

DIFFERENT APPROACHES FOR MODELLING SUNFLOWER PHENOLOGY UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

APPROCCI MODELLISTICI PER LA SIMULAZIONE DELLA FENOLOGIA DEL GIRASOLE (*HELIANTHUS ANNUUS L.*) IN SCENARI DI CAMBIAMENTO CLIMATICO

Francesca Di Cesare¹, Giovanni Maria Poggi^{2*}, Marco Vignudelli³, Francesca Ventura³

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

²CREA - Council for Agricultural Research and Economics, Research Centre for Agriculture and Environment, Bologna, Italy

³Department of Agricultural and Food Sciences (DISTAL), Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Bologna, Italy

*Corresponding author email: giovannimaria.poggi@crea.gov.it

Abstract

Temperature variations related to climate change are profoundly affecting crop phenological development, highlighting the need to reassess commonly used predictive models. The calculation of Growing Degree Days (GDD) is a key tool for estimating phenological dynamics, but models that do not account for the impact of high temperatures are becoming increasingly inadequate in the face of more frequent heatwaves.

This study compares six GDD calculation models to evaluate their effectiveness under current climate conditions in Northern Italy, focusing on the spring-summer crop cycle of sunflower. The models analyzed include the average method, the single triangle method (with three different upper threshold cut-off techniques: horizontal, vertical, and intermediate), and the physiologically based beta-distribution function method.

The analysis, conducted using a 22-year historical dataset of phenological and meteorological data from the Cadriano station (Bologna, Italy), showed that traditional models maintain good accuracy in estimating full flowering, but tend to underestimate full maturity in warm years. The beta-distribution method proved to be the most accurate, although it is also the most complex to implement. Conversely, the intermediate cut-off technique offered a good balance between accuracy and ease of application. These findings emphasize the importance of adopting predictive models that are more responsive to thermal stress, in order to support effective agronomic decision-making and promote climate-resilient agriculture

Parole chiave

Calcolo dei GDD, fenologia, cambiamento climatico, tecniche di cut-off, soglie termiche

Keywords

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

Introduzione

Il cambiamento climatico e le conseguenti variazioni nel trend delle temperature hanno un impatto significativo sullo sviluppo fenologico delle piante, poiché la temperatura è il principale fattore determinante di questo processo.

Questa connessione tra temperatura dell'aria e fenologia delle piante, è espressa attraverso i Growing Degree Days (GDD), definiti come "unità termiche" o "tempo termico" accumulato durante un periodo di tempo, generalmente un giorno (24 ore) (McMaster e Wilhelm 1997)

Esistono diversi approcci modellistici per simulare lo sviluppo fenologico attraverso il calcolo dei GDD. La maggior parte di questi modelli condivide l'assunzione che una pianta inizi a cumulare il tempo termico una volta che le temperature superano una soglia minima (temperatura base - T_{base}), necessaria per passare da una fase fenologica all'altra, e cessi di accumularlo quando la temperatura supera una soglia superiore (T_{up}) (McMaster e Wilhelm 1997; Chuine e Régnière 2017; Piao et al. 2019).

Il metodo più semplice per calcolare i GDD è rappresentato dal cosiddetto *average method* (Arnold 1960). Si tratta di un metodo che calcola i GDD a partire dalla temperatura massima e minima giornaliera dell'aria. Questo modello presuppone che le unità di calore cumulate nelle 24 ore possano essere approssimate alla differenza tra la

temperatura media giornaliera e la temperatura di base della coltura.

Tuttavia, questo approccio presenta diverse debolezze a causa della sua eccessiva semplificazione, poiché assume una relazione lineare tra temperatura e GDD, contrariamente alla risposta non lineare degli organismi biologici (Maiorano 2012), e non considera le fluttuazioni giornaliere della temperatura.

Un approccio non lineare invece considera che il tasso di sviluppo delle piante aumenta linearmente con la temperatura solo tra la temperatura di base e la temperatura ottimale per lo sviluppo della coltura. Una volta che la temperatura supera quella ottimale, il tasso di sviluppo inizia a diminuire, fino a diventare nullo quando la temperatura raggiunge la cosiddetta "temperatura massima cardinale".

