

LA CLIMATOLOGIA DELLE GELATE PRIMAVERILI IN TRENTINO: IL PASSATO E GLI SCENARI FUTURI

SPRING FROST CLIMATOLOGY IN TRENTINO: PAST AND FUTURE SCENARIOS

Emanuele Eccel^{1*}, Roberto Rea¹, Alfonso Crisci²

¹Fondazione Edmund Mach-Centro Sperimentale Via E. Mach, 1- 38010 San Michele all'Adige (TN) – Italia

²CNR - IBIMET - Firenze (Italia)

*Corresponding author : Tel. +39 0461 615397 Fax: +39 0461 65095 emanuele.eccel@iasma.it

Received 24/07/2007 – Accepted 12/05/2008

Riassunto

E' forte l'evidenza di una tendenza generalizzata all'anticipo della fioritura di molte specie arboree, ed in particolare delle piante da frutto. La modellistica fenologica può risultare utile a simulare le date di fioritura in periodi con rilevazioni mancanti, sia nel passato, sia per il futuro, affidandosi a scenari climatici evolutivi; ciò consente di stimare il rischio di gelata incrociando le date di fioritura simulate con le temperature minime previste (o registrate) nel periodo concomitante. Tale analisi consente di ricavare eventuali tendenze di variazione nel rischio di gelo, sia rispetto al passato, sia nel futuro rispetto all'oggi. Con sei serie di date di fioritura per il melo cv. *Golden d.* raccolte in Trentino è stato sviluppato un modello fenologico a partire dal modello "Utah", basato sul soddisfacimento del fabbisogno in freddo e su un successivo accumulo di calore, con efficienza variabile. Si è trovato che esiste un'ottima correlazione tra il fabbisogno di caldo e le caratteristiche topo-climatiche del sito: piante che crescono in condizioni più "favorevoli" abbisognano di più caldo per schiudere le gemme a fiore. Estendendo il concetto, il fabbisogno in caldo potrebbe essere considerato "dinamico" con il clima, anziché statico. Il modello fenologico è stato applicato a dati del passato (dal 1960) e a simulazioni per il futuro, dopo aver eseguito un *downscaling* del modello climatico HadCM3 su due siti trentini significativi, secondo due scenari di evoluzione atmosferica dell'IPCC diversi. Per ogni stagione le date simulate sono state confrontate con le temperature previste per le medesime annate, contando il numero previsto di giorni di gelo. Risulta una riduzione del rischio di gelo nelle condizioni attuali rispetto ai decenni appena trascorsi, e una stazionarietà, o addirittura un lieve calo, per i decenni futuri, con un segnale un po' più chiaro nell'ipotesi del fabbisogno di caldo impostato in modo dinamico, ossia variabile con il riscaldamento climatico, anziché statico.

Parole chiave : melo, fenologia, rischio gelate, climatologia

Abstract

There is a strong evidence of a generalized tendency to an anticipation of flowering from many tree species, particularly for fruit trees. Phenological modelling may be helpful in estimating bloom dates in periods with missing surveys, both in the past and for the future, relying on climatic scenarios; that allows to estimate frost risk by crossing simulated bloom dates with simulated (or recorded) minimum temperatures in the same period. Such an analysis allows to detect possible trends in frost risk, comparing both the past with the present and the present with the future. Six phenological series were surveyed in Trentino on apple cv. Golden d.; with these data, a phenological model was developed starting from the "Utah" approach, based on the fulfilment of chill requirement and on the subsequent heat accumulation with a variable efficiency. We found a very good agreement between heat requirement and topo-climatic features of each site: plants growing in more "favourable" conditions need more heat to budburst. If this principle is extended, a "climate-dynamical" heat requirement might be assumed, instead of static one. The phenological model was applied to past data (from 1960) and to future simulations, after downscaling the climatic model HadCM3 at two significant sites in Trentino and according to two different IPCC's atmospheric evolution scenarios. For every season, simulated dates have been compared with temperatures predicted for the same years, and frost days have been assessed. The results point out that, under present conditions, frost risk is reduced in comparison to past decades, while it is stationary, or even in light decrease, for future decades. This trend is more significant under the hypothesis of dynamic heat requirement, increasing with the general temperature increase.

Keywords: apple, phenology, frost risk, climatology

1. Introduzione

L'uso della fenologia come indicatore climatico è in continua diffusione. Sono frequenti ricerche che testimoniano il forte legame tra le grandezze meteorologiche (in particolare i parametri legati alla termometria) e il calen-

dario fenologico di specie spontanee, e ciò risulta particolarmente attuale in un contesto di cambiamento climatico in atto (Menzel *et al.*, 2006; Schwartz *et al.*, 2006). Anche la fenologia delle specie agrarie si trova attual-

mente, in Italia come in Europa, in una fase di rilancio, come testimoniano, per esempio, la recente costruzione di una rete di rilievo fenologico nazionale (progetto I-PHEN - <http://www.ucea.it/iphen/>), promossa dall'UCEA (Ufficio Centrale di Ecologia Agraria del Ministero per le Politiche Agrarie e Forestali), e il progetto europeo MARS (Monitoring Agriculture by Remote Sensing), uno dei cui obiettivi è fornire stime annuali e modellizzare la produzione di specie agrarie in Europa (<http://mars.jrc.it>).

I modelli fenologici esplicitano le relazioni tra grandezze fisiche rilevabili e sviluppo delle fenofasi (Bindi *et al.*, 1997a, 1997b; Calò, 1993; Severini *et al.*, 2004; Kramer, 1994a). Essi consentono di simulare la transizione da una fase all'altra applicando relazioni funzionali alle variabili identificate come influenti. La modellizzazione del ciclo vegetativo delle specie agrarie trova un'immediata applicazione nella previsione fenologica e nella decisione dei tempi ottimali di esecuzione di determinati interventi agronomici (Austin *et al.*, 2002). Un modello fenologico consente anche di simulare il comportamento della pianta con serie di variabili meteorologiche, anche simulate, come lo possono essere quelle ottenute tramite modelli di circolazione atmosferici (GCM Global Circulation Model) in un preciso scenario climatico stabilito a priori. Proprio la quantificazione degli effetti che i fattori climatici esercitano sul ciclo vegetativo è di particolare attualità, soprattutto considerando che il riscaldamento climatico è in atto e probabilmente continuerà nei prossimi decenni (IPCC, 2007), se le ipotesi sostenute dall'IPCC risulteranno corrette. In Italia, l'attenzione verso la tematica è testimoniata dal recente progetto di ricerca CLIMAGRI (Esposito *et al.*, 2006), che ha indagato singoli aspetti delle ricadute del cambiamento climatico sulle colture agrarie, ed in particolare anche il problema del ri-

schio da gelo (Antolini *et al.*, 2006). In Trentino, la gran parte del coinvolgimento del comparto agricolo nella problematica delle gelate riguarda la coltivazione del melo; in una generale predisposizione alla preoccupazione verso qualunque modifica dello *status quo* climatico, anche ispirato dagli stessi rapporti ufficiali ONU - IPCC (Barker *et al.*, 2007), esistono timori che la tendenza all'anticipo vegetativo, osservato generalmente già ora, possa prevalere sull'effetto dell'aumento di temperatura, collocando la fase di fioritura delle piante da frutto in periodi caratterizzati da una maggiore probabilità di ritorni di freddo forse più rigidi di quelli attuali, per l'accentuazione degli scambi meridionali delle masse d'aria artica e tropicali (Cannell and Smith, 1986; Hänninen, 1991). Tale preoccupazione è sostenuta anche da due diverse motivazioni:

