

PROGETTO FINALIZZATO

CLIMAGRI

CAMBIAMENTI CLIMATICI E AGRICOLTURA

SOTTOPROGETTO 2: AGRICOLTURA ITALIANA E CAMBIAMENTI CLIMATICI

Scheda di ricerca 2.3: Effetto delle modificazioni del clima sui rischi da gelate (invernali, precoci e tardive) e sul soddisfacimento in freddo delle specie coltivate.

Alla ricerca partecipano i seguenti Enti:

ARPA-SIM – Servizio IdroMeteorologico ARPA Emilia-Romagna (titolare della scheda)
UCEA, Ufficio Centrale di Ecologia Agraria
CNR-IBIMET, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Biometeorologia
DPV-UNIMI, Dipartimento di Produzione Vegetale, Università di Milano
ISMAA, Istituto Sperimentale di S. Michele all'Adige

Responsabile della ricerca:

Franco Zinoni, ARPA-SIM

Collaboratori:

G. Antolini, ARPA-SIM
A. Brunetti, G. Dal Monte, UCEA
F. Rossi, O. Facini, M. Nardino, CNR-IBIMET
L. Mariani, DPV-UNIMI
G.B. Toller, E. Eccel, R. Rea, ISMAA

RELAZIONE TECNICA – 2° ANNO DI ATTIVITÀ

INDICE

1.	Presentazione della ricerca.....	2
2.	Obiettivi generali della ricerca.....	2
3.	Campagne sperimentali di misura.....	3
4.	Implementazione di modelli di sviluppo delle colture.....	4
5.	Sviluppo di un modello topoclimatico.....	8
6.	Definizione di indici di rischio climatico da gelata.....	9
7.	Conclusioni e sviluppi previsti.....	10
8.	Pubblicazioni e presentazioni.....	10
9.	Bibliografia.....	11

1. Presentazione della ricerca

Numerosi studi climatologici hanno evidenziato un aumento della temperatura e una diminuzione delle precipitazioni a livello nazionale e globale negli ultimi decenni. Modelli climatici a scala globale hanno permesso di simulare simili tendenze anche per gli scenari climatici futuri. L'effetto di tali variazioni climatiche sull'agricoltura è difficile da prevedere per la complessità delle interazioni tra fattori meteorologici e agronomici. Alcune ricerche, tuttora in corso, prevedono l'utilizzo di modelli di simulazione della crescita delle piante, per considerare tali processi nel loro insieme, e per stimare principalmente la tendenza della produzione in termini di sostanza secca prodotta. Generalmente, tuttavia, tali modelli trascurano o sottovalutano l'effetto rilevante che taluni eventi meteorologici estremi potrebbero avere sulla produzione agricola, come le gelate, o la grandine. Le gelate, in particolare quelle primaverili, sono la calamità naturale più rilevante per la perdita di produzione agricola alle medie latitudini. Nell'ultimo decennio, si sono verificati in Italia diversi eventi di gelo che hanno spesso compromesso la produzione frutticola e cerealicola.

Le gelate che interessano l'agricoltura italiana sono prevalentemente di tipo avvertivo o radiativo. Nel primo caso, il raffreddamento, causato dall'incursione di masse d'aria a temperatura relativamente bassa, è pressoché uniforme su tutto il territorio. Nel secondo caso, si tratta di un fenomeno legato ai processi di bilancio energetico superficiale, tipici della microscala meteorologica. Il raffreddamento è causato dalla perdita di energia dal suolo sotto forma di radiazione ad onda lunga, ed è tipico di notti serene e poco ventose. Spesso si genera un profilo d'inversione termica (temperatura crescente con la quota) molto accentuato. Inoltre, il movimento gravitazionale dell'aria che si raffredda e che diventa quindi più densa, ne provoca l'accumulo nelle zone relativamente meno elevate (fondovalle in collina e montagna, depressioni in pianura). La variabilità spaziale del campo termico in prossimità del suolo è quindi molto alta, essendo legata alla conformazione orografica della superficie terrestre. Questa seconda tipologia di gelata rappresenta la più pericolosa per intensità, periodo e frequenza delle gelate tardive, ed è inoltre la situazione più difficile da descrivere per l'elevata variabilità spaziale e temporale della temperatura.

La temperatura è il fattore meteorologico che regola lo sviluppo della pianta e ne determina il calendario fenologico. L'aumento delle temperature durante il periodo autunnale-invernale, rilevato negli ultimi anni, ha portato ad un risveglio vegetativo anticipato, esponendo maggiormente le piante ai ritorni di freddo primaverili. La pianta possiede meccanismi di resistenza al gelo, che si estrinsecano durante la dormienza invernale, ma che sono inibiti dopo il risveglio vegetativo, quando la pianta entra in fasi molto sensibili alle basse temperature. Le gelate primaverili sono le più pericolose, a parità d'intensità, proprio per la presenza di organi giovani e più sensibili, perché non lignificati e idratati.

Numerose piante delle medie latitudini presentano inoltre la necessità di accumulare un certo fabbisogno in freddo per uscire dalla dormienza. Temperature invernali più alte potrebbero impedire tale accumulo di freddo e provocare nel breve periodo una perdita del carico produttivo potenziale, dovuta ad una minore fioritura, soprattutto per le specie più esigenti e nelle zone in cui le basse temperature sono un fattore limitante, come in gran parte dell'areale mediterraneo.

A lungo termine, l'effetto di variazioni termiche sullo sviluppo delle piante, può tradursi in un'alterazione della distribuzione geografica delle colture agrarie, ed in un consistente incremento del rischio produttivo all'interno di aree attualmente vocate per la produzione, aspetto quest'ultimo analizzato nell'ambito del progetto di ricerca.

2. Obiettivi generali della ricerca

La ricerca si propone di definire, per alcune aree rilevanti dell'agricoltura italiana, il rischio produttivo indotto dalle gelate dovuto all'effetto delle variazioni termiche in atto e previste sulla base degli scenari climatici futuri. Inoltre, ci si propone di valutare la variazione nell'accumulo delle unità di freddo autunnali-invernali (Chill Units), riguardo al fabbisogno fisiologico specifico delle colture.

I risultati ottenuti e gli strumenti messi a punto nel corso della ricerca potranno costituire utili supporti per lo studio della vocazionalità agricola del territorio, soprattutto in relazione al rischio climatico specifico per colture e per aree. Altrettanto importante è l'impiego delle conoscenze acquisite al fine di indirizzare le scelte programmatiche relative alla pianificazione agricola, in termini di scelte varietali dei futuri impianti e di adeguamento dei disciplinari di produzione.

Le zone agricole prescelte come aree di studio sono: la Pianura Padana (emiliana, romagnola, piemontese, lombarda), la Valle dell'Adige, l'Agro Romano, la piana di Caserta. Sono state prese in considerazione colture frutticole (melo, pero, pesco, albicocco, vite, actinidia), orticole (patata, pomodoro, cipolla), e industriali a pieno campo (frumento, orzo, bietola).

L'attività è orientata alla realizzazione di modelli specifici per la valutazione del rischio, utilizzabili sia a livello operativo sia a livello di ulteriori ricerche riguardanti l'impatto dei cambiamenti climatici in agricoltura. I risultati della ricerca, saranno costituiti da strati informativi idonei per stampe o per utilizzo mediante appositi software grafici e di reportistica, e da opportune librerie software dedicate alla valutazione del rischio climatico, possibilmente ricalibrabili e applicabili così anche in altre aree agricole in ambito nazionale e internazionale, considerato che è già in corso di svolgimento il progetto parallelo ClimagriMED, per la cooperazione scientifica con altri paesi del Mediterraneo su queste tematiche.

Gli obiettivi specifici del secondo anno d'attività erano i seguenti:

- coordinamento tra i partner, in particolare con le unità operative addette allo studio di scenari climatici;
- rilevazione dati sperimentali (agronomici, meteorologici);
- taratura e validazione di un modello topoclimatico;
- analisi climatologica delle unità di freddo e delle gelate precoci e tardive;
- acquisizione e implementazione dei modelli fenologici;
- definizione di indici di danno da gelo;
- progettazione di un modello integrato per la valutazione del rischio produttivo.

3. Campagne sperimentali di misura

Come durante il primo anno, due campagne sperimentali di misura sono state condotte sul territorio della regione Emilia-Romagna, a supporto delle altre attività di progetto, al fine di trasferire i risultati e le conoscenze acquisite nell'ambito delle altre attività di ricerca, in particolare nell'analisi topoclimatica della temperatura minima.

Una sperimentazione riguardava la misurazione delle principali grandezze micrometeorologiche in gioco durante le gelate, per caratterizzare la dinamica dello strato limite atmosferico. Lo scopo è quello di comprendere in maniera dettagliata i principali processi coinvolti durante il raffreddamento notturno che si osserva durante le gelate radiative tipiche dell'ambiente padano, che sono le più rilevanti, in termini di frequenza e variabilità spaziale. Si sono individuati due siti sperimentali: uno in ambiente aperto, presso la base meteorologica di San Pietro Capofiume, uno all'interno di un actinidiato presso un'azienda sperimentale della pianura ravennate (fig. 1).

Il primo sito ha caratteristiche ideali per lo studio dello strato limite atmosferico in condizioni indisturbate, essendo in terreno pianeggiante privo di ostacoli maggiori per diverse centinaia di metri. Le analisi effettuate durante il primo anno hanno permesso di verificare per tale sito le relazioni di similarità di letteratura, quindi l'applicabilità delle tecniche di misura. Le misure sono state condotte sia durante il periodo invernale, sia in quello primaverile. Il bilancio radiativo è stato quantificato valutando separatamente le componenti in ingresso e in uscita rispetto la superficie del suolo, in onda lunga e corta, per mezzo di un radiometro multicanale, in base all'equazione:

$$R_n = (R_{s\downarrow} - R_{s\uparrow}) + (R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow}) \quad (1)$$

dove R_n , $R_{s\downarrow}$, $R_{s\uparrow}$, $R_{l\downarrow}$, $R_{l\uparrow}$ sono rispettivamente la radiazione netta, in onda corta dall'alto (atmosfera) e dal basso (suolo), e in onda lunga dall'alto e dal basso.

Il bilancio energetico è stato studiato valutando i flussi di calore nel terreno (con piastre di flusso) e i flussi di calore latente e sensibile. I flussi di calore atmosferici sono stati calcolati in base alle misurazioni di temperatura e vento ad alta frequenza, eseguite con anemometro sonico triassiale, in base alle tecniche di eddy covariance. Il flusso di calore latente è stato calcolato come valore residuo in base all'equazione di bilancio energetico superficiale:

$$R_n = H + LE + G \quad (2)$$

dove H , LE , G sono rispettivamente i flussi di calore sensibile, latente e nel terreno.

La temperatura è stata misurata anche a diverse quote e profondità, per determinarne i profili in atmosfera e nel suolo rispettivamente.

La stabilità atmosferica è stata valutata calcolando il rapporto:

$$\zeta = z / L \quad (3)$$

dove z è la quota e L la lunghezza di Obukov, calcolata come:

$$L = \frac{-u_*^3}{\kappa \frac{g}{T} \frac{H}{\rho C_p}} \quad (4)$$

dove u_* è la velocità di frizione, κ la costante di Von Karman, g l'accelerazione di gravità, T la temperatura dell'aria, ρ la densità dell'aria, C_p il calore specifico a pressione costante dell'aria. Il rapporto (3) è positivo in condizione di stabilità, negativo in condizione di adiabaticità e prossimo allo zero in condizioni neutrali.

Le stesse misurazioni sono state eseguite anche in azienda sperimentale, per valutare quanto e come le strutture vegetazionali tipiche dei frutteti alterano i regimi termici, anemologici e radiativi dello strato limite.

Nell'anno 2003 si sono verificati numerosi e intensi eventi di gelata, che peraltro hanno compromesso in maniera considerevole la produzione frutticola dell'area padana. In particolare, si sono osservate diverse tipologie di eventi e per la prima volta anche gelate in cui l'avvezione era non trascurabile rispetto al solo raffreddamento radiativo. Si sono quindi arricchite le conoscenze, ottenendo una casistica sufficiente per una descrizione degli aspetti fisici delle gelate in situazioni di pieno campo, sia di tipo semplice (copertura erbacea) che complessa (frutteto).

