appl. Clim.*, 135, 959–977. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2427-3>.
- Tuel, A.; Eltahir, E.A. (2020). Why is the Mediterranean a climate change hot spot? *J. Clim.*, 33, 5829–5843.
- Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S.; López-Moreno, J.I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.*, 23, 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2909.1>.
- World Meteorological Organization (WMO); Global Water Partnership (GWP). *Handbook of Drought Indicators and Indices*; Svoboda, M., Fuchs, B.A., Eds.; Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2; World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP): Geneva, Switzerland, 2016. ISBN 978-92-63-11173-9.



# MULTICRITERIA ANALYSES FOR THE PRODUCTION OF VITICULTURAL SUITABILITY MAPS OF SARDINIA

## ANALISI MULTICRITERIALI PER LA PRODUZIONE DELLE CARTE DI VOCAZIONALITÀ VITICOLA DELLA SARDEGNA

Ana Fernandes de Oliveira<sup>1</sup>, Simone Cossu<sup>1</sup>, Alessandro Marrone<sup>2</sup>, Rita Puddu<sup>2</sup>, Stefania Fanni<sup>2</sup>, Michele Fiori<sup>3</sup>, Daniela Satta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AGRIS Sardegna, Servizio Ricerca nell'Arboricoltura, Via De Martini, 244 – 07100 Sassari

<sup>2</sup> AGRIS Sardegna, Servizio Ricerca studi ambientali, difesa delle colture e qualità delle produzioni, Viale Trieste, 111 – 09123 Cagliari

<sup>3</sup> ARPAS Sardegna, Dipartimento Meteorologico - Servizio Meteorologico, Agrometeorologico ed Ecosistemi, Viale Porto Torres, 119 – 07100 Sassari

\* aoliveira@agrisricerca.it

### Abstract

In this study, an integrated analysis of the main agrometeorological and pedological factors for viticultural suitability in Sardinia, Italy, was carried out. The multicriteria suitability model included indexing and classifying bioclimatic factors (Huglin, dryness, and cool nights), based on high-resolution (40 m) climate maps of current climatology (1981-2010), and of soil's stationary, physical-structural, and chemical factors, using the soil and salinity maps, the digital terrain model, and the Corine Land Cover (2018) as input datasets. The categorization in composite bioclimatic and pedological indices allowed for representing viticultural suitability and providing an overall picture of Sardinia's viticultural agroclimatic resources and limitations. Finally, homogeneous suitability zones were delimited for the Nurra, Gallura, Jerzu – Cardedu – Bari Sardo and Parteolla – Settimo S. Pietro study areas through clustering techniques, applied to the multicriteria viticultural maps.

### Parole chiave

Zonazione viticola, indicizzazione bioclimatica; attitudine pedologica, mappe multicriteriali; aree cluster

### Keywords

Viticultural zoning; bioclimatic indexing; soil suitability; multicriteria maps; cluster areas

### Introduzione

La valutazione dell'attitudine agricola di un territorio per mezzo di metodi di *land suitability evaluation* (FAO, 1981) viene utilizzata per determinarne l'utilizzo più idoneo, per la pianificazione e la gestione efficiente e sostenibile delle risorse, tenendo conto dei fattori pedoclimatici e socio-economici locali e classificando l'attitudine alla coltivazione in funzione delle esigenze della specie, delle limitazioni ambientali nel contesto socio-culturale locale (Stanchi et al., 2013). Nelle regioni con tradizione viticola, l'approccio alla pianificazione culturale è associato alla delimitazione geografica degli areali vitivinicoli (IGT, DOC o DOCG) e al concetto di terroir (Vaudour et al., 2015). Gli attuali sistemi GIS e di telerilevamento mettono oggi a disposizione una enorme quantità di dati utili alla caratterizzazione multicriteriale (Bollati et al., 2015) del territorio e del clima, e consentono di incrementare il dettaglio e l'accuratezza dei modelli di valutazione della vocazionalità culturale a differenti scale spazio-temporali (Rossi et al., 2022). Queste tecnologie sono utilizzate per delimitare l'attitudine viticola tramite criteri precisi di attitudine in differenti macroaree del mondo viticolo (Del Rio et al., 2021; Malheiro et al., 2010). Tuttavia, la resilienza dei sistemi viticoli, la produttività e la qualità delle produzioni, non sono immutabili ma bensì sono modellate dal cambiamento climatico, del *landscape* e dell'uso del suolo (Fonseca et al., 2024). Per affrontare al meglio le sfide del *global change* nella viticoltura e supportare la pianificazione e le decisioni dei viticoltori, si rende sempre più necessario caratterizzare gli areali in

funzione delle esigenze della specie o varietà e delle risorse che il territorio offre e che maggiormente influenzano la crescita, lo sviluppo e la perennità della vite (Costa et al., 2019; Fraga et al., 2020). Il principale obiettivo di questo lavoro è quello di caratterizzare la vocazionalità viticola della Sardegna e differenziare le specificità pedo-climatiche di alcune delle sue principali aree vitivinicole.

### Materiali e Metodi

Il modello di vocazionalità creato fornisce differenti livelli informativi e si basa sulle carte di attitudine bioclimatica e pedologica per la coltivazione della vite in Sardegna (<http://gisdev.crs4.it/sardinialands2023/documents/>). Nella scelta degli indici agrometeorologici e dei fattori pedologici più efficaci per caratterizzare disponibilità e limitazioni del territorio (Bucelli & Costantini, 2006), sono state rispettate le premesse delle analisi climatologiche e dei modelli di *Land Suitability Evaluation* (FAO, 1981). Gli indici selezionati sono stati testati nel contesto attuale, classificando tramite "*matching tables*" le disponibilità climatiche e pedologiche in funzione dei requisiti della specie. La climatologia attuale (periodo 1981-2010), derivata dalla rete di stazione meteorologiche ARPAS, è stata impiegata nell'analisi. Sono stati calcolati i valori mensili e annuali di temperature e di precipitazioni, e tramite tecniche di interpolazione sono state realizzate mappe climatiche e di indici bioclimatici ad alta risoluzione (40 m).

Gli indici individuati indicano, con un'elevata precisione, l'influenza del clima sui decorsi fenologici, sull'efficienza fisiologica e sulla produttività della vite (Malheiro et al., 2010; Hall & Jones, 2010; Costa et al., 2019). Pertanto, sono in grado di evidenziare la frazione di variabilità che impatta in modo significativo la crescita vegetativa e la produttività di queste specie arboree. Il tempo termico è stato quantificato con l'indice eliotermico di Huglin, HI (Huglin, 1878). Le disponibilità idriche, durante il ciclo vegetativo, sono state descritte tramite l'indice di siccità (*dryness index*) di Riou, DI (Riou et al., 1994). Nella stima, l'evapotraspirazione potenziale è stata calcolata su base mensile seguendo il metodo di Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985). Per ultimo, si è tenuto conto dell'indice di freschezza delle notti (*cool night index*, CN), proposto da Tonietto & Carbonne (2004) per fornire una misura del potenziale di maturazione dell'uva. La definizione dei requisiti dell'uso viticolo del suolo e il rilevamento delle qualità che il territorio offre per soddisfare tali requisiti ha seguito il metodo della *Land Suitability Evaluation* (FAO, 1976), utilizzando come fonti di informazione geografica la carta dei suoli della Sardegna in scala 1:250.000 (Aru et al., 1991), la carta della distribuzione dei suoli a differente grado di salinità (Puddu et al., 2008), il *digital elevation model* della Regione Autonoma della Sardegna e la *Corine Land Cover 2018*. La figura 1 presenta il flussogramma metodologico e i dataset utilizzati. La categorizzazione di ciascun indice in un numero ridotto di classi (i.e. *range* degli indici bioclimatici e di attitudine pedologica) ha permesso di discriminare la complessità dei bioclimi e delle unità di suolo, rappresentate sulle mappe dei singoli indici e/o tramite l'aggregazione in un indice bioclimatico composito e tre indici pedologici compositi – stazionale, fisico-strutturale e chimico. Successivamente sono state analizzate nel dettaglio quattro macroaree viticole distinte: Gallura, Nurra, Parteolla – Settimo S. Pietro e Jerzu – Cardedu – Barì Sardo, e tramite tecniche di clustering in ambiente GIS (*unsupervised k-means algorithm*), sono state identificate zone di attitudine viticola omogenea (ZO) all'interno delle aree ad uso agricolo (SAU), individuate condizioni ottimali per la viticoltura e condizioni per cui la coltivazione può essere soggetta a rischio bioclimatico e/o pedologico.

## Risultati e Discussione

Attualmente, in Sardegna, è possibile individuare 40 classi bioclimatiche vitivinicole composite (Fernandes de Oliveira et al., 2022). Molte aree mostrano decorsi termici tipici delle zone temperate-calde (Fig. 1) e soltanto l'1% dell'isola presenta condizioni troppo fredde per la viticoltura. Il fabbisogno irriguo è elevato per 57% del territorio, a causa di limitate precipitazioni durante il ciclo vegetativo della vite. Il 41% del territorio è classificato come moderatamente secco e in gran parte delle macroaree della Gallura, della Nurra e del Parteolla predominano condizioni di deficit idrico durante la maturazione. Le temperature notturne a maturazione variano da temperate a calde e gli areali con maggiore incidenza di notti fresche si trovano nella Gallura e a Jerzu. Una ridotta percentuale della regione (ca. 5%),

sulle coste centro-meridionali, registra temperature notturne estive capaci di limitare parzialmente il potenziale aromatico e/o fenologico delle uve (Malheiro et al., 2010). I suoli della Sardegna presentano elevata o media attitudine alla coltivazione della vite per fattori stazionali (i.e. quota, pendenza, quota, esposizione, erosione e rocciosità), rispettivamente, in ca. il 15% e il 35% delle SAU (Fig. 1). Tuttavia, ca. 38% delle aree sono da considerarsi di bassa e/o assente attitudine per fattori stazionali. L'attitudine per fattori fisico-strutturali (i.e. profondità utile alle radici, orizzonte calcico e petrocalcico; tessitura del topsoil e drenaggio interno) varia fra classi da alta a bassa (29%), a media (17%) o bassa (32%) e, per quanto riguarda i fattori chimici del suolo (i.e. reazione del topsoil, salinità del topsoil e calcare totale), l'attitudine è alta o media nella maggior parte delle SAU (66%) e varia, per un minore percentuale di SAU, da media a media – bassa (23%). La classificazione non ha tenuto conto di fattori di coltivabilità come l'acqua utilizzabile del suolo e la profondità della falda acquifera, per i quali l'interpolazione sull'intero territorio ad ampia scala richiede l'utilizzo di modelli di simulazione idrogeologica e del flusso di falda, la creazione di una fitta rete di osservazione e la validazione, con la raccolta di dati in pieno campo, su suolo e sottosuolo (Condon et al., 2021). Ciononostante, lo studio di vocazionalità ha fornito un quadro dettagliato e completo dell'attitudine viticola degli areali agricoli della Sardegna. L'analisi dei cluster omogenei ha permesso di individuare e descrivere aree molto differenti e quantificare gli aspetti più discriminanti della variabilità delle risorse ambientali per la viticoltura (Tabelle 1 e 2). Nella Gallura e nella Nurra (Fig. 2) sono state individuate 4 ZO, mentre nel Parteolla – Settimo S. Pietro e a Jerzu – Cardedu – Barì Sardo (Fig. 3) ne sono state identificate 2. La tabella 1 descrive le classi bioclimatiche e pedologiche dominanti nelle ZO e la tabella 2 illustra la distribuzione di classi di suscettibilità a fattori di rischio pedoclimatico. Nella Gallura predomina la ZO 4, da temperata a calda, da secca a moderatamente secca e con notti temperate e, in alcuni casi, moderatamente calde a maturazione (Tab. 2). Il suolo presenta elevata vocazionalità chimica e fisico-strutturale ed è mediamente vocato per fattori stazionali. Nella ZO 3 (ca. l'11% delle SAU di questa regione) l'attitudine chimica e fisico-strutturale del suolo è da media a bassa e la suscettibilità pedoclimatica è correlata a fattori stazionali. Nella Nurra ca. il 76% delle SAU sono temperate calde e molto secche durante il ciclo vegetativo della vite, con notti temperate e talvolta moderatamente calde a maturazione. La vocazionalità dei suoli nella ZO 1 varia da alta a media per fattori chimici ed è media per quelli stazionali. Tuttavia, molte aree presentano da media a bassa attitudine fisico-strutturale e questo è un fattore di rischio da non trascurare nelle scelte d'impianto, poiché si tratta di una regione con importante fabbisogno irriguo nelle fasi di crescita e maturazione dei frutti. La ZO 3 della Nurra è caratterizzata da elevate disponibilità termiche per i decorsi fenologici.

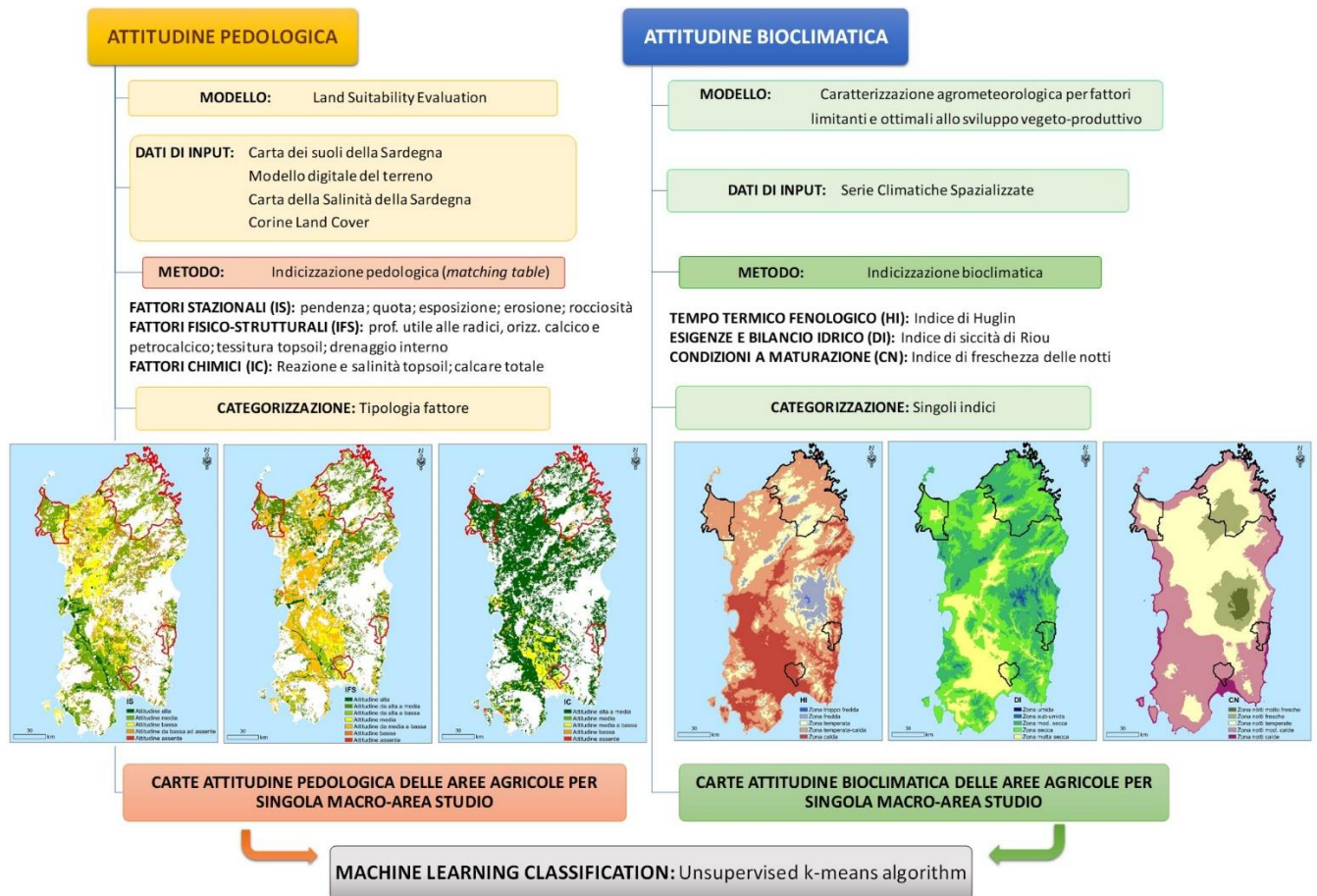


Fig.1 - Flussogramma metodologico utilizzato per la valutazione della vocazionalità pedoclimatica delle aree agricole per la coltivazione della vite in Sardegna.

Fig.1 – Methodological flowchart used for the assessment of climate and soil suitability of agricultural areas for viticulture in Sardinia.

Areale ZO (%SAU)	Attitudini bioclimatica			Attitudini pedologica		
	Indici	Classe	(%)	Indici	Classe	(%)
<b>Gallura</b> ZO 4 (56)	HI	Temperata	23	IC	Alta a media	99
		Temperata calda	77	IFS	Alta a media	99
	DI	Molto secca	62	IS	Media	96
		Mod. secca	38			
	CN	Notti mod. calde	22			
		Notti temperate	65			
<b>Nurra</b> ZO 3 (76)	HI	Temperata calda	100	IC	Alta a media	89
	DI	Molto secca	76	IFS	Media a bassa	88
	CN	Notti temperate	61	IS	Media a bassa	76
		Notti mod. calde	39			
<b>Jerzu Cardedu Bari Sardo</b> ZO 1 (69)	HI	Calda	63	IC	Alta a media	100
		Temperata calda	33	IFS	Media	45
	DI	Mod. secca	51	IS	Media a bassa	59
		Molto secca	49			
	CN	Notti mod. calde	49			
<b>Parteolla S.S. Pietro</b> ZO 1 (70)	HI	Calda	98	IC	Media	57
	DI	Mod. secca	30	IFS	Media a bassa	74
		Molto secca	70		Alta	13
	CN	Notti mod. calde	82		Alta a media	13
		Notti calde	18	IS	Alta a media	13
				Media	77	

Tab.1 – Zone omogenee predominanti sulla superficie agricola (%SAU) delle 4 aree studio e principali classi di attitudini bioclimatica e pedologia.

Tab.1 – Homogeneous zones predominant in the agricultural area (%SAU) of the four study areas and main bioclimatic and pedological suitability classes.

Tab.2 – Zone omogenee con maggior suscettibilità in Gallura, Nurra e Parteolla – Settimo S. Pietro e principali classi di altitudine bioclimatica e pedologia.

Tab.2 – Homogeneous zones with increased susceptibility in Gallura, Nurra and Parteolla – Settimo S. Pietro and main bioclimatic and pedological suitability classes.

Areale ZO (%SAU)	Attitudini bioclimatica		Attitudini pedologica		
	Indici	Classe (%)	Indici	Classe (%)	
<b>Gallura</b> ZO 3 (11)	HI	Temperata	58	IC Media a bassa	96
		Temperata calda	41	IFS Media a bassa	73
	DI	Molto secca	25	Bassa ad assente	16
		Mod. secca	74	IS Bassa ad assente	95
	CN	Notti fresche	31		
		Notti temperate	55		
<b>Nurra</b> ZO 4 (14)	HI	Temperata calda	97	IC Alta a media	100
	DI	Molto secca	62	IFS Alta a media	96
		Mod. secca	28	IS Bassa	64
	CN	Notti temperate	65	Bassa ad assente	21
		Notti mod. calde	35	IC Alta a media	100
<b>Parteolla S.S. Pietro</b> ZO 2 (30)	HI	Calda	97	IC Alta a media	99
	DI	Molto secca	82	IFS Bassa	99
	CN	Notti mod. calde	97	IS Alta a media	76
			Bassa	18	
			Bassa ad assente	6	

Le condizioni di siccità e notti da temperate a moderatamente calde a maturazione possono limitare la crescita e la maturazione dei frutti. In questo caso però, i suoli sono fertili e con buone condizioni fisico-strutturali e chimiche, e quindi in grado di garantire un buon sviluppo radicale, la riserva idrica necessaria per la gran parte del ciclo vegetativo e consentire buona efficienza irrigua. Negli areali più meridionali di Jerzu, Cardedu – Bari Sardo e Parteolla – S. S. Pietro il bioclima è da caldo a temperato-caldo e da moderatamente secco a molto secco e l'attitudine chimica dei suoli è alta nei primi e media a bassa nei secondi. I fattori limitanti riguardano la siccità estiva e l'occorrenza di temperature elevate a maturazione, la cui frequenza sembra essersi intensificata negli anni più recenti, con ondate di calore estivo prolungate. Per far fronte a questi eventi e contrastare l'effetto combinato di stress idrico e termico sui sistemi viticoli più esposti, è fondamentale ottimizzare i sistemi di irrigazione e adottare strategie irrigue di precisione nei periodi di carenza idrica, quando questi coincidono con fenofasi chiave del vigneto (Ojeda, 2007). La scelta di cultivar e portinnesti tolleranti a condizioni di stress abiotico è basilare per garantire resa e qualità nell'hotspot climatico del Mediterraneo (Van Leeuwen et al., 2024).

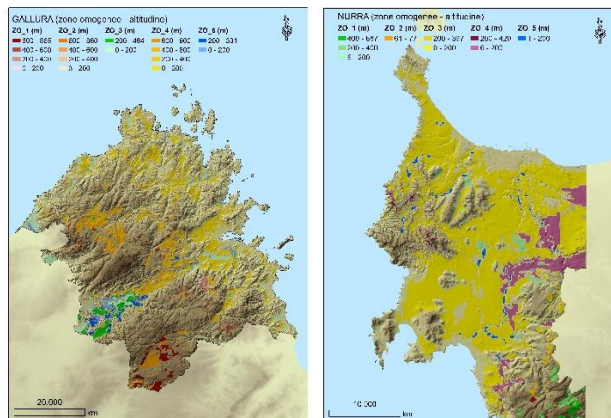


Fig.2 - Mappa delle zone omogenee per la viticoltura in Gallura e Nurra, distribuite su classi di altitudine.

Fig.2 - Map of homogeneous zones for viticulture in Gallura and Nurra macro-areas, distributed over altitude classes.

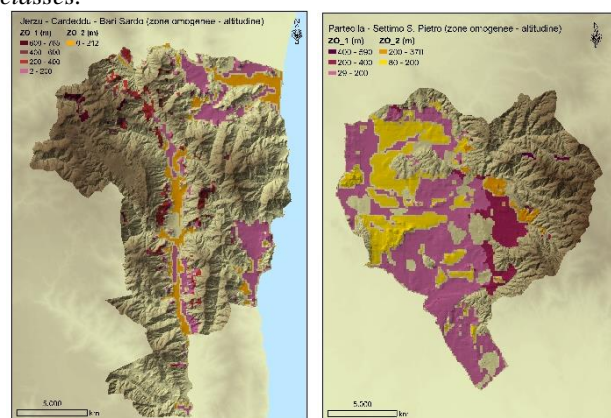


Fig.3 - Mappa delle zone omogenee per la viticoltura in Jerzu – Cardedu – Bari Sardo e Parteolla – Settimo S. Pietro, distribuite su classi di altitudine.

Fig.3 - Map of homogeneous zones for viticulture in Jerzu –Cardedu – Bari Sardo and Parteolla – Settimo S. Pietro macro-areas, distributed over altitude classes.

La resilienza vitivinicola di questi areali è fortemente legata alla plasticità di adattamento delle varietà tradizionali. Lo spostamento degli appezzamenti vitati su zone collinari di maggior altitudini, rispetto alla coltivazione in pianura, è opportuno soprattutto quando le cultivar sono più sensibili a stress idrico e da calore (Fernandes de Oliveira et al., 2024).

Le figure 2 e 3 mostrano la delimitazione delle ZO e la loro distribuzione su range di altitudine. Di fatto, gli effetti della latitudine, dell'altitudine e della distanza dal mare sono alla base della discriminazione bioclimatica degli areali viticoli all'interno della regione, infatti le principali variazioni sono governate da questi fattori (Hall & Jones, 2010). Perciò, la rappresentazione su classi di altitudine dà una indicazione sulla variabilità all'interno delle ZO e sulle potenzialità di espansione dei vigneti su differenti quote o esposizioni.



## Conclusioni

Il metodo di valutazione della vocazionalità pedoclimatica utilizzato in questo lavoro consente di descrivere, in maniera oggettiva, le differenze attitudinali all'interno delle aree studio della Sardegna. Gli indici categorizzati rispecchiano, indirettamente, le esigenze delle cultivar e il loro adattamento al territorio, dettati da specifiche caratteristiche fisiologiche e fenologiche. Il modello è in grado di riflettere suscettibilità degli areali viticoli a fattori pedoclimatici limitanti. Allo stesso modo, sarà possibile prevedere cambiamenti di attitudine colturale dovuti a differenti scenari climatici o all'aumento della severità dei fattori di stress abiotico, quantificandone le ricadute sulla vocazionalità futura. Le analisi di omogeneità spaziale consentono di ponderare il rischio effettivo di cambiamento di tipicità a causa di specifici fattori climatici in evoluzione.

## Ringraziamenti

La ricerca è stata condotta nell'ambito del progetto ZONAS 2, finanziato dalla L.R. 07 agosto 2007: "Promozione della Ricerca Scientifica e dell'innovazione tecnologica in Sardegna" della Regione Autonoma della Sardegna.

## Bibliografia

- Aru, A., Baldaccini, P., Vacca, A., Delogu, G., Dessena, M.A., Madrau, S., Melis, R.T., Vacca, S. (1991). Nota illustrativa alla Carta dei suoli della Sardegna. Università di Cagliari, Ass. Regionale Program. Bilancio e Assetto del Territorio, 83 pp.
- Bollati, A., Molin, P., Cifelli, F., Petrangeli, A. B., Parotto, M., Mattei, M. (2015). An integrated methodology of viticultural zoning to evaluate terrains suitable for viticulture: the test area of Cesanese DOC (Latium, central Italy). *J. Wine Res.*, 26, 1-17.
- Bucelli, P., Costantini, E.A.C., 2006. Vite da vino e zonazioni vitivinicole. In: Costantini, E.A.C. (Ed.), *Metodi di valutazione dei suoli e delle terre*, Cantagalli, Siena, pp. 922.
- Condon, L.E., Kollet, S., Bierkens, M.F.P., Fogg, G.E., Maxwell, R.M., Hill, M.C. et al. (2021). Global groundwater modeling and monitoring: Opportunities and challenges. *Water Resources Research*, 57, e2020WR029500
- Costa, R., Fraga, H., Fonseca, A., García de Cortázar-Atauri, I., Val, M.C., Carlos, C., Reis S., Santos J.A. (2019). Grapevine phenology of cv. Touriga Franca and Touriga Nacional in the Douro Wine Region: modelling and climate change projections. *Agronomy* 9, 210.
- Del Río, S., Álvarez-Esteban, R., Alonso-Redondo, R., Hidalgo, C., Penas, A. (2021). A new integrated methodology for characterizing and assessing suitable areas for viticulture: A case study in Northwest Spain. *Eur. J. Agron.* 131, 126391.
- Fernandes de Oliveira, A., Piga, G.K., Najoui, S., Becca, G., Marceddu, S. Rigoldi, M.P. Satta, D., Simonetta Bagella, S., Nieddu, G. (2024). UV light and adaptive divergence of leaf physiology, anatomy and ultrastructure drive heat stress tolerance in genetically distant grapevines. *Front. Plant Sci.* (accepted).
- Fonseca, A., Cruz, J., Fraga, H., Andrade, C., Valente, J., Alves, F., Neto, A.C., Flores, R., Santos, J.A. (2024). Vineyard Microclimatic Zoning as a Tool to Promote Sustainable Viticulture under Climate Change. *Sustainability* 16, 3477.
- Food and Agriculture Organisation, FAO (1981). *Soils Bulletin 32. Soil resources development and conservation service land and water development division*. Rome.
- Fraga, H., Molitor, D., Leolini, L., Santos, J.A. (2020). What is the impact of heatwaves on European viticulture? a modelling assessment. *Appl. Sci.*, 10, 3030.
- Hall A. & Jones, G. V. (2010). Spatial analysis of climate in winegrape-growing regions in Australia. *Aust. J. Grape Wine Res.* 16(3), 389-404.
- Hargreaves, G.H. & Samani, Z.A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1, 96-99.
- Huglin P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *CR Acad Agr* 64,1117-1126
- Jones, G.V., White, M.A., Cooper, O.R., Storchmann, K. (2005). Climate change and global wine quality. *Clim. Change* 73, 319-343.
- Malheiro A.C., Santos J.A., Fraga H., Pinto J.G. (2010). Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Clim Res.* 43(3),163-177.
- Ojeda, H (2007). Irrigation qualitative de precisión de la vigne. *PAV*, 7, 133-141.
- Puddu R., Fanni S., Loddo S., Manca D. (2008). La salinizzazione dei suoli nelle piane agricole della Sardegna. Distribuzione, intensità e valutazione del rischio. *AGRIS*, 80 pg., cod. ISBN 978-88-903404-1-3.
- Riou C., Becker N., Sotes-Ruiz V., Gómez-Miguel V., Carbonneau A., Panagiotou M., Calò A., Costacurta A., Castro de R., Pinto A., Lopes C., Carneiro L., Climaco P. (1994). Le déterminisme climatique de la maturation du raisin: application au zonage de la teneur en sucre dans la communauté européenne. 322 pp.
- Rossi, M., Bornaetxea, T., Reichenbach, P. (2022). LAND-SUITE V1.0: a suite of tools for statistically based landslide susceptibility zonation. *Geosci. Model Dev.*, 15, 5651-5666.
- Stanchi, S. Godone, D. Belmonte, S. Freppaz, M., Galliani, C., Zanini E. (2013). Land suitability map for mountain viticulture: a case study in Aosta Valley (NW Italy). *J Maps*, 9, 367-372.
- Tonietto, J., Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agric For Meteorol.* 124, 81-97.
- Van Leeuwen, C., Seguin, G., Bois, B. et al. (2024). Climate change impacts and adaptations of wine production. *Nat Rev Earth Environ* 5, 258-275.
- Vaudour, E., Costantini, E., Jones, G.V., Mocali, S. (2015). An overview of the recent approaches to terroir functional modelling, footprinting and zoning. *SOIL*, 1, 287-312
- Wanyama D., Bunting E.L., Goodwin R., Weil N., Sabbatini P., Andersen J.A. (2020). Modeling land suitability for Vitis vinifera in Michigan using advanced geospatial data and methods. *Atmosphere*, 11, 339.