- 1) dal punto di vista osservativo, è riportata da alcuni autori (Zinoni e Antolini, 2002; Zinoni, 2008) una tendenza all'aumento del rischio di gelata, anche se talvolta dovuta alla diffusione di cultivar precoci o all'estensione dell'areale di coltivazione;
- 2) dal punto di vista modellistico, alcune proiezioni climatiche (Schär *et al.*, 2004) indicano una tendenza non solo all'aumento dei valori medi di temperatura, ma anche della loro distribuzione, in direzione di una sua maggiore dispersione intorno alla media; ciò si tradurrebbe in una previsione di maggiori oscillazioni termiche, sia positive che negative, sempre rispetto alla media; di conseguenza, i ritorni di freddo, seppur oscillanti intorno a temperature maggiori, potrebbero manifestarsi con entità superiore a quella attuale, o meglio, a quella del periodo climatico assunto come riferimento (di solito il trentennio 1961 - '90).

Quest'ultima tendenza, tuttavia, non pare ben supportata dalle indicazioni di IPCC, dove anche per l'area sudeuropea è prevista, per il secolo in corso, una minore incidenza di incursioni di masse d'aria artica (Meehl *et al.*, 2007). Altri autori, per aree diverse, si sono, peraltro, espressi a favore dell'ipotesi di una più probabile diminuzione del rischio (Kramer, 1994b; Murray *et al.*, 1989) o per la sua stazionarietà (Rochette *et al.*, 2004).

La quantificazione dell'entità del rischio da gelata tardiva richiede dunque un approccio modellistico rigoroso, per evitare di incorrere in speculazioni qualitative, che non potrebbero essere comprovate. Anche per ciò che riguarda il passato, un'analisi del rischio di gelata per una data coltura in un territorio non può essere condotta rigorosamente solo con indagini sul danno denunciato in occasione di gelate. Intervengono infatti, nel tempo, modifiche nelle varietà coltivate (e quindi della suscettibilità e del calendario fenologico), delle superfici utilizzate, di quelle assicurate, ecc... In definitiva, si è ritenuto che la migliore simulazione del rischio (dal passato al futuro) dovesse passare per un'impostazione modellistica doppia: la data di fioritura e la temperatura minima. La sperimentazione ha quindi compreso una prima fase di ricerca di un modello di fioritura del melo, una seconda di simulazione climatica calibrata sul Trentino, e infine un raffronto tra le date di raggiungimento delle fenofasi sensibili e le concomitanti temperature minime previste.

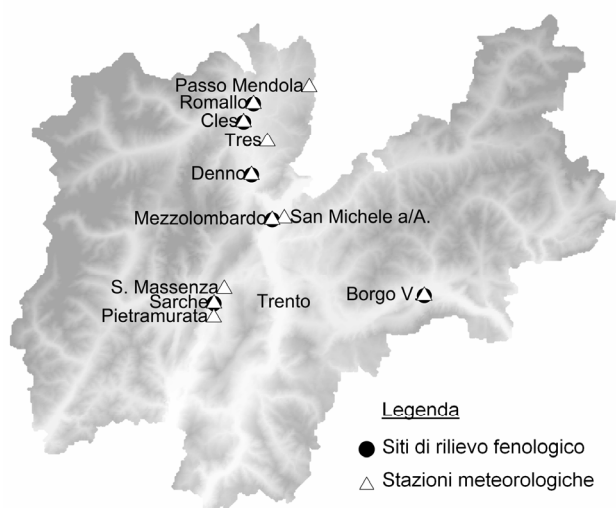


Fig. 1 - Localizzazione dei siti di rilievo fenologico e delle stazioni meteorologiche utilizzate per la modellistica fenologica.

Fig. 1 - Location of phenological survey sites and of meteorological stations used in phenological modelling

2. Metodi

2.1. Archivio di dati meteorologici e fenologici

La ricerca è stata condotta su diverse aree trentine vocate alla melicoltura, sia in fondovalle, sia in collina (Val di Non). La validazione del modello fenologico è stata invece eseguita su serie raccolte in Piemonte e Romagna. Le serie fenologiche utilizzate per il lavoro (localizzazione in fig. 1) erano di ampiezza e natura diversa (tab. 1). In due siti (Mezzolombardo e Cles) si poteva disporre di serie relativamente lunghe (17 anni) raccolte per buona parte del periodo secondo un criterio "orientato alla gemma" (protocollo Phenagri - Brunetti e Zinoni, 1999), con rilievi eseguiti sulle singole gemme di alberi e rami scelti ad inizio stagione. Per altri quattro siti le serie erano più brevi ed erano "orientate alla fase", ossia si limitavano alla registrazione della data di raggiungimento della fase fenologica, secondo la scala Fleckinger, riferita all'appezzamento aziendale nel suo complesso. Si è resa indispensabile una calibrazione del rilievo fenologico per permettere alle due serie, per i siti che le contemplavano entrambe, di corrispondere negli anni comuni; per i dettagli sul metodo si veda Rea and Eccel (2006).

Il modello fenologico è stato sviluppato sulle due serie più lunghe e di migliore qualità, mentre le altre quattro sono state impiegate per valutare il legame tra caratteristiche climatiche e richiesta di unità di caldo (gradi ora), come sarà meglio illustrato più avanti.

Nelle vicinanze di tutti i siti (con distanze dalle centinaia di m ai pochi km) si trovavano stazioni meteorologiche che hanno fornito i dati orari necessari per la modellazione, che sono stati integrati, ove necessario, per pervenire ad un archivio senza dati mancanti. La ricostruzione è stata eseguita con interpolazione dei singoli dati mancanti oppure tramite l'applicazione di un modello di interpolazione oraria (Cesaraccio *et al.*, 2001) a valori giornalieri di temperature massime e minime ricostruiti a loro volta grazie agli opportuni algoritmi di spazializzazione utilizzando la rete di stazioni esistente.

2.2. Modelli fenologici

Dopo un confronto tra alcuni modelli riportati in letteratura, si è scelto di integrare il modello "Utah" (Ashcroft *et al.*, 1977), introducendo un termine per l'efficienza di cumulo di calore, valutando la convenienza di inglobare il fotoperiodo e consentendo al cumulo di calore necessario al raggiungimento della fase di fioritura di variare con alcune caratteristiche topo-climatiche del sito.