Riguardo alla sperimentazione presso San Pietro Capofiume, si sono analizzate le situazioni meteorologiche e micrometeorologiche tipiche dei raffreddamenti più consistenti. Il periodo invernale-primaverile è caratterizzato da vento in prevalenza da Ovest e Nord-Ovest, con classi di stabilità atmosferica che si distribuiscono uniformemente (fig. 2). In particolare, si è osservata una notevole frequenza di casi di stabilità atmosferica, durante la quale è molto basso o quasi nullo il rimescolamento dell'aria a causa della stratificazione termica. Appare evidente come l'area sia soggetta a situazioni meteorologiche favorevoli al verificarsi di gelate, con afflussi d'aria proveniente dai quadranti nord e periodi di stabilità e stratificazione. Due eventi rilevanti sono stati analizzati in particolare nel 2003: la notte tra il 7 e l'8 aprile e la successiva. Il primo evento rappresenta la situazione tipica di gelata radiativa in pianura padana, dove condizioni di ventosità relativamente bassa (fig. 3) e la perdita radiativa del suolo e degli strati atmosferici superficiali favoriscono la stratificazione e la stabilità atmosferica (fig. 4) e l'instaurarsi di un profilo d'inversione termica con gradienti positivi anche molto alti (fig. 5), che si mantengono fino all'alba. La notte successiva, in cui si sarebbero potuti raggiungere valori di temperatura notturna molto bassi, considerato il raffreddamento dell'aria già verificatosi il giorno prima, la stratificazione è stata limitata da un vento relativamente caldo proveniente da Sud che ha perdurato fino alla mezzanotte dell'8 aprile (fig. 6). In queste condizioni, nelle prime ore delle notte le condizioni dello strato limite erano neutrali, mentre la stabilità si osserva solo successivamente (fig. 7). È evidente l'effetto della ventosità sul profilo termico verticale: l'inversione termica è limitata nelle prime ore della notte, ma si accentua in seguito all'abbassamento del vento (fig. 8).

Le misurazioni effettuate in pieno campo hanno permesso di valutare in che misura una struttura vegetazionale complessa (actinidiato) renda peculiari i fenomeni legati agli abbassamenti termici, in particolare come gli scambi energetici e radiativi siano resi più complessi da fenomeni di attrito, assorbimento selettivo e riflessione della radiazione. La presenza di filari modifica il campo di vento in modo assai più marcato di una superficie erbacea, esercitando un attrito maggiore, e modificando quindi i processi di scambio tra le piante e l'atmosfera. Tra le peculiarità del frutteto, anche la dinamica di accrescimento legata alla fenologia annuale deve essere tenuta in conto, dato che un maggiore o minore grado di copertura del terreno condiziona considerevolmente non soltanto le caratteristiche aerodinamiche del frutteto ma anche quelle radiative. L'albedo, coefficiente di riflessione in onda corta, è infatti apparso cambiare in maniera determinante in funzione degli incrementi stagionali della biomassa. Per caratterizzare il regime termico, sono apparsi molto utili i dati relativi ai profili della temperatura dell'aria dal suolo alla chioma e sopra la chioma, e la temperatura raggiunta dagli organi vegetali in relazione alla loro specifica collocazione sull'albero. Infatti, appare notevole, anche nell'ambito della stessa pianta, la disparità tra la temperatura raggiunta dai tessuti in funzione ad esempio, della posizione della gemma sul ramo: tessuti di gemme rivolti verso il cielo perdono infatti più facilmente calore, durante una gelata radiativa, rispetto a tessuti di gemme rivolte verso il basso (fig. 9).

In generale, l'insieme dei dati raccolti nell'ambito di questa attività può offrire indicazioni importanti non soltanto sulla caratterizzazione dei fenomeni fisici dovuti alle gelate, ma anche per la definizione di un opportuno modello topoclimatico per l'interpolazione dei dati di temperatura minima sul territorio.

4. Implementazione di modelli di sviluppo delle colture

La ricerca effettuata nel corso dei primi due anni di attività ha consentito di raccogliere informazioni sui principali modelli fenologici delle colture che sono oggetto di studio per il progetto:

arboree	erbacee
albicocco	pomodoro
pesco	patata
susino	cipolla
melo	bietola
actinidia	frumento
vite	orzo

Tab. 1 – Colture prese in esame nella ricerca.

In base alle esigenze della ricerca, per ogni coltura o classe di coltura è stato implementato il modello di sviluppo che fornisce performance migliori, in fase di calibrazione. Alcuni modelli sono stati calibrati e applicati su tutte le serie storiche disponibili, altri sono in fase di sviluppo e calibrazione.

Calibrazione di modelli fenologici per colture frutticole in Emilia-Romagna

Sono state prese in esame le specie e le cultivar delle quali è stato possibile reperire le date delle principali fasi fenologiche, per il periodo 1996-2001, per la zona orientale della regione (tab. 2).

Pesco	Albicocco	Susino	Melo	Kiwi
Springcrest	S.Castrese	Angeleno	Golden Delicious	Hayward
Stark Red Gold	Tyrinthos	President		

Tab. 2 – Colture e varietà considerate in Emilia-Romagna.

Avendo a disposizione rilievi fenologici effettuati in diverse località della regione, si è deciso di suddividerli in due siti principali, uno di collina e uno di pianura. I dati meteorologici utilizzati per la calibrazione sono quelli relativi a due stazioni della rete ARPA-SIM, S.Agata sul Santerno per il sito di pianura e Brisighella per quello di collina. Ambedue le serie sono costituite dalle temperature orarie e i dati mancanti sono stati riempiti con diverse metodologie secondo la lunghezza dell'interruzione. Per periodi inferiori al giorno i dati sono stati ricostruiti interpolando linearmente in base ai valori orari precedenti e conseguenti all'interruzione, mentre per periodi superiori è stato ricostruito l'andamento in base ai giorni precedenti. La calibrazione è stata per ora condotta solo per la pianura.

Le fasi fenologiche per ogni specie su cui si è effettuata l'indagine, da utilizzare poi per la valutazione del rischio produttivo sono le seguenti:

	actinidia	melo	albicocco	pesco	susino
1	germogliamento	germogliamento	germogliamento	germogliamento	germogliamento
2	accrescimento germoglio	mazzetti affioranti	inizio fioritura	inizio fioritura	inizio fioritura
3	bottoni fiorali	fioritura	fioritura	fioritura	fioritura
4	fioritura	allegagione	allegagione	allegagione	allegagione
5	allegagione	frutticini	frutticini	frutticini	frutticini

Tab. 3 – Fasi fenologiche considerate per le colture arboree.

Tutti e tre i modelli hanno al loro interno possibili varianti che ne possono modificare anche sostanzialmente il contenuto. Tutti i modelli si dividono in periodo di accumulo di unità di freddo (CU: Chill Units), durante il quale la pianta resta in attesa di aver raggiunto un certo quantitativo di ore di freddo necessarie per iniziare la ripresa vegetativa; in questa fase le temperature contribuiscono quindi al cumulo quando si trovano sotto una certa soglia, di norma compresa tra 0 e 10 °C .

Mentre nella seconda fase di “accumulo del caldo” vengono cumulati i gradi-giorno (GDD: Growing Degree Days) o i gradi-ora (GDH: Growing Degree Hours) che superano una soglia, specifica per coltura. Sono stati testati due modelli, come descritto in seguito: Utah, in diverse versioni, e Chill.

Il modello Utah nasce negli anni settanta nello stato dello Utah ed è applicato ancor oggi in molte zone del mondo. Una delle più recenti applicazioni si trova in Valentini et al. (2001), dove Utah ed altri tre modelli sono applicati nella regione Piemonte per la fioritura dei meli. Il modello si compone di una prima fase di cumulo CU in base alla tab. 4, e una seconda fase di cumulo GDH o GDD, in base alle formule:

$$GDH = \sum T_h - s \quad (5)$$

$$GDD = \sum T_d - s \quad (6)$$

dove T_h e T_d sono le temperature rispettivamente orarie e giornaliere medie dell'aria, s è la soglia per il cumulo e vengono esclusi dalla sommatoria i termini negativi. Sebbene solitamente si usino valori orari di temperatura, in questo progetto si è invece preferito usare dati giornalieri, per la maggiore applicabilità e versatilità in relazione all'impiego delle serie storiche e degli scenari climatici futuri. Le soglie utilizzate sono 4 °C per il melo, 7 °C per le altre quattro colture, come da letteratura.

Temperatura [°C]	CU
$T < 1.4$	0
$1.5 < T < 2.4$	0.5
$2.5 < T < 9.1$	1
$9.2 < T < 12.4$	0.5
$12.5 < T < 15.9$	0
$16 < T < 18$	-0.5
$T > 18$	-1

Tab. 4 – Metodo di cumulo CU per il metodo Utah (da Richardson et al., 1974).

La data di inizio di cumulo di freddo può essere individuata considerando il giorno in cui il cumulo delle CU giornaliere, durante il periodo 1 Ottobre-31 Dicembre, raggiunge il minimo. Un'altra possibilità è quella di escludere dal modello l'accumulo di freddo e fissare a priori una data fissa per l'inizio dell'accumulo di GDD. Entrambe le modalità sono state testate, utilizzando come date fisse il 15 gennaio e il 15 febbraio. La calibrazione consiste nel trovare il valore di cumulo di CU che minimizza la deviazione standard del cumulo dei GDD, e successivamente trovare il valore di GDD che minimizza l'errore rispetto ai dati osservati.

Anche il modello CHILL, modello presentato in Cesaraccio et al. (2004) per la regione Sardegna, è stato testato sui dati fenologici dell’Emilia-Romagna. Questo metodo consiste nel calcolo dei “chill days” (Cd) e di anti-chill days (Ca). I Cd sono valori negativi che vengono cumulati finché non si raggiunge un valore prestabilito di richiesta di fabbisogno di freddo (CR). Il giorno in cui si verifica $\sum Cd = CR$ corrisponde al giorno in cui iniziano a sommarsi le Ca, finché non si verifica la condizione $CR + \sum Ca = 0$, che corrisponde all’evento fisiologico che stiamo tentando di prevedere, nel nostro caso la fioritura. Tutto il procedimento dipende dai valori di CR e della temperatura soglia (Tc) utilizzata per il calcolo di Cd e Ca. Anche in questo caso, la calibrazione consiste nel variare in modo iterativo tali parametri, fino a ottenere valori che minimizzano l’errore della previsione rispetto ai dati osservati. I valori di Cd e Ca sono ottenuti in funzione della temperatura massima (Tx), della temperatura minima (Tn) e della temperatura media giornaliera (TM) oltre che in funzione di Tc, che è il parametro variabile. Si è seguito il metodo dell’approssimazione delle temperature con triangoli isosceli (Snyder et al., 1999) riportato nella tabella successiva.

<i>Casi</i>	<i>Cd</i>	<i>Ca</i>
$T_c \leq T_n$	$Cd = 0$	$Ca = TM - T_c$
$0 \leq T_n \leq T_c < T_x$	$Cd = - \left[(TM - T_n) - \left(\frac{T_x - T_c}{2} \right) \right]$	$Ca = \left(\frac{T_x - T_c}{2} \right)$
$0 \leq T_n \leq T_x \leq T_c$	$Cd = -(TM - T_n)$	$Ca = 0$
$T_n < 0 < T_x \leq T_c$	$Cd = - \left(\frac{T_x}{T_x - T_n} \right) \left(\frac{T_x}{2} \right)$	$Ca = 0$
$T_n < 0 < T_c < T_x$	$Cd = - \left[\left(\frac{T_x}{T_x - T_n} \right) \left(\frac{T_x}{2} \right) - \left(\frac{T_x - T_c}{2} \right) \right]$	$Ca = \left(\frac{T_x - T_c}{2} \right)$

Tab. 5. Equazioni per il calcolo di Cd e Ca in funzione dei diversi casi.

Entrambi i modelli sono stati calibrati in base ai dati fenologici dell’Emilia-Romagna (provincia di Ravenna, zona di pianura). Non esiste un modello migliore in senso assoluto, come si può vedere dalla tabella 6 per la fioritura, in cui sono mostrati gli indici statistici di performance dei vari metodi. Per ogni coltura sarà pertanto necessario scegliere il modello che fornisce i migliori risultati. Il modello CHILL sembra funzionare molto bene per il melo (Golden Delicious) e l’actinidia, mentre la simulazione della fioritura delle drupacee fornisce risultati migliori con il modello UTAH, con data fissa di inizio d’accumulo di calore. A titolo d’esempio, in fig. 10 sono i risultati per la fioritura dell’albicocco San Castrese.