# HAZELNUT DEVELOPMENT MODELLING AND TEST WITH EXPERIMENTAL DATA IN PIEDMONT

## MODELLISTICA DI SVILUPPO DEL NOCCIOLO E VERIFICA CON DATI SPERIMENTALI IN PIEMONTE

Davide Magliano <sup>1</sup>, Federico Spanna <sup>2\*</sup>, Tiziana La Iacona <sup>2</sup>, Claudio Cassardo <sup>1</sup>, Valentina Andreoli <sup>1</sup>, Stefano Barbero <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Università degli studi di Torino – Dipartimento di Fisica, 10125 Torino, Italia

<sup>2</sup> Settore Fitosanitario e Servizi Tecnico-scientifici, Regione Piemonte, 10144 Torino, Italia

<sup>3</sup> 3A S.R.L., via Le Chiuse 68, 10144 Torino, Italia

\* federico.spanna@regione.piemonte.it

### Abstract

Hazelnut is a widespread crop around the world which in recent years has seen growing demand from the confectionery industry. Italy, currently the second larger producer in the world behind Turkey, has various cultivar distributed along the peninsula; this study is about the Tonda Gentile Trilobata from which “Tonda Gentile delle Langhe” is obtained. Hence the need to develop a model that allows studying the plant to obtain information about phenology, biomass accumulation and so a quantification of the harvest. The study starts from Cravanzana, placed at 585 m above sea level in the Langhe region and it is carried out in collaboration with the Phytosanitar Sector (Piedmont Region). It has been used as principal reference the Italian Vineyard Integrated Numerical Model for Estimating Physiological Value (IVINE) about vineyard, then considering appropriate integrations with studies carried out on hazelnut or similar crops as olive. The development of the model was carried out using Fortran. Data were obtained from meteorological stations in situ and from ERA5, the archive of the European Center Medium Weather Forecast (ECMWF) while validation has been possible thanks to Azienda Nasio in Cravanzana.

### Parole chiave

Biofisica; Modello di crescita; Nocciolo; Fenologia; Crescita di biomassa

### Keywords

Biophysics; Crop model; Hazelnut; Phenology; Biomass Growth

### Introduzione

I cambiamenti climatici degli ultimi decenni hanno avuto un impatto significativo sulle regioni di tutto il mondo. Tale impatto si sta manifestando anche sullo sviluppo della vegetazione e sui processi produttivi in ambito agricolo. Le variazioni delle principali grandezze agrometeorologiche e della loro distribuzione nel corso dell'anno infatti stanno determinando da un lato un anticipo delle fasi fenologiche per la maggior parte delle piante e dall'altro irregolarità nello sviluppo fisiologico e dei processi vege-to-produttivi.

In Piemonte molte colture stanno subendo gli effetti di questi squilibri e di conseguenza è aumentata considerevolmente l'esigenza di sviluppare strumenti e supporti che consentano di seguire l'andamento fenologico ed interpretare l'evolversi dei processi vege-to-produttivi nel corso della stagione. In questo studio particolare attenzione viene dedicata alla coltura del nocciolo. Tale coltura infatti negli ultimi anni ha visto una imponente crescita sia in termini di superfici coltivate sia quindi in termini di produzione.

La produzione mondiale vede al primo posto la Turchia, dove nel 2023 sono state prodotte oltre 600.000 tonnellate (USDA) di nocciole, mentre l'Italia si conferma, ormai da anni, come secondo produttore, con 102.743 tonnellate (ISTAT, 2023), ottenute da 95.143 ettari di terreno impiegato, di cui 27.516 solo nel Piemonte.

La cultivar più diffusa e tipica del Piemonte è la Nocciola Gentile Trilobata, cultivar presa in esame in questo studio. La pianta presenta un'ottima adattabilità e una facile coltivazione in terreni sciolti, ossia caratterizzati da elementi a grana piuttosto grossolana, con buona percentuale di sostanza organica e può essere coltivata fino a 950 m s.l.m. Il frutto è adatto alla lavorazione, di forma sferica e avvolto in un perisperma sottile facile da asportare soprattutto dopo la tostatura. Questa varietà di nocciola ha inoltre la caratteristica di avere meno grassi rispetto ad altre, per cui, oltre ad avere un apprezzabile aroma e positive caratteristiche nutraceutiche, ha un minor grado d'irrandimento e una migliore conservabilità.

Lo scopo del presente lavoro è stato quello di elaborare un modello che consenta di simulare lo sviluppo fenologico e la crescita in biomassa della pianta di nocciolo, pervenendo anche alla stima della produzione finale.

Gli studi relativi alla modellistica di crescita e produttività del nocciolo sono in numero esiguo, motivo per cui si è reso necessario integrare il modello con altri lavori su colture come la vite o l'ulivo.

È stato quindi creato un modello denominato, HAZelnut Numerical plant Development model (HAND) finalizzato alla simulazione dei processi di crescita e sviluppo del nocciolo finalizzato alla successiva applicazione sui diversi areali di produzione del Piemonte

## Materiali e Metodi

### Le variabili atmosferiche

Le principali grandezze utilizzate per lo studio sono la temperatura dell'aria e la radiazione solare.

La temperatura dell'aria (°C) ha un notevole impatto sia sullo sviluppo fenologico che sulla crescita e produttività delle piante. Una variazione di temperatura, specie se brusca, può influenzarne il corretto sviluppo, per cui è fondamentale conoscere la risposta della stessa a tali variazioni sia in termini fenologici che fisiologici. La funzione utilizzata per descrivere tale impatto è stata quella dello studio di Yan & Hant (1999) dove, oltre la temperatura dell'aria, vengono utilizzate tre temperature caratteristiche della pianta, la  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  e  $T_{opt}$  di sviluppo:

$$f(T) = \left( \frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}} \right) \left( \frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right)^{\frac{T_{opt} - T_{min}}{T_{max} - T_{opt}}}$$

La radiazione solare ( $W/m^2$ ) è stata considerata come Radiazione Fotosinteticamente Attiva (PAR), ossia la porzione della radiazione visibile che entra in gioco nella fotosintesi e che risulta fondamentale nell'accumulo di biomassa. La radiazione intercettata dalla pianta è stata calcolata a partire da quella incidente a cui viene sottratta la radiazione attenuata dalla canopy (Legge di Lambert-Beer):

$$Par = Par_{inc} \cdot (1 - e^{-LAI \cdot k})$$

dove  $k$  è il coefficiente di estinzione e LAI è l'indice di area fogliare, dato dalla superficie di area delle foglie rispetto la proiezione sul suolo ( $m^2/m^2$ ).

### Le scale fenologiche

La fenologia è stata studiata considerando due scale di riferimento: la BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry) e la IPG (da Italian Phenological Garden). In fig. 1 è rappresentato il confronto tra le due scale BBCH e IPG per il nocciolo. Le fasi subiscono delle oscillazioni, in alcuni casi non trascurabili, quando si passa da una cultivar all'altra, per cui sono necessari degli approfondimenti nello studio delle singole varietà. Lo sviluppo fenologico del nocciolo a differenza dagli altri fruttiferi è suddiviso in due parti che proseguono parallelamente, lo sviluppo vegetativo e quello riproduttivo.

IPG code	BBCH code	Description
<i>Vegetative phases</i>		
V1	00	Bud dormancy
V2	03	End of bud swelling
V3	7-10	Bud breaking: swollen and opening buds with folded leaves
V4	11	Open buds and first young leaves with unfolded blade
V5	12-18	Young leaves unfolded, not yet full size
V6	19	Young leaves unfolded together with leaves fully expanded
V7	91	Leaves fully developed
V8	92	Beginning of leaf discoloring
V9	94	Leaves mostly discolored
V10	93	Beginning of leaf dryness
V11	95	Leaves mostly dried up
V12	93	Beginning of leaf fall
V13	95	Leaves mostly fallen
V14	97	End of leaf fall, plants dormant
<i>Reproductive phases</i>		
R7	71	Beginning of female flowering
R8	72-77	Full female flowering
R9	79-87	End of female flowering
R10	89	Beginning of ovary growing
R11	-	Beginning of fruit ripening
R12	-	Fruits visible but mostly unripe
R13	-	Fruits maximum ripening
R14	-	Beginning of fruits fall and seed dispersal

Fig.1 - Confronto fasi fenologiche (Bregaglio et. al, 2016)

Fig.1 - Comparison of phenological phases (Bregaglio et. al, 2016)

### Modellistica biofisica

Il modello sviluppato per lo studio è l'HAZelnut Numerical plant Development model (HAND), che è stato ottenuto dall'applicazione di diversi studi di modellistica biofisica. Di seguito si evidenziano i più importanti.

Il primo studio considerato è l'Italian Vineyard Integrated Numerical Model for Estimating Physiological Values (IVINE) (Andreoli et al., 2019), sviluppato presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino per lo studio della vite. HAND è stato sviluppato sulla struttura di IVINE, in Fortran, e conserva alcune sezioni dell'originale; in particolare quelle relative al calcolo dei parametri del suolo e al calcolo della radiazione intercettata, utilizzata in due simulazioni sull'accumulo di biomassa.

Un altro studio considerato è stato quello effettuato sul nocciolo da Bregaglio et al. (2016), di questo lavoro sono stati utilizzati per il modello HAND i parametri relativi allo sviluppo fenologico, oltre alla parte di crescita di biomassa che, proposta come generico accumulo giornaliero, è stata utilizzata come punto di partenza in due simulazioni per ottenere la produzione finale.

Infine si cita lo studio sull'olivo di Moriondo et al. (2019) che è stato invece utilizzato per altre due simulazioni sull'accumulo di biomassa e il calcolo del volume della chioma, essendo l'olivo e il nocciolo piante strutturalmente simili.

Il modello HAND è stato suddiviso in cinque moduli, uno relativo alla fenologia e quattro all'accumulo di biomassa, per ottenere la produzione finale.

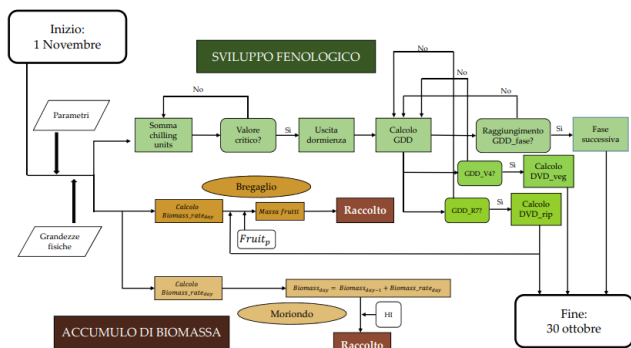


Fig.2 - Diagramma di flusso  
Fig2 - Flow chart

Lo sviluppo fenologico si ottiene dalla valutazione della risposta termica della pianta alla temperatura. La simulazione inizia il 1° novembre con il calcolo delle chilling units (CH), ossia le ore in cui la pianta si trova in una temperatura compresa tra 0 e 7 °C. Al raggiungimento del valore critico di  $CH_{cr}=1200$  (Črepinšek et al., 2012), la pianta ha soddisfatto il suo fabbisogno di freddo, che consiste nella somma dei gradi termici utili ottenuti sommando i gradi orari (Growing Degree Hours, GDH). Il passaggio da una fase alla successiva si ottiene al raggiungimento del valore soglia di quella fase.

L'accumulo di biomassa è stato ottenuto calcolando giornalmente l'incremento di biomassa usando l'approccio RUE (Radiation Use Efficiency), che consiste nella conversione della PAR incidente in biomassa utilizzando il coefficiente RUE, caratteristico di ogni pianta. Il calcolo della produzione finale è stato ottenuto utilizzando due approcci diversi, il primo partendo dallo studio di Bregaglio et al. (2016) (simulazione 1 e 2), in cui si calcola il prodotto finale come partizionamento dell'accumulo di biomassa dalla fase R11 (inizio riempimento) alla fase R14 (caduta frutti), mentre il secondo è riferito allo studio di Moriondo et al. (2019) (simulazioni 3 e 4), dove si calcola la percentuale di massa secca accumulata grazie all'*harvest index* (HI).

Il calcolo della PAR intercettata è stato effettuato utilizzando il modello IVINE (modello su vite, simulazioni 1 e 3) e l'approccio individuato da uno studio su olivo di Testi et al. (2006) (simulazione 2 e 4). Sono state eseguite quindi quattro simulazioni diverse ottenute combinando i due calcoli sull'accumulo di biomassa con i due calcoli diversi per la PAR intercettata.

Le 4 simulazioni possono quindi per semplicità essere definite come segue:

1. Approccio Bregaglio-Ivine,
2. Approccio Bregaglio-Testi,
3. Approccio Moriondo-Ivine,
4. Approccio Moriondo-Testi

Sito e dati in input

Il sito scelto per lo studio è stato quello di Cravanzana (CN), località delle Langhe. I dati relative alle grandezze fisiche utilizzate sono stati presi dalla stazione della rete agrometeorologica del Piemonte (RAM) situata a Cravanzana e integrati con dati estratti da ERA5, database dell'ECMWF, sul punto griglia di coordinate (WGS84) 44.605° N 8.169° E, posto a 3.91 km dal sito di Cravanzana. I dati di campo relativi all'accumulo di biomassa e la produzione finale, utilizzati per la validazione del modello, sono stati forniti dell'azienda Nasio di Cravanzana. I parametri relativi alle piante infine sono stati ricercati in letteratura.

## Risultati e Discussione

### Fenologia

I risultati della simulazione dello sviluppo fenologico sono riportati in figura 3. In giallo è evidenziato il confronto tra il giorno di inizio delle fasi principali (germogliamento, sviluppo foglie e riempimento dei frutti) con i dati di campo.

FASE (PG)	FASE (BCH)	MODELLO	DATI	MODELLO	DATI	MODELLO	DATI	MODELLO	DATI	MODELLO	DATI	MODELLO	DATI
		2018		2019		2020		2021		2022		2023	
R7	71	09-feb		22-feb		02-feb		19-feb		18-feb		15-feb	
V3	7-10	06-apr		15-mar	08-mar	02-mar	15-mar	19-mar	17-mar	23-mar	16-mar	12-mar	22-mar
R10	89	06-apr		16-mar	06-mar	06-mar	22-mar			26-mar		16-mar	
V4	11	09-apr		22-mar	14-mar	11-mar	20-mar	26-mar	14-mar	28-mar	30-mar	19-mar	05-apr
V5	12-18	18-apr	27-mar	02-apr	26-mar	28-mar	06-apr	03-apr	08-apr	10-apr	13-apr	25-mar	19-apr
R11		02-mag		28-apr		17-apr		28-apr		26-apr		17-apr	
V6	19	05-mag		26-apr		19-apr		30-apr		28-apr		19-apr	
V7	91	16-mag		11-mag		03-mag		14-mag		11-mag		03-mag	
R12		08-giu		06-giu		27-mag		08-giu		04-giu		28-mag	
R13		16-lug	11-lug	16-lug		03-lug	08-lug	17-lug		16-lug	12-lug	05-lug	25-lug
R14		31-lug		31-lug		17-lug		01-ago		02-ago			
V8	92	12-ago		10-ago		27-lug		12-ago		14-ago			
V9	94	15-set		13-set		01-set		16-set		18-set			

Fig.3 - Simulazione fasi fenologiche e confronto con dati da campo.

Fig.3 - Simulation of phenological phases and comparison with field data.

Si riporta nelle figure 4a e 4b l'andamento delle somme termiche accumulate nei diversi anni, confrontandole con i valori soglia delle fasi vegetative (V1-V9) e delle fasi riproduttive (R7-R14) dal 1° gennaio al 20 settembre per un totale di 260 giorni.

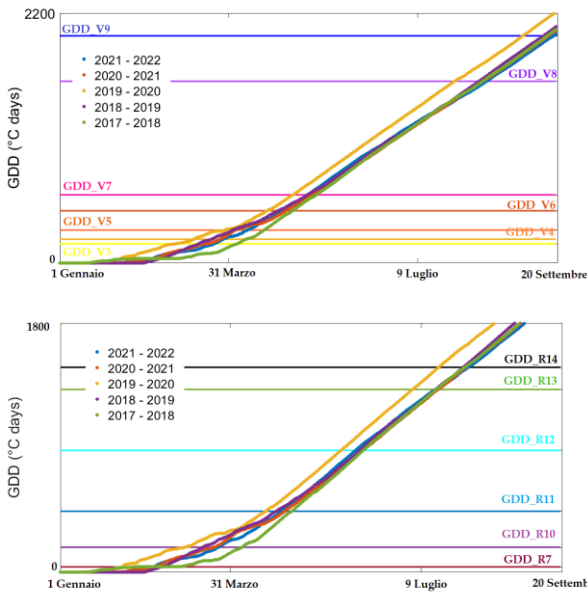


Fig.4a - Andamento delle somme termiche negli anni e confronto con i valori soglia delle fasi vegetative.

Fig.4b - Andamento delle somme termiche negli anni e confronto con i valori soglia delle fasi riproduttive.

Fig.4a - Trend of thermal sums over the years and comparison with the threshold values of the vegetative phases.

Fig.4b - Trend of thermal sums over the years and comparison with the threshold values of the reproductive phases.

Le soglie termiche confrontabili con i dati di campo sono state calibrate: noto il giorno del raggiungimento della singola fase, è stato calcolato il valore della somma termica raggiunta, ed è stata poi calcolata la media nei diversi anni per confrontarla con i valori delle soglie termiche utilizzate nella simulazione. Il confronto dei valori e gli errori (RMSE e RRMSE) sono riportati in tabella 1.

Tab.1 – Calibrazione soglie termiche.

Tab.1 - Thermal threshold calibration.

Fase fenologica	Media simulazioni	Valori modello	RMSE	RRMSE
V3	175	170	48.35	27.71%
V4	236	210	69.82	29.61%
V5	294	290	105.24	35.88%
R13	1308	1320	46.6	3.56%

#### Accumulo di biomassa

I risultati dell'accumulo di biomassa (e quindi del prodotto finale, espresso in quintale su ettaro) sono stati ottenuti per le quattro simulazioni diverse e sono stati confrontati con i valori forniti dell'azienda Nasio. Il confronto per le simulazioni 2 e 4 è stato limitato a 4 anni a causa della limitatezza dei dati in input relativi al calcolo della PAR. Va sottolineato che nel 2019 è stata eseguita una potatura che ha ridotto notevolmente la produzione finale.

La simulazione 4 è risultata la più coerente con i dati di campo, per cui si riporta in figura 5 il confronto dell'accumulo di biomassa dal 2015 al 2022 simulato con tale approccio.

Tab.2 – Produzione finale.

Tab.2 – Yield.

ANNO	Produzione finale (q/ha)				
	Dati di campo	Simulazione			
		1	2	3	4
2015	15.48		18.09		11.91
2016	18.32		15.73		11.81
2017	13.84	2.93	17.33	9.06	12.79
2018	11.53	3.80	15.97	7.16	11.06
2019	4.27	4.07	13.50	7.91	12.36
2020	12.34	3.30	13.78	7.74	12.26
2021	9.91		14.63		12.51
2022	12.62		18.74		13.14

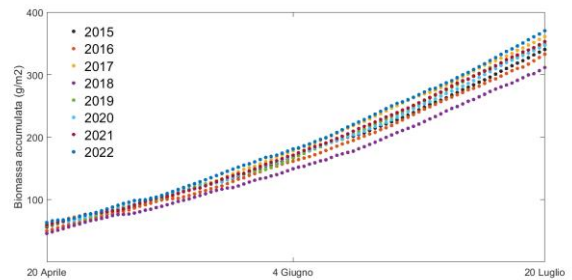


Fig.5 - Andamento dell'accumulo di biomassa negli anni.

Fig.5 - Trend of biomass accumulation over the years.

#### Conclusioni

Il presente studio ha permesso di simulare lo sviluppo fenologico della coltura del nocciolo, ottenendo una buona corrispondenza tra i dati del modello e quelli di campo, nonostante la limitatezza dei dati a disposizione. La calibrazione ha permesso di osservare una coerenza nei valori utilizzati per le soglie termiche.

Per l'accumulo di biomassa si può osservare dalla tabella 2 come le quattro simulazioni abbiano stimato un prodotto finale compreso tra circa 3 q/ha e circa 20 q/ha. La simulazione 1 (Bregaglio-IVINE) ha dato il risultato più lontano da quello osservato in campo, mentre la 4 (Moriondo-Testi) quello più simile, e si può dunque concludere che l'approccio migliore alla stima dell'accumulo di biomassa sia quello di Moriondo, e per il calcolo della PAR quello di Testi et al.

Lo studio rappresenta un valido punto di partenza per arrivare alla creazione di un modello di simulazione di crescita e produttività per la coltura del nocciolo, a cui in futuro sicuramente si potranno aggiungere ulteriori componenti, ad esempio quella idrica ed evapotraspirativa.

## 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). In: *Agronomy* 9.2, p. 94.
- Baldwin B., (2015). The growth and productivity of hazelnut cultivars (*Corylus avellana* L.) in Australia. In: The University of Sydney.
- Bregaglio S., Orlando F., Forni E., De Gregorio T., Falzoi S., Boni C., Pisetta M., Confalonieri R. (2016) Development and evaluation of new modelling solutions to simulate hazelnut (*Corylus avellana* L.) growth and development. In: *Ecological modelling* 329, pp. 86–99.
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M. H., Bouthier A., Ripoché D., Mary B., Justes E. (2022). STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. In: *Agronomie* 22.1, pp. 69–92.
- Črepinšek Z., Štampar F., Kajfež-Bogataj L., Solar A. (2012) The response of *Corylus avellana* L. phenology to rising temperature in north-eastern Slovenia. In: *International Journal of Biometeorology* 56 (2012), pp. 681–694.
- Leolini L. et al. (2018) A model library to simulate grapevine growth and development: Software implementation, sensitivity analysis and field level application. In: *European journal of agronomy* 99, pp. 92–105.
- Mariscal M.J., Orgaz F., Villalobos F.J. (2000) Radiation-use efficiency and dry matter partitioning of a young olive (*Olea europaea*) orchard. In: *Tree Physiology* 20.1, pp. 65–72.
- Morales A., Leffelaar P.A., Testi L., Orgaz F., Villalobos F.J. (2016) A dynamic model of potential growth of olive (*Olea europaea* L.) orchards. In: *European journal of agronomy* 74, pp. 93–102.
- Moriondo M., Leonini L., Brillì 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. In: *European Journal of Agronomy* 105 (2019), pp. 129–145.
- Paradinas A., Ramade L., Mulet-Greffeuille C., Hamidi R., Thomas M., Toillon J. (2022) Phenological growth stages of ‘Barcelona’ hazelnut (*Corylus avellana* L.) described using an extended BBCH scale. In: *Scientia Horticulturae* 296 (2022), p. 110902.
- Sandaña P., Ramirez M., Dante Pinochet D. (2012) Radiation interception and radiation use efficiency of wheat and pea under different P availabilities. In: *Field crops research* 127 (2012), pp. 44–50.
- Solar A., Stampar F. (2010) Characterisation of selected hazelnut cultivars: phenology, growing and yielding capacity, market quality and nutraceutical value. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91.7 (2011), pp. 1205–1212.
- Spanna F., Cassardo C., Monchiero M., Vercellino I., Francone C., La Iacona T., Sanna M., Gullino M.L. (2011) La modellistica micrometeorologica applicata ai processi di crescita e produttività della vite. In: vol. 2. Mar. 2011, pp. 2–10.
- Taghavi T., A Rahemi A., Suarez E. (2022) Development of a uniform phenology scale (BBCH) in hazelnuts. In: *Scientia Horticulturae* 296 (2022), p. 110837.
- Testi L., Villalobos F.J., Orgaz F., Fereres E. (2006) Water requirements of olive orchards: I simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis. In: *Irrigation Science* 24 (2006), pp. 69–76.
- Toillon J., Hamidi R., Paradinas A., Ramade L., Thomas M., Suarez E. (2022) Using a consolidated BBCH scale for hazelnut. In: *Proceedings of the 10th International Congress on Hazelnut*. 2022.
- Yan W., Hunt L.A. (1999) An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. In: *Annals of Botany* 84.5 (1999), pp. 607–614.
- Zhao C., Liu B., Xiao L., Hoogenboom G., Boote K. J., Kassie B. T., Pavan W., Shelia V., Kim K.S., Hernandez-Ochoa I. M., Wallach D., Porter C. H., Stocklef C. O., Zhu Y., Asseng S. (2019) A SIMPLE crop model. In: *European Journal of Agronomy* 104 (2019), pp. 97–106.



# PRELIMINARY INSIGHTS ON THE IMPACT OF THERMOPLUVIOMETRIC TRENDS ON EMMER QUALITY: A TUSCANY CASE STUDY

## ANALISI PRELIMINARE DELL'IMPATTO DELL'ANDAMENTO TERMOPLUVIOMETRICO SULLA QUALITÀ DEL FARRO: UN CASO DI STUDIO IN TOSCANA

Leonardo Verdi<sup>1\*</sup>, Riccardo Rossi<sup>1</sup>, Michele Moretta<sup>1</sup>, Paolo Armanasco<sup>1</sup>, Anna Dalla Marta<sup>1</sup>, Simone Orlandini<sup>1</sup>, Enrico Palchetti<sup>1</sup>, Marco Mancini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI) – Università degli Studi di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144, Firenze

\* leonardo.verdi@unifi.it

### Abstract

Emmer is an interesting cereal for human consumption due to its high nutritional characteristics and low gluten content. Its high tolerance to biotic and abiotic stresses, and the low input requirements make it a suitable crop for low-impact agricultural systems. However, there is currently no certain knowledge about which pedoclimatic factors affect the grain quality, which can present either a flourey fracture, suitable for baking and easily obtainable, or a vitreous fracture, suitable for pasta production with higher added value for farmers' productions. In this study, the grain quality was evaluated on emmer samples obtained from 27 farms homogeneously distributed within the Tuscany region over a period of three years (2020-2022). From the analysis of the results, it emerges that the most influential factor is temperature. Mild minimum temperatures during the early stages of crop development (early spring) favor the obtaining of vitreous fracture. These findings lay the groundwork for developing an early evaluation method of grain quality based on the meteorological trends of the cultivation season.

### Parole chiave

Vitrosità; Farinosità; Temperatura; Cereali; Granella

### Keywords

Vitreousness; Flouriness; Temperatures; Cereals; Grain

### Introduzione

Con il termine farro si fa riferimento a tre differenti specie quali, il farro monococco (*Triticum monococcum* L. ssp. *Monococcum*), dicocco (*T. turgidum* L. ssp. *dicoccum*, Schrank ex Schubler) e spelta (*T. aestivum* L. ssp. *spelta*) (Szabo & Hammer 1996). In genere, con il termine farro si fa riferimento esclusivamente al dicocco, uno dei più antichi cereali coltivati, originario del Medio Oriente e diffuso ampiamente nel bacino del Mediterraneo. Il farro è un cereale tetraploide ottenuto dall'incrocio delle specie selvatiche di *Triticum dicoccoides* e *Triticum durum*. Grazie alla sua rusticità, il farro può essere coltivato in suoli poveri di nutrienti e mostra un'elevata resistenza alle condizioni meteorologiche avverse come estremi freddi e caldi, nonché ambienti aridi e umidi. Le basse richieste di input e la resistenza alle condizioni meteorologiche estreme rendono questo cereale adatto alla coltivazione in regioni collinari e montane. Oggi il farro è coltivato in diverse regioni del mondo e in Europa occupa un areale che copre la zona centrale, quella orientale e tutto il Mediterraneo. In Italia la coltivazione del farro è principalmente concentrata nelle regioni centrali e meridionali dalla Toscana fino alla Puglia (Perrino et al., 1996; Porfiri et al., 1998).

Dopo un periodo di abbandono dalla rivoluzione industriale fino ai primi anni 2000, nel corso gli ultimi decenni la coltivazione del farro sta conoscendo una nuova fase di sviluppo. Questo si deve a differenti fattori di natura sociale,

economica e culturale. In questo senso, l'attenzione verso un'agricoltura sostenibile e la crescente domanda di alimenti salutari hanno contribuito al rinnovato interesse per il farro. Inoltre, il crescente interesse per l'agricoltura biologica ha contribuito a riaccendere l'interesse per questo cereale (De Vita et al., 2006). La sua capacità di avere successo in suoli poco fertili, la maggiore resistenza agli stress abiotici e l'ottimo adattamento a tecniche agronomiche a basso impatto, hanno facilitato la diffusione di questa coltura. Inoltre, le proprietà nutrizionali del farro, come il suo contenuto di amido resistente, di fibre, di composti antiossidanti e il basso contenuto di glutine, hanno aumentato ulteriormente l'interesse verso questa coltura. Da un punto di vista nutrizionale, il farro si caratterizza anche per l'alto contenuto di microelementi e di aminoacidi preziosi (come fenilalanina, tirosina e isoleucina), fondamentali per il corretto funzionamento del sistema nervoso (Biel et al., 2021). Nonostante le interessanti caratteristiche nutrizionali di questo cereale, la scarsa qualità e il basso contenuto di glutine limitano notevolmente le prestazioni tecnologiche e il potenziale utilizzo del farro nell'industria alimentare, sebbene venga attualmente utilizzato per la produzione di pasta (Giacintucci et al., 2014).

Numerosi studi hanno valutato le performance qualitative del farro per la produzione di prodotti panificabili e biscottieri (Biel et al., 2021; Şahin and Karakas, 2022; Cabas-Lühmann et al., 2023). Tuttavia, la filiera di produzione della pasta richiede standard qualitativi diversi e in particolare a livello

di caratteristiche microstrutturali della granella (frattura vitrea). Questa caratteristica risulta di più difficile ottenimento rispetto alla frattura farinosa, adatta alla panificazione, influenzando in maniera significativa l'intera filiera. Giacintucci et al. (2014), attraverso un confronto fra analisi elettroforetiche e studi microstrutturali su differenti tipologie di farine di farro e frumento, hanno valutato il profilo proteico prendendo in considerazione la gliadina e la glutenina. I campioni di farro evidenziano composizioni simili di gliadina ma sensibilmente diverse in termini di glutenina. In particolare, i campioni di farro ottenuti da semine tardive (primaverili) evidenziano una struttura più simile a quella del frumento tenero. Il confronto delle caratteristiche microstrutturali delle granelle di farro ottenute da semine autunnali e primaverili evidenziano una frattura vetrosa nei campioni ottenuti da semine tardive con granuli di amido che risultano ricoperti in misura maggiore da strutture proteiche, rispetto alle semine precoci. Il glutine del farro primaverile si presenta come una struttura omogenea mostrando spiccate somiglianze con il glutine del frumento. Diversamente, la granella ottenuta da semine autunnali evidenzia un aspetto maggiormente eterogeneo e privo di struttura, tenendo alla farinosità (Giacintucci et al., 2014). Questo suggerisce un chiaro effetto delle condizioni meteorologiche nelle fasi iniziali dello sviluppo vegetativo della coltura, in cui temperature più miti favoriscono l'ottenimento di una granella caratterizzata da una frazione proteica del glutine omogenea e quindi tendente alla frattura vitrea. Contrariamente, un farro sottoposto a condizioni meteorologiche rigide durante le prime fasi di sviluppo, a seguito, ad esempio, di una semina autunnale, mostra una maggiore probabilità di produrre una granella in cui la componente glutinica si presenta eterogenea e tendente alla frattura farinosa.