Per superare le limitazioni dell'*average method*, si possono utilizzare modelli più sofisticati basati su funzioni non lineari, come il *beta distribution function*, metodo che, impiegando dati di temperatura orari come input, considera le fluttuazioni giornaliere della temperatura (Zhou e Wang 2018).

Questo approccio permette di rappresentare in modo più realistico la risposta termica delle piante, incorporando tre parametri: la temperatura base (T_{base}), la temperatura ottimale (T_{opt}) e la temperatura massima (T_{up}). In questo

modello, il tasso di sviluppo è nullo quando la temperatura è inferiore a T_{base} o superiore a T_{max} , mentre raggiunge il valore massimo a T_{opt} . Tale equazione consente di descrivere in maniera più accurata la dinamica fenologica, tenendo in conto sia la non linearità della risposta biologica sia le variazioni termiche giornaliere, ma necessita di dati di temperatura orari come input

Ad un livello intermedio di complessità, troviamo il *single triangle method* (Snyder et al. 1999) frequentemente impiegato in contesti operativi di campo, che utilizza come input le temperature minime e massime giornaliere ma introduce una migliore approssimazione dell'andamento nelle 24 ore rispetto al metodo della media. Questo metodo presuppone che la variazione di temperatura giornaliera possa essere approssimata rappresentando il profilo di temperatura di 24 ore come un triangolo. I GDD cumulativi sono stimati in base all'area del triangolo, che serve come approssimazione dell'integrale della curva di temperatura giornaliera. Inoltre, per tenere conto degli effetti negativi delle temperature superiori alla T_{opt} , il metodo del triangolo singolo può essere affinato utilizzando diverse tecniche di “cut-off” (*horizontal, vertical, intermediate*).

In questi metodi, l'area di calcolo dei gradi-giorno viene modificata in relazione a una temperatura soglia superiore (T_{up}), al di sopra della quale il tasso di sviluppo inizia a diminuire o si ferma, a seconda della strategia di cut-off utilizzata (University of California Davis, www.ipm.ucdavis.edu/WEATHER/ddconcepts.html).

Alla luce di queste considerazioni, i metodi di calcolo dei GDD che non considerano una soglia superiore di temperatura - e quindi non tengono conto degli effetti negativi delle alte temperature sullo sviluppo fenologico - risultano adeguati in condizioni climatiche “standard”, ma possono rivelarsi inadatti nel contesto del cambiamento climatico, in particolare in area mediterranea. L'aumento della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore potrebbe infatti condurre a stime distorte dello sviluppo fenologico, non rappresentative della reale risposta delle colture alle condizioni termiche estreme.

Il cambiamento climatico ha infatti spostato notevolmente i tempi dei principali eventi fenologici, con forti impatti sullo sviluppo delle colture, sulla resa e sulla qualità (Piao et al. 2019; Poggi et al. 2022; Fornaciari et al. 2023), aprendo la strada a numerosi studi di confronto dei modelli fenologici (Chuine e Régnière 2017).

In questo contesto, l'obiettivo del presente lavoro è quello di confrontare i vari modelli di calcolo, dal più semplice al più raffinato, con particolare attenzione alle tecniche di cut-off che considerano la soglia di temperatura superiore (T_{up}), applicate al *single triangle method*, per valutare quale di esse fornisca i migliori risultati nel calcolo dei GDD e nella simulazione fenologica, per la coltura primaverile-estiva *Helianthus annuus* L. nel Nord Italia alla luce del cambiamento climatico.

A tal fine, è stata utilizzata una serie storica di dati fenologici e meteorologici, confrontando “anni standard” e “anni caldi” (anni in cui sono state registrate condizioni di alta temperatura).

Materiali e Metodi

In questo studio sono stati utilizzati ventidue anni di dati fenologici (2003 - 2024), ricavati dal bollettino fenologico, pubblicato settimanalmente dal Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari (DISTAL) dell'Università di Bologna. Il bollettino diffonde i dati dei rilievi fenologici effettuati secondo il protocollo Phenagri (Pasquini 2006), presso le parcelle sperimentali della stazione agro-fenologica di Cadriano (BO) (44° 33' 0300" N, 11° 24' 03600" E).