Come fenofase-obiettivo del modello è stata scelta l'inizio fioritura (F1 secondo Fleckinger, 60 secondo BBCH). Per i dettagli sulle metodiche di calibrazione, confronto e sviluppo dei modelli si veda ancora Rea and Eccel (2006).

Tab. 1- Anagrafica delle serie fenologiche utilizzate

Tab. 1 - Status of phenological series

Sito	Periodo	Quota (m)	Tipo di rilievo
<u>Serie per sviluppo modello</u>			
Mezzolombardo	1984-2000	210	fenofasi gemma (PHENAGRI)
Cles	1984-2000	652	fenofasi gemma (PHENAGRI)
<u>Serie in Trentino</u>			
Mezzolombardo	1979-2003	210	fenofasi gemma (1984-2000), date di fioritura (1979-2003)
Cles	1979-2003	652	fenofasi gemma (1984-2000), date di fioritura (1979-2003)
Denno	1990-2001	321	solo date di fioritura
Sarche	1994-2001	245	solo date di fioritura
Romallo	1993-2001	727	solo date di fioritura
Borgo Valsugana	1995-2002	419	solo date di fioritura
<u>Serie fuori dal Trentino (test)</u>			
Solarolo (RA)	1996-2001		solo date di fioritura
Lagnasco (CN)	2002-2003		solo date di fioritura
Guarene (CN)	2003		solo date di fioritura
Savigliano (CN)	2003		solo date di fioritura
Busca (CN)	2003		solo date di fioritura

Il modello si divide in due fasi: il soddisfacimento del fabbisogno di freddo, per completare la dormienza, e l'accumulo di calore (fase "forzante"). Le due fasi si sviluppano in sequenza, vale a dire che la fase forzante inizia subito dopo il termine della fase di rimozione della dormienza. Il modello è stato utilizzato con dati orari. Il soddisfacimento del fabbisogno di freddo è stato mantenuto come proposto dal modello originale, interpolando con una funzione polinomiale di terzo grado la risposta della temperatura in unità di freddo ("chilling units"), originariamente proposta dagli autori in forma tabellare. Il fabbisogno è stato calibrato con la minimizzazione dell'errore sulla data di fioritura.

2.3. Modelli climatici

Il modello utilizzato nel presente studio è stato l'HadCM3 dell'Hadley Centre del MetOffice britannico (Pope *et al.*, 2000). Il valore scientifico dei risultati sui trend climatici futuri è sempre da subordinare al carattere ipotetico dello scenario che guida le simulazioni numeriche eseguite dal modello. Ogni simulazione viene effettuata assumendo una delle varie ipotesi sulle future emissioni di anidride carbonica, cui viene attribuito il ruolo di principale forzante nei confronti dei cambiamenti climatici. All'interno del presente studio

l'attenzione si è concentrata in particolare su due ipotesi di emissioni dello "Special Report Emission Scenario" (SRES), A2 e B2, che rappresentano per l'IPCC le opzioni intermedie di incremento di gas-serra. Le due ipotesi rispettivamente corrispondono a due scenari in cui nel primo caso, contrassegnato con la lettera A, è stato ipotizzato uno sviluppo condotto senza politiche di stabilizzazione delle emissioni, contrariamente a quanto avviene nel secondo; entrambi gli scenari della classe 2 prevedono uno sviluppo condotto su dinamiche "regionali"; essi non prevedono un aumento o una riduzione drastica del consumo di energia fossile, che invece è presa in considerazione in altri scenari come l'A1 e il B1.

Il dominio dell'HadCM3 è una griglia globale di 2.5° di latitudine x 3.75° di longitudine. Le proiezioni climatiche sono state ricondotte alla realtà climatica trentina tramite downscaling statistico (Murphy 1999, 2000), utilizzando le serie di temperatura per le stazioni di S. Michele e di Cles per il periodo 1990 – 2005 associate a dati temporalmente omologhi di simulazione giornaliera HADCM3 A2 e B2. Il downscaling ha avuto come orizzonte la finestra 1990-2050. Il metodo proposto nell'ambito del presente studio è assimilabile alla categoria delle funzioni di trasferimento e agisce in due passaggi a partire direttamente dall'insieme delle serie simulate dal modello climatico. In una prima fase, identificato geograficamente il sito dove si intende procedere alla costruzione dello scenario locale, sono state costruite le serie di scenario puntuali tramite un'interpolazione locale lineare basata sulla triangolazione irregolare lineare TIN – Triangulated Irregular Network (Heller, 1986), molto utilizzata nelle interpolazioni per creare modelli digitali del suolo. L'operazione di interpolazione vera e propria è stata fatta utilizzando la funzione *griddata*, disponibile nelle librerie del pacchetto MATLAB®R11 (www.mathworks.com). Le serie ottenute con questo tipo di interpolazione hanno il pregio di mantenere intatte le proprietà del trend lineare locale medio del punto geografico in esame, grazie all'utilizzo di operatori matematici di tipo non lineare e soprattutto per il fatto che la griglia di interpolazione è sempre costante e regolare nel modello di scenario. Tale fatto permette di ottenere dal contributo informativo del gruppo dei soli nodi prossimi al punto di stima di tenere conto dell'impatto dovuta dalla topografia associata dal modello. Questo è implicito nella ponderazione realizzata dall'algoritmo di TIN, che invece non era possibile con altro tipo di interpolatore senza ottenere distorsione forte del trend locale della variabile. Una volta ottenuta la serie interpolata in seguito si è proceduto alla stima delle funzioni di trasferimento per ogni singola data, mediante l'applicazione della funzione GLM (Generalized Linear Model) con link gaussiano disponibile nell'ambiente statistico di R Stat (R Development Core Team, 2007). L'operazione è stata fatta mantenendo, come variabile dipendente, l'insieme ordinato per rango dei dati giornalieri osservati e, come variabile indipendente, quello dei dati dello scenario puntuale, anch'essi ordinati per rango. Prima di effettuare la regressione tutti i dati sono stati opportunamente filtrati con un operatore a media mobile comprensivo di un intorno di ± 15

giorni rispetto alla data di stima. Con la modellistica GLM per ogni giorno sono disponibili i coefficienti da riapplicare alla serie di scenario per ottenere la serie calibrata.

2.4. Valutazione del rischio di gelo

Per la stima del rischio di gelo sono state valutate le temperature previste da modello climatico, considerando due soglie di rischio per due periodi, leggermente diversi a seconda delle soglie considerate. Sono state scelte soglie di rischio più alte di quelle ritenute di effettivo pericolo per le gemme del melo per due motivi: in primo luogo, esistono aree microclimaticamente soggette a temperature più basse di quelle che normalmente si verificano nelle due stazioni di riferimento e proprio in tali aree normalmente si hanno le gelate più evidenti; in secondo luogo, essendo la gelata un fenomeno di per sé poco frequente, la numerosità dei casi di gelata aumenta sensibilmente alzando di un grado le soglie; un campione più numeroso consente di valutare con migliore significatività l'occorrenza di casi di gelata prevista nei diversi periodi a confronto.