Metodo	Pesco				Albicocco				Susino				Melo		Actinidia			
	Springcrest		StarkR.G.		S.Castrese		Tyrinthos		Angelino		President		GoldenD.		Fioritura		Rott.Gemme	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
UTAH	4.3	6.6	6.8	9.3	3.2	5.6	4.8	7.6	2.5	4.4	3	3.4	2.2	3.1	1.8	2.3	3.2	4.4
UTAH 15 gen	3.7	4.7	4	4.8	1.7	2.3	2.8	3.8	3.3	4.8	2.8	3.3	2	3.7	2.5	3.2	2.7	3.2
UTAH 15 feb	3.2	3.9	3.3	4	1.5	2	2.3	3.1	3.5	4.8	3.7	4.6	1.7	2.5	1.7	2.1	1.7	2.3
CHILL	2.7	3.9	3.5	4.6	2	3.2	3.5	4.9	4.8	6.2	4.3	5.7	4.5	6.5	1	1.4		

Tab. 6. – Errore della previsione del giorno di fioritura calcolato con alcuni modelli per diverse specie e cultivar. UTAH 15 gen: modello UTAH senza cumulo CU e data inizio di accumulo GDD 15 gennaio; UTAH 15 feb: modello UTAH senza cumulo CU e data inizio di accumulo GDD 15 febbraio. Per l’actinidia sono riportati anche i risultati relativi alla simulazione della rottura delle gemme. MAE: Errore Medio Assoluto; RMSE: Errore Quadratico Medio.

Calibrazione di modelli fenologici per colture frutticole in Valle dell’Adige

La ricerca in Valle dell’Adige si è concentrata esclusivamente sul melo, che con la vite rappresenta la coltura più rappresentativa e rilevante nel panorama agricolo trentino. Nello specifico ci si è occupati della simulazione della data di fioritura per il melo Golden Delicious delle aziende Sperimentali di Maso Parti (Mezzolombardo) e Maso Maiano (Cles) (v. fig. 11). L’integrazione di diverse informazioni fenologiche hanno consentito di investigare il periodo 1984-2002.

I modelli utilizzati sono due: Utah e Bidabe. Il primo è già stato descritto in precedenza. Il modello Bidabe è in realtà un insieme di modelli. Seppure come Utah, esso proponga una fase di cumulo del freddo ed una di cumulo di GDH, dà la possibilità di effettuare entrambi i cumuli con due metodologie diverse, una “esponenziale” ed una “lineare con soglia”. Il metodo prevede alcune differenze a seconda che si intenda basare il cumulo su temperature orarie o giornaliere. Il cumulo di CU su base giornaliera si basa sul metodo “esponenziale”:

$$a_f = \frac{1}{2} \left(Q_{10}^{\frac{-M}{10}} + Q_{10}^{\frac{-m}{10}} \right) \quad (7)$$

dove a_f è il cumulo in freddo, Q_{10} è la cosiddetta “base” d’azione ($2 < Q_{10} < 3$), M è la temperatura massima giornaliera, m la temperatura minima giornaliera.

Per quanto riguarda l’accumulo di calore i metodi si distinguono in “esponenziale” e “lineare con soglia”, entrambi sono pensati per l’utilizzo di dati giornalieri ma possono essere facilmente estesi all’utilizzo di dati orari; il metodo “esponenziale” per il cumulo di caldo giornaliero è del tutto simile a quello per le CU:

$$GDD = \left(Q_{10}^{\frac{m}{10}} + Q_{10}^{\frac{M}{10}} \right) \quad (8)$$

Il metodo “lineare con soglia” al contrario cumula la quantità:

$$GDD = (M - s) + (m - s) \quad M > s, m > s \quad (9)$$

$$GDD = (M - s) \quad M > s, m < s \quad (10)$$

$$GDD = 0 \quad M < 0, m < 0 \quad (11)$$

dove s è la soglia d’azione del cumulo di caldo.

In fig. 12 sono riportati alcuni indici statistici per i due modelli, con differenti combinazioni di parametri, mentre la fig. 13, 14 illustrano le date di fioritura stimate con i due modelli.

I modelli proposti sono stati calibrati ed entrambi possono ritenersi soddisfacenti in termini di previsione delle date del calendario fenologico più sensibili al gelo. In particolare, si è osservato che anche in questo caso, come in Emilia-Romagna, è possibile escludere dalla modellazione il calcolo del cumulo di freddo, senza pregiudicare la bontà della stima, scegliendo una data fissa per l’inizio del cumulo di caldo.

Calibrazione di modelli fenologici per cereali vernini in Lombardia

La ricerca relativa ai modelli fenologici per le colture erbacee è stata svolta del Dipartimento di Produzione Vegetale dell’Università di Milano.

Dopo la ricerca relativa alla sensibilità al freddo per le colture erbacee previste nel progetto, e la ricerca dei modelli di sviluppo più idonei per la modellazione delle fasi più sensibili, si è giunti finora all’individuazione di fonti bibliografiche opportune e allo sviluppo e implementazione di un modello fenologico per il frumento tenero per la simulazione della fenologia del grano, e di un modello multi-coltura per l’emergenza delle altre specie erbacee considerate nel progetto, per le quali tale fase di sviluppo è la più rilevante in termini di danno da gelo. Il modello può essere facilmente esteso ad altre colture cerealicole vernine mentre la sua estensione alle colture primaverili estive richiede alcuni aggiustamenti più sostanziali.

Il modello è prevalentemente basato sulle formulazioni matematiche presenti in Wang and Engel (1998). Si tratta di un modello di simulazione dinamica, a passo giornaliero, che ha come variabile guida la temperatura dell’aria rilevata in capannina. Tuttavia, è stata perfezionata la funzione di vernalizzazione in base alle recenti proposte di Streck et al. (2003). Gli output del modello sono costituiti dalle fasi fenologiche espresse secondo la scala olandese e secondo la scala decimale di Zadoks. Il modello comprende l’effetto della temperatura, del fotoperiodo e della vernalizzazione sullo sviluppo del frumento tenero, con l’introduzione di una funzione risposta alla temperatura per il tasso di sviluppo e per la vernalizzazione, e i concetti di giorni fisiologici di sviluppo e giorni fisiologici di vernalizzazione.

Il modello è stato inizialmente sviluppato e parametrizzato in base a dati provenienti dalla Germania e dall’Olanda. Per gli scopi del progetto, è stata effettuata inizialmente un’analisi di sensitività, per l’individuazione delle variabili su cui operare in sede di calibrazione. Successivamente, si è operata la vera e propria calibrazione, in relazione ai dati fenologici per la provincia di Milano rilevati dalla rete agrofenologica ERSAL nel periodo 1990-1996. Le variabili su cui si è agito sono: il tasso di sviluppo vegetativo massimo, il tasso di sviluppo riproduttivo massimo, e il cumulo di gradi giorno necessari per l’emergenza. In fig. 15 sono illustrati i valori simulati per le date di emergenza, rispetto a quelli osservati.

Il modello di simulazione dell’emergenza delle altre specie erbacee si basa sul lavoro di Donatelli et al. (1994), dove il tasso di sviluppo vegetativo verso l’emergenza è calcolato in base alla temperatura media giornaliera del suolo, in base ad una curva asimmetrica con massimo. I parametri di forma della curva e il tasso di sviluppo massimo sono specifici per ogni coltura.

5. Sviluppo di un modello topoclimatico

In condizioni di gelate radiative, la variabilità spaziale del campo termico è molto elevata, in relazione a diversi fattori naturali e antropici, che influiscono sul bilancio energetico e radiativo superficiali o sul movimento gravitativo di masse d'aria a diversa temperatura. Pertanto, per valutare correttamente il rischio climatico da gelata a livello territoriale, è stato previsto all'interno del progetto lo sviluppo di metodi che consentono di interpolare i dati termici sul territorio considerando i fattori topoclimatici che intervengono sulla dinamica del fenomeno. A tal fine, il primo anno d'attività è stato definito e implementato un modello topoclimatico (Zinoni et al., 2002), che nel secondo anno è stato perfezionato e validato. Il metodo si basa su equazioni statistiche derivate dall'analisi climatologica, e combina tecniche di interpolazioni classiche (kriging) e tecniche di analisi in ambiente GIS, utilizzando come base un modello digitale del terreno (DEM). L'orografia è infatti la variabile che più influenza la variabilità spaziale della temperatura minima in condizioni di forte irraggiamento notturno e successivo drenaggio di aria fredda. Per la regione Emilia-Romagna, in base ai dati climatici del periodo 1987-2003, l'analisi di regressione lineare multipla ha permesso di ottenere la relazione seguente:

$$T_{\min} = a \cdot H_{\text{rel}} - b \cdot I_{\text{plain}} + c \cdot \Delta_z + d \cdot \Delta_{\text{Sea}} + \text{Err} \quad (12)$$

dove T_{\min} è la temperatura minima giornaliera, a , b , c , d sono i coefficienti di regressione, I_{plain} un indice topografico di pianura, variabile da -1 a 1 , che esprime quantitativamente la presenza di depressioni e dossi, Δ_z un fattore correttivo legato alla quota, calcolato in base ai radiosondaggi effettuati presso la base di San Pietro Capofiume (fig. 2), Δ_{Sea} un fattore correttivo relativo all'effetto climatizzante del mare, Err l'errore che si compie nella stima. Err è lo scarto che si determina in base ai valori osservati su ogni stazione, e che viene interpolato sul territorio. Il procedimento per la realizzazione di mappe di temperatura minima di gelata è illustrato in fig. 16, un esempio applicativo è riportato in fig. 17.

Il modello topoclimatico è stato validato in maniera quantitativa, utilizzando dati indipendenti di temperatura misurati presso aziende sperimentali, e in maniera qualitativa, analizzando i pattern spaziali delle mappe prodotte con il modello e di quelle ottenute da dati telerilevati. Inoltre, per valutare ulteriormente la performance del modello, sono stati operati confronti statistici con altre tecniche di interpolazione.

I dati sperimentali per la verifica quantitativa sono i valori di temperatura minima ottenuti con sensori portatili posizionati nelle aziende sperimentali (fig. 2), in occasione di 20 eventi nel 2003. I risultati sono mostrati nella tabella sottostante, mentre in fig. 18 sono illustrati gli scatterplot tra dati osservati e dati stimati, distinguendo per ambiti geografici.

	<i>Totale</i>	<i>Pianura</i>	<i>Collina</i>
RMSE	2.8	2.7	2.9
MAE	2.4	2.4	2.5
MBE	2.3	2.3	2.3

Tab. 7 – Indici statistici relativi alla validazione del modello topoclimatico con campioni indipendenti. RMSE: errore quadratico medio, MAE: errore assoluto medio; MBE: scarto medio.

Se teniamo conto dell'incertezza insita nel processo di calcolo e nei metodi di misura della temperatura, possiamo concludere che l'accordo tra i dati osservati e previsti è soddisfacente. Infatti, il sensore utilizzato presso le aziende è posizionato ad un'altezza di 1 metro, mentre le temperature misurate presso le stazioni meteo della rete ARPA-SIM sono all'altezza di 1.80 m, secondo lo standard WMO (World Meteorological Organization). In condizione di forte irraggiamento, gli strati di atmosfera più bassi sono più freddi. Inoltre, non essendo il sensore portatile schermato, il sensore stesso è soggetto ad irraggiamento, quindi tende a raffreddarsi.

Per un ulteriore confronto, in collaborazione con il laboratorio LSIIT (Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection), dell'università Louis Pasteur di Strasburgo, presso ARPA-SIM si sono installati e applicati gli algoritmi di analisi di dati telerilevati per la realizzazione di mappe di temperatura superficiale terrestre. I dati di partenza sono costituiti da immagini acquisite dal radiometro AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), a bordo dei satelliti delle missioni NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration). Il sensore AVHRR rileva dati nel visibile (2 canali), nell'infrarosso medio (1 canale) e nell'infrarosso termico (2 canali). La simultanea presenza di due satelliti con orbite combinate (per esempio il NOAA 12 e il NOAA 15), con periodo di circa 102 minuti permette di ottenere, per una stessa area alle medie latitudini, due passaggi di notte e due di giorno. La risoluzione spaziale (al nadir) è di circa 1.1 km, quella radiometrica nell'infrarosso di 0.1°C. I dati grezzi sono state forniti dal LSIIT. Il calcolo della LST per una superficie terrestre è complicato dal fatto che l'emissività superficiale deve ritenersi significativamente diversa da 1, e può variare sensibilmente nello spazio e nel tempo. Essa infatti dipende dalla composizione e dalla rugosità superficiale, dallo stato del terreno, e dalla lunghezza d'onda del canale in cui si opera. In questo caso, non è possibile semplicemente invertire la legge di Planck e ottenere la temperatura dalla radianza. Inoltre, è necessario correggere il segnale al sensore per gli effetti atmosferici, poiché la radianza misurata al sensore è la somma delle radianze atmosferiche e superficiali. L'equazione di traferimento radiativo contiene infatti i

termini di emissione e scattering atmosferici, oltre al termine legato all'emissione superficiale. La tecnica utilizzata sfrutta la parziale sovrapposizione tra spettro di emissione solare e spettro di emissione terrestre, nel canale 3 dell'AVHRR (3.7 μm). La tecnica TISI consente di calcolare l'emissività da satellite, utilizzando una coppia di immagini, una di giorno e una di notte. Supponendo che le emissività possano ritenersi costanti per le due immagini, è possibile calcolare il contributo aggiuntivo della radiazione solare, che nel caso dell'immagine notturna è nulla, calcolando in tal modo la riflettività superficiale. Da questa è facilmente calcolabile l'emissività per le due immagini. La correzione atmosferica è realizzata con l'ausilio di un modello di trasferimento radiativo che in base ad alcuni profili di grandezze atmosferiche, ottenibili per esempio da un radiosondaggio, simula le principali variabili che costituiscono l'equazione di trasferimento, in particolare i termini di emissione e scattering atmosferici, la radianza solare riflessa e la trasmittività per i vari canali.