Alla luce di queste considerazioni, lo studio approfondito dell'effetto delle condizioni meteorologiche e l'individuazione dei principali fattori responsabili della qualità del farro risultano di fondamentale importanza. Se da un lato la pratica agronomica (es. semina tardiva) permette di aumentare le probabilità di ottenere una granella a frattura vitrea, dall'altra vi è un dibattito ancora aperto sull'effetto dei singoli fattori pedoclimatici (precipitazioni, temperature, altitudine ecc.). In questo senso, l'individuazione di range specifici per i singoli fattori pedoclimatici (es. temperature minime e massime durante le varie fasi fenologiche) rappresenta un interessante ambito di studio per il supporto alle produzioni di farro. Questo tipo di informazioni potrebbero fornire indicazioni preziose per la stima della qualità delle produzioni con diversi mesi di anticipo rispetto alla fase di raccolta.

Gli obiettivi di questo studio sono stati: (i) la definizione di un metodo di valutazione della qualità della granella basato su modelli che sfruttano criteri oggettivi limitando il rischio di errori di osservazione. Infatti, ad oggi non esiste una metodologia standard per la definizione della qualità della granella e i metodi utilizzati si affidano a valutazioni visive da parte dell'operatore; (ii) la valutazione dell'effetto della componente meteorologica, ovvero l'andamento delle

temperature e delle precipitazioni durante il ciclo vegetativo, sulla qualità del farro. A questo fine, è stato considerato un campione di 27 aziende omogeneamente distribuite all'interno della regione Toscana per un periodo di tre anni (2020-2022), ed è stata svolta un'analisi sulla qualità del farro valutando la tipologia di frattura della granella.

## Materiali e Metodi

La valutazione della qualità della granella è stata svolta su campioni di farro ottenuti da un totale di 27 aziende omogeneamente distribuite all'interno della regione Toscana per un periodo di tre anni (2020-2022). Le aziende erano distribuite nella zona montana dell'Alto Mugello, nella zona centrale collinare, fino alla zona costiera nella parte Sud della regione con altitudini variabili dai 200 ai 900 metri sul livello del mare.

*Tabella 1 – Posizione e altitudine delle 27 aziende oggetto di studio*

*Table 1 – Location and altitude for the 27 farms considered within the study*

<b>Id azienda</b>	<b>Latitudine</b>	<b>Longitudine</b>	<b>Altitudine m s.l.m.</b>
<b>AZ1</b>	44°03'09.8"N	11°09'48.1"E	400
<b>AZ2</b>	44°20'31.22"N	11°12'58.93"E	1000
<b>AZ3</b>	42°27'15"N	11°25'21"E	217
<b>AZ4</b>	43°19'24.2"N	11°02'10.2"E	417
<b>AZ5</b>	43° 0' 29" N	11° 36' 56" E	540
<b>AZ6</b>	43° 24' 5" N	10° 51' 40" E	531
<b>AZ7</b>	43°40'07.1"N	11°09'01.3"E	310
<b>AZ8</b>	44° 11' 39" N	11° 20' 9" E	779
<b>AZ9</b>	44°08'20.3"N	11°19'10.5"E	874
<b>AZ10</b>	42°52'18.3"N	11°52'31.7"E	582
<b>AZ11</b>	43° 24' 5" N	10° 51' 40" E	531
<b>AZ12</b>	43°30'49.1"N	11°05'51.1"E	190
<b>AZ13</b>	43°56'54.6"N	11°20'34.8"E	193
<b>AZ14</b>	43°26'43.1"N	11°02'05.8"E	531
<b>AZ15</b>	43°21'07.0"N	11°09'24.9"E	333
<b>AZ16</b>	43°07'15.5"N	11°35'33.2"E	380
<b>AZ17</b>	43°57'48.5"N	11°19'25.2"E	292
<b>AZ18</b>	44°00'44.0"N	11°17'14.7"E	295
<b>AZ19</b>	42°27'00.38"N	11°30'33.30"E	680
<b>AZ20</b>	42°27'00.38"N	11°30'33.30"E	680
<b>AZ21</b>	42°25'19.5"N	11°51'55.2"E	165
<b>AZ22</b>	44°14'46.64"N	11°13'31.53"E	1000
<b>AZ23</b>	43° 24' 5" N	10° 51' 40" E	531
<b>AZ24</b>	43° 24' 5" N	10° 51' 40" E	531
<b>AZ25</b>	43°28'54.4"N	10°32'42.1"E	102
<b>AZ26</b>	43°03'55.3"N	11°41'16.8"E	498
<b>AZ27</b>	43°16'01.8"N	11°14'19.9"E	265

Per ognuna delle aziende oggetto dello studio sono state individuate delle stazioni meteorologiche di riferimento dalle quali sono stati raccolti i dati di temperatura (minima, massima e media giornaliera) e di precipitazione (Tab. 1). Per la valutazione del tenore di vitrosità/farinosità della granella,

i campioni (3529 semi, in totale) sono stati sezionati sul lato trasversale tramite un bisturi ed è stata utilizzata la parte basale del seme per l'analisi. La porzione selezionata del seme è stata quindi posizionata all'interno di un supporto in polistirolo rivestito da uno strato plastico di colore nero per facilitare la valutazione della frattura del seme. L'analisi visiva della granella è stata svolta utilizzando un microscopio digitale (Dino-Lite AM4113ZT Digital Microscope, Taiwan) collegato ad un computer. Il software di acquisizione Dino è stato calibrato per il farro ed è stato utilizzato per catturare le immagini della granella sezionata. Successivamente alla raccolta delle immagini è stato sviluppato un approccio automatizzato per la determinazione del grado di vitrosità/farinosità. In particolare, circa 1/3 dei campioni (908 immagini) è stato utilizzato per calibrare il metodo di classificazione nell'ambiente di lavoro MATLAB. Le diverse componenti della cariosside sono state identificate applicando un approccio di thresholding basato su valori dei singoli pixel nei canali rosso, verde e blu. L'efficacia e l'affidabilità del sistema è stata validata confrontando i dati estratti automaticamente con quelli ottenuti mediante digitalizzazione manuale in Photoshop sui restanti 2/3 circa del campione (2621 immagini). Questa attività ha permesso la determinazione oggettiva delle classi di qualità della frattura in base alle caratteristiche cromatiche e morfometriche dei pixel con i passaggi di seguito riportati:

1. Pixel totali dell'immagine
2. Pixel sfondo. Valore costante a seguito della calibrazione del software Dino per il farro in base alla dimensione dell'immagine. Questo fattore comprende i pixel totali dell'immagine al netto di quelli relativi al seme sezionato
3. Pixel cariosside. Valore calcolato sottraendo i "pixel di sfondo" al numero totale dei pixel dell'immagine
4. Pixel endosperma. Valore ottenuto sottraendo ai "pixel della cariosside" i "pixel della crusca" stimati con valore medio costante pari a 12% ("pixel della cariosside \* 0,12")
5. Pixel farinosità. Conteggiati con lo strumento di selezione del colore di Photoshop impostato appositamente con tolleranza tale da includere nella selezione le sole sfumature di colore classificabili come farinoso
6. Pixel vitrosità. Valore calcolato sottraendo i "pixel farinosità" al numero totale dei pixel dell'endosperma (punto 4)

I valori ottenuti, una volta validato il metodo, sono stati elaborati per ottenere un dato di qualità della granella espresso come valore percentuale (%) di vitrosità o farinosità. È stata definita come 65% la soglia minima per classificare un campione all'interno della classe di frattura vitrea. In base a questa informazione, la granella è stata organizzata in quattro classi (Fig. 1):

- Completamente farinoso: 0 - 33% di vitrosità
- Disomogeneo: 34 - 66% di vitrosità
- Completamente vitreo: 67 - 100% di vitrosità

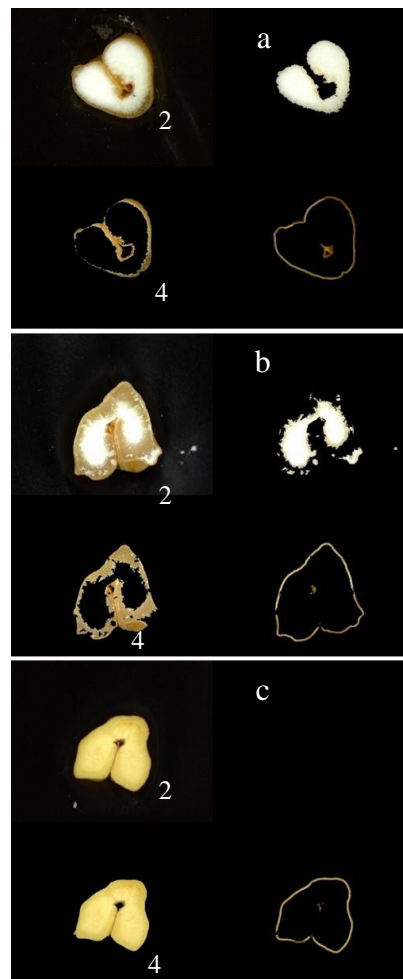


Figura 1 – Rappresentazione delle tre classi di qualità del farro in base alla frattura (a: completamente farinoso; b: disomogeneo; c: completamente vitreo). 1: Area totale della sezione della cariosside ("Pixel di cariosside"); 2: area farinosa; 3: area vitrea; 4 crusca ("Pixel della crusca")

Figure 1 - Representation of the three quality classes of emmer based on seed fracture (a: completely floury; b: heterogeneous; c: completely vitreous). 1: Total area of the grain section ("Pixels of the grain"); 2: Floury area; 3: Vitreous area; 4: Bran ("Bran pixel")

Il coefficiente di regressione ( $r$ ), il Root Mean Square Error (RMSE) e l'Akaike Information Criterion (AIC) sono stati calcolati confrontando i valori percentuali di vitrosità estratti automaticamente dal campione di 2621 immagini con quelli ottenuti tramite digitalizzazione manuale, al fine di valutare l'efficacia del modello sviluppato. Successivamente, un'analisi delle componenti principali (PCA) è stata condotta per esaminare la struttura del dataset e identificare eventuali pattern tra le variabili meteorologiche ("Tmin", "Tmax" e "Prec") rilevate da febbraio (02) a giugno (06) per i tre anni di sperimentazione, l'altitudine dell'azienda ("Alt") e la qualità della granella ("Vitrosità"). Tuttavia, poiché il test di Shapiro-Wilk ha indicato una distribuzione non normale dei dati ( $p$ -value < 0.05), questi sono stati trasformati nei loro ranghi (*rank transformation*) prima di eseguire la PCA. Infine, le relazioni tra le variabili del dataset sono state analizzate mediante una matrice di correlazione.

## Risultati e Discussioni

Attualmente non esistono metodologie per la definizione della qualità della granella di farro che siano basati su parametri oggettivi. L'unico metodo utilizzato prevede una valutazione visiva della frattura della granella di farro da parte dell'operatore con il rischio di generare errori di osservazione (Giacintucci et al., 2014). In questo senso, appare necessaria la creazione di una metodologia rigorosa e fondata su modelli di definizione che sfruttano criteri oggettivi. Questo studio propone una metodologia innovativa che si distingue da quelle già conosciute per la definizione del grado di vitrosità/farinosità del seme di farro. Tale metodologia si basa sull'elaborazione digitale dell'immagine della sezione del seme attraverso un approccio totalmente automatizzato che restituisce il numero di pixel appartenenti ad una determinata classe di frattura. Questo permette, attraverso un calcolo oggettivo, di definire il livello di vitrosità/farinosità della granella di farro. L'elevata precisione complessiva ( $r = 0.98$ ;  $RMSE = 6.67\%$ ;  $AIC = 17226.60$ ) ottenuta tra la percentuale di pixel vitrosi estratta automaticamente e quella osservata ha fornito evidenze circa la robustezza e l'efficacia dell'algorithmo sviluppato nella classificazione di campioni indipendentemente dall'areale di provenienza e/o dall'anno di raccolta.

I dati di qualità della granella sono poi stati elaborati considerando differenti parametri pedoclimatici al fine di definire una metodologia di stima anticipata anche di diversi mesi, della qualità del farro ottenibile.

L'analisi dei risultati attraverso PCA è stata condotta su tutte le variabili meteorologiche ("Tmin", "Tmax" e "Prec") rilevate da febbraio (02) a giugno (06), altimetriche ("Alt") e di qualità del seme ("Vitrosità") per i tre anni di sperimentazione (Fig. 2A). Le prime tre componenti principali, PC1, PC2 e PC3 (dati non mostrati) spiegano il 74.2% della varianza totale nel dataset, con PC1 e PC2 che complessivamente rappresentano il 54.4%. Le temperature minime e massime mostrano un forte impatto soprattutto sulla PC1, con coefficienti significativi per "Tmin\_02", "Tmin\_03", "Tmin\_04" e "Tmax\_03". "Vitrosità" e "Alt", invece, presentano un carico meno pronunciato sulla PC1 e sulla PC3, suggerendo un'interazione complessa tra le variabili climatico-ambientali e la qualità del seme, la quale potrebbe essere influenzata anche da altri fattori non inclusi nel modello. D'altra parte, la precipitazione influisce maggiormente sulla PC2 rispetto agli altri parametri analizzati.

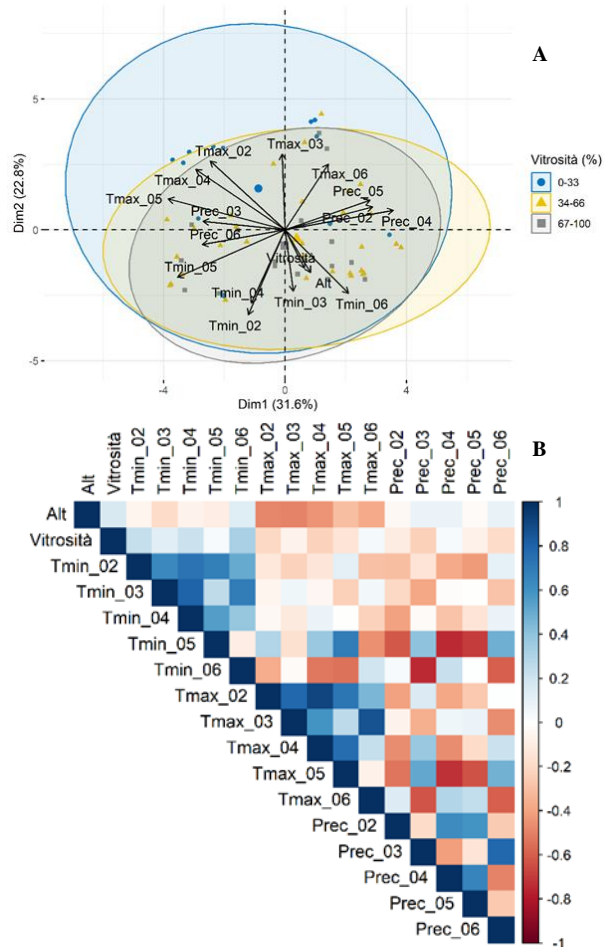


Figura 2 – (A) Analisi delle componenti principali (PCA) per la valutazione dell'effetto delle temperature massime mensili ( $Tmax_{XX}$ ), minime mensili ( $Tmin_{XX}$ ), precipitazioni cumulate mensili ( $PREC_{XX}$ ) e dell'altitudine ( $Alt$ ) sulla qualità della granella di farro. (B) Rappresentazione grafica della matrice di correlazione tra le variabili considerate nello studio. Il colore blu rappresenta correlazioni positive, mentre il rosso correlazioni negative.

Figure 2 – (A) Principal Component Analysis (PCA) for evaluating the effect of monthly maximum temperatures ( $Tmax_{XX}$ ), monthly minimum temperatures ( $Tmin_{XX}$ ), cumulative monthly precipitation ( $PREC_{XX}$ ), and altitude ( $Alt$ ) on the quality of emmer grain. (B) Graphic representation of the correlation matrix between the variables considered in the study. Blue color represents positive correlations, while red represents negative correlations

L'evidenza principale si riferisce al fatto che, in corrispondenza di temperature minime più miti durante i mesi di febbraio, marzo e aprile, si osserva una maggiore tendenza all'ottenimento di granella a frattura principalmente vitrea, mentre non si osserva sostanzialmente nessun effetto relativamente all'andamento delle temperature minime a maggio e giugno. Queste osservazioni ci suggeriscono che il farro tende ad accumulare un maggior contenuto di proteine all'interno della granella in corrispondenza di condizioni meteorologiche miti durante le prime fasi del ciclo

vegetativo. Questo concorda con le osservazioni di Giacintucci et al. (2014) che osservano una maggiore tendenza alla frattura vitrea (e maggior accumulo di proteine nella granella) in corrispondenza di semine primaverili rispetto a quelle autunnali. Infatti, una semina tardiva fa sì che la coltura si sviluppi a partire dalla fine del periodo invernale riducendo notevolmente l'incidenza delle basse temperature rispetto a quello che avviene con semine autunnali.

Relativamente alle temperature massime, l'indicazione principale è stata fornita dall'analisi dei risultati del mese di marzo in cui si osserva un chiaro effetto sulla qualità della granella. In particolare, temperature massime particolarmente elevate in corrispondenza di questo mese determinano una chiara tendenza della granella di farro alla farinosità. L'andamento delle temperature massime di giugno sembra fornire indicazioni analoghe a quelle del mese di giugno, seppur con minore chiarezza, spingendo la qualità della granella verso la farinosità in corrispondenza di valori di temperatura elevati. Le precipitazioni cumulate mensili forniscono le indicazioni meno rilevanti mostrando un'incidenza trascurabile sulla qualità della granella. Dall'analisi dei risultati sembra che solo durante il mese di marzo questo fattore influenzi minimamente la qualità della granella favorendo la vitrosità in corrispondenza di valori limitati di piovosità. Relativamente all'altitudine, l'analisi dei risultati suggerisce che anche tale fattore influisce sulla qualità della granella favorendo la vitrosità all'aumentare della quota. Tuttavia, questo effetto sembra meno chiaro rispetto a quello delle temperature suggerendo una probabile influenza di fattori non considerati all'interno del modello. Questi risultati trovano conferma nella correlazione tra la vitrosità e le temperature, che emerge come una delle più significative (Fig. 2B). In particolare, si osserva una moderata correlazione positiva tra "Vitrosità" e le temperature minime registrate durante il periodo di studio. Ciò suggerisce che, in generale, temperature più elevate possano favorire un aumento della qualità della granella di farro in termini di vitrosità. Tuttavia, la correlazione negativa con le temperature massime evidenzia l'esistenza di un punto ottimale oltre il quale un ulteriore aumento della temperatura potrebbe influenzare negativamente la vitrosità.

## Conclusioni

Il metodo presentato in questo studio rappresenta un'interessante opportunità di innovazione delle attività di valutazione della qualità del farro verso la definizione di un protocollo riconosciuto e condiviso.

La possibilità di stimare la qualità della granella di farro a distanza di alcuni mesi dalla raccolta rappresenta uno strumento interessante che potrebbe supportare gli agricoltori verso una migliore gestione del processo produttivo. Attraverso il monitoraggio dell'andamento meteorologico durante la stagione di coltivazione è possibile prevedere con un certo grado di precisione la qualità delle produzioni ottenibili con ricadute positive sui produttori, sui trasformatori e, infine, sui consumatori. I risultati di questo studio ci suggeriscono come le temperature minime durante

le fasi di accostamento e levata del farro giocano un ruolo fondamentale sulla qualità delle produzioni. Questa tipologia di studio fornisce indicazioni importanti a servizio degli agricoltori e del settore di trasformazione anche in ottica di cambiamento climatico.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano l'azienda Poggio del Farro (<https://poggiodelfarro.com/>) per il supporto durante la fase di raccolta dei campioni e identificazione delle aziende agricole coinvolte nella sperimentazione.

## Bibliografia

- Biel, W., Jaroszewska, A., Stankowski, S., Sobolewska, M., & Kępińska-Pacelik, J. (2021). Comparison of yield, chemical composition and farinograph properties of common and ancient wheat grains. *European Food Research and Technology*, 247(6), 1525-1538.
- De Vita P., Riefolo C., Codianni P., Cattivelli L., Fares C. (2006): Agronomic and qualitative traits of *Turgidum* ssp. *dicocum* genotypes cultivated in Italy. *Euphytica*, 150: 195–205.
- Giacintucci V., Guardañó Expósito L. M., Puig Gómez C. A., Hernando Hernando M., Sacchetti, G., Pittia P., 2014. Composition, protein contents and microstructural characterisation of grains and flours of emmer wheats (*Triticum turgidum* ssp *dicocum*) of the central Italy type. *Czech Journal of Food Sciences*, 32(2), 115-121.
- Perrino P., Laghetti G., D'Antuono L.F., Al Ajlouni M., Kanbertay M., Szabó A.T., Hammer K., 1996. Ecogeographical distribution of hulled wheat species. In: Padulosi S., Hammer K., Heller J. (eds): *Hulled Wheat*. International Plant Genetic Resources Institute, Rome: 42–102.
- Porfiri O., Papa R., Veronesi F., 1998. Il farro nel rilancio delle aree marginali umbro-marchigiane. In: Papa C. (ed.): *Il farro, saperi, usi e conservazione delle varietà locali*. Quaderni del CEDRAV, 1: 58–67.
- Şahin, Y., & Karakas, F. P. (2022). Chemical Composition of Einkorn (*Triticum monococcum* ssp. *monococcum*), Emmer (*Triticum dicocum*), and Spelt (*Triticum spelta*). In *Ancient Wheats* (pp. 119-145). Cham: Springer International Publishing.
- Szabó A.T., Hammer K. (1996): Notes on the taxonomy of farro: *Triticum monococcum*, *T. dicoccon*, *T. spelta*. In: Padulosi S., Hammer K., Heller J. (eds): *Hulled Wheat*. International Plant Genetic Resources Institute, Rome: 2–40



# MODELLAZIONE DELLA DINAMICA DI MATURAZIONE DEL GRAPPOLO PER LA VALUTAZIONE PRECOCE DELLA QUALITÀ ORGANOLETTICA DEL VINO: UN CASO DI STUDIO IN VENETO

## MODELING GRAPE BERRIES MATURATION FOR AN EARLY ASSESSMENT OF WINE ORGANOLEPTIC QUALITY: A CASE STUDY IN VENETO

Maria Roberta Bruno<sup>1\*</sup>, Patrick Marcuzzo<sup>2</sup>, Federica Gaiotti<sup>2</sup>, Luca Masiero<sup>2</sup>, Riccardo Hénin<sup>1</sup>, Simone Bregaglio<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup> Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'economia agraria (CREA), Agricoltura e Ambiente, Bologna, 40128 Italia; mariaroberta.bruno@crea.gov.it;

<sup>2</sup> Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'economia agraria (CREA), Viticoltura ed Enologia, Conegliano 31015 Italia;

### Abstract

La vite (*Vitis vinifera* L.) caratterizzata da una fruttificazione aclimaterica, richiede che il momento della raccolta sia effettuato con precisione per ottenere vini di alta qualità. Durante le fasi di sviluppo dell'acino avvengono diverse reazioni biochimiche appartenenti al metabolismo primario. Negli anni sono stati sviluppati diversi modelli per individuare il momento ottimale di raccolta dell'uva che spesso non hanno considerato l'eterogeneità che può esistere tra gli acini. Il modello BErry PRImary METabolism (BEPRIME) gestisce efficacemente la variabilità dei tratti metabolici attraverso un approccio misto statistico e basato su processi, consentendo un campionamento più o meno randomico all'interno delle popolazioni di acini. La coerenza delle simulazioni effettuate con BEPRIME è stata verificata confrontando i risultati con alcuni dataset del Consorzio Conegliano Valdobbiadene DOCG e relativi alla varietà Glera. Questo lavoro preliminare apre nuove prospettive per la comprensione e previsione della qualità dell'uva.

### Parole chiave

Acino D'uva, Qualità, Metabolismo Primario, Vinificazione, Etereogeneità

### Keywords

Berry Grape, Quality, Primary Metabolism, Winemaking, Heterogeneity

### Introduction

La vite, essendo una pianta dai frutti aclimaterici, richiede l'individuazione del momento ideale per la raccolta al fine di produrre un vino dalle qualità organolettiche eccellenti (Meléndez et al., 2013). Le condizioni pedoclimatiche ed agrometeorologiche influenzano l'espressione fenotipica del genotipo del vitigno, determinando lo sviluppo fenologico della pianta e la sua fisiologia. Queste a loro volta influenzano in modo determinante i tratti qualitativi dell'uva, con un diretto impatto sulle caratteristiche dei vini che dipendono in larga misura dalla composizione biochimica dell'acino (Letchov et al., 2021). Lo sviluppo dei grappoli avviene secondo tre fasi distinte (Coombe, 1988; Coombe, 1960), una prima fase di accrescimento "verde", una seconda fase di stasi detta di "lag" ed una terza fase, che inizia dall'invaiaatura e che comprende l'ammorbidimento, la maturazione ed infine una fase di avvizzimento dell'acino in cui si verifica un aumento della concentrazione di zuccheri dovuto alla perdita d'acqua (Sadras and McCARThY, 2007). Durante le fasi di sviluppo, all'interno dell'acino avvengono diverse reazioni biochimiche che prendono il nome di metabolismo primario. Questo insieme di processi biochimici è fondamentale per la maturazione dell'uva e comprende una serie di reazioni metaboliche che influenzano direttamente la composizione chimica e la qualità dell'acino (Gouot et al., 2019). Tra le reazioni caratterizzanti vi sono la

sintesi di diversi acidi tra cui malico e tartarico, presenti in maggior quantità (Li et al., 2023; Michelini et al., 2021), e l'aumento della concentrazione degli zuccheri esosi. Diversi studi hanno analizzato il metabolismo primario per determinare il momento ottimale per la raccolta. L'approccio tradizionale prevede la considerazione di un campione ritenuto rappresentativo del grappolo che viene definito selezionando acini con un peso simile, nonché una concentrazione media di zuccheri e acidi organici. Tuttavia, l'eterogeneità degli acini all'interno del grappolo è stata scarsamente considerata probabilmente per la mancanza di strumenti analitici idonei, e sta diventando un tema centrale della ricerca sperimentale in viticoltura. La mancata considerazione della plasticità fenotipica e fisiologica degli acini del grappolo all'interno degli strumenti previsionali per l'individuazione del momento ottimale per la raccolta rappresenta un punto debole della ricerca condotta in passato. E' necessario quindi un approccio modellistico che cambi prospettiva, considerando esplicitamente tale eterogeneità, in linea con le evidenze sperimentali prodotte dalle piattaforme di fenotipizzazione negli ultimi anni. Un possibile approccio a questo problema è la definizione di distribuzioni statistiche relative alle caratteristiche degli acini, che comprendano parametri medi calcolati dai dati aggregati considerando la loro variabilità (Bigard et al., 2019; Shahood et al., 2020). Attraverso il campionamento più o meno randomico all'interno di queste popolazioni, è

quindi possibile gestire la variabilità dei tratti metabolici, tracciando una popolazione di acini relativa ai grappoli della varietà oggetto di studio. E' questo il concetto fondante del modello BERRY PRIMARY METABOLISM (BEPRIME), che sposta l'attenzione dal grappolo medio al singolo acino, tramite un approccio misto statistico e basato su processi per definire le dinamiche caratterizzanti il metabolismo primario della vite in fase di maturazione. Il lavoro qui presentato rappresenta un punto di partenza per elaborare successive analisi che permetteranno di valutare la formazione di metaboliti secondari principali che conferiscono al vino le sue peculiari caratteristiche, per fornire indicazioni tempestive rispetto alla qualità attesa in fase di vinificazione.

## Materiali e Metodi

Abbiamo studiato la dinamica concettuale del metabolismo primario della vite in fase di maturazione, concentrandoci sulla successione delle fasi fenologiche, l'ingrossamento dell'acino, l'accumulo di zuccheri e la degradazione degli acidi malico e tartarico. In particolare, l'obiettivo è stato quello di riprodurre l'elevata asincronia fenotipica degli acini all'interno del grappolo, tema di ricerca che sta rivoluzionando la tradizionale concezione di maturazione omogenea (Daviet et al., 2023; Shi et al., 2023). Il risultato è la realizzazione di un modello, BEPRIME (Berry PRIMARY METabolism), in grado di simulare esplicitamente la variabilità intrinseca nel grappolo d'uva, tramite la definizione di una popolazione di acini, ciascuno dei quali viene caratterizzato da parametri campionati da distribuzioni statistiche rappresentative della variabilità osservata. La dinamica dello sviluppo fenologico e l'espressione del metabolismo primario di ogni acino vengono quindi simulate su base statistica tramite campionamento random da distribuzioni uniformi, e viene quindi riprodotto secondo una logica basata su processi dapprima a livello potenziale, e poi considerando l'influenza dello stress termico ed idrico. Il prototipo del modello BEPRIME è scritto in C# (.NET Core) e simula la crescita di peso dell'acino, l'accumulo di zuccheri, l'accumulo e la degradazione degli acidi malico e tartarico. Lo sviluppo fenologico dell'acino è simulato a partire da cardinali termiche secondo un approccio non lineare (Yan and Hunt, 1999), settando la durata complessiva del periodo di maturazione (BBCH 65-89) ed il termine della fase di formazione dell'acino (BBCH 79). Quando la somma termica dei gradi giorno raggiunge la soglia termica fissata per la fase in analisi, il modello segnala il verificarsi di tale fase e inizia il calcolo per la fase successiva. Le seguenti fasi sono state definite: post fioritura, inizio ingrossamento, fine ingrossamento, lag, invaiatura, ammorbidimento, maturazione ed appassimento dell'acino. Le dinamiche di crescita ed il metabolismo degli zuccheri e degli acidi si innestano sulla riproduzione dello sviluppo fenologico e sono simulate secondo curve Gompertz: la crescita dell'acino viene riprodotta da una doppia dinamica (eq. 1)

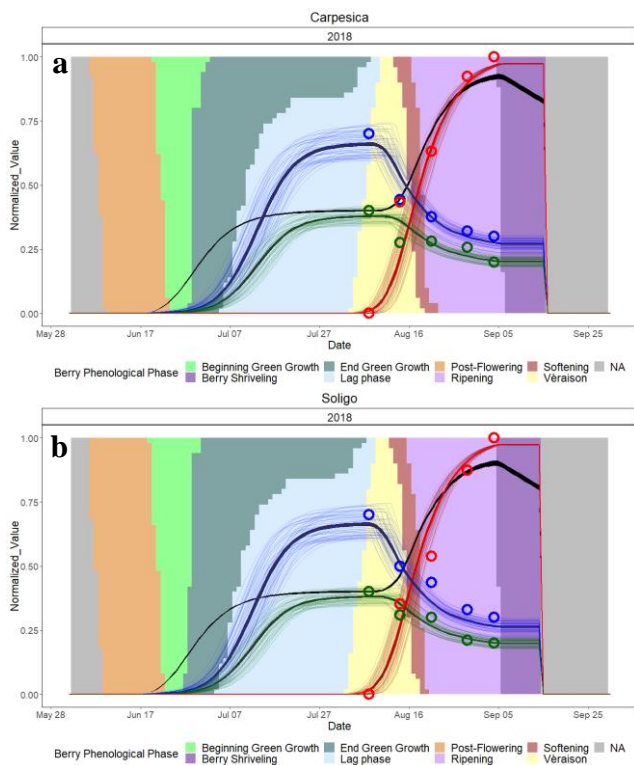
$$Y = Ae^{-e^{-\frac{\mu(t-t_0)}{A}}} \quad (1)$$

seguita da una decrescita lineare nella fase di appassimento; l'accumulo degli zuccheri è stato simulato secondo una singola curva a partire dall'invaiatura, mentre l'accumulo di acido malico e tartarico viene seguito dalla loro degradazione con un'equazione esponenziale inversa.