Chiarito ciò, sono state identificate le seguenti soglie: -1°C e +1°C. Sono state contate le giornate in cui la temperatura (simulata) è scesa al di sotto delle soglie fissate, in un periodo che va da otto giorni prima della fioritura nel primo caso (gelata moderata, per tenere conto di possibili effetti anche in fenofasi precedenti l'inizio di fioritura), e due giorni nel secondo caso (gelata lieve, senza possibilità di danni concreti per fenofasi antecedenti la fioritura), fino al 31 maggio di ogni anno.

3. Risultati

3.1 Modelli fenologici

Il risultato della modellistica fenologica può essere condensato in un modello che è stato denominato "Utah modificato", in quanto si tratta di un affinamento del modello originariamente proposto dal gruppo di lavoro di Ashcroft *et al.*, (1977). Considerando un'efficienza termica variabile in funzione della percentuale di cumulo raggiunto, il modello può essere espresso secondo la seguente equazione (Rea and Eccel, 2006):

$$GDH(k) = GDH(k-1) + \sum_{h=1}^{24} \max \left\{ 0, (T_h(k) - T_b) \left[1 + \left(\frac{GDH(k-1)}{GDH_{in.fior.}} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

dove

GDH(k) = gradi-ora cumulati per il giorno k;

$T_h(k)$ = temperatura dell'ora h nel giorno k;

T_b = temperatura di soglia (4.4 °C);

$GDH_{in.fior.}$ = cumulo richiesto per raggiungere la fase di inizio fioritura.

Il modello è stato sviluppato e calibrato su due siti (Mezzolombardo e Cles) e per ognuno di questi è stato calcolato $GDH_{in.fior.}$ come il valore che minimizzava l'errore sulla data di fioritura; tale valore è stato calcolato anche per le altre stazioni trentine.

Il risultato, espresso in termini di radice dell'errore medio quadratico (RMSE) si trova riassunto nella tab. 2. Esso è assai buono per le due stazioni con serie più lunga e rilievo più accurato (RMSE pari a $1.2 \div 1.5$ gg), per le quali è stato sviluppato il modello, soddisfacente ma meno accurato (RMSE tra 4.0 e 6.3 gg) per le altre stazioni. Dall'osservazione che il cumulo richiesto in calore ($GDH_{in.fior.}$) aumenta tendenzialmente con l'aumentare della temperatura media del sito, e non è quindi da ritenere una costante, si è indagato sui legami di tale importante parametro con parametri direttamente misurabili e legati al sito. E' infatti ipotizzabile che la maggior richiesta di caldo, per le aree climaticamente più favorite, potesse rispondere ad una legge empiricamente traducibile in equazione o algoritmo. Si è quindi trovato che esiste una correlazione strettissima tra le caratteristiche topoclimatiche del sito e il requisito in gradi-ora per raggiungere l'inizio della fioritura; si sono dapprima valutati mediante GIS i valori di pendenza ed esposizione per i singoli siti, ricavando degli indici (I_{slope} e I_{aspect}), tanto più alti quanto maggiore risultava la capacità di ricevere energia radiante (esposizione vicina al sud, inclinazione sensibile del pendio); si è visto poi che esisteva una buona correlazione tra le temperature primaverili (in particolare della media di aprile e maggio, T_{AM}) e il requisito in gradi-ora. Tramite calibrazione empirica (si veda sempre Rea and Eccel, 2006, per i dettagli), è stato trovato il coefficiente (pari a 0.4) che, come moltiplicatore della T_{AM} , consente di sommarla ai due indici I_{slope} e I_{aspect} per ottenere un indice sintetico chiamato I_{site} :

$$I_{site} = 0.4 \cdot T_{AM} + I_{slope} + I_{aspect} \quad (2)$$

Si è trovato che tale indice, calibrato come descritto, è perfettamente correlato al requisito in gradi-ora del modello "Utah modificato" ($r^2 > 0.99$), secondo l'equazione seguente:

$$GDH_{in.fior.} = 1302 \cdot I_{site} - 1371 \quad (3)$$

tanto che, noto I_{site} per una località, è possibile usare l'eq. (3) per valutare il requisito in gradi-ora per la fioritura. Aver ottenuto un requisito in calore che dipende così fortemente da parametri topo-climatici, facilmente calcolabili per qualunque sito, consente di "esportare" il modello anche in aree esterne a quella di creazione del modello stesso; è quanto è stato fatto con le serie fenologiche romagnole e piemontesi. Sono risultati errori medi per la serie piemontesi di 2.2 giorni e di 5.5 giorni (RMSE) per la serie romagnola, quindi perfettamente in linea con le serie trentine, per le quali $GDH_{in.fior.}$ era stato calcolato in modo indipendente, serie per serie.

3.2. Date di fioritura simulate

Per il periodo di disponibilità dei dati osservati, come si è detto, il risultato è soddisfacente e addirittura ottimo per le due serie sulle quali il modello è stato sviluppato (Mezzolombardo e Cles); si veda al proposito la fig. 2.

Per il sito di Mezzolombardo, con l'utilizzo dei dati della stazione di S. Michele è stato possibile simulare le date di fioritura con il modello fenologico dal 1960. La serie

Tab. 2 - Risultati della modellistica fenologica: requisito in calore per ogni sito ($GDH_{in.fior.}$), coeff. di determinazione della previsione della data di fioritura (r^2) e significatività, radice dell'errore quadratico medio (RMSE) della previsione

Tab. 2 - Results of phenological modelling: forcing requirement for every site ($GDH_{in.fior.}$), coefficient of determination of the flowering date prediction (r^2) and significance, root mean square error (RMSE) of prediction

sito	numer. campione	$GDH_{in.fior.}$	r^2	RMSE [giorni]
Mezzolombardo	25	9350	0.93***	1.5
Cles	25	7850	0.95***	1.2
Denno	12	8850	0.64**	4.0
Sarthe	8	8500	0.73**	6.3
Romallo	9	7100	0.60**	4.7
Borgo V.	8	7400	0.57**	4.7

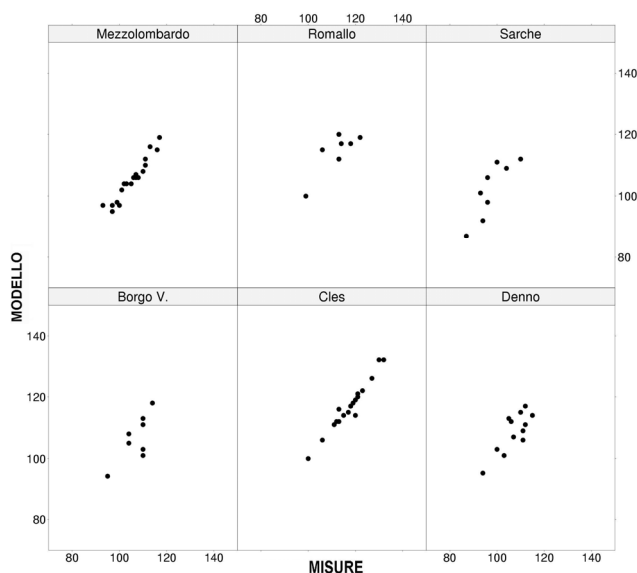


Fig. 2 - Date di fioritura simulate dal modello "Utah modificato" raffrontate alle date misurate, per le serie trentine (da Rea and Eccel, 2006).