La fig. 19 riporta un esempio di mappa di temperatura superficiale terrestre per una gelata del 2003. Sono evidenti strutture spaziali simili a quelle ottenute con il modello topoclimatico. In particolare, si notano fasce relativamente calde in vicinanza della costa e in corrispondenza della prima fascia collinare, dovuti rispettivamente all'effetto climatizzante del mare e all'inversione termica che in genere raggiunge una quota compresa tra i 200 e i 300 metri. È altresì evidente come siano perfettamente riconoscibili anche isole di calore dovute alla presenza dei centri urbani. Tali strutture non sono presenti nelle mappe realizzate con analisi topoclimatica, poiché tale variabile non è inserita nel modello.

6. Definizione di indici di rischio climatico da gelata

La valutazione del rischio climatico è necessariamente legata all'individuazione di indici climatici basati sui dati meteorologici, sufficientemente semplici per permetterne il calcolo con tempi gestibili e sintetici, e per esprimere con poche variabili l'evoluzione del rischio anche sulle scale temporali tipiche dell'analisi climatologica. Nel caso di eventi estremi come il gelo in agricoltura, si tratta di un compito particolarmente arduo, poiché singoli eventi possono determinare effetti molto rilevanti sulla produzione agricola annuale.

L'attività di ricerca di quest'anno è stata principalmente rivolta all'integrazione dei modelli fenologici sviluppati dalle diverse unità e degli indici sintetici di rischio. L'obiettivo era quello di inserire l'informazione fenologica in maniera dinamica nella valutazione del rischio. Il calendario fenologico è infatti fortemente dipendente dall'andamento meteorologico, e una corretta valutazione del rischio da gelo non può prescindere dall'utilizzo di strumenti in grado di determinare lo stadio di sviluppo della coltura, qualora non siano disponibili osservazioni sul campo, come nel caso di serie storiche e di scenari climatici futuri. In fig. 20 sono riportati i risultati della simulazione sul periodo 1951-2000 in una stazione del ravennate per l'albicocco San Castrese. A parità di altre condizioni, è lecito pensare che un anticipo dello sviluppo vegetativo in generale possa determinare per la pianta un rischio maggiore di essere sottoposta a freddi primaverili più intensi.

La conoscenza dello stadio di sviluppo di una pianta permette di conoscerne la sensibilità al freddo, in base alle informazioni acquisite durante il primo anno per le diverse colture. Per le colture frutticole, sono a disposizione curve del tipo di fig. 21, in base alle quali è possibile calcolare il danno atteso in ogni singolo evento, in termini di perdita di produzione percentuale. L'indice di rischio climatico è così espresso in termini molto pratici dal punto di vista agronomico. Gli effetti dei singoli eventi devono essere poi integrati per ottenere un valore univoco che indichi il rischio climatico relativo all'annata, in modo da determinare eventuali trend statistici nel passato e nel futuro. In base alla letteratura, all'esperienza nel settore e alla consulenza con tecnici, si sono individuati alcuni modelli di integrazione basati sulle seguenti formule:

$$\text{Modello "danno massimo"} \quad DT = \max(D_i) \quad (13)$$

$$\text{Modello "additivo"} \quad DT = \sum_i D_i \cdot (1 - DT_{i-1}) \quad (14)$$

$$\text{Modello "additivo pesato"} \quad DT = \sum_i D_i \cdot (1 - DT_{i-1}) \cdot P_i \quad (15)$$

I danni percentuali D_i derivati da singoli eventi i -esimi sono integrati su tutto l'anno in base alle formule riportate, fino ad ottenere un danno totale DT . Nel primo caso (13) si assume che sia l'evento più dannoso a determinare la produzione persa nell'anno. Nel caso del modello "additivo" (14), invece, la percentuale di danno è calcolata sul residuo di produzione dell'evento precedente, come suggerito anche da Snyder et al., (2004). Quest'ultimo metodo è stato anche modificato (formula (15)), inserendo un peso P_i legato al tempo trascorso dalla gelata precedente. Si è osservato infatti che per le colture arboree una gelata che si verifichi poco tempo dopo un'altra provoca, a parità di intensità, un danno limitato. Anche all'interno dell'albero stesso, le gemme presentano sensibilità diverse, per una diversa idratazione, per uno sviluppo più o meno accentuato, per la disposizione (a tal proposito si veda la fig. 9). Uno stress da freddo provocherà quindi un danno sulle gemme più sensibili, e nel caso si verifichi una gelata simili a distanza temporale relativamente breve, non ci saranno ulteriori gemme danneggiate. Se al contrario la distanza temporale tra le due gelate è tale che nel frattempo si siano sviluppate altre gemme in sostituzione di quelle colpite, allora il danno torna ad essere paragonabile a quello osservato nel primo evento. In ogni caso, se la gelata è di intensità superiore alla prima, allora anche gemme più resistenti potranno subire conseguenze negative. Il modello "additivo

pesato” è pertanto quello che esprime in maniera più realistica la risposta fisiologica delle piante arboree allo stress da freddo, in relazione a ciò che si è osservato in campo.

I modelli di calcolo del danno e i modelli fenologici sono stati integrati in un unico sistema, in modo da automatizzare la lettura dei dati meteorologici, la simulazione, e la stampa degli output, e rendere facilmente applicabile la metodologia nelle altre aree di studio. In fig. 22 sono riportati a titolo di esempio i risultati, derivati dall'applicazione dei tre diversi metodi all'albicocco San Castrese, utilizzando i dati meteo del periodo 1951-2000 rilevati in una stazione nella pianura ravennate. In fig. 23 sono riportati gli stessi valori, per il modello “additivo pesato”, per il solo periodo 1991-2000, per il quale sono disponibili valori di produzione osservati, relativi tuttavia all'intero territorio regionale. Considerando che la coltivazione dell'albicocco è concentrata in quella zona, il confronto tra dati simulati e dati osservati può fornire un risultato preliminare in termini di validazione del modello, che va comunque perfezionato nel corso dell'ultimo anno di attività.

Oltre a tale approccio integrato, che rimane comunque quello principale a cui saranno rivolti anche gli sforzi futuri, una parte della ricerca ha riguardato l'applicazione di metodi presenti in letteratura per la determinazione del rischio da gelo su base puramente climatologica. Tale metodo, descritto in Snyder et al., (2004), consiste nel calcolo dei tempi di ritorno di anni con temperature minime sotto una certa soglia, in un determinato periodo dell'anno. Si utilizza la distribuzione di probabilità per eventi estremi perfezionato da Haan, (1979): si calcola la probabilità che la temperatura scenda sotto una certa soglia critica, e successivamente il rischio che questo accada in un determinato numero di anni. Tale metodo può essere utile per conoscere il rischio climatico relativo a specie pluriennali, come quelle frutticole, per valutazione costi-benefici relativi ai nuovi impianti e all'installazione di strumenti di difesa. I risultati dell'applicazione su sei stazioni della regione Emilia-Romagna e due stazioni della Valle dell'Adige sono illustrati in fig. 24. Si può notare come le due stazioni trentine, pur essendo situate a latitudini più elevate, presentino un rischio climatologico minore di alcune stazioni della pianura padana.

7. Conclusioni e sviluppi previsti

L'attività del secondo anno ha consentito di arricchire in maniera cospicua le conoscenze, e sviluppare metodologie e strumenti utili per la valutazione del rischio climatico da gelata.

L'attività sperimentale ha fornito risultati preziosi per la comprensione dei fenomeni fisici legati al raffreddamento notturno, alla sua variabilità spaziale e all'individuazione delle principali grandezze micrometeorologiche rilevanti durante gli eventi di gelo. In particolare, l'attività svolta in pieno campo presso le aziende sperimentali ha permesso di evidenziare le peculiarità agronomiche e meteorologiche che più influenzano il microclima locale.

La campagna sperimentale per la rilevazione della temperatura in aziende sperimentali con sensori portatili e la realizzazione di mappe di temperatura superficiale terrestre hanno garantito la base per una nuova calibrazione del modello topoclimatico e una prima validazione.

Si sono implementati in un sistema integrato i modelli di sviluppo delle colture previste nel progetto, che sono stati calibrati in alcune delle aree di studio. Per le colture che presentano sensibilità al freddo diverse secondo lo stadio di sviluppo, la simulazione avviene in maniera dinamica per le fasi più rilevanti. Sono ora operativi modelli fenologici multifase per il frumento tenero e per le colture frutticole, e un modello per l'emergenza per le colture erbacee.

Indici di rischio specifici per il rischio da gelo sono stati definiti e la loro implementazione e integrazione nel sistema ha permesso di effettuare le prime simulazioni su alcune serie storiche dell'Emilia-Romagna.

Gli sviluppi previsti per il terzo e conclusivo anno sono le seguenti:

- integrazione del modello topoclimatico, dei modelli fenologici e dei modelli di valutazione del rischio produttivo in un unico sistema;
- calibrazione dei modelli alle altre aree di studio;
- applicazione del modello ai dati meteorologici relativi agli scenari climatici futuri.

In particolare, l'integrazione dei diversi modelli seguirà l'approccio illustrato schematicamente in fig. 25. La temperatura minima, la cui variabilità spaziale è particolarmente elevata durante eventi di gelo, sarà stimata sulla griglia di calcolo del modello topoclimatico (100 m) per ogni evento. La fenologia sarà invece calcolata su una griglia meno densa, essendo dipendente principalmente dalla temperatura media, che presenta variazioni spaziali più contenute. Infine, il rischio da gelo, inteso come danno produttivo percentuale e calcolato in base alla temperatura minima e alla fase fenologica, sarà calcolato su una griglia intermedia tra le due precedenti.

8. Pubblicazioni e presentazioni

Rea R., Eccel E., 2004. Modelli di fioritura di melo “Golden Delicious” in Trentino per una valutazione degli effetti di tendenze climatiche. Atti del convegno AIAM “Gli agroecosistemi nel cambiamento climatico”, Matera 22-23 aprile 2004.

Antolini G., Marletto V., Zinoni F., 2004. Analisi comparata di alcuni metodi di interpolazione spaziale di temperatura minima di gelata. Atti del convegno AIAM “Gli agroecosistemi nel cambiamento climatico”, Matera 22-23 aprile 2004.

Facini O., Nardino M., Rossi F., Antolini G., Zinoni F., 2004. Applicazione di modelli fenologici su alcune specie frutticole dell'Emilia-Romagna. Atti del convegno AIAM "Gli agroecosistemi nel cambiamento climatico", Matera 22-23 aprile 2004.

9. Bibliografia

Anderson, J.L., Richardson, E.A., 1986. Validation of Chill Unit and flower bud phenology models for "Montmorency" sour cherry, *Acta Horticulturae*, 184.

Antolini G., Zinoni F., Anconelli S., Palara U., Reggiori G., Rossi F., Zuppiroli M., 2003. Il progetto Disgelo: nuovi risultati. Atti convegno AIAM, 29-30 maggio 2003.

Avissar R., Mahrer Y. 1998. Mapping frost-sensitive areas with a three-dimensional local-scale numerical mode. Parts I and II. *J. Appl. Meteorol.* 27.

Becker F., Li Z.L., 1995. Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems. *Remote Sensing Reviews*, vol. 12, 225-253.

Bidabe, B., 1967, Action de la température sur l'évolution des bourgeons de pommier et comparaison de méthodes de contrôle de l'époque de floraison, *Ann. Physiol. vég.*, 9, 65-86.