La concentrazione degli zuccheri è stata quindi desunta dal rapporto tra il peso dell'acino ed il loro contenuto di zucchero variabile durante la maturazione. Il tasso giornaliero di variazione potenziale è stato quindi derivato e modificato in funzione delle specifiche condizioni termiche e di richiesta evapotraspirativa con delle funzioni guidate da parametri che riproducono la fisiologia della vite. I dati meteo giornalieri usati in input per le simulazioni sono stati ricavati dal dataset MERIDA, il cui "downscaling dinamico" utilizza i dati di rianalisi globali ERA5 come input per il modello Weather Research and Forecasting NCAR/MMM.

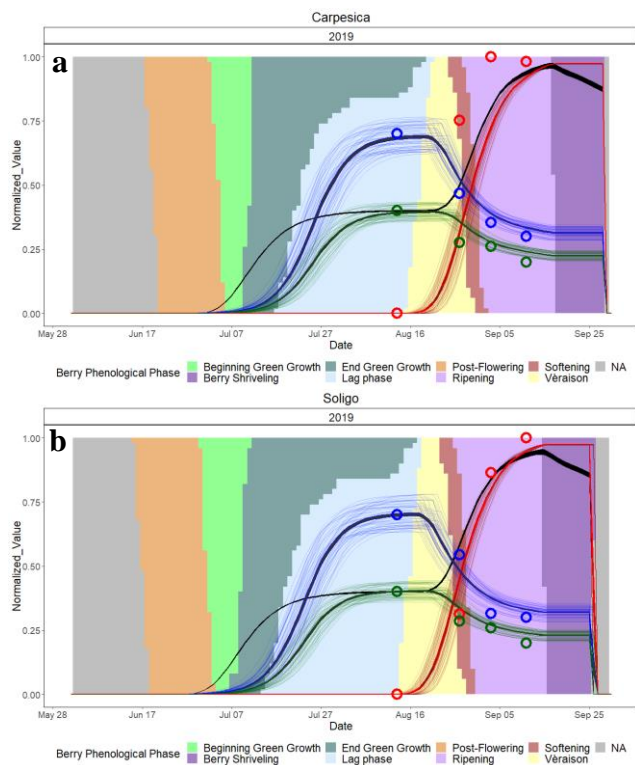
## Risultati, discussioni e conclusioni

La coerenza delle simulazioni effettuate con BEPRIME è stata verificata confrontando i risultati con alcuni dataset scaricati dal sito web del Consorzio Conegliano Valdobbiadene DOCG e relativi alla varietà Glera (2018-2020). La calibrazione è stata svolta manualmente e si è concentrata sulle dinamiche misurate di gradi Brix, acido malico (g/l), acido tartarico (g/l) nell'ultima fase di sviluppo dell'acino detta curva di maturazione, che precede la vendemmia (circa 30±5 giorni). Sono state quindi settate le soglie termiche per la riproduzione dello sviluppo fenologico ed i parametri delle funzioni che modulano l'espressione dei parametri biochimici considerati. Nelle figura 1 e 2 vengono mostrati i risultati della calibrazione in due zone con differenti altimetrie, Carpesico e Soligo nel 2018 e nel 2019, annata quest'ultima caratterizzata da temperature più elevate di circa 1°C rispetto all'annata precedente. Carpesico si trova ad 170 m s.l.m mentre Soligo, che dista 16 km in linea d'aria da Carpesica, ha un'altimetria di 152 m s.l.m. Nell'anno 2018 (fig.2a-2b) tra Soligo e Carpesica è stato registrato un 'delta' termico medio nel periodo che rappresenta la seconda fase di crescita dell'acino (06-01-2018/08-31-2018) pari +0.5 °C. Il modello BEPRIME è stato in grado di riprodurre i dati osservati (cerchi) e l'andamento medio dei quattro parametri considerati in entrambe le zone, attraverso la simulazione di un grappolo di 50 acini. Nel 2019, annata nella quale si è registrato un delta termico pari a +0.91°C tra Soligo e Carpesica, il modello ha evidenziato un leggero ritardo nell'accumulo di zuccheri. Nelle figg. 3a-3b si sono registrate soprattutto nella zona di Carpesica, differenze nell'accumulo degli zuccheri rispetto al modello dovute probabilmente alle temperature più fredde che hanno determinato un accumulo meno rapido degli zuccheri con un conseguente ritardo nella maturazione, mentre nella zona di Soligo seppur ci siano state temperature più basse rispetto al 2018, l'accumulo degli zuccheri è avvenuto in maniera coerente rispetto a quanto simulato dal modello. Le differenze di temperature registrate nei due anni, con un 2018 più caldo rispetto al 2019 ha portato ad un anticipo nella maturazione in entrambe le località.



**Fig.1 - Andamento fenologico del grappolo (50 acini) nell'anno 2018; a) Carpesica, b) Soligo.** Andamento delle concentrazioni di zuccheri (linea rossa), acido malico (linea blu), acido tartarico (linea verde) e peso dell'acino (linea nera). I cerchi indicano i dati misurati per Glera, mentre per il peso dell'acino sono presentate solo le dinamiche simulate.

Sebbene questo lavoro sia ancora in fase di sviluppo preliminare, la rappresentazione asincrono della fenologia del grappolo risulta un tratto distintivo del modello BEPRIME, in accordo con i più recenti studi di fenotipizzazione condotti in Francia. I limiti registrati in questa prima fase di sviluppo sono dovuti principalmente alla disponibilità di dataset di dati misurati, che sono fondamentali per verificare i risultati delle simulazioni in condizioni pedoclimatiche differenti, garantendo così robustezza all'approccio modellistico. Lo scopo principale di questa è quello di mettere a punto un sistema previsionale in grado di prevedere la qualità degli acini all'interno di una popolazione, al fine di poter fornire indicazioni quantitative rispetto alla qualità attesa in fase di vinificazione. A questa fase di sviluppo seguirà quindi una rappresentazione modellistica dei metaboliti secondari principali da cui si originano le peculiari caratteristiche organolettiche del vino, in particolare del Prosecco. Nonostante le criticità derivate soprattutto dalla difficoltà nel reperire dataset affidabili di dati misurati, questo lavoro offre una visione modellistica in



**Fig.2 - Andamento fenologico del grappolo (50 acini), anno 2019; a) Carpesica, b) Soligo.** Andamento delle concentrazioni di zuccheri (linea rossa), acido malico (linea blu), acido tartarico (linea verde) e peso dell'acino (linea nera). I cerchi indicano i dati misurati per la cv Glera, mentre per il peso dell'acino sono presentate solo le dinamiche simulate.

linea con lo stato dell'arte della ricerca in viticoltura, consentendone l'estensione ad altre varietà oltre a Glera.

## Ringraziamenti

“AGRARSENSE” Smart, Digitalized components and systems for data-based Agriculture and Forestry OB/FU 1.99.09.29.00.A - 1.99.09.29.00.R - 1.99.09.29.00.S - CUP C37G22000620002

## Bibliografia

- Bigard, A., Romieu, C., Sire, Y., Veyret, M., Ojeda, H., Torregrosa, L., 2019. The kinetics of grape ripening revisited through berry density sorting. *Oeno One* 53(4).
- Coombe, B., 1988. *Grape Phenology In: Viticulture Vol. 1, Resources*. Ed. BG Coombe and PR Dry. Australian Industrial Publishers Pty Ltd, Adelaide, SA, Australia.
- Coombe, B.G., 1960. Relationship of growth and development to changes in sugars, auxins, and gibberellins

- in fruit of seeded and seedless varieties of *Vitis vinifera*. *Plant physiology* 35(2), 241.
- Daviet, B., Fournier, C., Cabrera-Bosquet, L., Simonneau, T., Cafier, M., Romieu, C., 2023. Ripening dynamics revisited: an automated method to track the development of asynchronous berries on time-lapse images. *Plant Methods* 19(1), 146.
- Gouot, J.C., Smith, J.P., Holzzapfel, B.P., Barril, C., 2019. Impact of short temperature exposure of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz grapevine bunches on berry development, primary metabolism and tannin accumulation. *Environmental and experimental botany* 168, 103866.
- Letchov, G., Roychev, V., Keranova, N., 2021. Metrics for studying berry growth kinetics in seedless grape cultivars (*Vitis vinifera* L.). *OENO One* 55(1), 119-131.
- Li, M., Su, J., Yang, H., Feng, L., Wang, M., Xu, G., Shao, J., Ma, C., 2023. Grape Tartaric Acid: Chemistry, Function, Metabolism, and Regulation. *Horticultrae* 9(11), 1173.
- Meléndez, E., Ortiz, M., Sarabia, L., Íñiguez, M., Puras, P., 2013. Modelling phenolic and technological maturities of grapes by means of the multivariate relation between organoleptic and physicochemical properties. *Analytica Chimica Acta* 761, 53-61.
- Michelini, S., Tomada, S., Kadison, A.E., Pichler, F., Hinz, F., Zejfart, M., Iannone, F., Lazazzara, V., Sanoll, C., Robatscher, P., 2021. Modeling malic acid dynamics to ensure quality, aroma and freshness of Pinot blanc wines in South Tyrol (Italy). *Oeno One* 55(2), 159-179.
- Sadras, V.O., McCARTHY, M.G., 2007. Quantifying the dynamics of sugar concentration in berries of *Vitis vinifera* cv. Shiraz: a novel approach based on allometric analysis. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 13(2), 66-71.
- Shahood, R., Torregrosa, L., Savoi, S., Romieu, C., 2020. First quantitative assessment of growth, sugar accumulation and malate breakdown in a single ripening berry. *Oeno One* 54(4), 1077-1092.
- Shi, M., Savoi, S., Simonneau, T., Doligez, A., Pantin, F., Torregrosa, L.J.-M., Romieu, C., 2023. Impact of water deficit on single grapevine berry ripening. *bioRxiv*, 2023.2009.2018.557818.
- Yan, W., Hunt, L., 1999. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Annals of Botany* 84(5), 607-614.

# AN INTEGRATED PLATFORM FOR INDICATORS AND MODELS APPLICATION TO AGROMETEOROLOGICAL DATA *UNA PIATTAFORMA INTEGRATA PER L'APPLICAZIONE DI INDICATORI E MODELLI A DATI AGROMETEOROLOGICI*

Paola Battilani<sup>1</sup>, Daniele Trincherò<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Università Cattolica del Sacro Cuore – Dipartimento di Scienze delle produzioni vegetali sostenibili, Via E. Parmense 84, 29122, Piacenza (PC)

<sup>2</sup> Politecnico di Torino – Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni – iXem Labs, corso Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino (TO)

[paola.battilani@unicatt.it](mailto:paola.battilani@unicatt.it); [daniele.trincherò@polito.it](mailto:daniele.trincherò@polito.it)

## Abstract

The Spoke 6 of Agritech aims to introduce management models supported by digital tools for the acquisition, transmission, management, and storage of data, to trigger sustainability and resilience in agriculture. Six units, scattered in Italy, are developing a platform aimed to calculate agronomical indicators, starting from data collected through field observations, laboratory tests, punctual sensors and remote investigations by drone and satellite. Among these sources, meteorological data are paramount input. These parameters are primarily available through public regional meteorological networks, but good opportunities are offered also by weather stations deployed by companies and private individuals. To harmonize data collection, a network to retrieve data from private stations, usable by all operational units, in some cases with coverage extended to a full province or region, is being realized. An automatic procedure to acquire regional meteorological data is being constructed.

## Parole chiave

Piattaforme agronomiche, Centraline Agrometeorologiche, Internet delle Cose, Sistemi di Supporto alle Decisioni

## Keywords

Agronomical Platforms, Agrometeorological Stations, Internet of Things, Decision Support Systems

## Introduzione

Lo Spoke 6 del National Research Centre for Agricultural Technologies (Agritech) ha come obiettivo l'introduzione di modelli gestionali a favore di sostenibilità e resilienza nelle aziende agricole. Allo Spoke contribuiscono sei unità di ricerca, l'Università Cattolica del Sacro Cuore, il Politecnico di Torino, l'Università degli Studi di Torino, l'Università Politecnica delle Marche, l'Università di Genova, l'Università di Foggia. Per raggiungere lo scopo istituzionale dello Spoke, le sei unità stanno sviluppando una piattaforma che offrirà la possibilità di calcolare indicatori, applicare modelli di predizione e algoritmi di supporto alle decisioni, a partire da dati raccolti mediante osservazioni in campo, prove di laboratorio, sensori puntuali e monitoraggi da remoto con drone e satellite. Fra tutti i dati potenzialmente utilizzabili, particolare rilevanza rivestono quelli agrometeorologici, misurabili per tramite di stazioni meteo o di singoli sensori, e per i quali la letteratura offre un ampio panorama di indicatori e modelli applicabili (Fioravanti et al., 2013).

La principale fonte di parametri agrometeorologici è rappresentata dalla Rete Agrometeorologica Nazionale e dalle Reti Agrometeorologiche Regionali, che insieme forniscono una mappatura delle zone a principale vocazione agricola, realizzata mediante centraline meteo automatizzate. Le grandezze agrometeorologiche rilevate dalle centraline sono varie: temperatura, precipitazione, umidità relativa, bagnatura fogliare, vento, irraggiamento solare, ecc., e consentono il monitoraggio della stagione agraria con campionamento su una scala compresa tra i 10 e i 20 km. I

dati rilevati sono acquisiti con cadenza oraria e sottoposti a sistematici controlli di correttezza e consistenza fisica e meteorologica prima di essere archiviati nelle rispettive banche dati, per essere successivamente utilizzati per il monitoraggio agrometeorologico. Le stesse stazioni sono verificate e sottoposte a taratura periodica, in modo da garantire la congruità e affidabilità del dato.

Recentemente, grazie ai progressi della tecnologia elettronica e delle telecomunicazioni, si è assistito a una crescita del numero di stazioni meteo posizionate da enti consortili, associazioni di categoria, soggetti privati. Questo ha permesso di ottenere dati agrometeorologici localizzati, in alcuni casi con passo di campionamento a scala di singolo appezzamento. In questo caso, la gestione del dato acquisito è destrutturata, le piattaforme di consultazione non sono pubbliche e la riferibilità del dato non è garantita.

Di conseguenza, i dati ottenuti con le Reti Agrometeorologiche Nazionali e Regionali e quelli ottenuti mediante installazioni private non sono armonizzati e non è possibile calcolare indicatori agronomici o applicare modelli predittivi, a meno di procedere in modo indipendente, duplicando le risorse e il tempo di consultazione e inibendo possibili utili confronti incrociati.

Per questo motivo, si è deciso di costruire una piattaforma di raccolta, consultazione e analisi unificata, capace sia di collegarsi con le reti pubbliche, sia di raccogliere dati dalle stazioni private, abbinandoli al calcolo di indicatori e all'applicazione di modelli. La piattaforma implementa una dashboard di indicatori agronomici, dove la componente agrometeorologica è importante ma non esclusiva.



## Materiali e Metodi

### *Gestione dei dati agrometeorologici*

Per quanto riguarda la gestione dei dati agrometeorologici, la realizzazione della piattaforma unificata passa attraverso tre implementazioni. La prima è rappresentata dalla costruzione di un sistema di interfacciamento con i database nazionale e regionali dei dati misurati dalle stazioni inserite nelle rispettive reti. La seconda si è basata sull'individuazione e successiva implementazione di un sistema di raccolta dati da sensori privati, aperto, ridondato e applicabile in ogni zona del territorio rurale, anche quelle affette da divario digitale. La terza passa attraverso la realizzazione della citata dashboard per la consultazione e analisi dei dati raccolti.

L'integrazione dell'applicazione Agritech con il sistema di monitoraggio delle stazioni meteo delle reti regionali consiste nell'eseguire le richieste ad uno specifico server che contiene tutti i dati memorizzati da una specifica rete. Si tratta, pertanto, di una estrazione di dati con un classico paradigma client/server. L'esempio attualmente disponibile riguarda la regione Piemonte che espone un servizio web di tipo SOAP (Simple Object Access Protocol), che può essere interrogato da un relativo client (che risiede tipicamente su una macchina remota). Questo sistema può operare per mezzo di diversi protocolli, ma in questo specifico caso viene sfruttato il protocollo HTTP. Una specifica API può essere richiamata per estrarre i dati istantanei, ogni 10 minuti, di una specifica stazione in un dato lasso di tempo. A questo scopo, si è implementata la seguente strategia: è stato programmato uno scheduler che esegue periodicamente l'estrazione e la memorizzazione dei dati sul database remoto dell'applicazione che si sta integrando.

Per quanto riguarda la raccolta dalle stazioni private, sono state valutate diverse soluzioni disponibili sul mercato: Narrow Band IoT (Nb-IoT), Bluetooth Low Energy (BLE), UltraNarrowBand (UNB) e LoRaWAN. La scelta è ricaduta su quest'ultima, in considerazione dei seguenti fattori:

1. formato di rete di tipo LP-WAN e quindi possibilità di ricezione cooperativa e quindi ridondata;
2. copertura di aree di grandi dimensioni, con possibilità di raggiungere i 100 km in linea di vista e quindi soluzione ideale contro il divario digitale;
3. configurazioni di rete semplici, del tipo a stella e quindi possibilità di gestire aree grandi senza necessità di ripetitori;
4. gestione intrinseca dell'integrità del dato e della crittografia;
5. accesso al canale radio con conferma del dato ricevuto;
6. capacità di trasmettere pacchetti di dati di dimensione adeguata alla rilevazione agrometeorologica;
7. consumi energetici molto bassi;
8. costi di esercizio contenuti, in considerazione del fatto che LoRa utilizza frequenze non licenziate ad accesso libero;

9. formato di rete aperto e quindi scalabile senza necessità di ricorrere ad un operatore esterno.

Tutti gli altri sistemi presi in considerazione presentavano limitazioni su almeno due dei punti precedentemente elencati: Nb-Iot sui punti 8 e 9, BLE sui punti 1, 2 e 3, UNB sui punti 4, 5, 6 e 9. Eventuali ulteriori sistemi presenterebbero criticità maggiori rispetto a quelli considerati in questo confronto.

Le stazioni private sono state quindi configurate in modo uniforme su tutto il territorio oggetto di indagine, coinvolgendo le seguenti Regioni: Piemonte, Liguria, Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Marche, Toscana, Sardegna, Puglia. Le stazioni sono state realizzate con una scheda che integra il chip Murata modello CMWX1ZZABZ-093, che comprende un microcontrollore STM32L e una radio LoRa SX1276. Il chip è interfacciabile con diversi sensori agro-meteo, individuati nel modo seguente:

- sensore di temperatura e umidità dell'aria prodotto da Sensirion modello SHT31, sensibilità 0.1°C, 1%;
- sensore di temperatura e umidità del terreno prodotto da DeltaOhm, modello HD3910.1.A.5, a due o tre elettrodi, sensibilità 0.1°C, 1%;
- sensore di vento prodotto da Navis, modello WSS 100/REED, sensibilità 1 m/s;
- sensore di pioggia prodotto da Pronamic, modello Professional 500.320, sensibilità 0.2 mm;
- piranometro passivo prodotto da Apogee, modello SP-110, sensibilità 1 W/mq;
- sensore di bagnatura fogliare capacitivo a doppia faccia, realizzato dal Politecnico di Torino per gli scopi di progetto (Filipescu et al, 2023), sensibilità 1%.

### *Dashboard*

L'attività dello Spoke 6 prevede lo sviluppo di una dashboard che offrirà la possibilità di raccogliere tutti i dati ottenuti dal progetto, o comunque resi disponibili dai partners, uniformarli, conservarli in modo ordinato, visualizzarli nelle modalità più appropriate. Inoltre, attraverso la dashboard sarà possibile elaborare i dati con diverse finalità, quali il calcolo di indicatori, o l'applicazione di modelli di predizione e sistemi di supporto alle decisioni (DSS). Gli indicatori e i modelli previsionali, integrati nei DSS, sono gli strumenti fondamentali per la realizzazione degli obiettivi del progetto.

La raccolta dati, nell'ambito del progetto, riguarda sia le fonti bibliografiche che lo svolgimento di prove *ad hoc* in laboratorio, in celle climatiche, in serra e in pieno campo e ovviamente i dati agrometeorologici. In ciascuno dei contesti citati, sono stati individuati fattori di interesse, declinati in diversi livelli, e i risultati saranno valutati sulla base degli indicatori definiti.

I dati possono essere raccolti mediante osservazioni o misurazioni dirette, impiego di sensori puntuali e monitoraggi da remoto con drone e satellite. Fra tutti i dati potenzialmente utilizzabili, particolare rilevanza rivestono comunque quelli agrometeorologici.

Al fine di coprire tutte le finalità del progetto e le diverse tipologie e modalità di raccolta dei dati, sono state definite otto categorie di indicatori che comprendono: misure ambientali e del suolo, quantità e qualità della produzione, indici di vegetazione, impatto di insetti e malattie, efficienza degli input e impatto ambientale. In totale, sono stati definiti più di cento indicatori e diversi di questi coinvolgono dati meteorologici. Alcuni indicatori si riferiscono semplicemente ai dati raccolti, mentre altri sono ottenuti dalla combinazione di più indicatori attraverso una apposita formula. Tra tutti gli indicatori raccolti saranno individuati quelli più adatti nella definizione delle performance dei sistemi studiati (*key performance indicators-KPI*).

Nell'ambito del progetto sono state considerate diverse colture, in particolare cereali (frumento, mais, riso), colture industriali (pomodoro, girasole), colture arboree (melo, vite, olivo), ma anche basilico, lattuga, cece e fragola.

Le prove in corso riguardano sia specifiche colture, ma anche colture in rotazione, con successioni differenti a seconda dell'area geografica, essendo la partnership rappresentativa di un gradiente territoriale nazionale.

Riguardo ai modelli previsionali, questi sono rivolti all'ottimizzazione e automazione dell'irrigazione, alla previsione della fenologia delle colture, della produzione e delle malattie, in termini di comparsa dei sintomi, incidenza e gravità, definizione delle soglie di intervento di difesa, come pure di eventuali contaminazioni da micotossine.

## Risultati e discussione

### Rete LP-WAN

La rete LP-WAN è stata realizzata utilizzando i server di rete di The-Things-Network e i gateways prodotti da Mikrotik, modello LtAP LR8 LTE. La Fig. 1 mostra la mappa dei gateways operativi al 28 aprile 2024, con una situazione in progressiva e costante crescita.

I segnaposto di colore rosso scuro corrispondono a gateways installati specificatamente per il progetto (37 in totale), mentre i segnaposto blu corrispondono a gateways esistenti (80 in totale), installati precedentemente all'esecuzione del progetto e acquisiti per completare la copertura di rete.

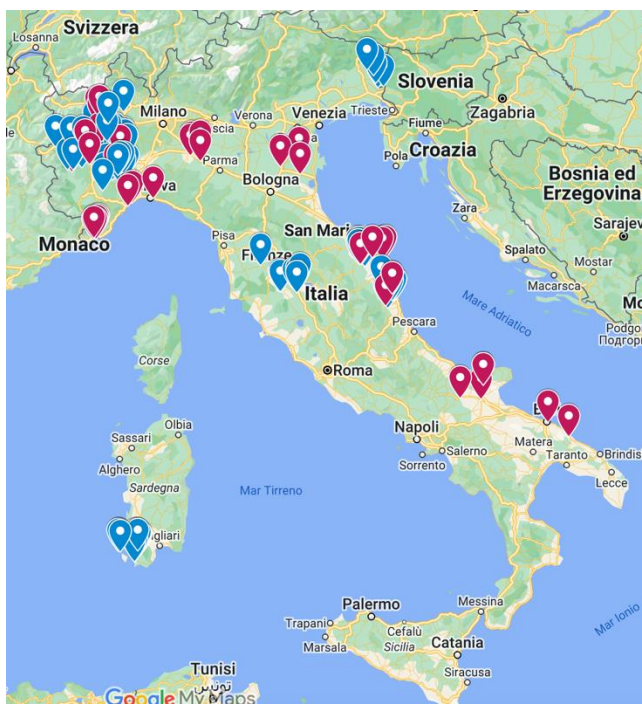


Fig.1 – Mappa dei 37 Gateways LoRaWAN implementati per gli scopi di progetto (in rosso scuro) e degli 80 esistenti e inseriti nel progetto (in blu).

Fig.1 – Map of the 37 LoRaWAN Gateways installed for the project (dark red) and the 80 ones already existing and inserted in the project (blue).

La Fig. 2 mostra due esempi di stazioni meteo realizzate per gli scopi di progetto, installate in vigneti di Settimo Vittone (TO, Piemonte), zona di produzione delle uve nebbiolo. Nel primo caso è stata adottata una soluzione a due radio in filare su supporto plastico, nel secondo si è scelto di abbinare tutti i sensori ad una singola radio fuori filare su palo di legno.

### Dashboard

La dashboard è in fase di realizzazione e sfrutta l'ambiente di sviluppo Apache Superset, che permette di elaborare i dati raccolti, ad esempio calcolando indicatori, e di generare vari tipi di grafici. Sono stati preferiti grafici lineari e istogrammi. La dashboard permette di visualizzare indicatori calcolati a partire da dati raccolti in campo, con drone, da satellite e di tipo agrometeorologico. Per quanto riguarda quest'ultima specifica componente, la dashboard permette di consultare sia i dati grezzi, sia diversi indicatori, tra i quali quelli meteorologici (Fioravanti et al., 2013), a partire dai flussi originati dalle stazioni RAM, e dalle stazioni private.

### Modelli previsionali

Le unità di ricerca stanno contribuendo in diversi modi. In particolare, con l'individuazione di modelli utili per le finalità e le tematiche di interesse per lo spoke, sia disponibili in letteratura che sviluppati in precedenza dai diversi gruppi, ma anche producendo nuovi dati che consentiranno lo



*Fig.2 – Esempio di stazione meteo contenente un sensore di temperatura e umidità del terreno, vento e radiazione solare (sul palo in primo piano), pioggia, temperatura e umidità dell'aria e bagnatura fogliare sul palo in secondo piano a destra.*

*Fig.2 – Example of meteo station containing a sensor of soil temperature/humidity, wind and a pyranometer (foreground), rain gauge, sensor of air temperature/humidity, sensor of leaf wetness (background, right).*

*Stazioni meteo puntuali*

sviluppo di nuovi modelli, o la calibrazione e il miglioramento di modelli esistenti con la scadenza temporale di fine del progetto (2025). Inoltre, è stato fatto un censimento dei modelli previsionali messi a disposizione dai siti delle diverse regioni italiane.

Le varie attività di modellistica riguardano: i) le risorse idriche, sia in termini di razionalizzazione dell'irrigazione in diversi ambienti di coltivazione (serre, coltivazioni fuori suolo e pieno campo) che di stima dell'utilizzo delle risorse idriche da parte dell'agricoltura italiana su scala di campo (Battilani et al., 2004); la previsione della dinamica di crescita della pianta e della resa; la previsione della comparsa e dell'epidemiologia delle malattie, incluse le indicazioni di razionalizzazione degli interventi di difesa.

In tutti i casi, l'input imprescindibile per tutti i modelli è costituito dall'acquisizione di dati meteorologici, aspetto che spesso rappresenta un limite per la loro applicazione.

## Conclusioni

L'attività svolta dallo spoke 6 nell'ambito del Centro Nazionale Agritech rappresenta una grande opportunità per il sistema agricolo italiano. Il coinvolgimento di varie unità di ricerca con competenze differenziate, non solo agronomiche ma anche ingegneristiche, distribuite sul territorio nazionale, è di stimolo ad una visione più ampia dei sistemi agricoli e della loro ottimizzazione. Tutte le attività in corso ruotano intorno all'ottenimento di una base di dati meteorologici con varie scale e modalità di raccolta, ma standardizzate in termini di acquisizione, gestione, elaborazione e utilizzo. Quanto più questa visione ambiziosa sarà condivisa da enti pubblici e privati a favore di un

obiettivo comune, tanto più si potrà considerare lo Spoke 6 un progetto di successo a reale supporto del sistema Italia.

## Ringraziamenti

Studio condotto nell'ambito del Centro Nazionale Agritech, finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU (PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR) – MISSIONE 4 COMPONENTE 2, INVESTIMENTO 1.4 - D.D. 1032 17/06/2022, CN00000022). I punti di vista e le opinioni espresse sono tuttavia solo quelli degli autori e non riflettono necessariamente quelli dell'Unione europea o della Commissione europea. Né l'Unione Europea né la Commissione Europea possono essere ritenute responsabili per essi.