La fenologia è stata analizzata secondo la scala BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt, and Chemical industry), riconosciuta a livello internazionale, che codifica gli stadi di sviluppo delle piante con un codice a due cifre, che va dalla semina (00) alla raccolta (99), consiste quindi in 10 stadi principali (0-9), con 10 stadi secondari (0-9) per ogni principale (Meier 1997).

Per il calcolo dei GDD, da associare ai dati fenologici, sono stati utilizzati i dati meteorologici (temperature massime e minime giornaliere e temperature orarie) forniti dalla stazione agrometeorologica DISTAL, situata in prossimità della stazione agro-fenologica. Per valutare gli effetti dei regimi di alta temperatura sul calcolo dei GDD per il girasole, i 22 anni considerati sono stati suddivisi in “anni standard” e “anni caldi”, seguendo la procedura descritta da Fornaciari et al. (2023); gli “anni standard” e gli “anni caldi” sono stati definiti rispettivamente come gli anni in cui, rispettivamente, la temperatura media del trimestre giugno-agosto era inferiore o superiore al valore mediano del periodo di 22 anni.

L'analisi si è articolata in due fasi: nella prima, i modelli sono stati calibrati utilizzando dati climatici relativi ad anni “standard”. Per ciascun modello, sono stati calcolati i Gradi Giorno Accumulati (CGDD) necessari al raggiungimento delle fasi fenologiche BBCH 65 e BBCH 89, al fine di definire i requisiti termici per il raggiungimento di tali fasi fenologiche negli anni standard, ricavando così una soglia sperimentale.

Nella seconda fase, i modelli sono stati validati su anni “caldi”, simulando i Giorni Dalla Semina (DAS) in cui si raggiungevano le stesse fenofasi, utilizzando i CGDD precedentemente calibrati, al fine di valutarne le prestazioni in uno scenario di temperature elevate. Le simulazioni sono state confrontate con i dati osservati in campo, riportati nei bollettini fenologici settimanali, tramite l'Errore Quadratico Medio (RMSE).

Per verificare se i modelli presentassero capacità predittive significativamente diverse, è stato condotto il test di Diebold-Mariano (valore di $p = 0,05$)

Tutte le analisi statistiche sono state eseguite in R (R Development Core Team 2021), utilizzando i pacchetti *rstatix* (Alboukadel Kassambara 2023) e *forecast* (Hyndman and Khandakar 2008).

Modelli di calcolo GDD

Nel presente lavoro sono stati confrontati sei modelli di calcolo dei gradi giorno.

Il primo è l'*average method*, proposto da Arnold (1960):

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

dove

$$T_{min} = T_{base} \quad \text{se} \quad T_{min} < T_{base}$$

GDD rappresenta i gradi giorno accumulati giornalmente, T_{min} e T_{max} sono rispettivamente le temperature minima e massima giornaliera ($^{\circ}\text{C}$), e T_{base} è la temperatura cardinale minima della coltura ($^{\circ}\text{C}$).

Questo studio ha inoltre considerato i cosiddetti metodi geometrici, in particolare sono stati testati il *single triangle method*, con e senza tecniche di *cut-off*, illustrate nella Figura 1. In breve, il metodo standard, quindi il *single triangle method* senza *cut-off*, non prevede alcuna soglia superiore, per cui l'accumulo dei GDD prosegue fino alla T_{max} giornaliera (Figura 1a). La tecnica dell'*horizontal cut-off* considera che lo sviluppo prosegua a un ritmo costante quando la temperatura supera la soglia superiore (Figura 1b). L'*intermediate cut-off* assume che lo sviluppo rallenti (senza arrestarsi completamente) a temperature superiori alla soglia (Figura 1c). Il *vertical cut-off* prevede che lo sviluppo si arresti completamente oltre la soglia superiore (Figura 1d).