Fig. 2 - Flowering dates simulated by "Modified Utah" model compared to measured dates. Series in Trentino (from Rea and Eccel, 2006).

(fig. 3, riferita alle medie mobili delle date di durata 11 anni, centrate sull'anno) indica una forte tendenza all'anticipo nel periodo 1960 - 2000 (trend negativo con $P < 0.01$), ma da un'analisi più dettagliata si può identificare un'oscillazione fino a circa metà degli anni '80, quindi un sensibile anticipo; dai primi anni '90 le date di fioritura (sempre filtrate con la media mobile) sembrano assestate su valori mai raggiunti nel ventennio precedente. Lo scostamento tra la simulazione con $GDH_{in.fior.}$ fisso e quella con $GDH_{in.fior.}$ dinamico è di 1-2 giorni. Per quanto riguarda le date simulate per il futuro, considerando l'intero periodo di simulazioni con temperature

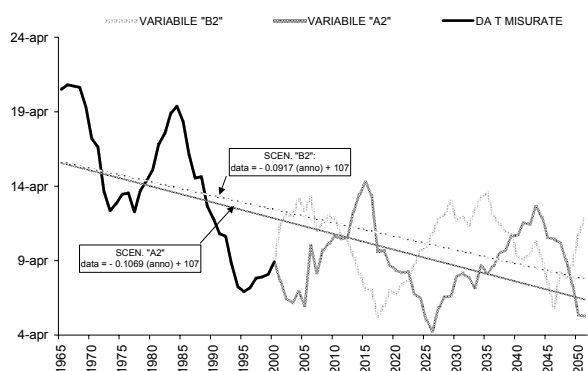


Fig. 3 - Date di fioritura per il melo cv. *Golden delicious* per il sito di Mezzolombardo (media mobile di ampiezza 11, centrata sull'anno) simulate con modello HadCM3, secondo gli scenari SRES - IPCC A2 e B2. Sono rappresentate le rette di regressione e le rispettive equazioni, nei casi di $GDH_{in.fior.}$ fisso con il clima (dinamico).

Fig. 3 - Flowering dates (11-years running mean, year-centred) for apple, cv. *Golden delicious*, simulated with model HadCM3 for the site of Mezzolombardo, scenarios SRES - IPCC A2 and B2. Regression lines with equations are given, for dynamic $GDH_{in.fior.}$.

misurate + proiettate dal modello climatico fino all'anno 2056 (medie mobili fino al 2051), si ottiene un valore altamente significativo per il trend, stimato, a seconda degli scenari, in $-0.09 \div -0.11$ giorni $anno^{-1}$; in entrambi i casi è stata utilizzata l'ipotesi di $GDH_{in.fior.}$ dinamico, ritenuta più verosimile. Come già detto poc'anzi, la serie simulata di lungo termine conferma il sensibile anticipo alla fioritura verificatosi fino agli anni '90, mentre per i decenni futuri il calendario fenologico simulato in questo modo pare assestarsi. Analizzando i dati per le sole date simulate da modello climatico (fig. 4), per il sito di Cles si ottiene che il trend è significativo ($P < 0.01$) solo nell'ipotesi di $GDH_{in.fior.}$ fisso. L'ipotesi a $GDH_{in.fior.}$ dinamico, invece, consente di ricavare trend significativi ($P < 0.05$) solo per lo scenario con maggior incremento termico (A2), oppure su scala secolare (dati non riportati nel presente studio).

3.3 Rischio di gelo

Poiché il fenomeno della gelata primaverile dannosa (ossia, in questa simulazione, quella che si verifica in concomitanza con la fioritura) è di per sé un fenomeno raro, il numero di anni con eventi simulati è basso. Per la stazione di Cles le annate con numero di giorni simulato diverso da zero sono più numerose, così che i risultati riferiti a tale sito paiono più affidabili; saranno quindi proposti i grafici relativi a quest'ultima stazione (fig. 5). È interessante osservare, qualitativamente, la differenza tra il caso in cui il cumulo di gradi ora per la fioritura sia stato mantenuto costante e il caso in cui esso sia stato fatto variare con il clima. In quest'ultima ipotesi, che corrisponde all'acclimatamento delle piante ad un clima più caldo, il numero di casi risulta inferiore, ed il campione di anni con casi di gelo ulteriormente meno numeroso. In

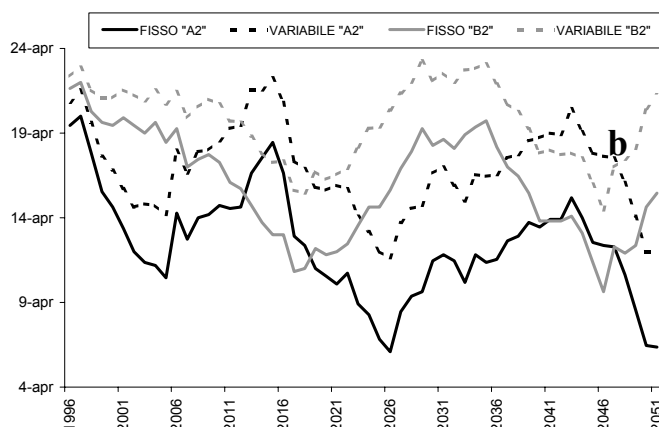
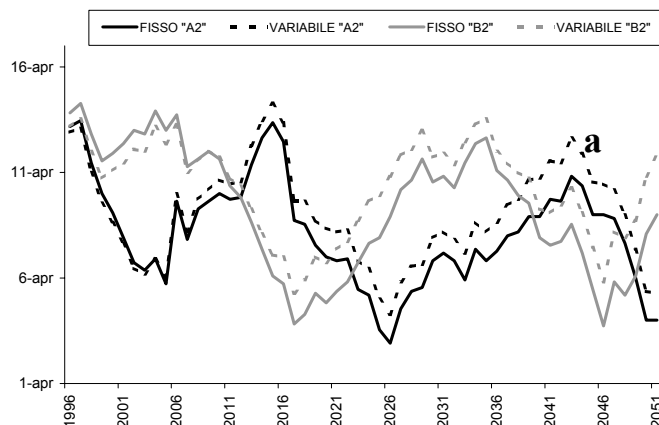


Fig. 4 - Simulazione delle date di fioritura per il futuro per gli scenari SRES A2 e B2, nelle ipotesi di $GDH_{in.fior.}$ fisso e variabile con il clima (dinamico). a) Mezzolombardo b) Cles

Fig. 4 - Simulation of flowering dates for the future, scenarios SRES A2 and B2, with fixed and climate-variable (dynamic) $GDH_{in.fior.}$. a) Mezzolombardo b) Cles

ogni caso, si osserva come la variazione, nell'arco dei prossimi 50 anni, non sia significativa, come confermato da un test t applicato a tutta la casistica (Cles e Mezzolombardo, cumulo statico e dinamico, scenario A2 e B2). Per poter contare su una maggiore significatività è stato valutato anche il caso con soglia = $+1^{\circ}C$, certamente non dannosa per la fioritura, ma indicatrice comunque di condizioni prossime al rischio, che senz'altro potrebbero manifestarsi in aree limitrofe. Anche in questo caso (fig. 6) la significatività del trend è inferiore al 5% per l'intera casistica, con un'unica eccezione: lo scenario B2 a Cles, con l'ipotesi di cumulo "dinamico" di calore; in questo caso il rischio sarebbe in diminuzione.