## Bibliografia

- Fioravanti G., Piervitali E., Desiato F., Perconti W., Frascchetti P., 2013. Variazione e Tendenze degli Estremi di Temperatura e Precipitazioni in Italia, ISPRA, Stato dell'Ambiente 37/2013.
- Filipescu, E., Colucci G.P., Trincherò D., 2023. "Advances in Design and Construction of Leaf Wetness Sensors." In 2023 IEEE Conference on AgriFood Electronics (CAFE), 128–131. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10291759/>.
- Saito K., Johnson J.M., Hauser S., Corbeels M., Devkota M., Casimero M. 2023. Guideline for measuring agronomic gain key performance indicators in on-farm trials, v. 1. Excellence in Agronomy for Sustainable Intensification and Climate Change Adaptation Initiative. <https://hdl.handle.net/10568/134668>.
- Battilani P., Elia A., Ledda L., Ridolfi L., Sacile R., Trincherò D. (2024) Soluzioni innovative per l'ottimizzazione della gestione irrigua. Atti del XXVI Convegno Nazionale di Agrometeorologia, L'Aquila, 5–7 giugno 2024.

# ON THE USE OF NDVI TO ESTIMATE LAI IN FIELD CROPS: PRESENTING THE LAIR PACKAGE

## USO DELL'NDVI PER STIMARE IL LAI NEI SEMINATIVI: IL PACCHETTO LAIR

Sofia Bajocco<sup>1\*</sup>, Carlotta Ferrara<sup>2</sup>, Lorenzo Crecco<sup>1</sup>, Nicola Puletti<sup>2</sup>, Simone Bregaglio<sup>1</sup>, Francesco Chianucci<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'analisi dell'Economia agraria – Centro di ricerca Agricoltura e Ambiente, Roma

<sup>2</sup> Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'analisi dell'Economia agraria – Centro di ricerca Foreste e Legno, Roma/Arezzo

\* sofia.bajocco@crea.gov.it

### Abstract

Leaf area index (LAI) is an important biophysical parameter describing vegetation. LAI is typically retrieved from optical remote sensing by empirical models relating LAI to vegetation indices, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). As the relationship between LAI and NDVI is non-linear and crop type dependent, several specific empirical equations relating LAI to NDVI have been developed using field data. This study presented LAIR, an R package to derive LAI from NDVI data from the most comprehensive library of conversion equations. In the package, the range of functions differs on environmental factors, sensors, and vegetation types, allowing flexibility in choosing appropriate options based on specific application, scale of investigation and data availability. We illustrated the use of the package with a case study to compare a generic LAI product with specific NDVI-based LAI estimations. By leveraging empirical knowledge, LAIR enables accurate and context-specific estimation of LAI. The deployment of an open-source R package serves as a valuable tool for aiding researchers in selecting the most appropriate equations for conducting NDVI-to-LAI conversion.

### Parole chiave

seminativi; indice di area fogliare; indice di verde normalizzato; telerilevamento satellitare

### Keywords

field crop; leaf area index; normalized difference vegetation index; remote sensing

### Introduzione

L'indice di area fogliare (LAI; Chen e Black 1992), è un parametro chiave per prevedere la fotosintesi, l'evapotraspirazione e la crescita delle coperture vegetali. Poiché la copertura vegetale reagisce alle perturbazioni più prontamente agli altri componenti delle piante, il LAI è anche frequentemente utilizzato per il monitoraggio continuo della vegetazione, essendo riconosciuto come una Variabile Climatica Essenziale (ECV) dal Sistema Globale di Osservazione del Clima (GCOS).

Il LAI è direttamente correlato alla dinamica di crescita delle colture, alla geometria della copertura vegetale, così come ai processi ecologici su scala globale e regionale. Il LAI è spesso utilizzato nella modellazione dei processi biofisici e rappresenta un input chiave per le attività di stima della crescita delle colture e delle previsioni di resa. La valutazione affidabile del LAI è quindi un tema fondamentale.

Il LAI può essere raccolto sul campo, utilizzando metodi ottici diretti o indiretti (Yan et al. 2019, Chianucci 2020). Tuttavia, le misurazioni *in situ* sono laboriose e poco pratiche per vaste aree. Il telerilevamento è emerso come una soluzione, fornendo dati LAI tempestivi e scalabili su vaste estensioni spaziali, dal paesaggio alla scala globale. Nonostante sensori attivi come LiDAR e SAR abbiano recentemente attirato l'attenzione per il monitoraggio del LAI (Wang et al. 2020), la maggior parte delle applicazioni considera ancora il telerilevamento ottico passivo (Chianucci et al. 2016; Fang et al. 2019; Xie et al. 2019). Gli avanzamenti nell'infrastruttura di telerilevamento hanno

portato a miglioramenti rilevanti nella mappatura e nel monitoraggio della dinamica delle colture, così come nelle previsioni di resa delle colture. Il vantaggio nell'utilizzare una tecnica di telerilevamento è la sua applicabilità a diverse scale, in base all'obiettivo dello studio e al sensore utilizzato: dalle applicazioni globali per studi agro-ecologici e agro-climatici, alla scala sub-regionale per l'agricoltura di precisione.

I prodotti LAI globali attuali sono stimati da vari dati satellitari (Fang et al., 2019a; Liang e Wang, 2019), come l'Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR), il Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), e lo SPOT/VEGETATION. Gli algoritmi di recupero di questi prodotti LAI si basano principalmente su metodi fisici o statistici. Al contrario, i metodi basati sul campo tipicamente derivano il LAI da equazioni empiriche che correlano il LAI ad alcuni indici di vegetazione (VI). Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) è tra i VI più ampiamente utilizzati nel monitoraggio della vegetazione, poiché è semplice e può essere derivato dalla più ampia gamma di sensori multispettrali attualmente disponibili. Questo teoricamente consente un recupero più coerente del LAI da strumenti di telerilevamento ottico passivo, che vanno dallo spettrometro da campo fino all'immagine multispettrale da drone, aerea e satellitare. Tuttavia, la relazione tra LAI e NDVI è essenzialmente non lineare e sensibile al tipo di vegetazione, alle condizioni e alla densità della copertura. Pertanto, molte equazioni di conversione sono state proposte e pubblicate nella letteratura, derivate da applicazioni in diverse regioni, su



piante diverse e con sensori diversi (Bajocco et al., 2022; Xu et al. 2022; Mthembu et al. 2023).

Basandosi sul lavoro di Bajocco et al. (2022), che hanno compilato una libreria completa di formule di conversione NDVI-to-LAI tramite uno screening bibliografico, è stato sviluppato il pacchetto LAIR R e utilizzato per calcolare il LAI dall'NDVI. L'obiettivo di questo studio è quindi: (i) calcolare il LAI utilizzando il pacchetto LAIR R, impiegando l'NDVI e un insieme di funzioni empiriche, e (ii) confrontare un prodotto LAI generico con stime specifiche del LAI basate sull'NDVI considerando diverse condizioni ambientali, tipi di vegetazione, tipi di sensore, risoluzioni spaziali e forme di equazione.

## Materiali e Metodi

### Utilizzo di LAIR

Il pacchetto LAIR fornisce uno strumento semplice per implementare le formule di conversione disponibili in questa libreria (<https://cran.r-project.org/web/packages/LAIR>). Il pacchetto LAIR può essere installato da CRAN nel seguente modo:

```
install.packages('LAIR')
```

La versione di sviluppo di LAIR può essere installata utilizzando devtools (Wickham et al. 2021):

```
install.packages("devtools")
devtools::install_git("https://gitlab.com/fchianucci/LAIR")
```

Una singola funzione NDVI2LAI() consente di selezionare la formula o le formule più adatte filtrate sui tipi di vegetazione disponibili, sui biomi e sugli attributi del sensore, e di applicare l'equazione o le equazioni di conversione a input raster o numerici. Se non vengono considerati argomenti, la funzione implementa per impostazione predefinita tutte le funzioni disponibili. La funzione consente di importare un raster di input o un vettore numerico. L'elenco di tutte le equazioni NDVI2LAI disponibili è stato compilato da Bajocco et al. 2022 e può essere visualizzato digitando NDVI2LAIeq, il che consente di vedere anche le opzioni disponibili per ciascun parametro di filtro. Di seguito viene mostrato un insieme selezionato di funzioni e argomenti.:

```
library(LAIR)
head(NDVI2LAIeq)

#> # A tibble: 6 × 11
#>   Function.ID      F.ID Plant.Category Plant.Type
#>   <chr>           <chr> <chr> <chr>
#>   <chr>           <chr>
#> 1 Johnson_et_al_2001 F001 Crop Permanent
#>   Vineyard Mediterranean F...
#> 2 Wilson_Meyer_2007 F002 Crop Summer
#>   Maize Temperate Grass...
#> 3 Fei_et_al_2012 F003 Crop Summer
#>   Maize Temperate Broad...
#> 4 Tan_et_al_2020_a F004 Crop Winter
#>   Wheat Temperate Broad...
#> 5 Tan_et_al_2020_b F005 Crop Winter
#>   Wheat Temperate Broad...
#> 6 Tan_et_al_2020_c F006 Crop Winter
```

```
Wheat      Temperate Broad...
#> # i 5 more variables: Location.Country <chr>, Senso
#>   r.Name <chr>,
#> #   Sensor.Platform <chr>, Sensor.Resolution <dbl>,
#> #   Sensor.ResolutionClass <chr>
```

### Esempi di applicazione di LAIR: dati LAI basati su NDVI generici vs specifici

To compare generic and specific LAI estimations and to test the applicability of the LAIR package, we used barley and maize as representative case studies of fall-winter and summer crops. The study focused on selected areas where confidence in the cultivated crop was ensured to minimize spurious pixels and signal noises, while preserving meaningful spatial heterogeneity. We referred to the maize and barley cadastral maps of 2018 provided by the Italian National Statistics Institute (ISTAT) and selected two regions where the field coverage was largely homogeneous: barley in Southern Italy (Apulia, Mediterranean biome) and maize in Northern Italy (Veneto, Temperate biome). For these study areas, we referred to the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data both for LAI and for NDVI, in order to ensure consistency between the generic and the specific LAI source. We downloaded the LAI and NDVI data from January to December 2018 for maize and from October 2018 to July 2019 for barley.

The generic Global Land Surface Satellite (GLASS) LAI product from MODIS surface reflectance data is developed using the bidirectional long short-term memory (Bi-LSTM) model. The model takes advantage of the existing global LAI products and the temporal and spectral information of MODIS surface reflectance effectively (Liang et al., 2021; Xiao et al., 2014). In this study, we used the latest version (Version 6) of GLASS LAI product at the 250-m resolution and a temporal resolution of eight days, which is based on a deep learning approach (Ma et al., 2022). LAI images for the selected crop study areas were downloaded from <http://www.glass.umd.edu/Download.html>.

For computing specific NDVI-based LAI data, MODIS NDVI images for the selected crop study areas were downloaded from the Google Earth Engine platform: <https://earthengine.google.com> (Gorelick et al., 2017), with a spatial resolution of 250-m and a temporal resolution of eight days. NDVI values were converted into LAI using selected equations based on three different use scenarios defined as the intersection between: (i) crop- and biome-specific equations; (ii) crop- and sensor-specific equations; (iii) crop-, biome- and sensor-specific equations.

## Risultati

Le Figure 1 e 2 illustrano esempi di applicazioni del pacchetto LAIR nei due studi di caso agricoli selezionati. I valori massimi di LAI derivati dalle equazioni e dal prodotto MODIS generico non sono stati costantemente in linea con i dati di riferimento della letteratura. In particolare, per la coltivazione di mais in Veneto (valori > 6) e di orzo in Puglia (valori 5 - 5,5), sono state osservate discrepanze. In generale, per entrambe le colture, i profili di LAI stimati utilizzando le equazioni LAIR hanno mostrato una variabilità più



pronunciata all'inizio della stagione rispetto alla curva LAI generica. Questa maggiore sensibilità consente la rilevazione di cambiamenti intra-stagionali delle piante dovuti a stress o disturbi che potrebbero essere oscurati dalla dinamica LAI appiattita di GLASS.

Per quanto riguarda l'orzo (Figura 1), le equazioni specifiche per coltura e sensore e le equazioni specifiche per coltura e bioma hanno garantito una maggiore coerenza sia nei valori del LAI che nella tendenza stagionale (cioè, equazioni "Chahbi et al., 2014"; "Mokhtari et al., 2018"). Le equazioni specifiche per coltura hanno mostrato una curva con un punto di partenza più alto rispetto al LAI generale, raggiungendo infine valori massimi comparabili. È da notare che, tra le quattro equazioni "Afrasiabian et al., 2020", solo quella costruita con MODIS come sensore tendeva a raggiungere i valori massimi di LAI più alti e i valori iniziali di LAI più bassi. Sorprendentemente, l'unica equazione specifica per coltura, bioma e sensore trovata ha mostrato una forte sottostima dei valori di LAI.

Per quanto riguarda il mais (Figura 2), i profili di LAI ottenuti da equazioni specifiche per coltura, bioma e sensore sono stati per lo più consistenti con il LAI generico in termini di valori e tendenza stagionale, con solo poche equazioni tendenti a sottostimare. Le equazioni specifiche per coltura, bioma e sensore, d'altra parte, hanno mostrato una variabilità sostanziale. Rispetto al LAI generico, queste equazioni avevano una propensione a sopravvalutare o sottostimare, mostrando anche una tendenza stagionale distinta; solo poche erano consistenti con il LAI generico. I profili di LAI più realistici, con i valori massimi più alti e con valori iniziali vicini allo zero, erano quelli che non consideravano equazioni specifiche per il sensore (ad esempio, equazioni "Huang et al., 2018b"; "Kross et al., 2015"; "Yonah et al., 2018a e b"; equazioni "Wiatrak et al., 2010b").

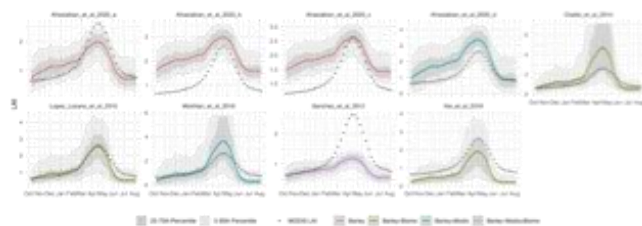


Fig.1 - Profili stagionali di LAI dell'orzo, calcolati con il pacchetto LAIr secondo le equazioni specifiche per la coltura (linea rossa), specifiche per coltura e bioma (linea verde), specifiche per coltura e sensore (linea blu) e specifiche per coltura, bioma e sensore (linea viola). Le ombre grigie indicano il 5°-95° percentile (grigio chiaro) e il 25°-75° percentile (grigio scuro) dei valori di LAI ottenuti dalle equazioni considerate. I punti indicano il profilo stagionale di LAI generico.

Fig.1 – LAI seasonal profiles of barley, computed with LAIr package according to crop-specific (red line), crop- and biome-specific (green line), crop- and sensor-specific (blue line) and crop-, biome- and sensor-specific equations (violet line). The grey shadows indicate the 5–95th (light grey) and the 25–75th percentile (dark grey) of the LAI values obtained

from the equations considered. The dots indicate the generic LAI seasonal profile.

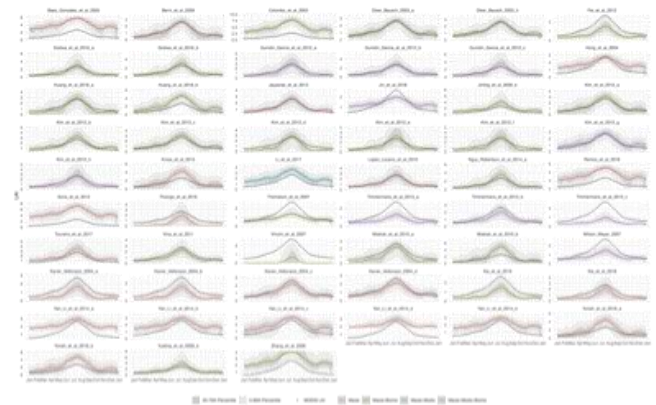


Fig.2 - Profili stagionali di LAI del mais, calcolati con il pacchetto LAIr secondo le equazioni specifiche per la coltura (linea rossa), specifiche per coltura e bioma (linea verde), specifiche per coltura e sensore (linea blu) e specifiche per coltura, bioma e sensore (linea viola). Le ombre grigie indicano il 5°-95° percentile (grigio chiaro) e il 25°-75° percentile (grigio scuro) dei valori di LAI ottenuti dalle equazioni considerate. I punti indicano il profilo stagionale di LAI generico.

Fig.2 – LAI seasonal profiles of maize, computed with LAIr package according to crop-specific (red line), crop- and biome-specific (green line), crop- and sensor-specific (blue line) and crop-, biome- and sensor-specific equations (violet line). The grey shadows indicate the 5–95th (light grey) and the 25–75th percentile (dark grey) of the LAI values obtained from the equations considered. The dots indicate the generic LAI seasonal profile.

## Discussione e Conclusioni

Nella ricerca sul telerilevamento, valutare quantitativamente l'Indice di Area Fogliare (LAI) è una sfida chiave. Le soluzioni esistenti includono opzioni generiche che utilizzano algoritmi software proprietari (ad esempio, ESA-SNAP) o prodotti satellitari (ad esempio, MODIS), così come approcci personalizzati basati su misurazioni sul campo, indici spettrali e modelli empirici. Il nostro contributo si distingue dai prodotti LAI generici incorporando equazioni derivate da articoli specifici, offrendo un valore aggiunto. A differenza dei prodotti generici, il nostro approccio considera la variabilità del LAI tra i tipi di coltura, gli ambienti bioclimatici e i sensori. La varietà di funzioni tiene conto dei fattori ambientali e dei tipi di vegetazione, offrendo flessibilità nella scelta delle opzioni adatte in base alle applicazioni specifiche, alle scale di indagine e alla disponibilità dei dati. Sfruttando la conoscenza empirica, LAIr facilita una stima precisa e contestuale del LAI. L'utilizzo di un pacchetto R open-source rappresenta una risorsa preziosa, assistendo i ricercatori nella selezione delle equazioni più adatte per le conversioni da NDVI a LAI.

LAIr offre una soluzione promettente per semplificare le conversioni da NDVI a LAI, migliorandone l'affidabilità, l'automazione e la trasparenza. Le principali caratteristiche del pacchetto includono:

1. Fornire un repository di equazioni, ciascuna con informazioni dettagliate.
2. Consentire flessibilità nella selezione delle opzioni adatte in base al compromesso tra applicazione specifica, scala di indagine e disponibilità dei dati.
3. Supportare i ricercatori nell'individuare le equazioni più appropriate per condurre le conversioni da NDVI a LAI.
4. Servire come strumento prezioso per una vasta gamma di applicazioni, che spaziano dall'ecologia alla biogeochimica, dalla fisica alla ricerca climatica.
5. Supportare modelli di ecosistemi, valutare i prodotti di telerilevamento, facilitare confronti tra studi sul campo e altre applicazioni.

## Bibliografia

- Akima, H. (1970). A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the ACM (JACM)*, 17(4), 589-602.
- Bajocco, S., Ginaldi, F., Savian, F., Morelli, D., Scaglione, M., Fanchini, D., Raparelli, E. and Bregaglio, S.U.M., 2022. On the use of NDVI to estimate LAI in field crops: Implementing a conversion equation library. *Remote Sensing*, 14(15), p.3554. <https://doi.org/10.3390/rs14153554>.
- Chen, J.M. and Black, T.A., 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 15(4), pp.421-429. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x>.
- Chester, D.L. (1990). Why Two Hidden Layers are Better than One, *IJCNN, International Joint Conference on Neural Networks*, pp. 265-268.
- Chianucci, F., 2020. An overview of in situ digital canopy photography in forestry. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(3), pp.227-242. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0055>.
- Chianucci, F., Disperati, L., Guzzi, D., Bianchini, D., Nardino, V., Latri, C., Rindinella, A. and Corona, P., 2016. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 47, pp.60-68. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.005>.
- Fang, H., Baret, F., Plummer, S. and Schaepman-Strub, G., 2019. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 57(3), pp.739-799. <https://doi.org/10.1029/2018RG000608> (<https://doi.org/10.1029/2018RG000608>).
- Fritsch, F. N., & Carlson, R. E. (1980). Monotone piecewise cubic interpolation. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 17(2), 238-246.
- Funahashi, K. I. (1989). On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. *Neural networks*, 2(3), 183-192.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*.
- Hecht-Nielsen, R. (1992). Theory of the backpropagation neural network. In *Neural networks for perception* (pp. 65-93). Academic Press.
- Hornik, K. (1991). Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. *Neural networks*, 4(2), 251-257.
- Ma, H., & Liang, S. (2022). Development of the GLASS 250-m leaf area index product (version 6) from MODIS data using the bidirectional LSTM deep learning model. *Remote Sensing of Environment*
- Munoz, E. A., Di Paola, F., & Lanfri, M. A. (2015). Advances on rain rate retrieval from satellite platforms using artificial neural networks. *IEEE Latin America Transactions*, 13(10), 3179-3186.
- Sanò, P., Panegrossi, G., Casella, D., Marra, A. C., Di Paola, F., & Dietrich, S. (2016). The new Passive microwave Neural network Precipitation Retrieval (PNPR) algorithm for the cross-track scanning ATMS radiometer: Description and verification study over Europe and Africa using GPM and TRMM spaceborne radars. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(11), 5441-5460.
- Thomas, A. J., Petridis, M., Walters, S. D., Gheytaoui, S. M., & Morgan, R. E. (2017). Two hidden layers are usually better than one. In *International Conference on Engineering Applications of Neural Networks*, pp. 279-290
- Wang, Y. and Fang, H., 2020. Estimation of LAI with the LiDAR technology: A review. *Remote Sensing*, 12(20), p.3457. <https://doi.org/10.3390/rs12203457> (<https://doi.org/10.3390/rs12203457>).
- Wickham, H., Hester, J., Chang, W., Bryan, J. (2022). *\_devtools: Tools to Make Developing R Packages Easier*. R package version 2.4.5, <https://CRAN.R-project.org/package=devtools>.
- Xie, X., Li, A., Jin, H., Tan, J., Wang, C., Lei, G., Zhang, Z., Bian, J. and Nan, X., 2019. Assessment of five satellite-derived LAI datasets for GPP estimations through ecosystem models. *Science of The Total Environment*, 690, pp.1120-1130. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.516>
- Yan, G., Hu, R., Luo, J., Weiss, M., Jiang, H., Mu, X., Xie, D. and Zhang, W., 2019. Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and forest meteorology*, 265, pp.390-411. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.033>.
- De Boor, C. (1978). *A practical guide to splines* (Vol. 27, p. 325). New York: springer-verlag.

# ***NITROUS OXIDE EMISSIONS FOLLOWING ORGANIC-BASED SOIL AMENDMENTS IN COMPARISON WITH MINERAL FERTILIZER IN WALNUT ORCHARD (JUGLANS REGIA L.)***

## ***COMPARAZIONE FRA LE EMISSIONI DI PROTOSSIDO DI AZOTO IN SEGUITO A CONCIMAZIONE CON AMMENDANTE ORGANICO E FERTILIZZANTE MINERALE IN NOCETO (JUGLANS REGIA L.)***

Camilla Chieco<sup>1\*</sup>, Daniela. Famulari<sup>1</sup>, Lorenzo Fiorini<sup>1</sup>, Elena Baldi<sup>2</sup>, Maurizio Quartieri<sup>2</sup>, Lorenzo Brilli<sup>3</sup>, Federico Carotenuto<sup>1</sup>, Vasileios Voulgaridis<sup>2</sup>, Moreno Toselli<sup>2</sup>, Marianna Nardino<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Institute of BioEconomy, National Research Council – Via P. Gobetti 101 – 40129 Bologna, Italy

<sup>2</sup> Department of Agricultural and Food Sciences, University of Bologna, – Viale Fanin, 46 – 40127 Bologna, Italy

<sup>3</sup> Institute of BioEconomy, National Research Council – Via Giovanni Caproni 8 – 50145 Firenze, Italy

### **Abstract**

Among the non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases, nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) is one of the most important, with the agricultural sectors representing its largest source worldwide. Understanding how different type and amount of fertilizers can determine different N<sub>2</sub>O emission patterns and magnitude may help to improve agronomic management in the perspective of both agricultural production optimization (i.e., reduction of N input costs) and climate mitigation (i.e., emissions reduction). In this context, an experimental field campaign to evaluate N<sub>2</sub>O emissions from soil amended with different type of fertilizers is currently ongoing in a walnut (*Juglans regia* L.) orchard in Bondeno (Emilia Romagna, Italy). Specifically, mineral fertilizer and municipal organic waste compost were tested. Soil amendments were added at the beginning of the season within the row, while mineral fertilizer was added twice 30 days apart. Soil N<sub>2</sub>O fluxes were measured using a portable N<sub>2</sub>O trace gas analyzer (LI-7820 N<sub>2</sub>O /H<sub>2</sub>O, Li-Cor) connected with an automated soil chamber (LI-8200-01S Smart Chamber, Li-Cor) along the whole growing season. Furthermore, monthly data of soil TKN, mineral N (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) and moisture were also measured. Despite the experiment is still running, preliminary results suggest that the emerged differences in the magnitude of N<sub>2</sub>O soil emission due to different fertilization treatments are willing to be further exploited.

### **Parole chiave**

Flussi di protossido di azoto; gas effetto serra; noceto; fertilizzazione azotata; ammendanti.

### **Keywords**

Nitrous oxide flux; greenhouse gases; walnut orchard; nitrous fertilization; soil amendments.

### **Introduction**

Agriculture is a significant anthropogenic source of greenhouse gas, especially methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O).

Methane is mainly emitted by livestock sector, while arable soils greatly contribute to N<sub>2</sub>O emission due to large use of nitrogen to improve crop yields (Bell *et al.* 2015). In fact, an excess in soil fertilizer, especially synthetic nitrogen-based, leads to nitrogen (N) loss due to denitrification and nitrification, beside leaching and volatilization. The Intergovernmental Panel on climate Change guidelines (IPCC, 2014) assumed that a constant 1% of N is released as N<sub>2</sub>O-N after a fertilization event (IPCC, 2014). However, there is large variability and uncertainty in this value, and different types of fertilizer types can yield different emissions (e.g. Cowan *et al.*, 2020).

N<sub>2</sub>O is an intermediate product of denitrification processes; it is also produced as by-product during ammonia oxidation, the first step of nitrification (Thomson *et al.*, 2012). These processes are strongly dependent on the availability of ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) and labile carbon (C) compounds and regulated by soil conditions, such as oxygen

content, moisture, pH and depend on the capacity of soil microbial community (Lazcano *et al.*, 2021).

Nitrous oxide has a warming potential almost 300 times greater than carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and an atmospheric lifetime of about 114 years; its atmospheric concentration has shown an increase of 20% since 1750 (IPCC, 2014).

Among the other sources (fossil fuel combustion, oceans, wastewater treatment) agriculture is the activity mainly responsible for additional N<sub>2</sub>O emission over the past century and half (Smith *et al.*, 2012).

Strategies to ameliorate N<sub>2</sub>O emission due to intensive farming are recommended to decrease current level of this GHGs in atmosphere. Among other, replacing mineral fertilizer with less impactful fertilizers, such as organic compost, can have a positive effect in reducing N loss and minimizing N<sub>2</sub>O emission from agriculture (Thomson *et al.*, 2012).

Soil organic amendments include compost, wood chips, biochar, animal manure, straw, husk, geotextile, and sewage manure. These substances are rich in organic matter and in macro- and microelements that increase the fertility of soils by ameliorating microclimatic conditions and may also provide substrates for microbial growth (Maiti *et al.*, 2019).

Since organic composts may impact soil structure and soil microorganisms in many ways, their effect on the rates and dynamics of N<sub>2</sub>O production is different from that of mineral or inorganic fertilizers and cannot be derived from N inputs alone but must be estimated by appropriate direct soil measurements (Lazcano *et al.*, 2021).

Direct assessment of N<sub>2</sub>O emissions from soils is a challenge due to the extremely large spatial and temporal variability of the fluxes and the specialized analytical instrumentation required to detect and quantify this trace gas. Eddy covariance is a micrometeorological method to quantify greenhouse gas emissions, including N<sub>2</sub>O, that allows for near-continuous measurements, and integrates emissions from a relatively large spatial region (>100 m) (Cowan *et al.*, 2020). This methodology is impractical in small size experimental plot, which are instead commonly assessed using soil flux chambers in which nitrous oxide fluxes are calculated based on the increase in gas concentrations over time in the measurement volume of the closed chamber. .

With the chamber placed in the treatment plots, the effect of different soil management practices and different types of fertilizers on N<sub>2</sub>O emissions can be assessed.

The aim of this study was to evaluate the effect of organic compost application on N<sub>2</sub>O emissions, compared with mineral fertilizer, using a real-time portable N<sub>2</sub>O trace gas analyzer connected with an automated soil chamber within a walnut orchard in Emilia-Romagna (Italy).

## Method

### Field site and management

Measurements were made on a 5-year-old walnut tree (*Juglans regia* L.) orchard in Bondeno (Emilia Romagna, Italy) from March 2023 till February 2024. The soil texture is classed as silty clay (Tab 1).

Two different matrices were tested, mineral fertilizer (MF) and municipal organic waste compost (ACM) and they were compared with an unfertilized Control.

Each fertilization treatment was applied along a single row that was divided into five plots (replicates) of 9 plants each. Soil amendment was applied at the rate of 120 kg of N/ha in one single event at the beginning of the season (June 21<sup>st</sup> 2023) and tilled into the soil at 0.20 m of depth.

Mineral fertilizer (applied as urea; N 46%) was split into two applications 30 days apart at the dose of 60 kg of N/ha each (June 21<sup>st</sup> and July 19<sup>th</sup>).

Compost was obtained from domestic organic wastes mixed with pruning material and was characterized by 2.2% N, 13 C/N, 36% moisture.

### Soil analysis

To assess the effect of treatments on soil nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)- and ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)-N, monthly sampling was done at a depth of 0.10-0.40 m. Nitrate- and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N were extracted from 10 g of soil by a solution of 100 mL of KCl (2 M); samples were shaken at 100 rpm for 1 h and, after soil sedimentation, limpid solution was collected and stored at -20°C until

analysis made with an auto analyzer (Auto Analyzer AA3; Bran+Luebbe, Norderstadt, Germany).

*Tab.1 Soil properties at 0-20 cm depth at experimental site*  
*Tab.1 Proprietà del suolo a 0-20 cm di profondità nel sito sperimentale*

Parameter	Value
Soil type	silty clay
Clay (%)	29.2
Silt (%)	70.4
Sand (%)	0.4
pH (H <sub>2</sub> O)	7.75
Electrical conductivity (mS cm <sup>-1</sup> )	0.26
Organic matter (%)	5.53
Total organic carbon (g kg <sup>-1</sup> )	23.3

### N<sub>2</sub>O fluxes measurement

Five soil collars were permanently installed along each treated row and each collar offset were recorded; five measurements per treatment were made.