Blennow K., 1998. Modelling minimum air temperature in partially and clear felled forests. *Agric. For. Meteorol.* 91, 223-235.

Blennow K., Persson P. 1998. Modelling local scale-frost variations using mobile temperature measurements with a GIS. *Agric. For. Meteorol.* 89, 59-71.

Bogren J., Gustavsson T. 1991. Nocturnal air and road surface temperature variations in complex terrain. *Int. Climatol.* 11, 443-445.

Bootsma, A., 1976. Estimating minimum temperature and climatological freeze risk in hilly terrain. *Agric. Meteorol.* 16, 425-443.

Carrozzo M.T., Chirenti A., Luzio D., Margiotta C., Quarta T. Realizzazione di un archivio delle quote medie. Bozza di pubblicazione.

Cesaraccio C., Spano D., Snyder R.L., Duce P., 2004. A temperature chilling forcing model to predict bud-burst. In stampa su *Agr. And For. Met.*

Donatelli M., Marchetti R., Zinoni F., 1994. A multi-crop submodel to predict emergence time: model definition and preliminary testing. Proc. 3rd ESA Congress, Abano (PD).

Francois, C., Bosseno, R., Vacher, J.J., Seguin, B., 1999. Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano. *Agric. For. Meteorol.* 95, 113-137.

Gate P., 1995. *Écophysiologie du blé, TEC & DOC*, Lavoisier, Cachan.

Gustavsson T., 1995. A study of air and road surface temperature variations during clear windy nights. *Int. J. Climatol.* 15, 919-932.

Gustavsson T., Karlsson M., Bogen J., Lindkvist S., 1998. Development of temperature pattern during clear nights. *J. Appl. Meteorol.* 37, 559-571.

Gustavsson, T., 1990. Variation in road surface temperature due to topography and wind. *Theor. Appl. Climatol.* 41, 227-236.

Haan C.T., 1979. Risk analysis in environmental modifications. In: Barfield B.J., Gerber J.F., Eds. *Modification of the aerial environment of crops*. Am. Soc. Agric. Eng. monogr., 2, St Joseph, Mich., 30-51.

IPCC, Third Assessment Report - Climate Change 2001.

Jarvis C.H., Stuart N., 2001. A comparison among strategies for interpolating maximum and minimum temperatures. Part I and II. *J. Appl. Met.*, 40: 1060-1084.

Lansberg, J.J., 1974, Apple fruit bud development and growth: analysis and an empirical model, *Annals of Botany*, 38, 1013-1023.

Laughlin, G.P., Kalma, J.D., 1987. Frost hazard assessment from local weather and terrain data. *Agric. For. Meteorology* 40, 1-16.

Laughlin, G.P., Kalma, J.D., 1990. Frost risk mapping for landscape planning: a methodology. *Theor. Appl. Climatology* 42, 4-51.

Li Z.L., Becker F., Stoll M.P., Wan Z., 1999. Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images. *Remote Sens. Environ.* 69, 197-214.

Lindkvist L e Chen D, 1999. Air and soil frost indices in relation to plant mortality in elevated clear-felled terrain in Central Sweden. *Climate Research* 12: 65-75.

Lindkvist L., Gustavsson T., Borgren J., 2000. A frost assessment method for mountainous areas. *Agric. For. Meteorol.* 102, 51-67.

Lindkvist, L., Lindqvist, S., 1997. Spatial and temporal variability of nocturnal summer frost in elevated complex terrain. *Agric. For. Meteorol.* 87, 139-153.

Maracchi G., Perarnaud V., Kleschenko A.D., 2000. Applications of geographical information systems and remote sensing in agrometeorology. *Agric. For. Meteorol.* 103, 119-136.

Marletto V., Sirotti M. 1993. Modelli fenologici e loro limiti previsionali. *AER* 3/93: 4-10.

Oke T.R., 1987. *Boundary Layer Climates*. Routledge, London, UK.

- Proebsting E.L.Jr., Mills H.H., 1978. Low temperature resistance of developing flower buds of six deciduous fruit species. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 103 (2): 192-198.
- Richardson E.A., Seeley S.D., Walker D.R., 1974. A Model for Estimating the Completion of Rest for "Redhaven" and "Elberta" Peach Trees, *Hort Sci*, 9, 331-332.
- Robertson G.W., 1983. In: *Weather based mathematical models for estimating development and ripening of crops*, WMO No.620, TN 180. WMO, Geneva, 32-56.
- Rossi F., Facini O. Loreti S., Zinoni F., Antolini G., Nardino M., Georgiadis T., 2002. Spring frost occurrence in Northern Italy orchards: micrometeorological observations and risk assessment. *Proceedings of 15th Conf. Biometeorology and Aerobiology*. 27 Oct - 1 Nov., Kansas City, USA.
- Simonini G., Marletto V., Zinoni F., 1997. *Agricoltura in ginocchio per le intense gelate di aprile in Emilia-Romagna*. AER, Aprile 1997.
- Snyder R.L., Spano D., Cesaraccio C. and Duce P., 1999: Determining degree day thresholds from field observations. *Int. J. Biometeorol.*, 42:177-182.
- Snyder, R. L., De Melo-Abreu, J. P., Matulich, S. 2004. *Frost Protection: Fundamentals, Practice and Economics*. Vol. I and II. United Nations, Food and Agriculture Organization, Rome, 263 pp. (in press).
- Sobrinho J.A., 2000. *Teledetección*. Servicio de publicaciones, Universidad de Valencia.
- Streck N.A., Weiss A., Baenziger P.S., 2003. Weath, a generalized vernalization response function for winter weath. *Agronomy Journal*, 95, 155-159.
- Tabony R.C., 1985. Relations between minimum temperature and topography in Great Britain. *J.Climatol.*5, 503-520.
- Valentini N., Me G., Ferrero R., Spanna F., 2001. Use of bioclimatic indexes to characterize phenological phases of apple in Northern Italy, *Int J Biometeorol*, 45, 191-195.
- Ventskevich G.Z., 1958. *Agrometeorology*. Jerusalem, Hidromet Pub. House.
- Wang E., Engel T., 1998. Simulation of phenological development of weath crops. *Agricultural systems*, vol. 58, n.1, 1-24.
- Zinoni F., 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.
- Zinoni F., Antolini G., Campisi T., Marletto V., Rossi F., 2002. Characterisation of Emilia-Romagna region in relation with late frost risk. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 1091-1101.
- Zinoni F., Lega P., Tonelli T., 1998. The IBIS project: vine bioclimatic indices assessed from landscape features and visualized as interactive raster maps - *Proceedings of the COST 77,79,711 International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology*, Volos (Grecia), 24 - 26/4/96, EUR 18328 EN, 487-493.
- Zinoni F., Marletto V., Van Soetendaal M., 2000. Caratterizzazione del territorio in relazione al rischio da gelate tardive, *Workshop Geostatistica per lo studio e la gestione della variabilità - Applicazioni nelle scienze fisiche, ambientali e agronomiche*, Milano.
- Zinoni F., Salsi A., Gennari V., Ferri A., Pitacco A., 1992. *Gelate primaverili tardive*. Agricoltura, Regione Emilia-Romagna, Luglio-Agosto 1992.
- Zinoni, F., Rossi, F., Pitacco, A., Brunetti, A. (Eds.), *Metodi di previsione e difesa dalle gelate tardive*. Calderini Agricole, Bologna, Italy.

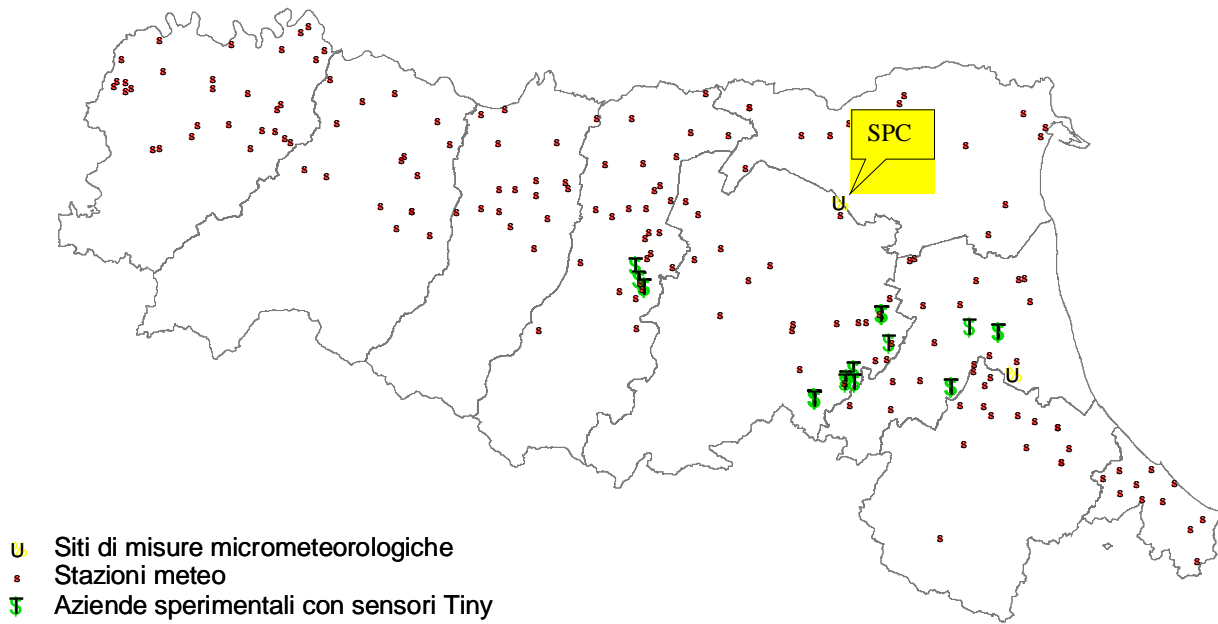


Fig. 1 – Rete per la rilevazione meteorologica e per la campagna sperimentale in Emilia-Romagna. SPC: San Pietro Capofiume.

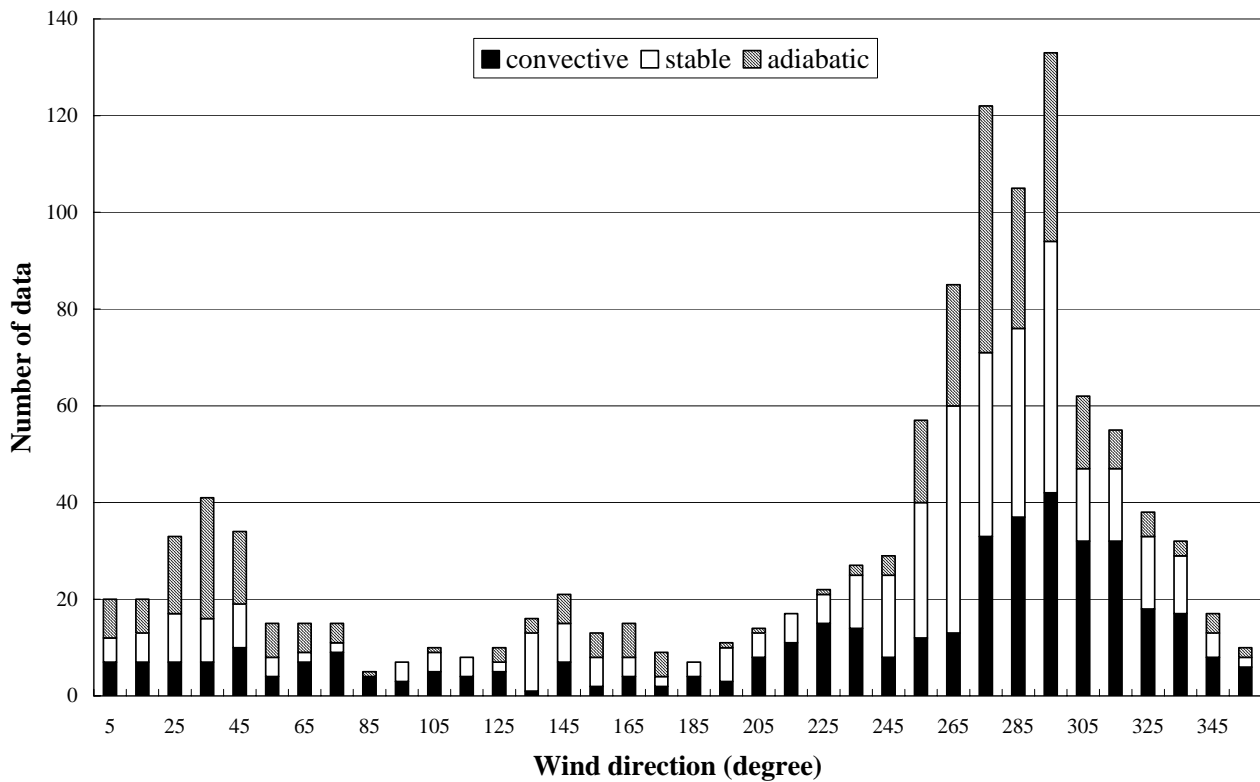


Figura 2 - Frequenze degli stati di stabilità atmosferica in relazione alla direzione del vento.