4. Discussione

Diversi autori hanno riscontrato, nelle loro indagini, come climi più freschi abbisognino di meno calore per sviluppare le fenofasi della fioritura; tuttavia, le ricadute modellistiche di questa generale caratteristica sono state tradotte in approcci diversi: soglie di cumulo per la fase forzante variabili a seconda del periodo (Winter, 1986; Kronenberg, 1983), effetti del fotoperiodo (Caffarra *et*

al., 2005), modelli “paralleli” (Landsberg, 1974; Chuine, 2000), in cui l’accumulo in calore avviene anche contemporaneamente all’accumulo di freddo, il quale agirebbe compensando la minor richiesta in calore. Tali impostazioni, sui cui fondamenti fisiologici gli autori spesso non si soffermano (Hänninen, 1995) differenziano da quello qui presentato in quanto legano il requisito in caldo all’andamento termico della singola stagione; al contrario, il modello presentato in questo lavoro considera fisso per un sito, nei confronti di una variabilità interannuale, il requisito in calore da accumulare, ma lo rende dipendente dal suo clima. Ciò si traduce nell’ottica di un’ipotesi di acclimatazione del melo: in un clima più fresco la pianta si “adatta” a richiedere meno calore, viceversa in uno più caldo la richiesta aumenta. In contesto diverso, una recente ricerca ha mostrato come, in actinidia, un modello per la previsione del numero di fiori sviluppati, basato sulle temperature medie invernali, debba tener conto anche della temperatura media “di lungo termine” del sito, con coefficienti correttivi: stagioni termicamente simili sortiscono effetti diversi se si verificano in siti diversi (Snelgar *et al.*, 2008).

Le ricadute di una tale impostazione non sono trascurabili, se la modellistica viene applicata ad un contesto di clima variabile: infatti, se l’ipotesi è vera, si può immaginare che le piante di melo reagiscano con plasticità fe-

nologica ad un riscaldamento aumentando la loro richiesta in caldo. Si tratta, peraltro, di un concetto già esplorato (Kramer, 1995). I risultati di questo studio dimostrano che, se ciò è vero, l’anticipo della fioritura è minore di quello che sarebbe ipotizzabile senza questo meccanismo; le differenze tra le due impostazioni, riferite alla metà del secolo attuale, si possono stimare in alcuni giorni (mediamente pochi giorni, fino ad un massimo di 10), dunque non drammatiche; l’irregolarità dello scarto, anno per anno, è dovuta al fatto che l’andamento non costante delle temperature durante la stagione può creare differenze più o meno vistose nelle date di fioritura secondo i due approcci, a seconda dell’andamento termico dopo il raggiungimento del $GDH_{in.fior.}$ “statico”: un brusco calo delle temperature in questo periodo può rallentare di molto l’accumulo finalizzato al raggiungimento del $GDH_{in.fior.}$ “dinamico”, creando quindi uno scarto più sensibile nelle date simulate di fioritura secondo i due approcci.

In Trentino l’anticipo della fioritura del melo, davvero notevole negli ultimi 20 – 25 anni, ad un’analisi più attenta risulta essersi prevalentemente verificato nel decennio corrispondente all’incirca con gli anni ’80. L’applicazione del modello fenologico ai dati termometrici di stazione conferma tale sensazione, e ancora di più si trova conferma di questo segnale affidandosi

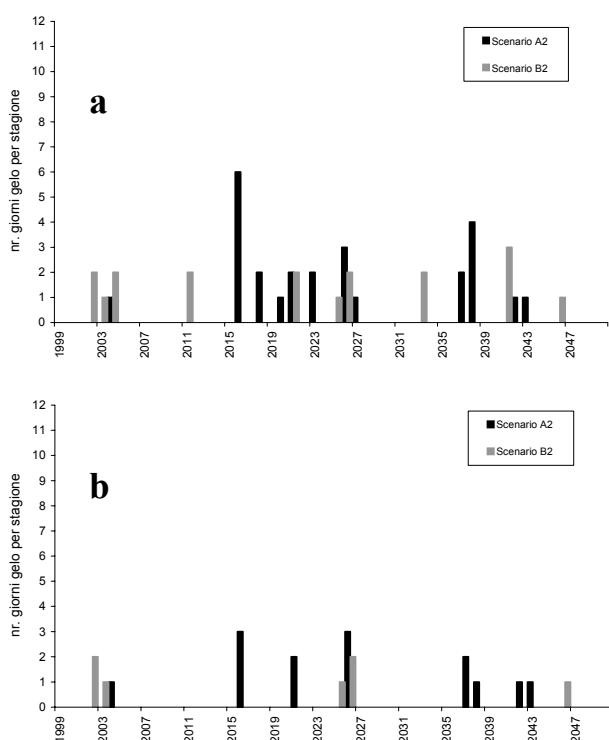


Fig. 5 - Sito di Cles: numero di casi di gelo (giornate per stagione) simulate; soglia = -1°C ; a) $GDH_{in.fior.}$ fisso. b) $GDH_{in.fior.}$ dinamico. Eventi simulati in funzione della data di fioritura calcolata con modello fenologico.

Fig. 5 - Site of Cles: simulated number of frost episodes (days per season); threshold = -1°C ; a) fixed $GDH_{in.fior.}$ b) dynamic $GDH_{in.fior.}$ Events assessed as a function of the flowering date by phenologic model.