Soil N<sub>2</sub>O fluxes were measured using a portable N<sub>2</sub>O trace gas analyzer (LI-7820 N<sub>2</sub>O /H<sub>2</sub>O, Li-Cor) connected with an automated soil chamber (LI-8200-01S Smart Chamber, Li-Cor). Intensive emission monitoring was done during the growing season, most frequently around fertilization; monitoring continued with monthly measurements until February 2024, when initial pre-fertilization emission levels were reestablished.

The N<sub>2</sub>O flux was calculated using the following equation:

$$F_{N_2O} = \frac{VP(1 - W_0)}{RST} \frac{dN_2O}{dt}$$

Where F<sub>N<sub>2</sub>O</sub> is the soil N<sub>2</sub>O flux (nmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), V is the chamber volume (m<sup>3</sup>), P is the atmospheric pressure (Pa), W<sub>0</sub> is initial water vapor mole fraction (mol mol<sup>-1</sup>), R is the gas constant (Pa m<sup>3</sup> mol<sup>-1</sup>k<sup>-1</sup>), S is the soil area (m<sup>2</sup>), T is chamber temperature (°K),  $\frac{dN_2O}{dt}$  is the rate of N<sub>2</sub>O change (nmol mol<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) during the chamber closure.

Soil temperature and soil moisture were measured with a Stevens HydraProbe connected to the Smart Chamber alongside flux measurements.

### Data analysis.

Simple linear regressions were performed to assess the correlation of soil-related independent variables on soil gas emissions.

## Results and Discussion

Preliminary results of the experimental thesis are reported. Fig. 1 and fig 2 show the soil moisture and soil temperature measured with Stevens HydraProbe along the growing season. Both soil moisture and temperature had similar trends in all theses.

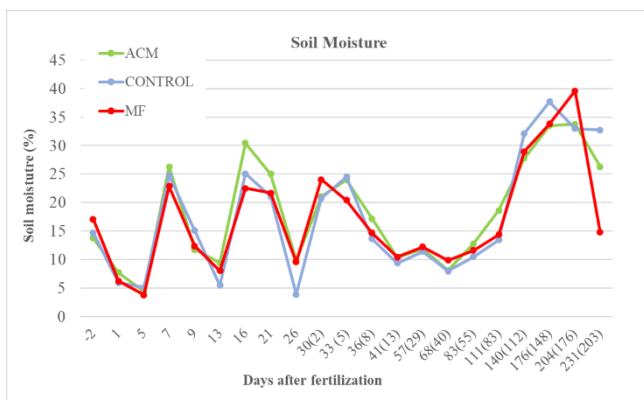


Fig.1 – Soil moisture (%) in plots treated with municipal organic waste compost (ACM), mineral fertilizer (MF) and in control plots. Number in bracket refer to days after the second mineral fertilization.

Fig.1 – Umidità del terreno (%) nei filari trattati con ammendante compostato misto (ACM), fertilizzante minerale (MF) e nel controllo. I numeri tra parentesi si riferiscono ai giorni successivi alla seconda fertilizzazione minerale.

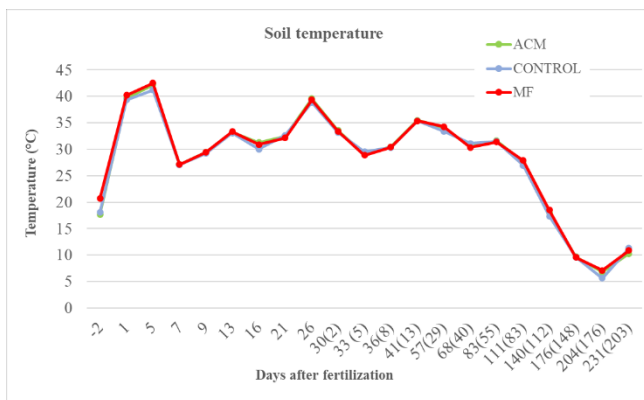


Fig.2 – Soil temperature (°C) in plots treated with municipal organic waste compost (ACM), mineral fertilizer (MF) and control plots. Number in bracket refer to days after the second mineral fertilization.

Fig.2 – Temperatura del suolo (°C) nei filari trattati con ammendante compostato misto (ACM), fertilizzante minerale (MF) e nel controllo. I numeri tra parentesi si riferiscono ai giorni successivi alla seconda fertilizzazione minerale.

Both fertilized these showed higher levels of soil ammonium 7 days post the first fertilization (Fig 3); after that, in ACM plot the soil ammonium levels rapidly decreased and 26 days after the first fertilization event return to levels similar to the initial levels.

Ammonium concentration in mineral plot declined slower and was influenced by the second fertilization event. Only after 55 days by the second fertilization the soil ammonium content returned to initial values.

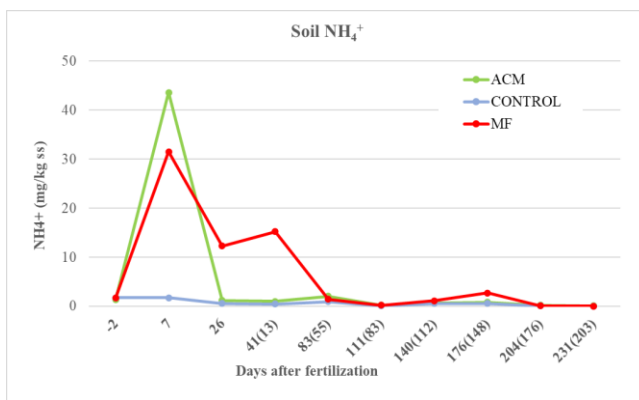


Fig.3 – Soil ammonium concentration (mg/kg ss) in plots treated with municipal organic waste compost (ACM), mineral fertilizer (MF) and control plots. Number in bracket refer to days after the second mineral fertilization.

Fig.3 – Concentrazione di ammonio (mg/kg ss) nei filari trattati con ammendante compostato misto (ACM), fertilizzante minerale (MF) e nel controllo. I numeri tra parentesi si riferiscono ai giorni successivi alla seconda fertilizzazione minerale.

The soil nitrate concentration also reached the maximum value 7 days after the first fertilization in the ACM thesis (Fig. 4); thereafter, the  $\text{NO}_3^-$  level gradually decreased without ever returning to the initial pre-fertilization values. Otherwise, the soil nitrate availability in mineral plot was higher 13 days after second fertilization event and returned to initial values 203 days later.

In control plots both  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  soil level remained low throughout the measurement period (Fig. 3 and Fig 4).

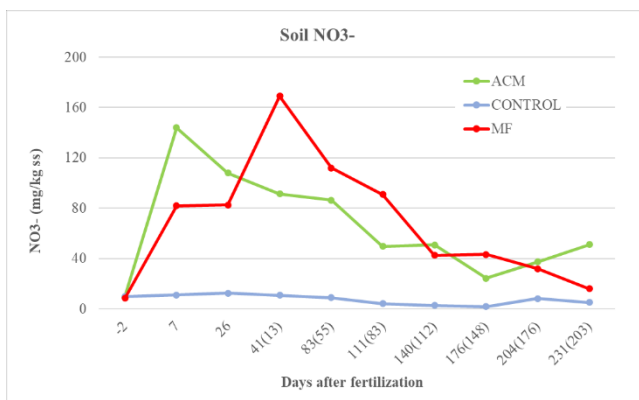


Fig.4 – Soil nitrate concentration (mg/kg ss) in plots treated with municipal organic waste compost (ACM), mineral fertilizer (MF) and control plots. Number in bracket refer to days after the second mineral fertilization.

Fig.4 – Concentrazione di azoto nitrico (mg/kg ss) nei filari trattati con ammendante compostato misto (ACM), fertilizzante minerale (MF) e nel controllo. I numeri tra parentesi si riferiscono ai giorni successivi alla seconda fertilizzazione minerale.



Along the growing season N<sub>2</sub>O flux measured in control plots were lower than those measured in the fertilized plots due to higher exchangeable nitrogen form availability (Fig 4).

In ACM plots, nitrous oxide emission peak occurs 7 days after fertilization and then decreases rapidly after two days. A positive correlation emerged for this thesis between N<sub>2</sub>O fluxes and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N soil concentration (Tab. 2). In fact, highest N<sub>2</sub>O emissions were concomitant with highest soil concentrations of both ions.

In plots with mineral fertilizers, an N<sub>2</sub>O emission peak occurred after each fertilization event. The emission peak that follows the second fertilization was faster and more pronounced than the first one. However, no clear correlation emerges between soil ion content and nitrous oxide emissions for this thesis (Tab. 2).

No correlation emerged between N<sub>2</sub>O fluxes and both soil moisture and soil temperature for both the theses (Tab. 2).

Comparing the N<sub>2</sub>O flux coming from two fertilization treatments, it emerges that in proportion MF emit more N<sub>2</sub>O than ACM; even if the first peaks are similar, in the first fertilization event, urea was added at a rate of 60 kg of N/ha, while ACM at a rate of 120 kg of N/ha. In addition, mineral fertilizer had a second major emission peak following the second fertilization.

In control plots there was a temporary increase in N<sub>2</sub>O emission a few days after fertilization, coinciding with the emission peak detected for ACM. This could be due to the concomitance of microclimatic conditions (high soil humidity due to high precipitation and soil mean temperatures of 27°C) that favor microbial activity and, therefore, nitrification and denitrification processes, both involved in N<sub>2</sub>O production.

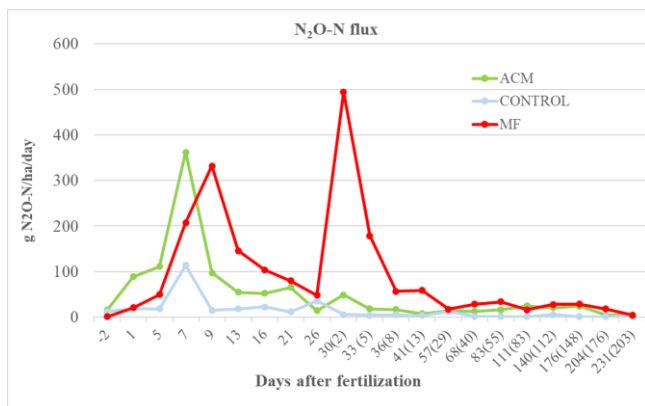


Fig.5 – Soil N<sub>2</sub>O fluxes (g N<sub>2</sub>O-N/ha/day) in plots treated with municipal organic waste compost (ACM), mineral fertilizer (MF) and control plots. Number in bracket refer to days after the second mineral fertilization.

Fig.5 – Flussi di N<sub>2</sub>O (g N<sub>2</sub>O-N/ha/day) emessi dal suolo nei filari trattati con ammendante compostato misto (ACM), fertilizzante minerale (MF) e nel controllo. I numeri tra parentesi si riferiscono ai giorni successivi alla seconda fertilizzazione minerale.

Tab.2 – N<sub>2</sub>O-N flux linear correlation best fit parameters with Soil Moisture, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> for all theses. In bold the significant correlation coefficients.

Tab.2 – Parametri di correlazione lineare del flusso N<sub>2</sub>O-N con umidità del suolo, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> per tutte le tesi. In grassetto i coefficienti di correlazione significativi.

	Moisture	Temperature	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
ACM	a=0.422x b=43.49 r <sup>2</sup> =0.002	a=1.427x b=11.13 r <sup>2</sup> =0.033	a=8.119x b=7.96 r <sup>2</sup> = <b>0.994</b>	a=1.7575x b=65.22 r <sup>2</sup> = <b>0.433</b>
CONTROL	a=0.064x b=16.13 r <sup>2</sup> =0.0008	a=0.451x b=2.409 r <sup>2</sup> =0.033	a=18.165x b=0.64 r <sup>2</sup> =0.211	a=4.5016x b=16.12 r <sup>2</sup> =0.233
MF	a=1.281x b=71.09 r <sup>2</sup> =0.009	a=2.68x b=17.09 r <sup>2</sup> =0.045	a=6.0639x b=3.57 r <sup>2</sup> = <b>0.384</b>	a=0.4138x b=16.40 r <sup>2</sup> =0.115

## Conclusions

Despite the experiment is still running, preliminary results suggest that organic compost application provided differences in magnitude of soil N<sub>2</sub>O emissions when compared to mineral fertilizers. Even if no positive correlation emerged in this study between nitrous oxide fluxes and both soil moisture and soil temperature, it is known that emissions of this GHG from soil are influenced by micro-climatic conditions, such as soil texture, oxygen availability, moisture and water filled pore space (WFPS) (e.g. Cowan et al., 2020).

A very complex relationship exists between these soil properties and N<sub>2</sub>O fluxes and our understanding of the interactions with microbial activity and soil properties are still poor (Tompson *et al.*, 2012).

Understanding how different fertilizers can result in different patterns and magnitude of N<sub>2</sub>O emission can certainly help optimize agricultural sustainability production by improving agronomic management (i.e., reducing N input costs) while reducing GHG emissions.

## Acknowledgements

This research was conducted as part of the project OttimaNoce: “Ottimizzazione della gestione agronomica del noce in ambiente regionale attraverso la digitalizzazione della tecnica frutticola” (OD4SA), financed by PSR 2014-2020 della Regione Emilia Romagna, tipo di operazione 16.1.01, focus area 4B.

## Reference

Bell M.J., Hinton N., Cloy J.M., Topp C.F.E., Rees R.M., Cardenas L., Scott T., Webster C., Ashton R.W., Whitmore A.P., Williams J.R., Balshaw H., Paine F., Goulding K.W.T., Chadwick D.R. (2015). Nitrous oxide emissions from fertilised UK arable soils: Fluxes, emission factors and mitigation. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 212, 134–147.

- Cowan N., Levy P., Maire J., Coyle M., Leeson S.R., Famulari D., Carozzi M., Nemitz E., Skiba U. (2020). An evaluation of four years of nitrous oxide fluxes after application of ammonium nitrate and urea fertilisers measured using the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280, 107812.
- Lazcano C., Zhu-Barker X., Decock C. (2021). Effects of Organic Fertilizers on the Soil Microorganisms Responsible for N<sub>2</sub>O Emissions: A Review. *Microorganisms*, 9, 983.
- Maiti S.K. and Ahirwal J. (2019). Chapter 3 - Ecological Restoration of Coal Mine Degraded Lands: Topsoil Management, Pedogenesis, Carbon Sequestration, and Mine Pit Limnology, Editor(s): Vimal Chandra Pandey, Kuldeep Baudh, Phytomanagement of Polluted Sites, Elsevier, Pages 83-111,
- IPCC, 2014. Climate change 2014: synthesis report. In: Core Writing Team, Pachauri, R.K., Meyer, L.A. (Eds.), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 151.
- Smith K.A., Mosier A. R., Crutzen P.J., Winiwarter W. (2012). The role of N<sub>2</sub>O derived from crop-based biofuels, and from agriculture in general, in Earth's climate. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 367, 1169–1174.
- Thomson A.J., Giannopoulos G., Pretty J., Baggs E.M., Richardson D.J. (2012). Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 367, 1157-1168.
- Vitale L., Polimeno F., Ottaiano L., Maglione G., Tedeschi A., Mori M., De Marco A., Di Tommasi P., Magliulo V. (2017). Fertilizer type influences tomato yield and soil N<sub>2</sub>O emissions. *Plant Soil Environ.*, 63(3), 105–110.

# AN ASSESSMENT OF FERTILIZER AND PESTICIDE TRANSITION TO A SUSTAINABLE USE PART OF THE ECOWHEATALY PROJECT

## UNA VALUTAZIONE DELLA TRANSIZIONE VERSO L'USO SOSTENIBILE DI FERTILIZZANTI E PESTICIDI PARTE DEL PROGETTO ECOWHEATALY

Concetta Cardillo<sup>1</sup>, Antonella Del Signore<sup>3</sup>, Edmondo Di Giuseppe<sup>2</sup>, Arianna Di Paola<sup>2</sup>, Antonio Gattone<sup>3</sup>, Gianfranco Giulioni<sup>3\*</sup>, Massimiliano Pasqui<sup>2</sup>, Sara Quaresima<sup>2</sup>, Marco Simonetti<sup>2</sup>, Ilaria Zappitelli<sup>2</sup>, and Piero Toscano<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA), Roma

<sup>2</sup> Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Bioeconomia, Roma

<sup>3</sup> Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara

<sup>4</sup> Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Bioeconomia, Firenze

\* gianfranco.giulioni@unich.it

### Abstract

In this paper, we will outline the planned activities for the next two years under the research project "Evaluation of policies for enhancing sustainable wheat production in Italy" (ECOWHEATALY). The goal of ECOWHEATALY is to evaluate the sustainability of wheat farms in Italy that are operating under the National and/or EU green policies. To this end, ECOWHEATALY plans to develop an open-source dynamic model that integrates social, economic, and environmental dimensions. The model will be a tool for Italian policymakers to evaluate sustainability indicators in wheat production under different policies. In this paper, we will explain the methodology, known as Life Cycle Assessment, that we will use to evaluate the effectiveness of these green policies on the production process of Italian farms. The paper focuses on the choices made concerning the assessment of the environmental impact of fertilizers and pesticides.

### Parole chiave

Valutazione del ciclo di vita, analisi dell'inventario, processo produttivo del grano, contributo alle emissioni.

### Keywords

Life cycle assessment, inventory analysis, wheat production process, emission contribution.

### Introduction

The PRIN 2022 ECOWHEATALY project aims to assess the efficacy of policies in promoting sustainable wheat production techniques in Italy. The study will analyze the impact of offering financial incentives to farms that adopt sustainable practices and move towards more sustainable use of fertilizers and pesticides. To accomplish this, the ECOWHEATALY adopts a circular modeling framework that includes:

- 1) clustering the Italian farms based on critical resource uses (fertilizers, pesticides, and fossil fuel) to profile the actual management of the Italian wheat sector. The identification of farm types will be used to initialize the Agent-Based Model (ABM) in the next step.
- 2) The ABM will explore possible switching in the resource uses and farm management driven by the green policies and global wheat prices by looking at the whole farms' revenues and costs.
- 3) Evaluation of the actual and expected environmental impacts by means of a Life Cycle Assessment (LCA) for single farms (i.e., the Agents).
- 4) Aggregate the wheat production quantity output from the ABM at the national scale to supply the Global Economic Model, updating wheat prices and allowing for the inclusion of global shocks.

The present paper focuses on item 3) and it will give details on the evaluation of the environmental impact of fertilizers and pesticides.

### Materials and Methods

#### *Life Cycle Assessment (LCA)*

The environmental impact of wheat production in the ECOWHEATALY project is performed through the LCA analysis. The International Organization for Standardization (ISO) set up a standard for this methodology (ISO 14040:2006). It recommends the analysis go through 4 phases: 1) goal and scope definition, 2) inventory analysis, 3) impact assessment, and 4) results interpretation. Phases 2) and 3) deserve particular attention and are briefly discussed hereafter.

The life cycle *inventory analysis (LCI)* consists of recording all the inputs and outputs involved in the production of the considered items. Inputs are distinguished into those coming from the environment and those coming from other production processes. In the same manner, outputs are distinguished between those used in other production processes, and those entering the environment (emissions). Inputs and outputs from and to other production processes are said to be techno-sphere items, while inputs and outputs from and to the environment are said to be bio-sphere items. Consider that the same input/output analysis can be done for the techno-sphere inputs and outputs of the item we are considering, and in turn to the inputs of the inputs and to the

outputs of the outputs. Iterations go on until covering a part or the whole life cycle of the considered item. At each iteration, the set of bio-sphere items grows and their quantities gradually cumulate. The *impact assessment* phase makes use of one or more assessment methods developed by the scientific community. An assessment method is a function taking as inputs the quantities of selected bio-sphere items, i.e. some of the outputs of the inventory analysis, and transforming them into an indicator or damaging substance directly linked to an environmental aspect. The transformation is made via coefficients studied and provided by the researchers who developed the method. In LCA, these coefficients are better known as characterization factors (CFs).

### Datasets

The data on which we build the analysis are collected by the Council for Agricultural Research and Agricultural Economy Analysis (CREA) and recorded in the RICA dataset. The RICA acronym comes from the French expression “Réseau d’Information Comptable Agricole”, better known as “Farm Accountancy Data Network” (FADN). We distinguish the Italian and the European versions of RICA-FADN. The Italian version includes more variables than those contributed to the European version on a harmonized base.

After inspecting the Italian RICA contents, the following variables were selected for the wheat cultivation of each farm:

- Cultivated hectares (ha);
- hours of tractor use per ha;
- fertilizers (kilograms of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium per ha);
- pesticides (toxicity level and quantity of herbicides, insecticides, fungicides).

Note that the hectare of cultivated wheat (1st bullet) is used mainly to obtain quantities per hectare and perform the LCA analysis on tractor, fertilizer, and pesticide use (2nd, 3rd, 4th bullets).

At the present stage, the ECOWHEATALY project is performing the LCI of tractor use, fertilizers, and pesticide use. After reporting briefly on the tractors use LCI, this paper delves into fertilizers and pesticides use LCI.

### LCI of tractors use

Because the ECOWHEATALY projects aim to rely on open-source resources, the analysis is based on an adaptation of the LCI data provided by the Federal LCA Commons. Browsing the available databases, we find the “University of Washington Design for Environment Laboratory/Field Crop Production” database, where there are several processes concerning the work of agriculture tractors for several cultures in several US states. Among them, there is, for example, a process named “work; ag. tractors for growing win wheat, 2014 fleet, all fuels; 100-175HP - US-AR” gathering inputs and outputs of an agriculture tractor producing 1 megajoule of work employed in winter wheat

production in Arizona. We take advantage of this LCI in the ECOWHEATALY project.

### LCI of fertilizers

RICA includes detailed information on fertilizers. It has one record for each different composition of applied fertilizers. Therefore, given a farm, a year, and a culture, several records can be found (one for each different fertilizer). Among many other variables, each record includes: i) the quantity of nitrogen per hectare, ii) the quantity of phosphorus per hectare, iii) the quantity of potassium per hectare. We report in the ECOWHEATALY database the sum of these three variables taken across all the records for each farm, in each year, but taking hard and soft wheat one by one. The inventory of fertilizers used in the LCA is reported in Table 1.

*Tab.1 – Analisi dell’inventario dei fertilizzanti azotati dall’appendice A di Brentrup et al. (2004).*

*Tab.1 – Inventory analysis of Nitrate fertilizers from appendix A of Brentrup et al. (2004).*

Emission/resource	Unit	N3 (144)	
		per ha	per t
<b>Resources</b>			
Phosphate rock	kg	202.9	23.79
Potash salt	kg	889.8	104.3
Hard coal	kg	47.12	5.524
Lignite	kg	2.285	0.268
Heavy oil	kg	10.13	1.188
Light oil/diesel	kg	76.89	9.014
Natural gas	kg	127.7	14.97
Total energy	MJ	10967	1286
Land	m <sup>2</sup> × year	10 000	1172
<b>Emissions to air</b>			
CH <sub>4</sub>	kg	0.0129	0.0015
CO	kg	0.074	0.009
CO <sub>2</sub>	kg	607.9	71.26
N <sub>2</sub> O	kg	5.332	0.625
NH <sub>3</sub>	kg	3.534	0.414
Nox	kg	4.63	0.543
Particles/dust	kg	0.553	0.065
SO <sub>2</sub>	kg	2.58	0.303
NMVOOC	kg	0.041	0.005
<b>Emissions to water</b>			
NO <sub>3</sub> -N	kg	1.483	0.174
Ntot	kg	0.016	0.002
Ptot	kg	0.104	0.012
<b>Emissions to soil</b>			
Cd	kg	0.0052	0.0006

We look to the literature to set up an LCI analysis using these variables. The environmental effects of mineral fertilizers are analyzed in Isherwood (1998). Another interesting document concerning fertilizers is IFA and Systemiq (2022). The report points out that Nitrogen is the main responsible for emissions (see in particular chapter 1, paragraphs 6-11).

To integrate Nitrogen fertilization in our LCA we build a process based on Brenttrup et al. (2004) taking as reference the median case in Appendix A.

### LCI of Pesticides

RICA provides the following data on pesticides: toxicity classification, type, and applied quantity per hectare.

Toxicity classification is:

- “0” for products marked with “caution handle with care”;
- “1” for products in the class “very toxic (T+)”;
- “2” for products in the class “Toxic (T)”;
- “3” for products in the class “harmful (Xn)”;
- “4” for products in the class “Irritating (Xi)”.

Pesticide types in RICA are Acaricide, Fungicide, Wetting agent, Adjuvant, Adjuvant, Herbicide, Plant growth regulator, Geodisinfestant, Insecticide; Molluscicide, Nematicide, and Rodenticide.

Unfortunately, the RICA dataset does not specify the active ingredients in each pesticide. Therefore, we do not have enough information for a standard LCA analysis of pesticides. In an attempt to trace the active ingredients, we use the Fitogest®+ where detailed information on pesticides available in Italy is recorded and can be accessed at: <https://fitogest.imagelinetwork.com/it/>.

However, there is a mismatch between the RICA and the Fitogest classifications since a European directive, which implies changes in pesticide classification, came into force in June 2015. For coherence with previously recorded data, RICA reports the old classification, while Fitogest®, being a picture of the current market, reports the newer one.









We use Table 2 from Camisa (2015) to match the two data sources, more specifically, our strategy is directed to:

- select products with the GHS06 pictogram in Fitogest, evaluate their active ingredients and use them for RICA classes T+ and T;
- select products with the GHS07 pictogram in Fitogest, evaluate their active ingredients and use them for RICA class Xn;
- select products with the GHS05 pictogram in Fitogest, evaluate their active ingredients and use them for RICA class Xi;
- select products marked with “caution handle with care” in Fitogest, evaluate their active ingredients and use them for the corresponding RICA class.

In Fitogest, we selected products with specific characteristics in RICA, such as those containing “harmful herbicides”. We analyzed the most found composition of these products and then examined the concentrations and recommended quantities of the most frequently used ingredient. By assuming that farmers in RICA use these most common active ingredients, we can conduct a pesticide Life Cycle Inventory (LCI) analysis.

Tab.2 – Corrispondenze tra la classificazione di tossicità derivante dalla direttiva CE n. 1272/2008 e quella precedente. Immagine ripresa da Camisa (2015).

Tab.2 – Correspondence between the old and the toxicity classification introduced with regulation CE n. 1272/2008. Picture from Camisa (2015).

	PITTOGRAMMA Regolamento 1272/2008		PITTOGRAMMA Direttiva 67/548/CE	CONVERSIONE DIRETTA (Conversione diretta impossibile)
TOSSICITÀ ACUTA		PERICOLO H300 H310 H330		R28 R27 R26
		PERICOLO H301 H311 H331		R25 R24 R23
TOSSICITÀ ACUTA		ATTENZIONE H302 H312 H332		R22 R21 R20
CORROSIONE/IRRITAZIONE DELLA PELLE GIRVILSIONI OCULARI/IRRITAZIONE OCULARE		PERICOLO H314		R34, R35
		PERICOLO H318		R41

We report in Table 3 the results of this process. The table is split into two sub-tables for space convenience. The *id* variable can be used to match the information in the two sub-tables.

Tab.3 – Principi attivi e quantità per ettaro degli stessi ottenute confrontando il tipo e il livello di tossicità da RICA e i corrispondenti tipi e livelli in Fitogest®+.

Tab.3 – Active ingredients and their quantity per hectare obtained by combining type and toxicity levels from RICA and the corresponding in Fitogest®+.

id	type	tox level	active ingredient	product
1	Acaricide	irritating	potassium salts of fatty acids	flipper
2	Fungicide	caution	sulfur	cosavet df edge
3		irritating	prothioconazole	pecari 300
4		harmful	Tebuconazole	ares 430 sc
5	Herbicide	caution	Glyphosate	clean-up
6		irritating	2,4-D	piminto 600
7		harmful	MCPA	erbitox m pro
8	Plant growth regulator	irritating	chlormequat chloride	stabilan
9		harmful	Trinexapac-ethyl	moddus
10	Insecticide	irritating	Deltamethrin	antal
11		harmful	Deltamethrin	antal
12		toxic	Pirimicarb	aphox 50
13	Molluscicide	caution	ferric phosphate	ferrex
14		irritating	metaldehyde	luma-kl



id	quantity	concentration	active ing per ha
1	4-10l/ha	479,8g/l	1920-4800g/ha
2	3-8 kg/ha	80%	2400-6400g/ha
3	0.65l/ha	300g/l	195g/ha
4	0.58l/ha	430g/l	250g/ha
5	1-4-6-12l/ha	360g/l	360-4320g/ha
6	0.6-1.2l/ha	600g/l	360-720g/ha
7	1.6-2l/ha	500g/l	800-1000g/ha
8	2-3.5l/ha	461g/l	922-1613.5g/ha
9	0.5l/ha	250g/l	125g/ha
10	0.3-0.5l/ha	25g/l	7.5-12.5g/ha
11	0.3-0.5l/ha	25g/l	7.5-12.5g/ha
12	260g/ha	50%	130g/ha
13	6kg/ha	25g/kg	150g/ha
14	7kg/ha	50g/kg	350g/ha

## Results and Discussion

Using the LCA methodology, the ECOWHEATALY project intends to assess the environmental impact of policies. The focus is on the impact of fertilizers and pesticides, although agriculture machinery will also be modeled. The process of applying fertilizers involves various stages such as the production of fertilizers, transportation to farms, application through tractors, and direct emissions to air, soil, and water resulting from fertilizer application.

Among various LCA software options, we decided to use Brightway because it is based on Python's freely available open-source software (Mutel, 2017). As with any other LCA software, it provides access to a Biosphere database, the available set of impact assessment methods, and tools to conduct LCA analysis.

To test the LCI analysis presented above, we conducted an LCA on a hypothetical farm that used 900 megajoules of tractor power and 50kg of nitrogen fertilizers for each hectare under wheat cultivation. The goal of our LCA is to evaluate the impact of this production process on climate. Among the available assessment methods, we choose the IPCC 2013-climate change-global warming potential GWP100. This assessment method outputs the kilograms of CO2 equivalent. The result delivered by the Brightway software is 883.66 kg CO2-Eq subdivided into categories of process and emission contribution (Table 4).

## Conclusion

The LCA methodology requires careful consideration in selecting the inputs used in each production phase. This becomes even more challenging when the project's goal is to produce and release open-source software that also uses open-source databases. Therefore, during the initial phase of the ECOWHEATALY project, the primary focus is on three key areas: 1) integrating pesticide active ingredients with the Brightway biosphere database to apply the "usetox" package; 2) exploring the possibility of utilizing databases created by the OLCA-pest project; and 3) identifying suitable third-party LCI processes. By the end of this phase, we will have the ability to select the impact categories and their corresponding assessment methods. We will also organize the set of impact indicators into clusters. Finally, we will

develop a web application that allows wheat farmers to input the amounts of machinery usage, fertilizer and pesticide to receive environmental impact indicators.