Progetto Climagri

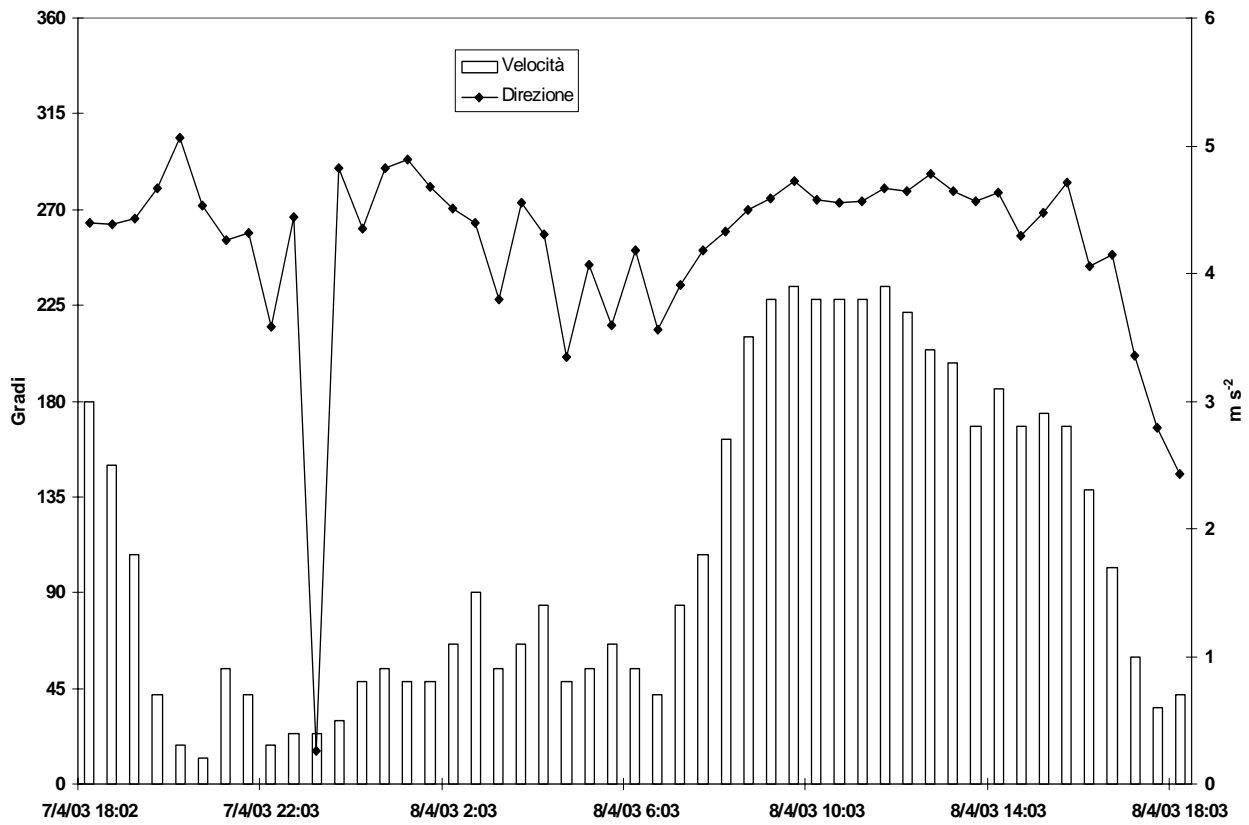


Fig. 3 - La gelata nella notte 7/8 aprile 2003: velocità e direzione del vento a S.Pietro Capofiume.

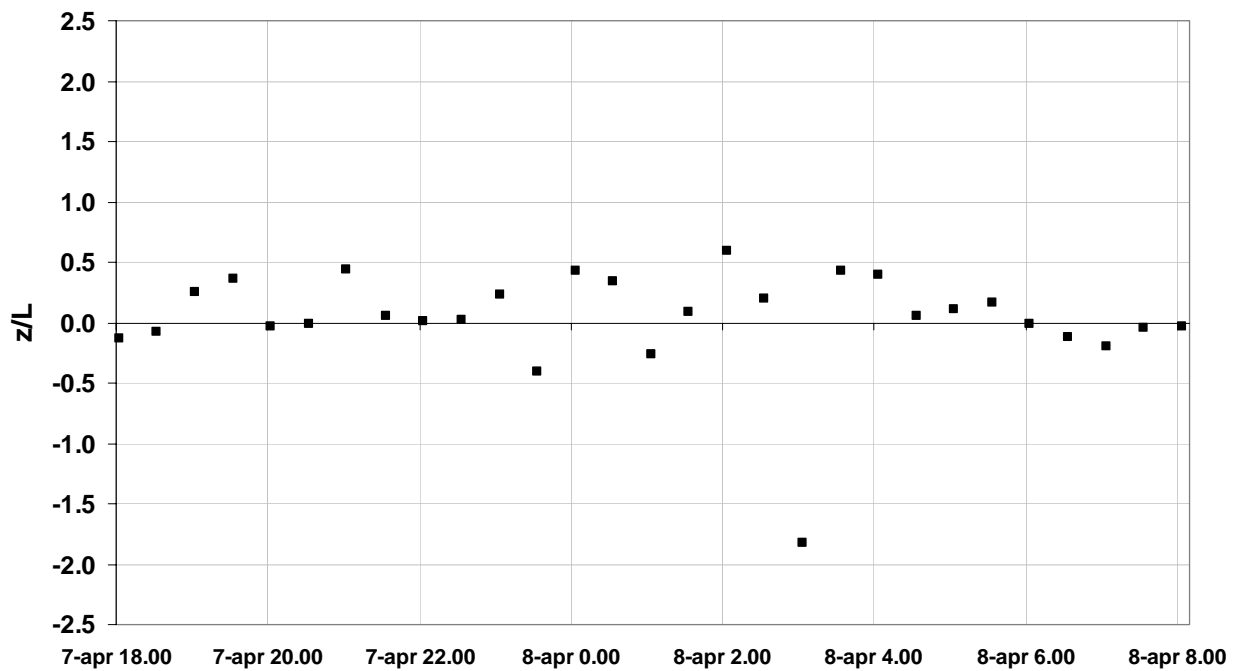


Fig. 4 - La gelata nella notte 7/8 aprile 2003: parametro di stabilità dell'atmosfera z/L .

Progetto Climagri

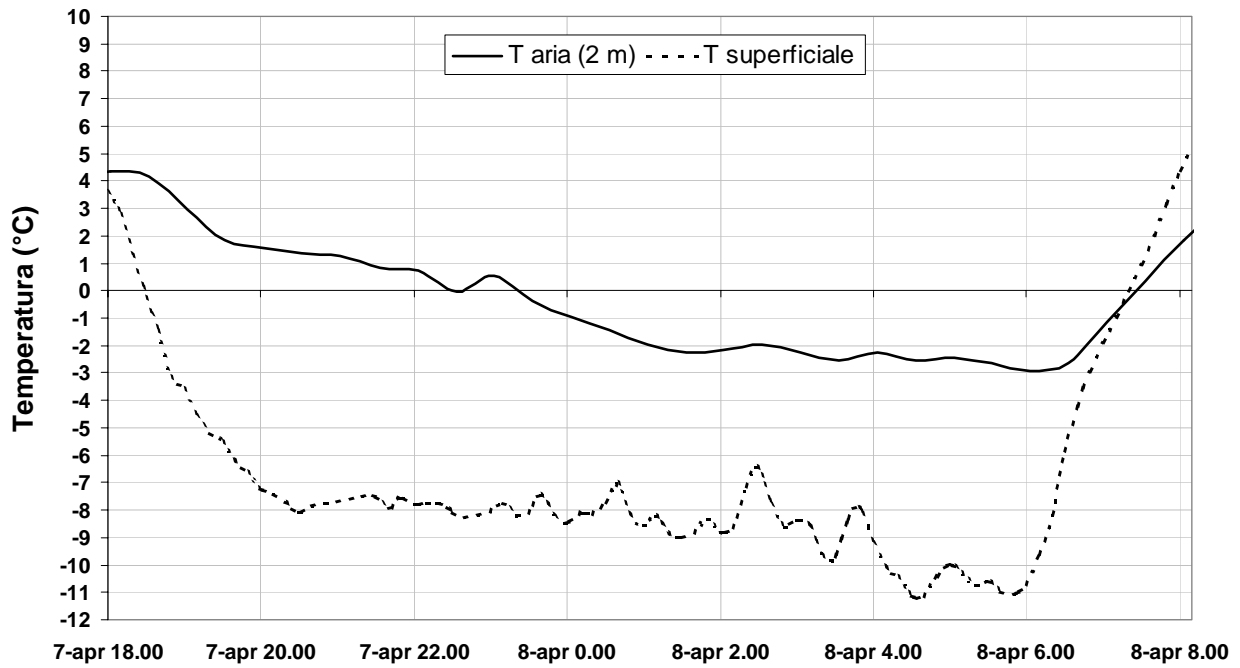


Fig. 5 - La gelata nella notte 7/8 aprile 2003: temperatura superficiale e temperatura dell'aria a 2 metri di altezza.

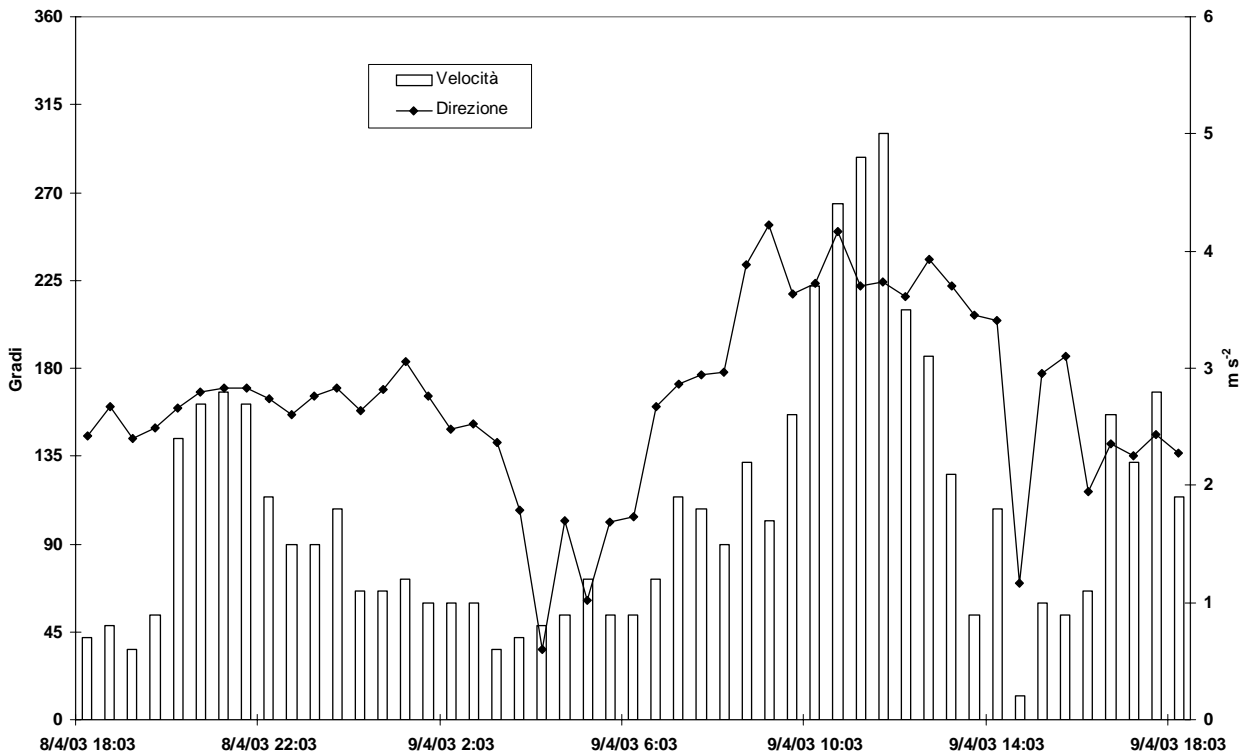


Fig. 6 - La gelata nella notte 8/9 aprile 2003: velocità e direzione del vento a S.Pietro Capofiume.