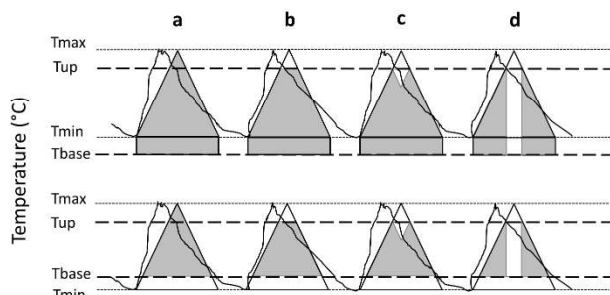


Fig.1 – Modelli GDD basati su approssimazioni geometriche: (a) triangolo singolo (senza *cut-off*); (b) *cut-off* orizzontale; (c) *cut-off* intermedio; (d) *cut-off* verticale. T_{base} = temperatura basale della coltura, T_{up} = soglia termica superiore della coltura, T_{max} = temperatura massima giornaliera, T_{min} = temperatura minima giornaliera. La linea continua rappresenta l'andamento giornaliero della temperatura.

Fig.1 - Degree-days models based on geometrical approximations: (a) single triangle (with no *cut-off*); (b) horizontal *cut-off*; (c) intermediate *cut-off*; (d) vertical *cut-off*. T_{base} = crop base temperature, T_{up} = crop upper threshold temperature, T_{max} = maximum daily temperature, T_{min} = minimum daily temperature. Solid line represents daily temperature dynamic.

In base alla concettualizzazione delle diverse tecniche di *cut-off*, la soglia superiore è stata impostata uguale a T_{opt} della coltura per le strategie *horizontal* e *intermediate*, e uguale a T_{up} per il *vertical cut-off*. I valori di T_{base} , T_{opt} e T_{up}

adottati per il girasole sono rispettivamente 4°C , 30°C e 40°C (Singh et al. 2017; Zhou e Wang 2018; Raes et al. 2018; FAO 2023).

L'approccio più avanzato considerato nel presente studio è il modello dei gradi giorno a base fisiologica, che impiega la *beta distribution function* e utilizza come input i dati della temperatura oraria. Questo modello è stato originariamente sviluppato da Yin et al. (1995) e successivamente riformulato da Zhou e Wang (2018):

$$GDD = \left(\sum_1^{24} HTT \right) / 24$$

Dove:

$$HTT = \begin{cases} 0 & \text{if } T_h < T_{base} \\ \left(\frac{T_h - T_{base}}{T_{opt} - T_{base}} \right) \left(\frac{T_{up} - T_h}{T_{up} - T_{opt}} \right)^{\frac{T_{up} - T_{opt}}{T_{opt} - T_{base}}} (T_{opt} - T_{base}) & \text{if } T_{base} \leq T_h \leq T_{up} \\ 0 & \text{if } T_h > T_{up} \end{cases}$$

HTT rappresenta il Tempo Termico Orario e T_h la temperatura dell'aria oraria.

Risultati e Discussione

Le medie di temperature dei due gruppi “anni standard” e “anni caldi” sono rappresentati nella Tabella 1. Il valore mediano del dataset è 24.4°C .

Tab.1 - Anni standard e anni caldi nel periodo 2003-2024, in base alla temperatura media nel trimestre giugno – agosto. Il valore mediano di riferimento, calcolato sull'intero dataset, è $24,4^{\circ}\text{C}$.

Tab.1 - Standard and warm years in the period 2003-2024, based on average temperature in the trimester June – August. The reference median value, calculated on the whole dataset, is $24,4^{\circ}\text{C}$.

standard years	average T in June - August	warm years	average T in June – August
2004	23.5 $^{\circ}\text{C}$	2003	26.8 $^{\circ}\text{C}$
2005	22.8 $^{\circ}\text{C}$	2009	24.5 $^{\circ}\text{C}$
2006	22.4 $^{\circ}\text{C}$	2012	25.9 $^{\circ}\text{C}$
2007	23.7 $^{\circ}\text{C}$	2015	25.1 $^{\circ}\text{C}$
2008	24.0 $^{\circ}\text{C}$	2017	26.1 $^{\circ}\text{C}$
2010	24.0 $^{\circ}\text{C}$	2018	24.9 $^{\circ}\text{C}$
2011	24.4 $^{\circ}\text{C}$	2019	26.0 $^{\circ}\text{C}$
2013	23.8 $^{\circ}\text{C}$	2021	24.9 $^{\circ}\text{C}$
2014	23.0 $^{\circ}\text{C}$	2022	25.6 $^{\circ}\text{C}$
2016	23.9 $^{\circ}\text{C}$	2023	24.9 $^{\circ}\text{C}$
2020	24.2 $^{\circ}\text{C}$	2024	26.0 $^{\circ}\text{C}$

I CGDD necessari per raggiungere le fasi BBCH 65 e 89 negli anni “standard” sono riportati per ciascun modello nella Tabella 2.