*Tab.4 – Risultati dell’LCA ottenuti dal software Brightway per un’impresa agricola che impiega 900 megajoule di potenza di trattori agricoli e fertilizzanti contenenti 50kg di azoto per ogni ettaro di grano coltivato.*

*Tab.4 – LCA results delivered by Brightway software for a farm that uses 900 megajoules of tractor power and 50kg of nitrogen fertilizers for each hectare under wheat cultivation.*

Process contribution	Kg of CO2-Eq.
application of N fertilizer (kg)	701.51
work; tractors (MJ)	182.14
<i>Emission contribution</i>	
Dinitrogen monoxide (kg)	490.24
Carbon dioxide (kg)	389.94
Carbon monoxide (kg)	2.028
Methane (kg)	0.1276

## Acknowledgment

This research was conducted as part of the project "ECOWHEATALY: Evaluation of policies for enhancing sustainable wheat production in Italy" (202288L9YN) 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) - "PRIN 2022".

## Reference

- Brentrup et al (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. *European Journal of Agronomy* 20(3), 265–279.
- Camisa, M. G. (2015) Il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele. Power point presentation available at [http://www.giornatefitopatologiche.it/UserFiles/File/giornate-fitopatologiche/2014/GiornateFitopatologiche\\_03\\_Camisa\\_CLP-18-3-2014.pdf](http://www.giornatefitopatologiche.it/UserFiles/File/giornate-fitopatologiche/2014/GiornateFitopatologiche_03_Camisa_CLP-18-3-2014.pdf)
- IFA and Systemiq (2022). Reducing emissions from fertilizers use. Technical report, Systemiq for International Fertilizer Industry Association (IFA).
- Isherwood, K.F. (1998). Mineral fertilizer use and the environment. Technical report, International Fertilizer Industry Association (IFA) and United Nations Environment Program (UNEP).
- Mutel, C. 2017. Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment. *Journal of Open Source Software*, 12:2.

# AGRICS. UNA PIATTAFORMA ICT PER IL TRASFERIMENTO DELLE CONOSCENZE A FAVORE DELLO SVILUPPO RURALE

## AGRICS: AN ICT PLATFORM FOR KNOWLEDGE TRANSFER FOR RURAL DEVELOPMENT

Valentino Volpe<sup>1\*</sup>, Stefano Barbieri<sup>1</sup>, Mariangela Sandra<sup>1</sup>, Lara Manzoni<sup>1</sup>, Linda Stel<sup>1</sup>, Valentina Caron<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ERSa-FVG – Servizio fitosanitario e chimico, ricerca, sperimentazione e assistenza tecnica - Via Sabbatini, 5, 33050 Pozzuolo del Friuli (UD)  
[\\*valentino.volpe@ersa.fvg.it](mailto:valentino.volpe@ersa.fvg.it); [infoagrics@ersa.fvg.it](mailto:infoagrics@ersa.fvg.it)

### Abstract

*AgriCS* is an ICT (Information and Communication Technologies) platform, financed through the RDP 2014-2020 (EU Reg. no. 1305/2013) of the Friuli Venezia Giulia Autonomous Region, Measure 1.2 – Knowledge transfer and information and developed by the Regional agency for rural development (ERSA). It takes advantage of digitalisation to promote innovation, knowledge transfer and dissemination of research and experimentation results to farmers, technicians and stakeholders. *AgriCS* comprises a set of mathematical models dealing with pests and diseases dynamics of cultivated plants (at territorial or at farm level), mathematical models dedicated to agronomic issues (at farm level) as well as agro-meteorological scenarios (at territorial level). Models can be used as DSS by farmers and in general by advisory technicians. ERSa may use *AgriCS* DSS tools to plan different agricultural experiments thus contributing further in the making of research results dissemination process.

### Parole chiave

Modelli matematici, sistemi di supporto alle decisioni, sperimentazione agraria, digitalizzazione, trasferimento della conoscenza

### Keywords

Mathematical models, decision support systems, agriculture experimentation, digitalisation, knowledge transfer

### Introduzione

Accanto ai tradizionali servizi diretti di assistenza tecnica e consulenza in campo, il cui ruolo non può essere né surrogato né sostituito, molte delle nuove e complesse conoscenze possono essere organizzate, mediate e disseminate all'intera comunità di operatori del settore agricolo (agricoltori, organizzazioni dei produttori, servizi di assistenza tecnica, portatori di interesse, decisori, pianificatori) sfruttando le Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (TIC o ICT).

Attraverso il progetto *AgriCS* (*Agricoltura, Conoscenza, Sviluppo*) ERSa (Agenzia regionale per lo Sviluppo rurale del Friuli Venezia Giulia) ha realizzato una piattaforma per la diffusione delle conoscenze che comprende sistemi decisionali e modelli matematici a favore dell'azienda agricola e più in generale della rete di consulenza ed assistenza tecnica in agricoltura per la regione Friuli Venezia Giulia. Gli ambiti considerati riguardano: (i) la difesa delle colture; (ii) l'irrigazione e l'ottimizzazione della risorsa "acqua"; (iii) la fertilizzazione delle colture; (iv) la valutazione dell'impronta ambientale e del bilancio energetico dell'azienda agricola.

### Materiali e Metodi

La piattaforma *AgriCS* è raggiungibile via web al seguente URL, <https://agrics.regione.fvg.it/agricsweb/>  
Comprende alcune aree liberamente accessibili al pubblico e altre riservate e dedicate ai *servizi avanzati* della piattaforma.

Dalla pagina principale è possibile selezionare le diverse *sezioni funzionali* disponibili:

- modelli fitosanitari dedicati ai principali patogeni e parassiti delle colture di maggiore interesse per il Friuli Venezia Giulia (vite, melo, mais);
- modelli agronomici a livello aziendale dedicati all'irrigazione, alla fertilizzazione e alla valutazione della sostenibilità dell'azienda agricola attraverso il calcolo dell'impronta del carbonio, dell'impronta dell'acqua e del bilancio energetico;
- scenari agro-meteorologici a carattere territoriale (SAM) che considerano patologie fungine di vite e melo, il bilancio idrico delle colture, la percorribilità dei suoli per le operazioni agronomiche e l'indice THI (*Temperature and Humidity Index*) per l'allevamento della bovina da latte;
- visualizzazione grafica di dati aggregati di monitoraggio rilevati sul territorio per le principali fitopatie e avversità delle piante coltivate;
- scarico, da parte degli utenti autorizzati, dei dati meteorologici forniti dall'Osservatorio meteorologico del Friuli Venezia Giulia (ARPA FVG Osmer);
- documenti ed altro materiale tecnico-divulgativo sui modelli agronomici e fitosanitari disponibili sulla piattaforma.

La piattaforma *AgriCS* fa riferimento a un *webGIS* che, tra i vari strati informativi, comprende anche le caratteristiche dei suoli, secondo gli studi e la cartografia sviluppata e curata da

ERSA.

I modelli matematici della piattaforma sono alimentati da dati meteorologici forniti da ARPA FVG Osmer (Cicogna *et al.* 2013) su base sia oraria che giornaliera, risultato di un'integrazione tra i dati rilevati dalle stazioni sinottiche attraverso la generazione di *GeoTIFF* con celle di area pari a 500m x 500m ("*stazioni virtuali*"). Ersa, attraverso il *webGIS* della piattaforma, può agire sul numero di *stazioni virtuali* messe a disposizione dell'utente esterno e con le quali utilizzare i dati meteorologici forniti da ARPA FVG Osmer per alimentare i modelli della piattaforma.

Gli utenti autorizzati all'accesso ai servizi avanzati della piattaforma possono scegliere se alimentare i *modelli fitosanitari* e i *modelli agronomici* o con i dati meteorologici forniti da ARPA FVG Osmer (e organizzati sulla piattaforma per singole *stazioni virtuali*) o con dati meteorologici raccolti da proprie centraline aziendali.

I modelli matematici della piattaforma sono organizzati in *web-service*, il codice dei vari modelli è aperto così da consentire a Ersa eventuali modifiche al contenuto e alle equazioni di ogni modello; in questo modo è possibile l'adattamento dei modelli anche sulla base dei risultati della sperimentazione condotta o di nuove evidenze sperimentali raccolte.

Il sistema dispone anche di un database denominato *FitoInfoData* utilizzato dai tecnici Ersa per caricare dati georiferiti di monitoraggi condotti sul territorio regionale sulle diverse colture presenti.

## Discussione

Per perseguire l'obiettivo di diffusione delle conoscenze in agricoltura, sono state prese in considerazione le tecnologie ICT e le varie forme di digitalizzazione in quanto offrono particolari vantaggi e potenzialità (Bacco *et al.* 2019, Ayre *et al.* 2019). Esse infatti possono caratterizzarsi per immediata e regolare disponibilità di dati e informazioni tecniche, organizzazione ordinata dell'informazione rispetto al suo utilizzo in relazione a colture, allevamenti, tecniche e tecnologie in ambito agricolo, possibilità di utilizzare il dato e l'informazione per simulare le scelte aziendali attraverso applicativi dedicati, possibilità di verificare gli effetti delle scelte aziendali tecniche ed economiche nel breve, medio e lungo periodo, possibilità di introdurre dei sistemi di supporto decisionali a favore dell'azienda agricola.

In tale ottica, attraverso *AgriCS* ci si è proposti di creare una piattaforma di diffusione delle conoscenze che comprenda una serie di sistemi decisionali e di modelli di simulazione specificatamente a favore dell'azienda agricola e più in generale della rete di consulenza ed assistenza tecnica in agricoltura sul territorio regionale.

Le caratteristiche dei suoli del territorio rappresentano uno strato informativo fondamentale di *AgriCS*, raggiungibile attraverso un web-GIS dedicato e utilizzato per i modelli agronomici della piattaforma dedicati all'irrigazione e alla fertilizzazione delle colture aziendali. Il web-GIS della piattaforma restituisce automaticamente al modello i parametri dei suoli dell'apezzamento investigato così come

descritti dalle unità cartografiche delle mappe dei suoli di Ersa; l'utente può comunque modificare tali parametri se in possesso di dati più puntuali.

Tutti i modelli della piattaforma, sia quelli di carattere fitosanitario che di carattere agronomico, vengono alimentati da dati meteorologici. In tal caso, grazie alla collaborazione con ARPA FVG Osmer viene assicurata non solo la fornitura dei parametri meteorologici di interesse (temperatura, umidità, precipitazioni, bagnatura fogliare) con frequenza oraria e giornaliera, ma soprattutto la costanza e il controllo sulla qualità del dato fornito. Oltre ai dati meteorologici validati viene fornito anche un set di dati meteorologici previsionali fino ai 3 giorni successivi alla data odierna, necessari per il funzionamento della componente predittiva dei modelli fitosanitari. La collaborazione tra Ersa e ARPA FVG Osmer non si limita alla sola fornitura del dato meteorologico, ma coinvolge ulteriori sviluppi della piattaforma attraverso i cosiddetti scenari agrometeorologici (SAM). Si tratta di rappresentazioni territoriali di aspetti fitosanitari e agronomici. Una scelta progettuale strategica nell'implementazione della piattaforma è stata quella di puntare sulla proprietà del codice informatico che governa i diversi modelli. Se da un lato tale prerogativa vede un significativo impegno sul fronte informatico, dall'altro consente ad Ersa di modificare in maniera indipendente le equazioni dei modelli. Tale scelta è connessa all'idea di base della piattaforma *AgriCS*: promuovere il trasferimento della conoscenza e dei risultati delle ricerche e delle sperimentazioni condotte da parte di Ersa a favore dello sviluppo rurale del territorio. L'evoluzione dell'attività sperimentale è dinamica e, di conseguenza, tenendo fede all'obiettivo di trasferire il più possibile tali conoscenze e innovazioni a favore della comunità di utenti, è necessario adattare continuamente le equazioni dei modelli della piattaforma alla sensibilità e agli orientamenti sperimentali di Ersa: le equazioni dei modelli proposti, in particolare quelli agronomici, riflettono alcune scelte strategiche della sperimentazione condotta dall'Agenzia. Di seguito riportiamo alcuni esempi di come le equazioni dei modelli di *AgriCS* ricalchino le linee strategiche di Ersa in ambito agricolo: gli effetti delle tecniche di agricoltura conservativa e dell'uso dei residui colturali sul bilancio idrico delle colture, gli effetti del bilancio idrico e dello stress fisiologico sulla possibile presenza di micotossine nella granella del mais, il bilancio della sostanza organica e gli effetti dell'apporto di diverse matrici di sostanza organica, gli interventi agronomici che prevengono *leaching* e *run-off* dei nutrienti, il ruolo delle *cover-crops* nel migliorare il riutilizzo dei nutrienti nel sistema pianta-suolo, le tecniche agronomiche e gestionali in grado di ridurre le emissioni dei gas climalteranti, nonché le ripercussioni sul piano dell'impronta del carbonio e l'impronta idrica delle produzioni aziendali, infine l'importanza del bilancio della sostanza organica rispetto all'efficienza energetica globale dell'azienda agricola.

Un altro aspetto molto significativo della piattaforma riguarda la calibrazione e i test di calibrazione dei modelli. A tale riguardo *AgriCS* dispone di un'area di *amministrazione* che consente ai tecnici Ersa di testare i

modelli sulla base di dati raccolti in campo e di calibrare i parametri delle equazioni dei modelli fitosanitari della piattaforma anche tenendo conto dei dati di monitoraggio territoriale salvati in un database dedicato facente parte del progetto *AgriCS* e denominato *FitoInfoData* (FID).

Se le equazioni dei modelli della piattaforma tengono conto degli orientamenti delle sperimentazioni condotte da ERSA, è altrettanto vero che i modelli sviluppati con *AgriCS* diventano un patrimonio di conoscenza per la stessa Agenzia. Infatti tali modelli possono costituire la base di simulazione per esperimenti da condurre in campo in un processo definito *sperimentazione orientata dalla modellistica*. I risultati ottenuti da questa sperimentazione possono quindi rivelarsi utili nell'impostazione di nuovi piani colturali, innescando un ulteriore ciclo virtuoso nel processo di trasferimento di conoscenze a favore del sistema agricolo regionale.

## Conclusioni

Per assicurare piena utilità e maggiore riscontro possibile, una piattaforma ICT deve essere costantemente aggiornata nei suoi contenuti e negli aspetti caratteristici di ogni modulo, interiorizzando le esigenze della “comunità di utenti” creatasi mano a mano con la diffusione del sistema. Una comunità indipendente di utenti può garantire infatti la crescita della piattaforma grazie alle diverse conoscenze sviluppate, tenendo conto delle domande di coloro che operano negli agri-sistemi presenti sul territorio regionale. Un sistema di questo tipo deve essere dapprima implementato e successivamente sviluppato e mantenuto nel tempo. La sua crescita dipende innanzitutto dalla vitalità della comunità di utenti, pertanto è necessario che tali applicativi entrino a far parte degli strumenti di uso comune delle aziende agricole, alimentando in questo modo l'interscambio di informazioni e bisogni che garantiscono la crescita, lo sviluppo e la continuità del metodo di lavoro avviato.

## Ringraziamenti

Lo sviluppo della piattaforma *AgriCS* è stato finanziato dalla sotto-misura 1.2 del PSR 2014-2020 della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia



PROGRAMMA DI SVILUPPO RURALE  
DELLA REGIONE AUTONOMA  
FRIULI VENEZIA GIULIA



## Bibliografia

- Cicogna A., Salvador M., Micheletti S. (2013). Integrazione di dati radar e dati di misure a terra per la creazione di mappe di pioggia Atti del convegno AIAM 2013, 75-76.
- Bacco, M., Barsocchi, P., Ferro, E., Gotta, A., & Ruggeri, M. (2019). The digitisation of agriculture: A survey of research activities on smart farming. *Array*, 3, 100009.
- Ayre, M., Mc Collum, V., Waters, W., Samson, P., Curro, A., Nettle, R., Paschen, J.-A., King, B., Reichelt, N. (2019). Supporting and practising digital innovation with advisers in smart farming. *Njas - Wageningen J. Life Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.05.001>.

# ANALYSIS OF YEARS 2014, 2021, 2022 AND 2023 IN BAROLO PIEDMONTESE WINE REGION USING CROP AND BIOSPHERIC MODELS IVINE AND UTOPIA

## *ANALISI DELLE ANNATE 2014, 2021, 2022 E 2023 NELLA REGIONE VINICOLA PIEMONTESE DEL BAROLO MEDIANTE L'USO DEI MODELLI DI CRESCITA E DI BIOSFERA IVINE E UTOPIA*

Claudio Cassardo<sup>1\*</sup>, Valentina Andreoli<sup>1</sup>, Giulio Nesti<sup>1</sup>, Luciana Rossato<sup>1</sup>, Tiziana La Iacona<sup>2</sup>, Federico Spanna<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics and NatRisk Center, University of Turin, Torino, Italia

<sup>2</sup> Phytosanitary Sector, Regione Piemonte, Torino, Italia

\* claudio.cassardo@unito.it

### **Abstract**

We have used the model chain composed by the land surface model UTOPIA (University of Turin model of land Process Interaction with Atmosphere) and the crop model IVINE (Italian Vineyard Integrated Numerical Model for Estimating Physiological Values) for analyzing the three years 2021-23, characterized by a progressive water scarcity, only temporary alleviated by few precipitation events in the summer and fall seasons. We have chosen a station located in the renowned Barolo wine region, in Piedmont (Italy). The data for driving the models have been gathered by the regional meteorological network. Despite the most important variable for IVINE model is the temperature, soil moisture is affecting the photosynthetic processes and has some influence on the plant growth, berry sugar content and final yield. To position those three years in the Piedmontese climate, we have compared them with the year 2014, in which precipitation amount in the region was higher than normal.

### **Parole chiave italiano**

Modello di crescita, vigne, siccità, UTOPIA, IVINE

### **Keywords english**

Crop model, vineyards, drought, UTOPIA, IVINE

### **Introduction**

Wine producers are increasingly turning to precision viticulture, a data-driven approach that aims to optimize grape quality and yield. Crop modeling, a technique born in the second part of the past century, nowadays plays a crucial role in this by acting as a virtual vineyard, allowing growers to explore different strategies and predict their outcomes before implementation. In particular, we can say that crop modeling is important for precision viticulture for the following reasons:

- i) Crop models can help predict grapevine water needs, allowing for targeted irrigation practices. This translates to water conservation and reduced costs.
- ii) Models can assess fertilizer requirements throughout the growing season, ensuring optimal nutrient supply for grape growth without unnecessary waste.
- iii) By simulating potential disease outbreaks based on weather conditions, crop models can guide preventative measures, minimizing reliance on pesticides.
- iv) Models can forecast potential grape yield, allowing viticulturists to plan harvest strategies and make informed decisions about resource allocation.
  - v) Crop models enable "what-if" scenarios. Viticulturists can test the impact of different

management practices or weather variations on grape quality and yield before implementing changes in the field.

Overall, crop modeling empowers viticulturists to make data-driven decisions, leading to: i) an increased profitability by optimizing resource use and minimizing waste; ii) an improved grape quality, through targeted management practices based on real-time data; iii) an enhanced sustainability, with reduced environmental impact from water and fertilizer use.

As precision viticulture continues to evolve, crop modeling is poised to play a central role in helping vineyards achieve optimal grape production while safeguarding the environment.

In this study, we focus our analysis on the years 2021, 2022 and 2023, characterized by lower-than-normal precipitations, which caused a serious depletion of the hydric resources in the renowned wine regions of Piedmont (Italy), such as Langhe, Roero, and Monferrato. In particular, we analyze the location of Castiglione Falletto, one of the eleven municipalities part of the DOCG territory of Barolo. The analysis is performed by looking the time trend of some output of the two numerical models shortly described in the next section, IVINE and UTOPIA.



## Materials and Methods

### UTOPIA

The University of Turin model of Land Process Interaction with Atmosphere (UTOPIA), continuously improved and tested since its Fortran development at our department in 1990 (Cassardo and Andreoli, 2019), is a one-dimensional diagnostic model. It studies the interactions at the interface between the atmospheric surface layer and the terrain, including vegetation and any present snow cover. The model has been applied to various climates using data collected routinely, during experimental campaigns, or coupled with atmospheric circulation models. UTOPIA simulates the physical interactions between the atmosphere, land surface, and vegetation. It is also a bigleaf scheme, where a single Leaf Area Index value represents the overall complexity of the vegetation canopy. UTOPIA is a one-dimensional diagnostic model (it works on a single point, in which the only direction considered is the vertical one) that, starting from the meteorological data, describes the exchanges of energy, momentum, and water vapor between the atmosphere and the soil, vegetated or not. The presence of a snow layer above ground or vegetation is also considered (Cassardo and Andreoli, 2019), as well as the water freezing in the soil. Vegetation and soil parameters (temperature and water content at different depths) are evaluated using balance equations applied to a scheme that considers the soil in multiple layers. The characteristics of soil and vegetation are codified into 34 types of vegetation or land use and 14 types of soil texture, respectively. In this study, the code referring to the vineyards was used. UTOPIA also calculates the terms of the carbon balance (linked to photosynthesis). UTOPIA requires the following meteorological parameters as boundary data, at an hourly or half-hourly rate: temperature and humidity of the air, pressure, precipitation, wind speed and direction, global solar radiation, and – if available – also the downward longwave radiation.

In this study, the only outputs of UTOPIA passed to IVINE model were those related to two subsoil variables: the temperature and the volumetric water content of the soil, in the root zone of the vineyards. However, some other variables relevant for the study will be shown.

### IVINE

The Italian Vineyard Integrated Numerical model for Estimating physiological values (IVINE – Andreoli et al., 2019) is a numerical model designed and developed in Fortran in our department to simulate the main phenological and physiological conditions of vines during their growth. It requires the following meteorological input data (boundary conditions) at an hourly rate: air temperature and relative humidity, global solar radiation, photosynthetically active radiation, wind direction and speed, atmospheric pressure, and temperature and volumetric water content in two subsoil layers (at depths of 34 and 106 cm, respectively).

IVINE also requires initial data: geographical information (latitude, longitude), soil texture, vineyard information (planting density and management data: number and dates of topping and thinning), and other parameters specific to the

grape variety considered (thermal thresholds for phenological phases, sugar content values for the beginning of ripening, veraison, and harvest, average number of bunches per plant and berries per bunch). If long-term data (30 years or more) are available, climatic simulations can be performed to obtain the climatology of the output.

IVINE outputs include the dates for each relevant phenological stage phase, plant yield, berry sugar content, berry weight, dry matter and fresh matter biomass, leaf water potential, and Leaf Area Index (LAI). As a detailed description of the model is available elsewhere (Andreoli et al., 2019), we will summarize some key points here.

IVINE simulates the phenological phases of the vines using hourly or daily thermal sums based on temperature thresholds defined for each variety. The phases considered are: budburst, flowering, fruit set, beginning of ripening, veraison, harvest, and exit from dormancy. The final three phases also consider berry sugar content, with specific thresholds for each stage. The model determines the phase change when either the thermal sum or sugar content threshold is met.

Plant vigor is evaluated using LAI (square meters of leaves per square meter of soil). Berry sugar content, used to monitor grape ripening, is calculated starting from the flowering phase using a double sigmoid curve. The yield is estimated based on dry matter production and plant density.

### Regional Meteorological Networks

We obtained the required hourly data for the two models from the meteorological observation database of ARPA (the regional agency for environmental studies) Piedmont, and from the one of the Regional Agro-Meteorological (RAM) network. The former database includes over 400 weather stations across the region, but not all stations have all sensors. The latter includes temperature, precipitation, and leaf wetness. For this study, we selected data (temperature, humidity, air pressure, wind speed and direction, precipitation, and solar radiation) measured at the stations closest to the municipal territory of Castiglione Falletto. When data was missing, we used data from the closest stations to fill the gaps. Finally, we created a database containing observations from January 1st, 2000, to March 31st, 2024, and used it to perform simulations with the UTOPIA and IVINE models.

## Results and Discussion

Soil temperature trends in the root zone across the four years considered (Fig. 1) reveal significant differences between years, despite the considerable depth examined. The range varies from 3-4 °C in the cooler months to 5-6 °C between June and August, particularly due to the extreme values of 2022. In particular, the soil is significantly warmer in 2022 from mid-May to late September, while in late January and mid-March, during temporary cold spells, it was the coolest. Conversely, 2014 and 2021 are almost always the coolest years of those examined (2014 in summer and 2021 in spring and autumn). 2023 is globally less hot than 2022, but during some heat waves it shows the highest temperatures (between

April and early May, and in October). Finally, the year 2024 is noteworthy, of which only the first three months are shown, because it is almost always warmer than the others, contributing to widening the range of values.

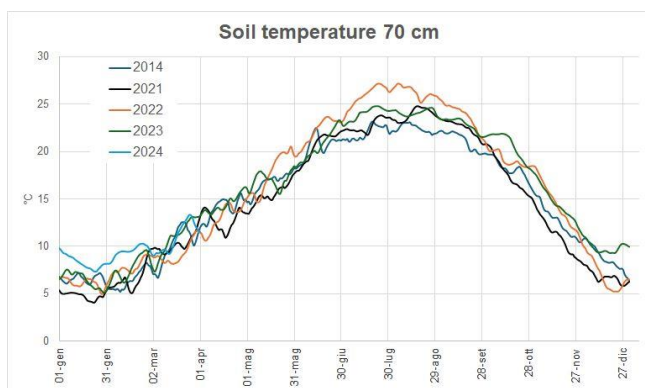


Fig.1 – Andamento della temperatura del suolo (dati giornalieri) valutata dal modello UTOPIA alla profondità di 70 cm nelle annate 2014, 2021, 2022, 2023 e inizio 2024 a Castiglione Falletto.

Fig.1 – Soil temperature time trend (daily data) evaluated by the UTOPIA model at a depth of 70 cm in the years 2014, 2021, 2022, 2023, and early 2024 in Castiglione Falletto.

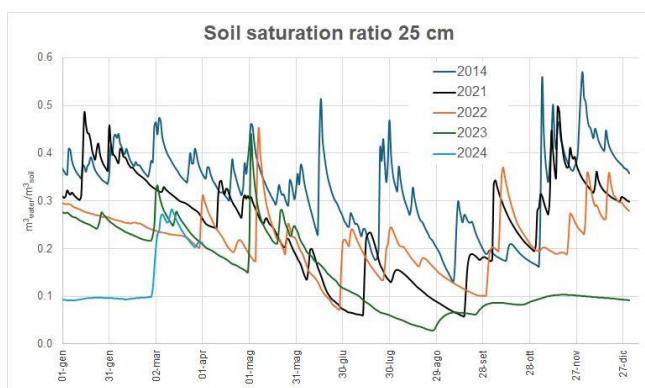


Fig.2 – Andamento dell’umidità del suolo (espressa come rapporto di saturazione) (dati giornalieri) valutata dal modello UTOPIA alla profondità di 25 cm nelle annate 2014, 2021, 2022, 2023 e inizio 2024 a Castiglione Falletto.

Fig.2 – Soil moisture (expressed as saturation ratio) time trend (daily data) evaluated by the UTOPIA model at a depth of 25 cm in the years 2014, 2021, 2022, 2023, and early 2024 in Castiglione Falletto.

Analysis of soil moisture trends at depths of 25 and 70 cm (fourth and fifth subsoil layers, respectively) reveals significant variations across the years. In 2014, the soil was significantly wetter during the summer season compared to other years. Additionally, at 25 cm (Fig. 2), the summer rainfall events in late June and late July 2022 and mid-July 2014 are clearly visible, followed by a similar decrease in moisture in both years. In autumn, precipitation in 2014 and 2021 brought values back to between 0.3 and 0.4  $\text{m}^3/\text{m}^3$  (however, in 2021 the decrease in moisture after rainfall appears to be greater), while in 2022 they remained slightly lower due to the sparser precipitation and in 2023 the

precipitation was so limited that the moisture remained below the threshold of  $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . This then led to the start of 2024 with a saturation ratio stuck at  $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$  until the March rainfall.

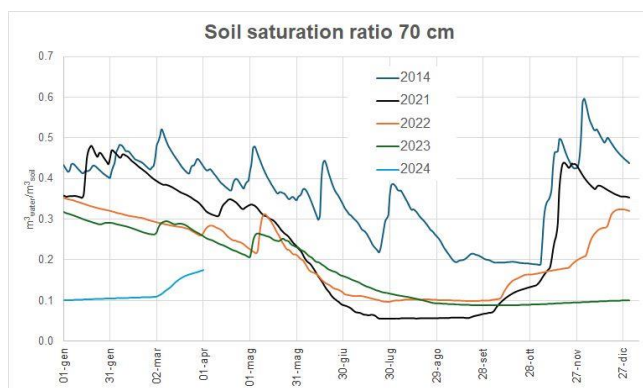


Fig.3 – Come Fig. 2 ma a 70 cm.

Fig.3 – Same as Fig. 2 but at 70 cm..

At a depth of 70 cm (Fig. 3), the situation is similar, albeit with less fluctuations, but the severe precipitation deficit of the year is much more evident, especially when comparing the years 2014 and 2021 in the summer quarter, where 2021 shows the minimum values among the years, and in the autumn quarter, where 2023 remains at very low values until the end of the year.

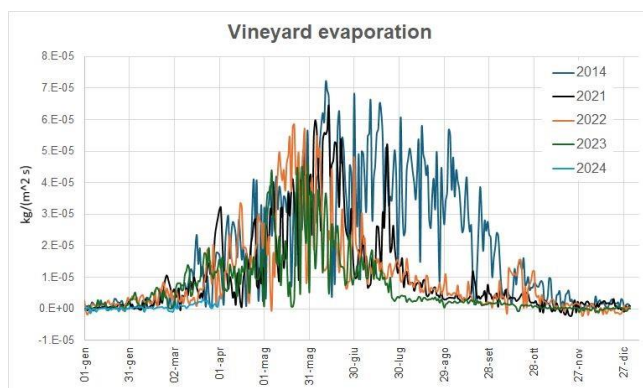


Fig.4 – Andamento del flusso di evaporazione dalla vegetazione (dati giornalieri) valutato dal modello UTOPIA nelle annate 2014, 2021, 2022, 2023 e inizio 2024 a Castiglione Falletto.

Fig.4 – Time trend of vegetative evaporation flux (daily data) evaluated by the UTOPIA model in the years 2014, 2021, 2022, 2023, and early 2024 in Castiglione Falletto.