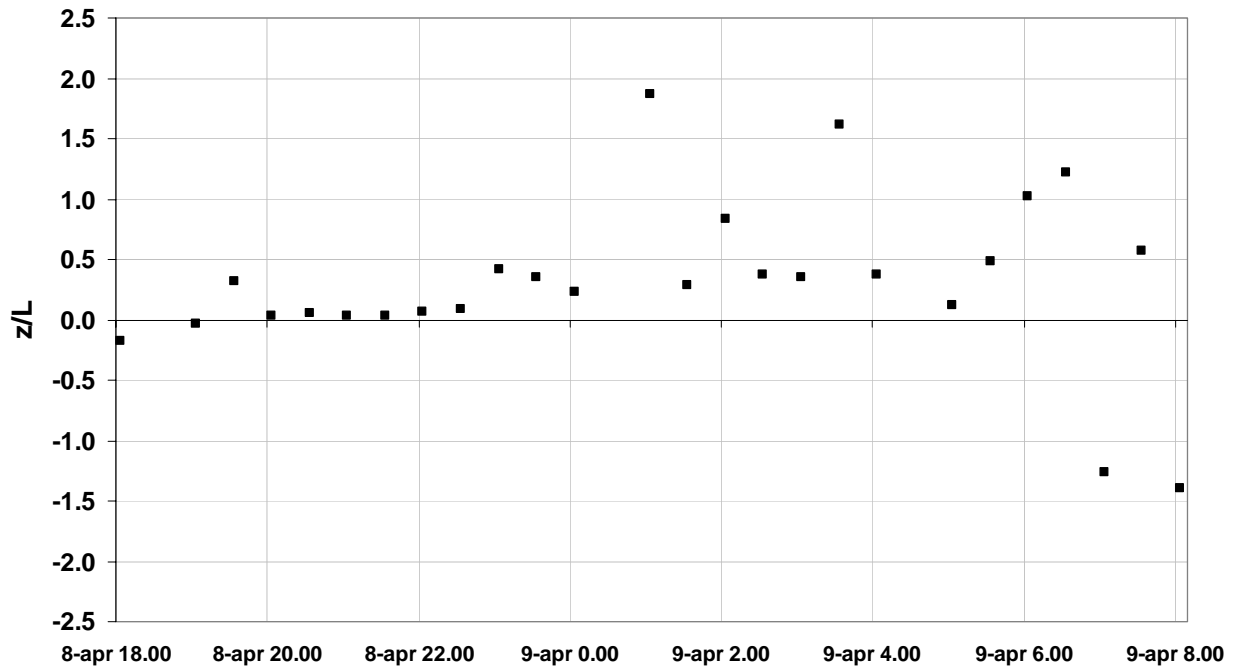


Fig. 7 - La gelata nella notte 8/9 aprile 2003: parametro di stabilità dell'atmosfera z/L .

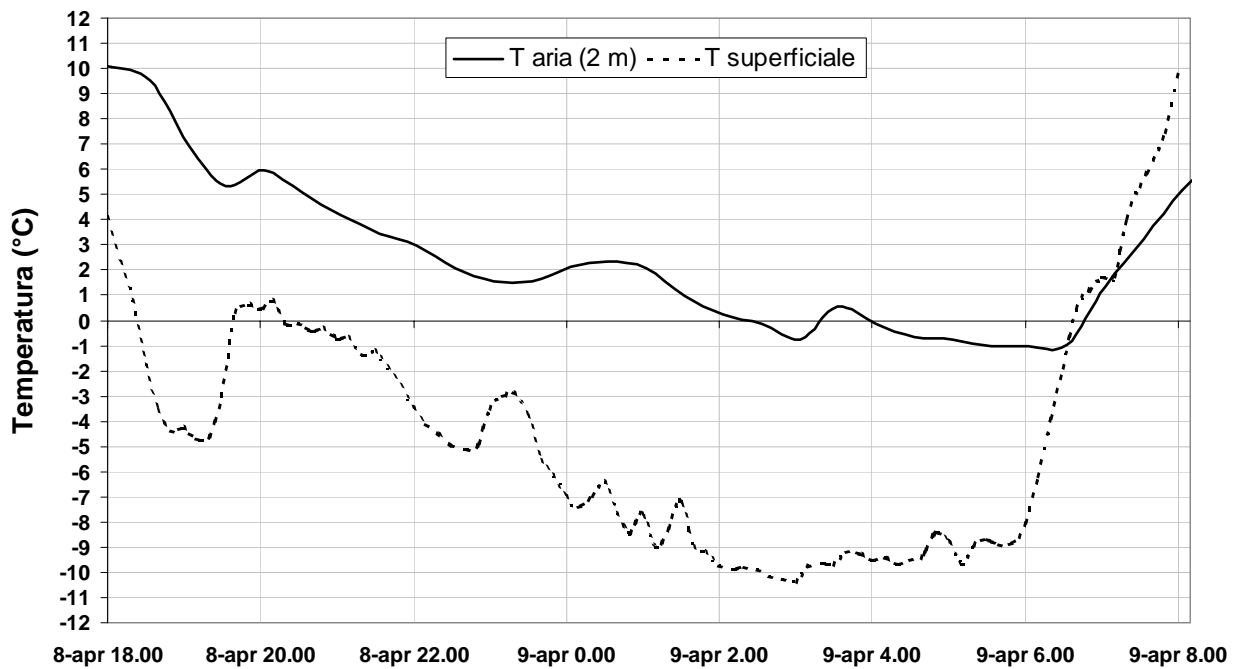


Fig. 8 - La gelata nella notte 8/9 aprile 2003: temperatura superficiale e temperatura dell'aria a 2 metri di altezza.

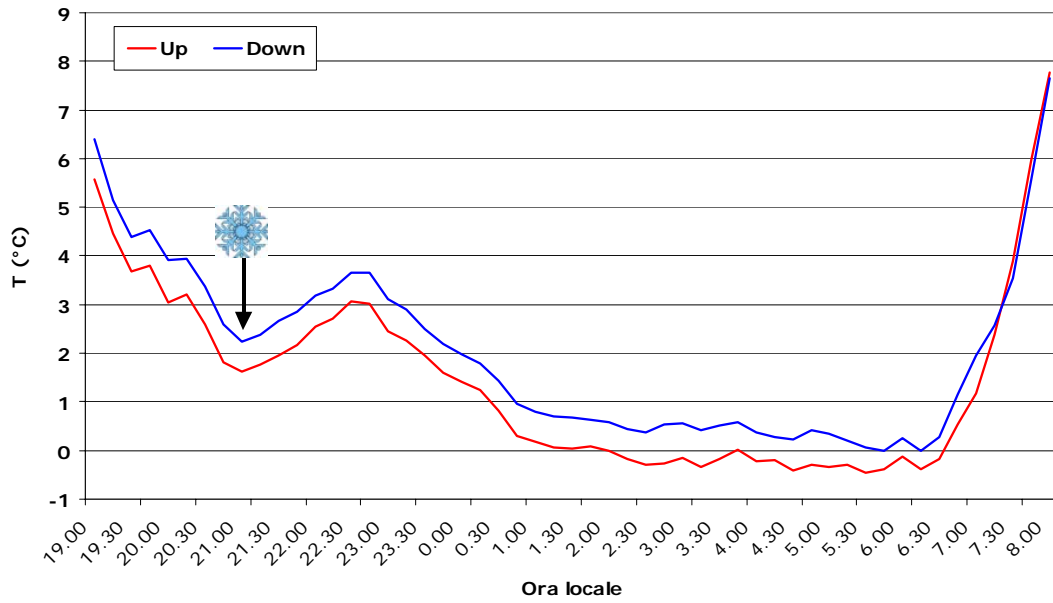


Fig. 9 - La gelata nella notte 7/8 aprile 2003: temperatura delle gemme in funzione della loro posizione sulla chioma: verso l'alto (up), verso il basso (down). La freccia indica l'ora in cui si è messo in funzione l'impianto di difesa antibrina.

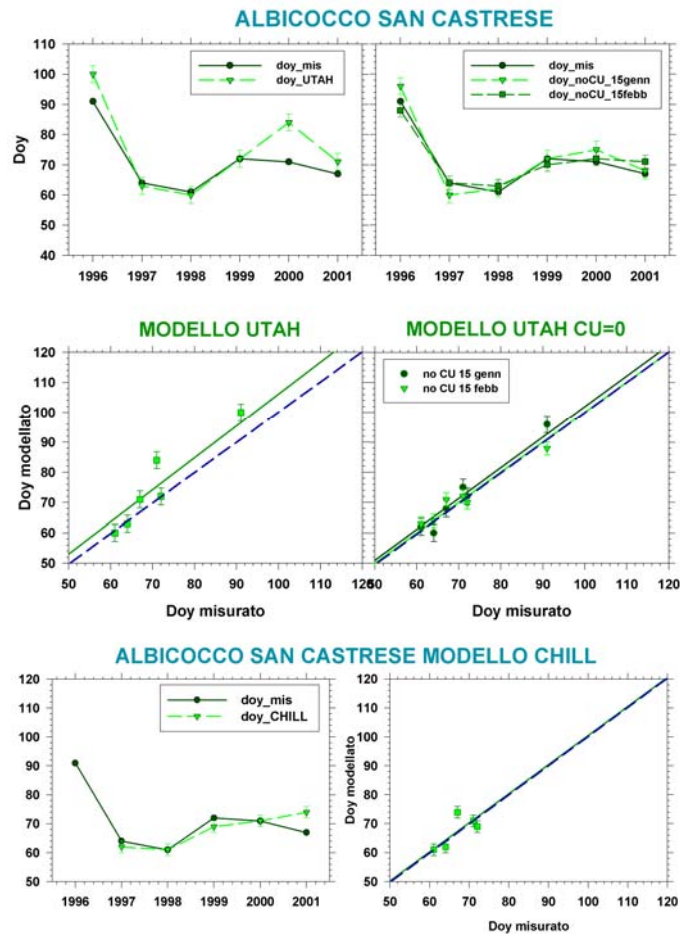


Fig. 10 - Data di fioritura modellata e misurata dell'albicocco San Castrese con i tre diversi metodi (DOY: Day Of Year). A sinistra in alto i risultati del modello UTAH classico, a destra in alto quelli del modello UTAH senza cumulo di freddo, in basso quelli del modello CHILL.

Progetto Climagri

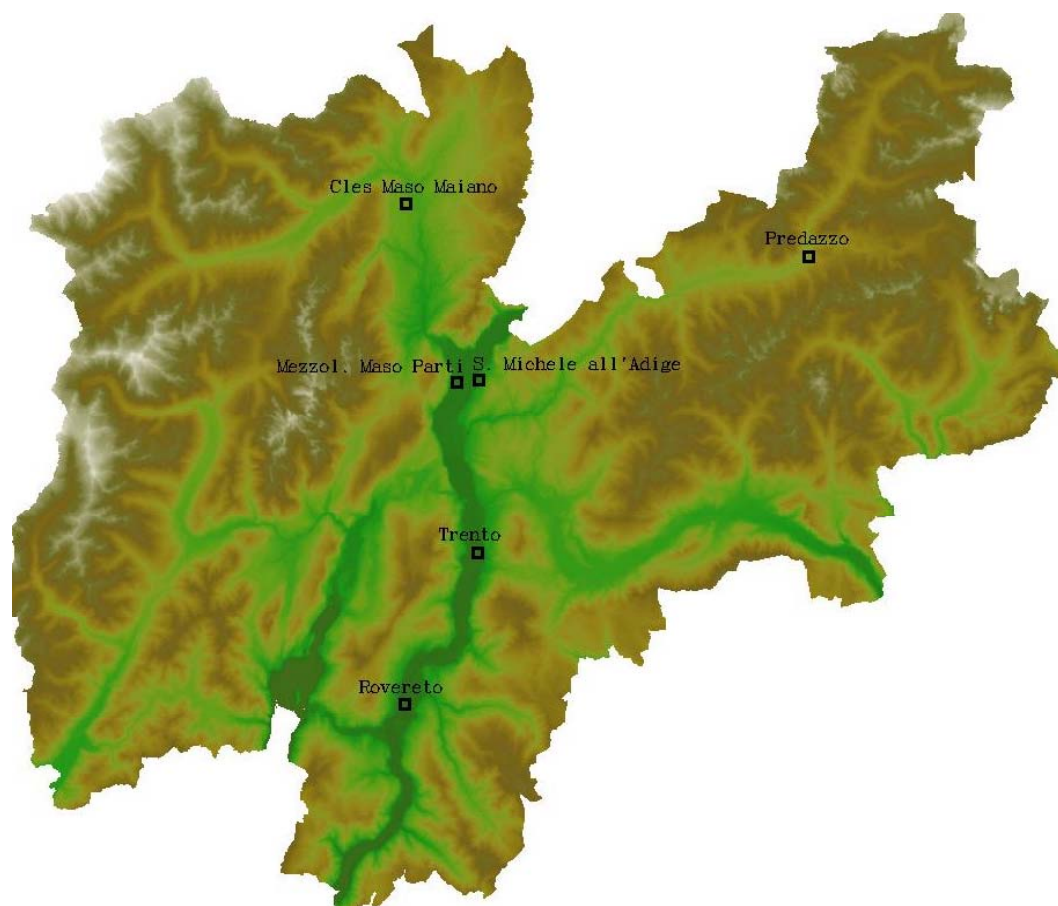


Fig. 11 –Siti analizzati per la calibrazione dei modelli fenologici in Trentino.