Per quanto riguarda la fase di fioritura (BBCH 65), sulla base dei valori di RMSE e dei risultati del test di Diebold-Mariano (Fig. 2A), non sono emerse differenze significative tra i modelli testati nella capacità di prevedere il raggiungimento

dello stadio BBCH 65. Negli “anni caldi”, la fioritura completa è stata raggiunta, in media, il 4 luglio, quindi, questo stadio fenologico è stato raggiunto prima dell’insorgere delle alte temperature estive, il che spiega le ridotte differenze nei CGDD tra i modelli, anche senza considerare una soglia termica superiore.

Tab.2 - Soglie termiche calibrate (CGDD) per il raggiungimento degli stadi BBCH 65 e BBCH 89 negli anni “standard”, per ciascun modello

Tab.2 - Calibrated thermal threshold (CGDD) to reach BBCH 65 and BBCH 89 in “standard” years for each degree-day model

Modelli GDD	CGDD per BBCH 65	CGDD per BBCH 89
Average method	1213	2390
Single triangle (ST)	1215	2392
(ST) vertical cut-off	1215	2392
(ST) horizontal cut-off	1212	2373
(ST) intermediate cut-off	1210	2354
Beta-distribution function	1569	2897

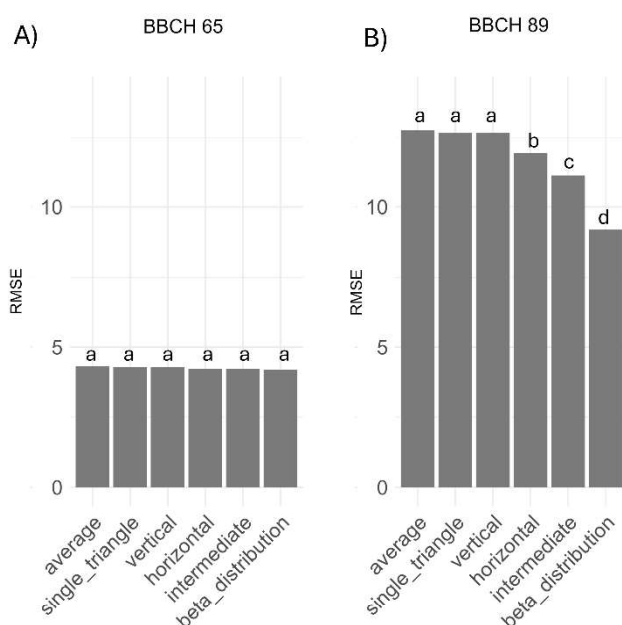


Fig.2 - Confronto delle prestazioni dei modelli di gradi giorno nel simulare gli stadi BBCH 65 (A) e BBCH 89 (B). Gli istogrammi rappresentano i valori di RMSE calcolati tra i giorni dopo la semina (DAS) osservati in campo e quelli simulati dai diversi modelli.

Fig.2 - Comparison of the performance of the tested degree-day models in simulating BBCH stages 65 and 89. Histograms represent RMSE values calculated between observed and simulated Days After Sowing (DAS).

Si segnala che i valori di RMSE sono espressi in DAS, indicando che le differenze nella previsione di BBCH 65 sono al massimo di 5 giorni. La frequenza delle osservazioni fenologiche effettuate nella stazione agrofenologica è

settimanale, e quindi questo RMSE risulta inferiore alla frequenza di campionamento. In pratica, l’errore è inferiore alla risoluzione delle misurazioni.