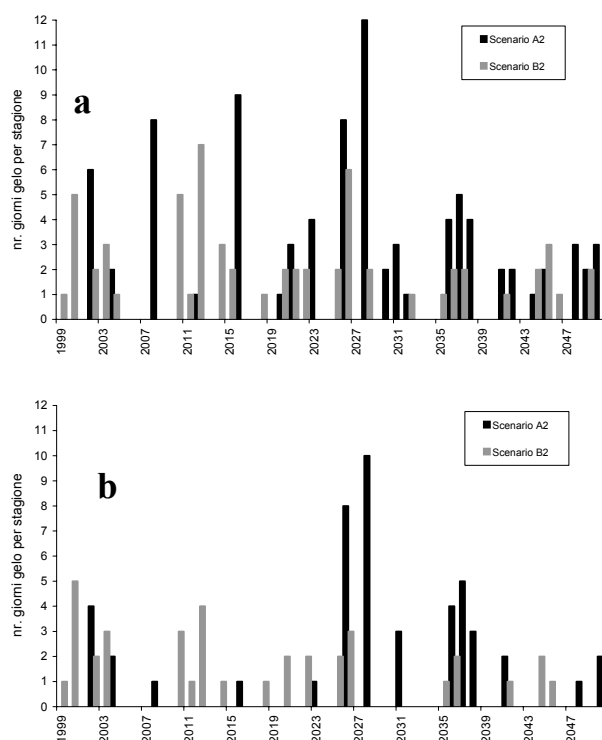


Fig. 6 - Sito di Cles: numero di casi di gelo (giornate per stagione) simulate; soglia = 1°C ; a) $GDH_{in.fior.}$ fisso. b) $GDH_{in.fior.}$ dinamico. Eventi simulati in funzione della data di fioritura calcolata con modello fenologico.

Fig. 6 - Site of Cles: simulated number of frost episodes (days per season); threshold = 1°C ; a) fixed $GDH_{in.fior.}$ b) dynamic $GDH_{in.fior.}$ Events assessed as a function of the flowering date by phenologic model

all'applicazione del modello fenologico alle serie di proiezione da modello climatico, dove si osserva come l'anticipo della fioritura sembri sostanzialmente legato al periodo anzidetto, mentre per il futuro tale incremento pare di minore entità. Va detto, però, che volutamente si è evitato di considerare gli scenari evolutivi più lontani, riferiti alla seconda metà dell'attuale secolo, in quanto l'affidabilità dei risultati dei modelli è discutibile, vista l'incertezza su cui essi si basano, e probabilmente, almeno nel caso delle indicazioni di cui si tratta nel presente lavoro, una proiezione che si spinga oltre 40 - 50 anni è di scarso interesse per le indicazioni che se ne potrebbero trarre. Si è accennato però alla significatività generale del trend delle date di fioritura su scala secolare; significatività che viene ridotta, anche sotto il 5%, quando l'orizzonte si limita ai prossimi 50 anni; naturalmente, se è accettata l'ipotesi di plasticità fenologica ($GDH_{in.fior.}$ dinamico) poc'anzi discussa, sono da attendersi effetti minori sull'anticipo delle date, rispetto all'ipotesi in cui essa non è valida.

La cosa si traduce, in una certa misura, anche sul rischio di gelata. Si è visto che, nell'orizzonte dei 50 anni, il trend è leggermente negativo, e anche significativo in uno dei casi considerati, almeno nell'ipotesi di $GDH_{in.fior.}$ dinamico. Per nessuno scenario e per nessuna delle due ipotesi si sono osservati trend di rischio in crescita.

5. Conclusioni

Il modello fenologico "Utah modificato" appare uno strumento adatto a simulare la fioritura del melo in condizioni climatiche diverse (seppur verificato sempre all'interno di un clima temperato umido come quello del Nord d'Italia). La temperatura appare come l'unica forzante di modello; ciò consente di ignorare altre variabili, che, in linea di massima, potrebbero essere considerate per tener conto del diverso cumulo di calore che le piante richiedono in diversi climi. Per aree collinari o pedemontane, quali quelle in cui tipicamente viene coltivato il melo in Italia, ciò si traduce nel poter stimare a priori la richiesta in caldo in funzione della temperatura media climatica di un sito, accompagnata alla conoscenza delle caratteristiche topografiche.

Sia le serie rilevate di fioritura, sia quelle simulate, indicano un forte anticipo negli ultimi 40 anni, prevalentemente concentrato però negli anni '80 - '90. Non è fuori luogo legare tale particolarità climatica a quanto osservato da più parti, cioè una discontinuità climatica, almeno per l'area settentrionale del Mediterraneo, che si può collocare approssimativamente nel periodo citato. Tale comportamento è stato osservato per le serie italiane in indagini indipendenti, su serie meteorologiche (Maugeri *et al.*, 2006) e fenologiche (Barbi *et al.*, 2007), anche se resta ancora indefinito il periodo esatto cui attribuire con maggiore probabilità il cambio.

Volendo esprimersi in termini generali sul rischio da gelo per il melo, almeno nell'ambito climatico trentino, si può ipotizzare una sua tendenza alla diminuzione, ma poco significativa se valutata nell'orizzonte temporale dei prossimi decenni. Cautelativamente, si può affermare che il rischio tenderà a mantenersi più o meno sui livelli

attuali. In ogni caso, uno scenario di aumentato rischio pare improbabile, alla luce dei risultati di queste simulazioni. Si tratta di un "non-risultato", che, come tale, non conforta il generale allarmismo che tende ad accompagnare generalmente ogni considerazione relativa al cambiamento climatico prossimo futuro.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato realizzato nell'ambito del progetto di ricerca "GEPRI", finanziato dal Fondo Unico per la Ricerca della Provincia Autonoma di Trento. Si ringraziano per la collaborazione Tommaso Pantezzi, Claudio Dalsant, Stefano Corradini ed Amelia Caffarra (IASMA), Marianna Nardino e Osvaldo Facini (CNR - IBIMET), Federico Spanna (Reg. Piemonte).