In fact, in 2024 the year starts extremely dry, and the March rains only allow a partial recovery but do not yet fill the water deficit present at this level. It can therefore be noted that the persistence of the deficit for three years, with occasional autumn and winter events, has not allowed for an adequate recovery of groundwater, at least until the end of March 2024.

Analysis of the vegetation evaporation flux (Fig. 4) highlights, on the one hand, the considerable daily variability of this parameter as a function of meteorological conditions.

However, vegetation evaporation depends on two factors: on the one hand, the availability of solar radiation, which is greater on summer days, and the presence of high temperatures (more likely in summer), but on the other hand, the presence of humidity in the root zone is also necessary. The trends highlight this fact and should be analyzed in close correlation with the trends in soil moisture. In particular, it can be noted that only in 2014 and, to a lesser extent, in 2021, there are significant evaporative fluxes during the summer months (from June) and into late autumn, while in 2022 and, above all, in 2023, the moisture fluxes are reduced to a minimum.

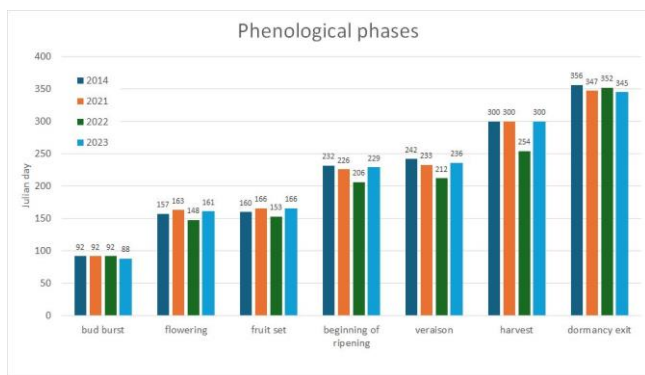


Fig.5 – Andamento delle fasi fenologiche valutate dal modello IVINE nelle annate 2014, 2021, 2022 e 2023 a Castiglione Falletto.

Fig.5 – Time trend of phenological phases evaluated by the IVINE model in the years 2014, 2021, 2022, and 2023 in Castiglione Falletto.

The trend of the main phenological phases (Fig. 5) shows that there are also significant differences: in 2014, all phases have a progressive delay, from four days for budburst to one month for the veraison phase, with 2022, the warmest year, well ahead of 2014, the coolest year among those examined. Less significant differences (about ten days) are instead present regarding the exit from dormancy, indicating that, probably, the climatic differences have not had too much impact on this variable, which in fact depends mainly on the air temperature.

The sugar content of the berries (Fig. 6), which shows a double sigmoid trend, clearly highlights the marked advance of the values in the 2022 year compared to all the others, and also the higher Brix values (25.6 °Bx). The optimal values are reached in 2022 already in the third decade of August, one month earlier than in 2021 and a few more days earlier than in 2023, while in 2014 lower values (23.9 °Bx) are reached two weeks after 2023.

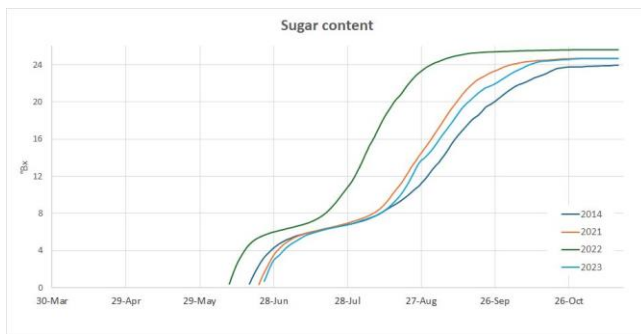


Fig.6 – Andamento del contenuto zuccherino degli acini (dati giornalieri) valutato dal modello IVINE nelle annate 2014, 2021, 2022 e 2023 a Castiglione Falletto.

Fig.6 – Time trend of berry sugar content (daily data) evaluated by the IVINE model in the years 2014, 2021, 2022, and 2023 in Castiglione Falletto.

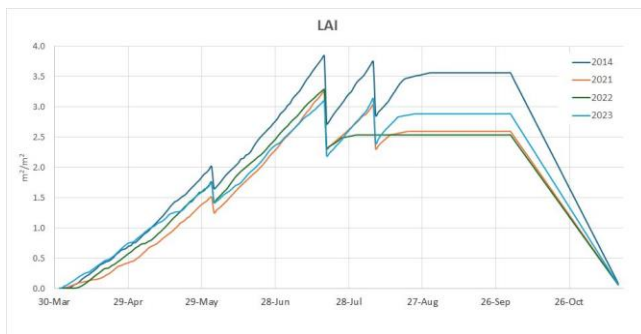


Fig.7 – Andamento dell'indice di area foliare (LAI, dati giornalieri) valutato dal modello IVINE nelle annate 2014, 2021, 2022 e 2023 a Castiglione Falletto.

Fig.7 – Time trend of leaf area index (LAI, daily data) evaluated by the IVINE model in the years 2014, 2021, 2022, and 2023 in Castiglione Falletto.

The trend of the leaf area index (Fig. 7) highlights the three prunings that, in the absence of measured data, the IVINE model automatically sets during the simulation: the first at the beginning of June, and the others in mid-July and in the first half of August. The trend, in analogy to what is then seen by examining the yield (Fig. 8), highlights the role of temperature and, in part, of solar radiation, combined with that of soil moisture, which regulates the photosynthesis process (we remember that photosynthetic activity involves water molecules, which are extracted from the subsoil through the roots). In these simulations, 2014 is the year with the highest LAI values due to the greater water availability. In 2021, it can be noted that LAI growth stalls after the second pruning, and the same happens in 2022, where the model does not perform the second summer pruning because the LAI stops growing shortly after the first pruning and therefore the pruning itself is no longer necessary. This behavior is not given by the trends of the individual variables, but by their combined trends, and by the non-linear processes that these trends have on the plant's physiology.

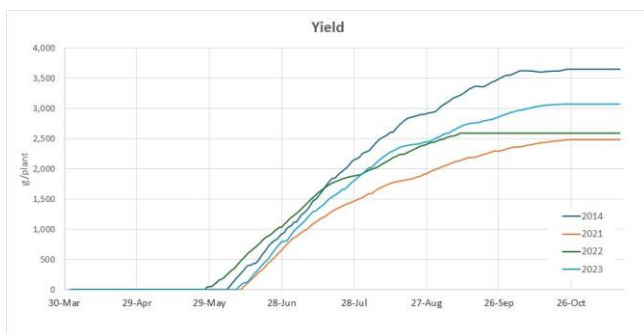


Fig.8 – Andamento del raccolto (dati giornalieri) valutato dal modello IVINE nelle annate 2014, 2021, 2022 e 2023 a Castiglione Falletto.

Fig.8 – Time trend of yield (daily data) evaluated by the IVINE model in the years 2014, 2021, 2022, and 2023 in Castiglione Falletto.

The trend of the yield (Fig. 8) highlights the dual role of air temperature and soil moisture, and therefore of the water balance. Both excessively low and high temperatures are limiting factors, but excessively low soil moisture is an equally strong limiting factor, as it affects photosynthesis. The 2014 yield has the highest values among the years because the temperatures were not excessive, and the soil had an adequate moisture content to favor optimal plant growth. 2021 was characterized by a hotter but especially very dry summer which severely limited plant growth. In 2023, the combination of temperature and moisture values practically stopped plant growth as early as August, and from then on there was only an increase in sugar content.

## Conclusions

The analysis of the trends of a selection of variables estimated by the two models UTOPIA (land surface model) and IVINE (crop model dedicated to vines) has allowed us to draw some indications on the trends of recent years, characterized by a strong water shortage due to the lack of rainfall, which has seriously decreased the soil moisture values even in the deepest layers. The results found, even if they depend on the models used, and on the presumption that they work well, have allowed us to make general considerations on what are the predominant factors that regulate the life and production of the vine, and will also allow us to verify the existing relationships in the models, in order to improve the parameterizations that will prove to be less performing. We will also try to dialogue with the producers to hear their point of view and to have confirmation that what has been modeled is in agreement with what they have also found in the field.

## Acknowledgements

The meteorological data necessary for the functioning of the models used in this work come from the ARPA Piemonte and Regional Agrometeorological databases, both available thanks to existing agreements between the Department of Physics of the University of Turin, the meteorological sector of ARPA Piemonte, and the Regione Piemonte (Piedmont Region), which allows us to use these data.

## 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.

# INTEGRATED SYSTEMS FOR THE ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY OF THE VINEYARD

## *SISTEMI INTEGRATI PER LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DEL VIGNETO*

Daniele Trincherò<sup>1\*</sup>, Giovanni Paolo Colucci<sup>1</sup>, Elena Filipescu<sup>1</sup>, Juan Camilo Mora Zoppi<sup>1</sup>, Enrico Borgogno Mondino<sup>2</sup>, Federica Ghilardi<sup>2</sup>, Andrea Virano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politecnico di Torino - Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Corso Castelfidardo, 39, 10129 Torino TO

<sup>2</sup> Università degli Studi di Torino - Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari - Largo Paolo Braccini, 2, 10095, Grugliasco, TO

\* [daniele.trincherò@polito.it](mailto:daniele.trincherò@polito.it)

### Abstract

"Integrated Tools for the Environmental Sustainability of the Vineyard" is a collaborative project by Politecnico di Torino, DET, and Università degli Studi di Torino, DISAFA, with three Wine Consortia and 17 farms. Over 44 months in Piemonte, it deployed local agrometeorological sensors in Moscato grape vineyards. These compact, low-energy sensors, along with a custom microcontroller LoRa board, monitored air temperature and humidity, soil conditions, and more. The project also analyzed satellite data using Google Earth Engine, creating multi-temporal NDVI maps. UAV surveys with DJI Phantom 4 Multispectral assessed vineyard dynamics. This integrated approach compared drone and satellite data, mapping vineyard vegetation for the 2022-2023 seasons and evaluating Sentinel-2's usefulness in describing vineyard growth.

### Parole chiave

Agrometeorologici; sensori; basso consumo; satellite; drone.

### Keywords

Agrometeorological; Low-energy sensors; Remote Sensing; Satellite; UAV.

### Introduzione

Il mondo dell'agricoltura, in particolare la viticoltura, al giorno d'oggi si affida in misura preponderante a dati meteorologici che devono essere accurati per prendere decisioni efficaci ed effettuare pratiche di gestione di precisione. Le condizioni meteorologiche influenzano direttamente la crescita delle colture, lo sviluppo delle malattie e la salute complessiva del vigneto. Tuttavia, ottenere informazioni meteorologiche precise e localizzate in ambienti rurali dei vigneti può essere non solo costoso ma anche difficile, specialmente laddove le stazioni meteorologiche tradizionali affrontano problemi di connettività a causa di una scarsa copertura digitale. Diverse soluzioni di tipo IoT (Internet-of-Things) sono state adottate negli ultimi anni per fornire soluzioni di tipo DSS (Decision Support System) (Vanezi et al. 2023) e per superare il divario digitale in ambiente rurale (Edwin et al. 2022; Langote et al. 2023).

Il progetto "Strumenti Integrati per la Sostenibilità Ambientale del Vigneto" è un progetto finanziato dalla Regione Piemonte che ha coinvolto il Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni (DET) del Politecnico di Torino, e il Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari (DISAFA) dell'Università degli Studi di Torino, insieme a tre consorzi vinicoli, 17 aziende agricole e 2 aziende per il trasferimento tecnologico e per la calibrazione della sensoristica, rispettivamente. Il progetto si avvale dell'utilizzo di dati raccolti da una rete di sensori wireless per l'agrometeorologia e dati ottenuti da sorvoli da drone e da immagini satellitari, mappando la vegetazione dei vigneti, ampliando le capacità di monitoraggio e gestione dei vigneti,

migliorando la precisione delle pratiche agricole e promuovendo la sostenibilità ambientale.

### Materiali e Metodi

Il progetto ha interessato un'area di territorio molto grande, quella di produzione delle uve moscato in Piemonte si sviluppa su tre province: Alessandria, Asti, Cuneo. Su questo territorio sono presenti una ventina di stazioni meteo appartenenti alla rete agrometeorologica regionale. Durante tutto il periodo di progetto i dati misurati da queste stazioni sono stati acquisiti e spazializzati. Per venire incontro alle evidenti limitazioni rappresentate dal numero ridotto di stazioni rispetto alla vastità delle aree oggetto di ricerca, si sono selezionate 17 aziende agricole e un vigneto campione posizionato in un'azienda facente parte del Consorzio Barbera d'Asti e Vini del Monferrato. All'interno di questi sono stati posizionati ulteriori sistemi di rilevazione agrometeorologica, personalizzati per ambienti viticoli, dotati di interfacce elettroniche progettate per un consumo energetico minimo e per coprire grandi distanze trasmissive, in modo da sopperire ai problemi originati dalle carenze di copertura telefonica. Il risultato è rappresentato da stazioni compatte che possono essere posizionate facilmente nei vigneti, anche in filare, permettendo una raccolta dati accurata e localizzata.

Lo standard trasmissivo adottato è di tipo LP-WAN (Low Power - Wide Area Network) (Kumar et al. 2022); in particolare, si è scelta una rete LoRaWAN, basata su tecnologia LoRa ('Lora Alliance'; 'SEMTECH'). All'inizio del progetto questa rete non era presente sul territorio oggetto di indagine e pertanto si è costruita un'architettura



specificatamente dedicata al raggiungimento delle 18 postazioni selezionate.

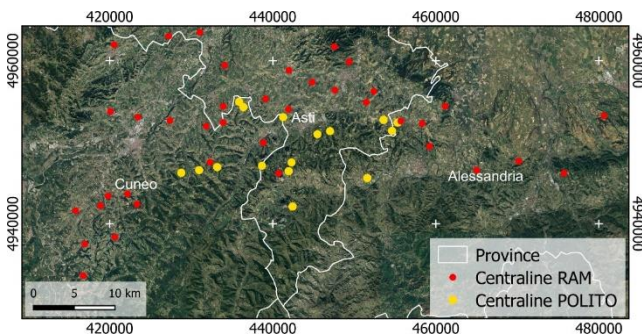


Figura 1 - Mappa delle 18 postazioni selezionate per il progetto e delle centraline RAM della Regione Piemonte.

Figure 1 - Map of the 18 stations selected for the project and the RAM control units in the Piedmont Region.

A differenza della rete regionale, è stato possibile raccogliere dati con cadenza temporale pari a 10 minuti, ottenendo 144 dati giornalieri. Il confronto con i dati regionali è stato condotto introducendo medie orarie. Le stazioni sono state progettate con la seguente dotazione di sensori:

- temperatura e umidità del terreno Delta Ohm HD3910.1.A.5 ('DeltaOHM');
- velocità del vento Navis WSS100/REED ('Navis');
- pluviometro Pronamic Tower Rain Gauge 1 mm ('Pronamic');
- temperatura e umidità dell'aria Sensirion SHT31 ('Sensirion');
- radiazione solare Apogee SP-110 ('Apogee');
- bagnatura fogliare doppia faccia.

Tutti i sensori sono stati selezionati sul mercato con caratteristiche idonee alle misurazioni agro-meteorologiche, con l'eccezione del sensore di bagnatura fogliare, che è stato progettato su misura per le esigenze di progetto.

Ogni sensore è stato collegato via cavo al nodo trasmittente, come illustrato in Figura 2.

Per quanto riguarda il sensore di bagnatura fogliare, è stata progettata una soluzione innovativa, a basso costo e caratterizzata da una particolare efficienza energetica.

Tradizionalmente, infatti, i sensori elettronici di bagnatura fogliare (Rowlandson et al. 2015), soprattutto quelli più precisi come quelli di tipo capacitivo, sono piuttosto costosi, richiedendo un investimento oneroso per piccole aziende agricole. L'adozione di un metodo di misura basato su un convertitore di tipo capacitivo-digitale ha permesso di rispettare i requisiti delle applicazioni dell'Internet-of-Things (IoT), mantenendo quindi consumi e costi bassi, come descritto in una precedente pubblicazione (Filipescu, Colucci, and Trincherò 2023). Per quanto riguarda la scheda elettronica, sviluppata per la raccolta e la trasmissione dei dati dai sensori, è stato utilizzato un modulo che integra in un unico componente un microcontrollore della famiglia STM32L0 ('STMicroelectronics') e il chip radio SX1262 ('SEMTECH').



Figura 2 - Stazione meteo installata in un vigneto di una delle aziende partner coinvolte nel progetto.

Figure 2 - Weather station installed in a vineyard of one of the partner companies involved in the project.

Questa scelta ha permesso di avere un dispositivo miniaturizzato e ottimizzato per installazioni in campo. La stazione è stata programmata per effettuare una misura per ogni sensore con un intervallo di 10 minuti. I dati trasmessi vengono ricevuti da una rete di ricevitori, connessi a Internet. La piattaforma iXemWine ('iXemLabs'; ('iXemWine')) è stata sfruttata per memorizzare i dati in arrivo e fornire un'applicazione web per la visualizzazione dei dati misurati dai sensori. Infine, sono state realizzate delle interfacce machine-to-machine per collegare tale piattaforma al sistema di supporto decisionale (DSS) fornito da Horta, per i modelli di interesse.

L'utilizzo combinato di UAV (Uncrewed Aircraft Vehicle) e la missione satellitare Sentinel-2 è funzionale al monitoraggio ambientale e combina le forze di entrambi. Sentinel-2, con dati forniti dall'Agenzia Spaziale Europea ('ESA'), offre una vasta copertura spaziale, temporale e spettrale. Il drone utilizzato (DJI Phantom 4 Multispectral - ('DJI')), d'altra parte, ha un sistema multispettrale ridotto e fornisce dettagli mirati su specifiche aree con una cadenza temporale ridotta. Grazie al suo sistema multispettrale di 5 bande e alla capacità di acquisizioni ad alta risoluzione, è possibile ottenere mappe dettagliate del vigneto (Ground Sampling Distance - GSD - 2-5 cm), comprese informazioni come l'altezza delle viti e la struttura del sistema di impianto. Nel 2022 è stato effettuato un unico sorvolo estivo pre-raccolta, utile per la pianificazione dei rilievi dell'anno successivo. Infatti, nel 2023 sono stati effettuati 3 voli nella stagione vegetativa. La ripetibilità del rilievo è stata garantita mantenendo costanti alcuni parametri nella pianificazione dei sorvoli: altezza di volo, sovrapposizione laterale (60%) e longitudinale (75%), velocità di sorvolo e GSD. Il software utilizzato per l'elaborazione dell'intero set di dati acquisiti è stato Pix4D Mapper.

I dati satellitari impiegati provengono da Copernicus Sentinel 2, acquisiti e pre-elaborati tramite Google Earth Engine ('GEE'). Le serie temporali delle mappe NDVI coprono l'intera area di interesse. Queste mappe sono state filtrate utilizzando il metodo Savitzky-Golay, regolarizzate con un intervallo di 5 giorni e selezionando solo le immagini con una copertura nuvolosa inferiore al 30%. L'NDVI è

ricosciuto come un indice spettrale in grado di fornire informazioni sulla vegetazione (Jiang et al. 2006; Sarvia et al. 2021; Sarvia et al. 2022), in particolare per quanto riguarda la fenologia e la caratterizzazione degli ecosistemi (Farbo et al. 2024; Usman et al. 2015; Pan et al. 2015). Per gli anni 2021, 2022 e 2023, sono stati elaborati i profili temporali di NDVI a livello di pixel per descrivere l'evoluzione locale del sistema vigneto. Avendo caratteristiche spettrali specifiche e comparabili, l'analisi di correlazione tra Sentinel-2 e il drone utilizzato consente di verificare l'affidabilità delle informazioni raccolte, stimare la coerenza radiometrica e integrare i vantaggi di entrambi i sistemi di monitoraggio. L'utilizzo combinato di tali strumenti supporta la gestione sostenibile delle risorse naturali e la comprensione dei cambiamenti ambientali attraverso la mappatura delle aree interessate (Ghilardi et al. 2023).

## Risultati e Discussione

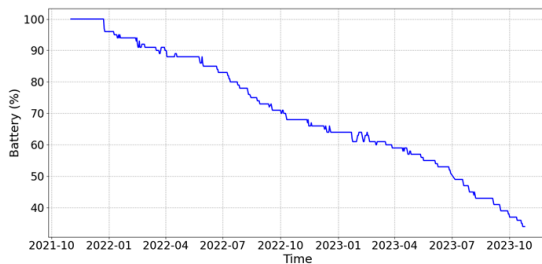


Figura 3 - Percentuale di livello di carica di una delle stazioni meteo.

Figure 3 - Percentage of charge level of one of the weather stations.

Le stazioni meteorologiche personalizzate hanno dimostrato un'elevata affidabilità e autonomia operativa durante l'intero periodo del progetto, grazie al funzionamento delle stazioni mediante l'utilizzo di due semplici batterie alcaline, facili da reperire e sostituire. Spesso, lo stesso paio di batterie ha permesso un funzionamento continuativo per oltre una stagione vegetativa, prima di scaricarsi, dimostrando l'efficienza energetica del dispositivo sviluppato (figura 3). La continuità dei dati è stata, inoltre, garantita dalla ridondanza della rete di ricevitori progettata, che ha permesso ad un ricevitore di sopperire al temporaneo malfunzionamento di un ricevitore vicino alla stazione meteo trasmittente.

I prodotti generati dai sorvoli UAV hanno generato una nuvola di punti densa da cui sono stati ricavati il Digital Surface Model (DSM) e l'indice NDVI. Il processamento di Pix4D Mapper ha creato automaticamente un Modello Digitale del Terreno (DTM). La differenza tra DSM e DTM fornisce l'altezza della vegetazione (Canopy Height Model - CHM). Il CHM consente di classificare efficacemente l'area di studio in filari e interfile, evidenziando le aree aventi vegetazione sviluppata, ridotta e/o zone prive di continuità vegetativa, ossia come lacune vegetative. Per quanto riguarda i risultati relativi alle mappe NDVI (da UAV e da satellite), vengono evidenziati bassi valori di indice spettrale nelle aree prive di vegetazione e valori elevati nelle zone con

filari vegetati, tenendo conto delle rispettive risoluzioni geometriche (figura 4).

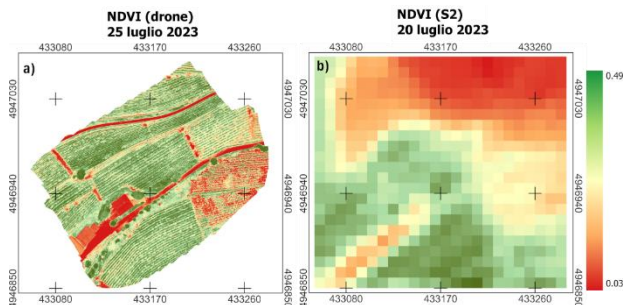


Figura 4 - Mappe NDVI da drone (a) e da Sentinel2 (b) (luglio 2023).

Figure 4 - NDVI maps from drone (a) and Sentinel2 (b) (July 2023).

Per analizzare la coerenza radiometrica e integrare i vantaggi di entrambi i sistemi di monitoraggio, è stata analizzata la correlazione tra NDVI da satellite e quello ottenuto da UAV, aspetto cruciale nel monitoraggio e nella valutazione delle risorse naturali e agricole. Ciò ha portato a significativi risultati, con alte correlazioni ( $R^2 =$  circa 0.8) tra i due indici spettrali calcolati.

## Conclusioni

Il progetto ha rappresentato un passo avanti significativo nella viticoltura di precisione, fornendo ai viticoltori una comprensione dettagliata delle condizioni meteorologiche e delle dinamiche di crescita dei vigneti.

Particolarmente utile è stata la dimostrazione dell'importanza delle stazioni agrometeorologiche in filare, che misurano dati diversi rispetto a quelle esterne al filare. Inoltre, le stazioni parcellizzate permettono una rappresentazione più significativa rispetto alle stazioni della rete pubblica regionale per il nostro scopo.

L'approccio integrato ha dimostrato di essere efficace nel migliorare le pratiche agricole e nella gestione sostenibile delle risorse naturali. Il mantenimento delle stazioni meteorologiche sarà esteso anche dopo la conclusione del progetto, garantendo una raccolta dati continua e sostenibile nel lungo termine. L'integrazione di dati provenienti da droni e satelliti offre un'importante soluzione per il monitoraggio e la gestione dei vigneti, migliorando l'efficacia delle pratiche agricole e la sostenibilità complessiva del settore vitivinicolo.

## Ringraziamenti

Questa ricerca è stata condotta nell'ambito del progetto "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"

## Bibliografia

- Edwin, Leslie, Hui J. Lee, Pin J. Ker, Md Z. Jamaludin, Mohd Anif Akhmal Abu Bakar, Ramlah Awang, and Farah AM Yusuf. 2022. "LoRa System with IOT Technology for Smart Agriculture System." In *2022 IEEE 20th Student Conference on Research and Development (SCoReD)*, 39–44. IEEE.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9974084/>.
- Farbo, A., F. Sarvia, S. De Petris, V. Basile, and E. Borgogno-Mondino. 2024. "Forecasting Corn NDVI through AI-Based Approaches Using Sentinel 2 Image Time Series." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 211. Elsevier: 244–261.
- Filipescu, Elena, Giovanni Paolo Colucci, and Daniele Trincherò. 2023. "Advances in Design and Construction of Leaf Wetness Sensors." In *2023 IEEE Conference on AgriFood Electronics (CAFE)*, 128–131. IEEE.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10291759/>.
- Ghilardi, Federica, Andrea Virano, Marco Prandi, and Enrico Borgogno-Mondino. 2023. "Zonation of a Viticultural Territorial Context in Piemonte (NW Italy) to Support Terroir Identification: The Role of Pedological, Topographical and Climatic Factors." *Land* 12 (3). MDPI: 647.
- Jiang, Zhangyan, Alfredo R. Huete, Jin Chen, Yunhao Chen, Jing Li, Guangjian Yan, and Xiaoyu Zhang. 2006. "Analysis of NDVI and Scaled Difference Vegetation Index Retrievals of Vegetation Fraction." *Remote Sensing of Environment* 101 (3). Elsevier: 366–378.
- Kumar, z, Gokul Prasanth M, Bharath Kumar R, Abhishek J, and Ajay D. 2022. "LPWAN for IoT." In *2022 International Conference on Advanced Computing Technologies and Applications (ICACTA)*, 1–4. doi:10.1109/ICACTA54488.2022.9753563.
- Langote, Meher, Arpit Chandankhade, Munabber Waghade, Shizhan Zade, and Priyanshu Lokhande. 2023. "System for IoT Agriculture Using LoRaWAN." In *2023 1st DMIHER International Conference on Artificial Intelligence in Education and Industry 4.0 (IDICAIEI)*, 1:1–5. IEEE.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10406617/>.
- Pan, Zhuokun, Jingfeng Huang, Qingbo Zhou, Limin Wang, Yongxiang Cheng, Hankui Zhang, George Alan Blackburn, Jing Yan, and Jianhong Liu. 2015. "Mapping Crop Phenology Using NDVI Time-Series Derived from HJ-1 A/B Data." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 34. Elsevier: 188–197.
- Rowlandson, Tracy, Mark Gleason, Paulo Sentelhas, Terry Gillespie, Carla Thomas, and Brian Hornbuckle. 2015. "Reconsidering Leaf Wetness Duration Determination for Plant Disease Management." *Plant Disease* 99 (3): 310–319. doi:10.1094/PDIS-05-14-0529-FE.
- Sarvia, Filippo, Samuele De Petris, Federica Ghilardi, Elena Xausa, Gianluca Cantamessa, and Enrico Borgogno-Mondino. 2022. "The Importance of Agronomic Knowledge for Crop Detection by Sentinel-2 in the CAP Controls Framework: A Possible Rule-Based Classification Approach." *Agronomy* 12 (5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute: 1228. doi:10.3390/agronomy12051228.
- Sarvia, Filippo, Elena Xausa, Samuele De Petris, Gianluca Cantamessa, and Enrico Borgogno-Mondino. 2021. "A Possible Role of Copernicus Sentinel-2 Data to Support Common Agricultural Policy Controls in Agriculture." *Agronomy* 11 (1). MDPI: 110.
- Usman, M., R. Liedl, M. A. Shahid, and A. Abbas. 2015. "Land Use/Land Cover Classification and Its Change Detection Using Multi-Temporal MODIS NDVI Data." *Journal of Geographical Sciences* 25 (12): 1479–1506. doi:10.1007/s11442-015-1247-y.
- Vanezi, Evangelia, Maria Anastasiou, Christos Mettouris, Aliko Kallenou, Marijana Dimitrova, and George A. Papadopoulos. 2023. "FARM: A Prototype DSS Tool for Agriculture." In *2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 1–6. doi:10.23919/SpliTech58164.2023.10193124.

## Sitografia

- "Apogee" - Available Online:  
<https://www.apogeeinstruments.com/content/sp-spec-sheet.pdf> (Accessed on 11 April 2024).
- "DeltaOHM" - Available Online:  
[https://environmental.senseca.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM\\_HD3910\\_datasheet\\_ITA.pdf](https://environmental.senseca.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM_HD3910_datasheet_ITA.pdf) (Accessed on 12 April 2024).
- "DJI" - Available Online: <https://www.dji.com/it/p4-multispectral> (Accessed on 9 April 2024).
- "ESA" - Available Online: <https://www.esa.int/> (Accessed on 3 April 2024).
- "GEE" - Available Online: <https://earthengine.google.com/> (Accessed on 3 April 2024).
- "iXemLabs" - Available Online: <https://www.ixem.polito.it> (Accessed on 8 April 2024).
- "iXemWine" - Available Online: <https://ixem.wine/> (Accessed on 12 April 2024).
- "Lora Alliance" - Available Online: <https://lora-alliance.org/> (Accessed on 12 April 2024).
- "Navis" - Available Online: [http://navis-anemometers.com/pdf/WSS100\\_REED2.pdf](http://navis-anemometers.com/pdf/WSS100_REED2.pdf) (Accessed on 11 April 2024).
- "Pronamic" - Available Online:  
<https://pronamic.com/products/tower-rain-and-precipitation-sensor/> (Accessed on 11 April 2024).
- "SEMTECH" - Available Online:  
<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276> (Accessed on 12 April 2024).
- "Sensirion" - Available Online:  
[https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/63A5A569/Datasheet\\_SHT3x\\_DIS.Pdf](https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/63A5A569/Datasheet_SHT3x_DIS.Pdf) (Accessed on 11 April 2024).
- "STMicroelectronics" - Available Online:  
[https://www.st.com/content/st\\_com/en.html](https://www.st.com/content/st_com/en.html) (Accessed on 11 April 2024). Accessed April 24.