Risultati differenti sono emersi per BBCH 89 (Fig. 2B). La previsione dei DAS per il raggiungimento della piena maturazione con i metodi *average*, *single triangle* e *vertical cut-off* ha mostrato valori di RMSE simili. Tali risultati non sorprendono, infatti, sia i metodi *average* che *single triangle* non considerano soglie superiori, e il *vertical cut-off* non prevede alcun rallentamento nell’accumulo dei GDD al di sopra di T_{opt} , fino al raggiungimento di T_{up} (40°C-raggiunti raramente nel periodo di riferimento).

Al contrario, il metodo *horizontal cut-off* ha mostrato un miglioramento significativo rispetto ai metodi suddetti, poiché considera che, al di sopra di T_{opt} , la relazione lineare tra incremento della temperatura e accumulo di GDD si interrompe.

Inoltre, il metodo *horizontal cut-off* si è rivelato meno preciso rispetto al metodo *intermediate cut-off*. Infatti, il primo assume che lo sviluppo continui a un tasso costante oltre la soglia superiore, senza considerare l’effetto negativo delle T eccessive sullo sviluppo della pianta. Pertanto, il metodo *intermediate cut-off* può essere considerato una migliore approssimazione della risposta fisiologica della coltura, in quanto tiene conto del rallentamento dello sviluppo vegetativo a temperature superiori alla soglia superiore (fissata pari a T_{opt}).

Tali considerazioni sono state confermate dai nostri risultati, poiché quest’ultima tecnica di *cut-off* ha mostrato valori di RMSE più bassi (11.2 giorni) e prestazioni predittive significativamente migliori, secondo il test di Diebold-Mariano, anche rispetto al metodo *horizontal cut-off*.

Infine, la *beta-distribution function*, che considera la variazione giornaliera della temperatura (utilizzando dati orari in ingresso) e che è basata su principi fisiologici, si è dimostrata più precisa di qualsiasi altro metodo analizzato, come già riportato in precedenti studi fenologici (Maiorano 2012; Zhou e Wang 2018). In particolare, ha mostrato i migliori risultati con valori di RMSE pari a 9.2 giorni, e prestazioni predittive significativamente superiori rispetto a tutti gli altri modelli analizzati.

Pertanto, considerando i risultati complessivi, il metodo *intermediate cut-off* è risultato il migliore tra le tecniche geometriche di *cut-off*, mentre la *beta-distribution function* ha mostrato le migliori prestazioni in assoluto.

Conclusioni

Questo studio ha confrontato diversi modelli alternativi per il calcolo dei gradi giorno (GDDs) al fine di individuare il più accurato per il girasole in condizioni di cambiamento climatico al Nord Italia, utilizzando un dataset di lungo periodo contenente dati fenologici e meteorologici, utilizzati per la calibrazione e la validazione. Sono stati presi in considerazione sia modelli semplificati per il calcolo dei GDDs (come il metodo delle medie), in quanto ancora ampiamente utilizzati in contesti operativi di campo, sia metodi a base fisiologica come la funzione di distribuzione beta, e le tecniche di *cut-off* applicate al *single triangle*

method, al fine di includere gli effetti negativi dei regimi termici elevati associati al cambiamento climatico. I risultati hanno evidenziato che, nell'area del Nord Italia e nel contesto dei cambiamenti climatici, per il girasole, i modelli comunemente utilizzati, come l' *average* e il *single triangle method*, non generano ancora errori significativi nella stima della piena fioritura (BBCH65), ma risultano inadeguati nella previsione della piena maturazione (BBCH89). Il modello basato sulla *beta-distribution function* ha mostrato le migliori prestazioni. Tuttavia, anche le tecniche di *cut-off* geometrico, più semplici rispetto alla *beta-distribution*, hanno evidenziato un miglioramento significativo; in particolare, il metodo *intermediate cut-off* si è rivelato, tra i modelli geometrici, la migliore approssimazione della risposta fisiologica delle colture. Questo approccio potrebbe favorire l'integrazione di soluzioni modellistiche avanzate nei contesti operativi e nei Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS), offrendo il vantaggio di una maggiore semplicità applicativa, in quanto basato sull'impiego delle temperature minime e massime giornaliere anziché su dati orari.