Bibliografia

- Antolini, G., Zinoni, F., Eccel, E., Facini, O., Mariani, L., Marletto, V., Nardino, M., Rea, R., Rossi, F., 2006. Effetto delle modificazioni del clima sui rischi da gelate (invernali, precoci, tardive) e sul soddisfacimento in freddo delle specie coltivate. In: CLIMAGRI - Cambiamenti climatici e agricoltura. Risultati conclusivi. Roma, ottobre 2006. A cura di Esposito, S., Epifani, C., e Serra, C.: 93-104.
- Ashcroft, L.G., Richardson, E.A., and Schuyler, D.S., 1977. A Statistical Method of Determining Chill Unit and Growing Degree Hour Requirements for Deciduous Fruit Trees. *Hort Science* 12(4): 347-348
- Austin P. T., A. J. Hall, W. P. Snelgar and M. J. Currie, 2002. Modeling kiwifruit budbreak as a function of temperature and bud interactions. *Annals of Botany* 89: 695-706.
- Barbi, A., Chiaudani, A., Delillo, L., Borin, M. e Berti, A., 2007. Andamenti agroclimatici nella regione Veneto nel periodo 1956 - 2004. *Italian Journal of Agrometeorology*, 12, suppl. al n. 1 - 10° convegno nazionale di agrometeorologia, 2007: 29-30 maggio, Isola di Capo Rizzuto (KR), 31 maggio, Loricca (CS). *Quaderno degli abstract*: 14-15.
- Barker T., I. Bashmakov, L. Bernstein, J. E. Bogner, P. R. Bosch, R. Dave, O. R. Davidson, B. S. Fisher, S. Gupta, K. Halsnæs, G.J. Heij, S. Kahn Ribeiro, S. Kobayashi, M. D. Levine, D. L. Martino, O. Masera, B. Metz, L. A. Meyer, G.-J. Nabuurs, A. Najam, N. Nakicenovic, H. -H. Rogner, J. Roy, J. Sathaye, R. Schock, P. Shukla, R. E. H. Sims, P. Smith, D. A. Tirpak, D. Urge-Vorsatz, D. Zhou, 2007. *Technical Summary. In Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Bindi, M., Miglietta, F., Gozzini, B., Orlandini, S. and Seghi, L., 1997a. A simple model for simulation of growth and development in grapevine (*Vitis vinifera* L.). I. Model description. *Vitis*, 36(2), 67-71.
- Bindi, M., Miglietta, F., Gozzini, B., Orlandini, S. and Seghi, L., 1997b. A simple model for simulation of growth and development in grapevine (*Vitis vinifera* L.). II. Model validation. *Vitis*, 36(2), 73-76.
- Brunetti, A. e Zinoni, F. (a cura di), 1999. Progetto Finalizzato PHENAGRI. Vol. 1 - Aspetti generali delle osservazioni agrofologiche, Ministero delle Politiche Agricole e Forestali, Collana di Agrofologia, Roma.
- Caffarra, A., Chuine, I., Donnelly, A., and Jones, M., 2005. Quantifying the environmental drivers of tree phenology. 17th International Congress on Biometeorology - ICB 2005, proceedings. *Deutscher Wetterdienst, Annalen der Meteorologie* 41, Vol. 2:493-497.
- Calò, A. (ed), 1993. Il determinismo climatico sulla fenologia della vite e la maturazione dell'uva in Italia. *Arti grafiche. Conegliano (TV)*, 14-15 luglio 1993, 197-211.
- Cannell, M.G.R., Smith, I., 1986. Climatic Warming, Spring Budburst and frost damage on trees. *Journal of Applied Ecology* 23: 177-191.
- Cesaraccio, C., Spano, D., Duce, P., Snyder, R.L., 2001. An improved model for determining degree-day values from daily temperature data. *Int. J. Biometeorol.* 45: 161-169.
- Chuine, I., 2000. A Unified Model for Budburst of Trees. *J. Theor. Biol.* 207: 337-347.

- Esposito, S., Epifani, C., e Serra, C. (a cura di), 2006. *CLIMAGRI - Cambiamenti climatici e agricoltura. Risultati conclusivi*. Roma, ottobre 2006. Pp. 256.
- Hänninen, H., 1991. Does climatic warming increase the risk of frost damage in northern trees? *Plant Cell and Environment* 14: 449-454.
- Hänninen, H., 1995. Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions and ecophysiological approach to modelling of bud burst phenology. *Canadian Journal of Botany*, 73:183-199.
- Heller, M., 1986. "Triangulation and Interpolation of Surfaces," in R. Sieber and K. Brassel (eds), *A Selected Bibliography on Spatial Data Handling: Data Structures, Generalization and Three-Dimensional Mapping*, Geo- Processing Series, vol 6, Department of Geography, University of Zurich, pp 36 - 45
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Kramer K., 1994a. Selecting a model to predict the onset of growth of *Fagus sylvatica*. *Journal of Applied Ecology* 31(1)172-181.
- Kramer, K., 1994b. A modelling analysis of the effects of climatic warming on the probability of spring frost damage to tree species in The Netherlands and Germany. *Plant Cell and Environment* 17: 367-377.
- Kramer, K., 1995. Modelling comparison to evaluate the importance of phenology for the effects of climate change on growth of temperate-zone deciduous trees. *Climate Research*, 5:119-130.
- Kronenberg, H.G., 1983. Relationships between temperatures and blooming dates of apple trees. *Neth. J. Agric. Sci.*, 31:259-267.
- Landsberg, J.J., 1974. Apple fruit bud development and growth; analysis and an empirical model. *Annals of Botany*, 38:1013-1023.
- Maugeri, M., Brunetti, M., Buffoni, L., Lentini, G., Mangianti, F., Monti, F., Nanni, T. e Pastorelli, R., 2006. Variabilità e cambiamenti climatici in Italia nel corso degli ultimi due secoli documentati da serie storiche secolari omogeneizzate. In: *CLIMAGRI - Cambiamenti climatici e agricoltura. Risultati conclusivi*. Roma, ottobre 2006. A cura di Esposito, S., Epifani, C., e Serra, C.P.: 15-29.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007: *Global Climate Projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Menzel et. al., 2006: European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* (2006) 12, 1969-1976
- Murray, M.B., Cannell, M.G.R., and Smith, R.I., 1989. Date of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming. *J. Appl. Ecol.*, 26:693-700.
- Murphy, J.M., 1999. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. *J. Clim.*, 12:2256-2284.
- Murphy, J.M., 2000. Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques. *Int. J. Climatol.*, 20:489- 501.
- Pope, V., Gallani, M.L., Rowntree, P.R., Stratton, R.A., 2000. The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Clim Dyn.*, 16:123-146.
- R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2007.
- Rea, R., Eccel E., 2006: Phenological models for blooming of apple in a mountainous region. *International Journal of Biometeorology*, Volume 51, Number 1:1-16.
- Rochette, P., Belanger, G., Castonguay, Y., Bootsma, A., and Mongrain, D., 2004. Climate change and winter damage to fruit trees in eastern Canada. *Can. J. Plant. Sci.*, 84:1113-1125.
- Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D. Frei, C., Häberli, C., Liniger, L.A. and Appenzeller, C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. *Nature*, 427, 332-336.
- Schwartz, M.D., Ahas, R., Aasa, A., 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology* 12: 343-351.
- Severini M., Alilla R., Pesolillo S., Comandini F., 2004. Simulazione tramite il modello ds 2.0 della fenologia della vite, degli attacchi di lobia botrana Den & Schiff (*lep. tortricidae*) e del tempo di raccolta dell'uva nella zona dei Castelli Romani. *Atti della "III Giornate di studio: metodi numerici, statistici e informatici nella difesa delle colture agrarie e delle foreste: ricerca e applicazioni"* 24 - 26 novembre 2004, Firenze.
- Snelgar, W.P., Hall, A.J., Mcpherson, H.G., 2008. Modelling flower production from winter chilling *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, Vol. 36: 273-284.
- Winter, F., 1986. A simulation model of phenology and corresponding frost resistance of "Golden Delicious" Apple. *Acta Horticulturae* 184: 103-108.
- Zinoni, F., 2008. Il problema delle gelate in agricoltura nel mondo e in Italia. *Italian Journal of Agrometeorology*, questo numero.
- Zinoni, F. and Antolini, G., 2002. The effect of climate modifications on the risks of freezing (winter, precocious, late) and on the cold requirements of cultivated-species. *Proceedings of First Technical Workshop of the Mediterranean component of CLIMAGRI project on Climate Change and Agriculture*, FAO, Rome 25-27 September.