Bibliografia

- Alboukadel Kassambara. 2023. "Rstatix R Package."
- Arnold, C. Y. 1960. "Maximum-Minimum Temperatures as a Basis for Computing Heat Units." *Proceedings. American Society for Horticultural Science* 76.
- Chuine, Isabelle, and Jacques Régnière. 2017. "Process-Based Models of Phenology for Plants and Animals." *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 48:159–82. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316>.
- "Food and Agriculture Organization (FAO). AquaCrop Version 7.1. Reference Manual: Annexes. Available Online." (2023).
- Fornaciari, Marco, Silvia Marrapodi, Luigia Ruga, Chiara Proietti, and Fabio Orlandi. 2023. "Tree Responses and Temperature Requirements in Two Central Italy Phenological Gardens." *International Journal of Biometeorology* 67 (10): 1607–17. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02522-3>.
- Hyndman and Khandakar. 2008. "Forecast: Forecasting Functions for Time Series and Linear Models. R Package Version 8.23.0."
- Memaster, Gregory S, and W W Wilhelm. 1997. "AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY Growing Degree-Days: One Equation, Two Interpretations." *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 87.
- Maiorano, Andrea. 2012. "A Physiologically Based Approach for Degree-Day Calculation in Pest Phenology Models: The Case of the European Corn Borer (*Ostrinia Nubilalis* Hbn.) in Northern Italy." *International Journal of Biometeorology* 56 (4): 653–59. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0464-z>.
- Maiorano, Andrea, Simone Bregaglio, Marcello Donatelli, Davide Fumagalli, and Antonio Zucchini. 2012. "Comparison of Modelling Approaches to Simulate the Phenology of the European Corn Borer under Future Climate Scenarios." *Ecological Modelling* 245: 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.03.034>.
- Meier, U. 1997. *Growth Stages of Mono-and Dicotyledonous Plants*. Edited by Blackwell Wissenschafts-Verlag. Berlin.
- Pasquini, Alessandra. 2006. *Il Rilevamento Agrofienologico: Dall'osservazione in Campo Alla Registrazione Dei Dati*. Edited by alimentari e forestali. CRA Ufficio centrale di ecologia agraria. Ministero delle politiche agricole.
- Piao, Shilong, Qiang Liu, Anping Chen, Ivan A. Janssens, Yongshuo Fu, Junhu Dai, Lingli Liu, Xu Lian, Miaogen Shen, and Xiaolin Zhu. 2019. "Plant Phenology and Global Climate Change: Current Progresses and Challenges." *Global Change Biology*. Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>.
- Poggi, Giovanni Maria, Iris Aloisi, Simona Corneti, Erika Esposito, Marina Naldi, Jessica Fiori, Stefano Piana, and Francesca Ventura. 2022. "Climate Change Effects on Bread Wheat Phenology and Grain Quality: A Case Study in the North of Italy." *Frontiers in Plant Science* 13 (August). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.936991>.
- Raes, Dirk, Pasquale Steduto, Theodore C. Hsiao, and Elias Fereres. 2018. Reference Manual for AquaCrop, Version 6.0/6.1. Fao. AquaCrop Website <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>. <http://www.fao.org/3/a-br244e.pdf>.
- Singh, Vijaya, Chuc T. Nguyen, Greg McLean, Scott C. Chapman, Bangyou Zheng, Erik J. van Oosterom, and Graeme L. Hammer. 2017. "Quantifying High Temperature Risks and Their Potential Effects on Sorghum Production in Australia." *Field Crops Research* 211 (June): 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.012>.
- Snyder, Richard L., Donatella Spano, Carla Cesaraccio, and Pierpaolo Duce. 1999. "Determining Degree-Day Thresholds from Field Observations." *International Journal of Biometeorology* 42 (4): 177–82. <https://doi.org/10.1007/s004840050102>.
- Yin, Xinyou, Martin J Kropff, Graham McLaren, and Romeo M Visperas. 1995. "AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY A Nonlinear Model for Crop Development as a Function of Temperature." *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 77.
- Zhou, Guanglin, and Qianjiu Wang. 2018. "A New Nonlinear Method for Calculating Growing Degree Days." *Scientific Reports* 8 (1): 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28392-z>.