	<i>modello UTAH 3</i> <i>s=0°C; primo giorno CU 15/2</i> <i>cumulo CU=0; cumulo GDD=474</i>	<i>modello UTAH 6</i> <i>s=-4°C; primo giorno CU 15/1</i> <i>cumulo CU=0 cumulo GDD=893</i>	<i>modello bidabè 7</i> <i>s=4°C; primo giorno CU 15/2</i> <i>cumulo CU=0 cumulo GDD=695</i>	<i>modello bidabè 9</i> <i>s=0°C; primo giorno CU 30/1</i> <i>cumulo CU=3 cumulo GDD=1210</i>
Maso Maiano (Cles)				
Sr	50	55	50	55
m	2.63	2.89	2.63	2.89
m ₂	1	2	1	2
m ₃	0.84	-0.68	0.63	-0.58
m _m ²	16.00	17.71	18.42	14.34
r ²	0.77	0.81	0.75	0.76
max	9	7	14	8
Maso Parti (Mezzol.)				
Sr	56	70	62	58
m	2.95	3.68	3.26	3.05
m ₂	3	3	3	2
m ₃	-1.68	-0.84	-1.68	-0.95
m _m ²	14.21	22.63	15.68	13.26
r ²	0.76	0.53	0.76	0.74
max	6	10	6	6

Sr=somma dei valori assoluti delle differenza fra date modellate e date rilevate
m=errore assoluto medio
m₂=mediana dell'errore assoluto
m₃=errore medio
m_m²=errore quadratico medio
r²=quadrato del coefficiente di momento di correlazione di Pearson fra date date modellate e date rilevate
max=errore massimo

Fig. 12 – Indici statistici relativi alla performance di 4 modelli fenologici per la fioritura del melo Golden Delicious.

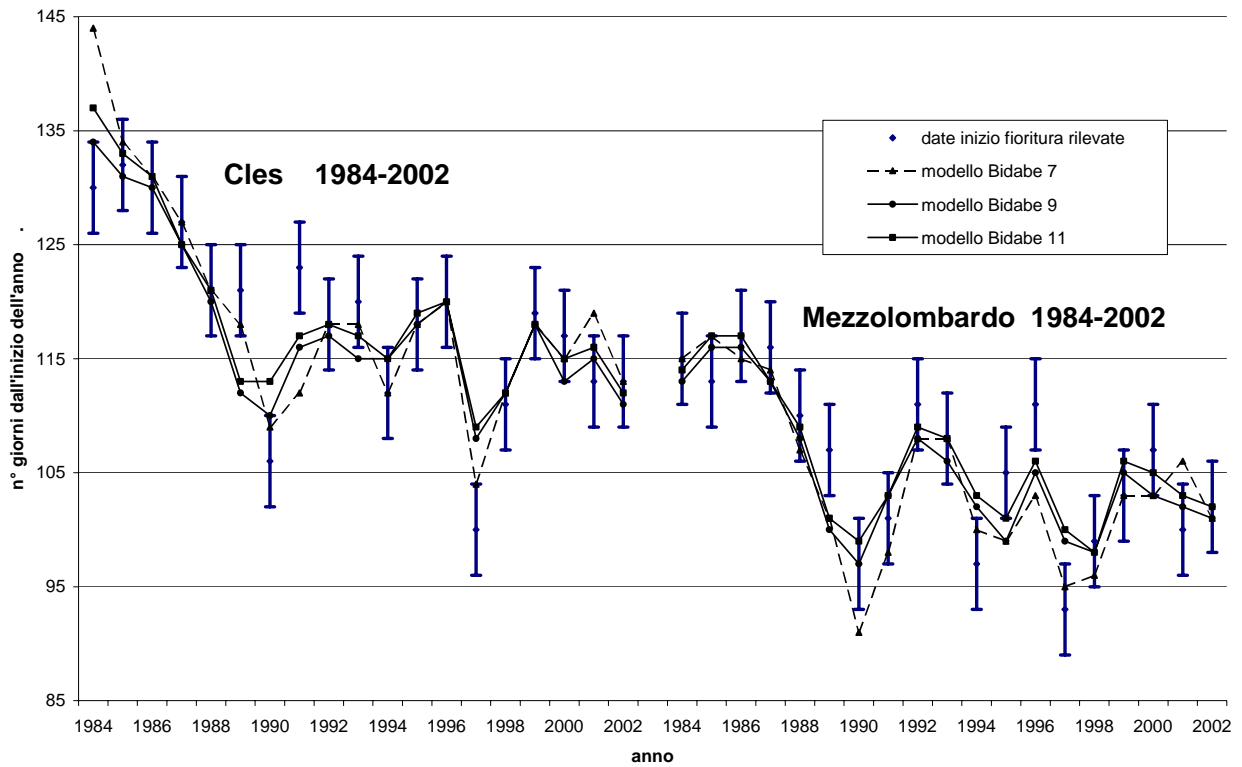


Fig. 13 – Date di inizio fioritura rilevate con intervallo di scarto di ± 4 giorni e date stimate con modello Bidabe (tre versioni).

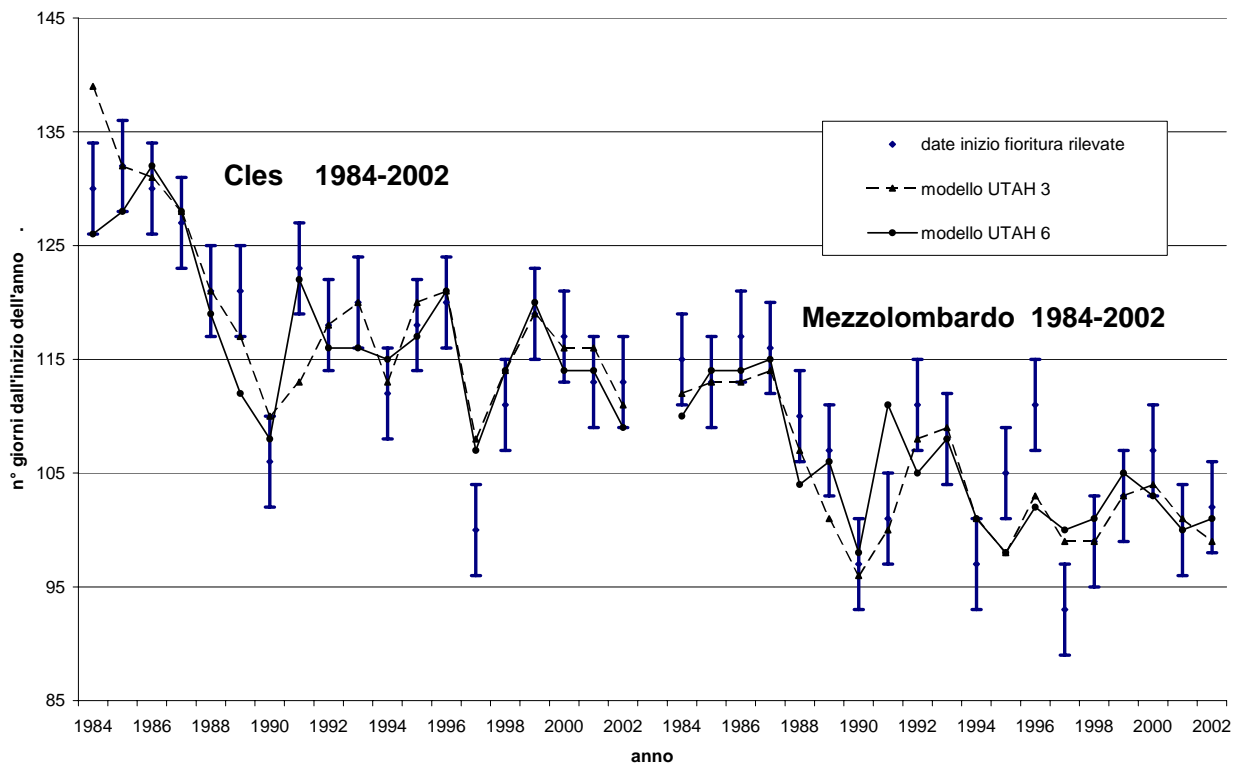


Fig. 14 – Date di inizio fioritura rilevate con intervallo di scarto di ± 4 giorni e date stimate con modello Utah (due versioni).

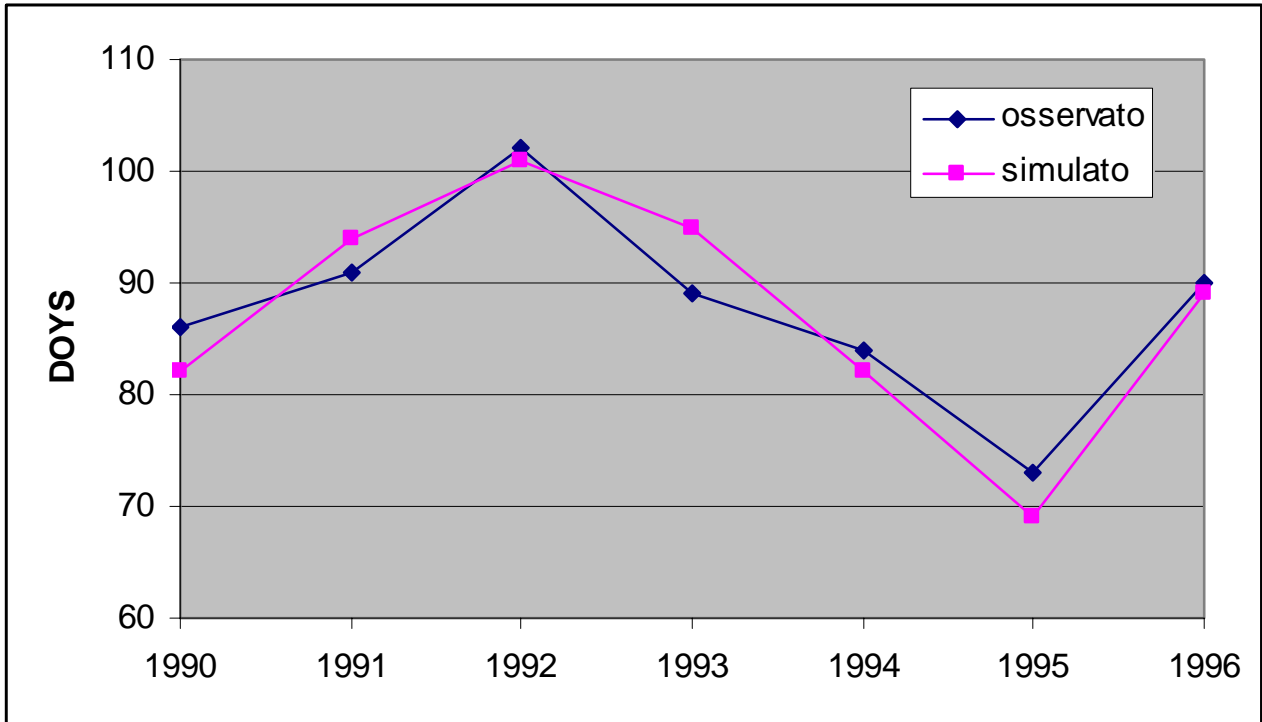


Fig. 15 – Data di emergenza modellata e misurata con il modello Wang-Engel-Streck per il frumento tenero.

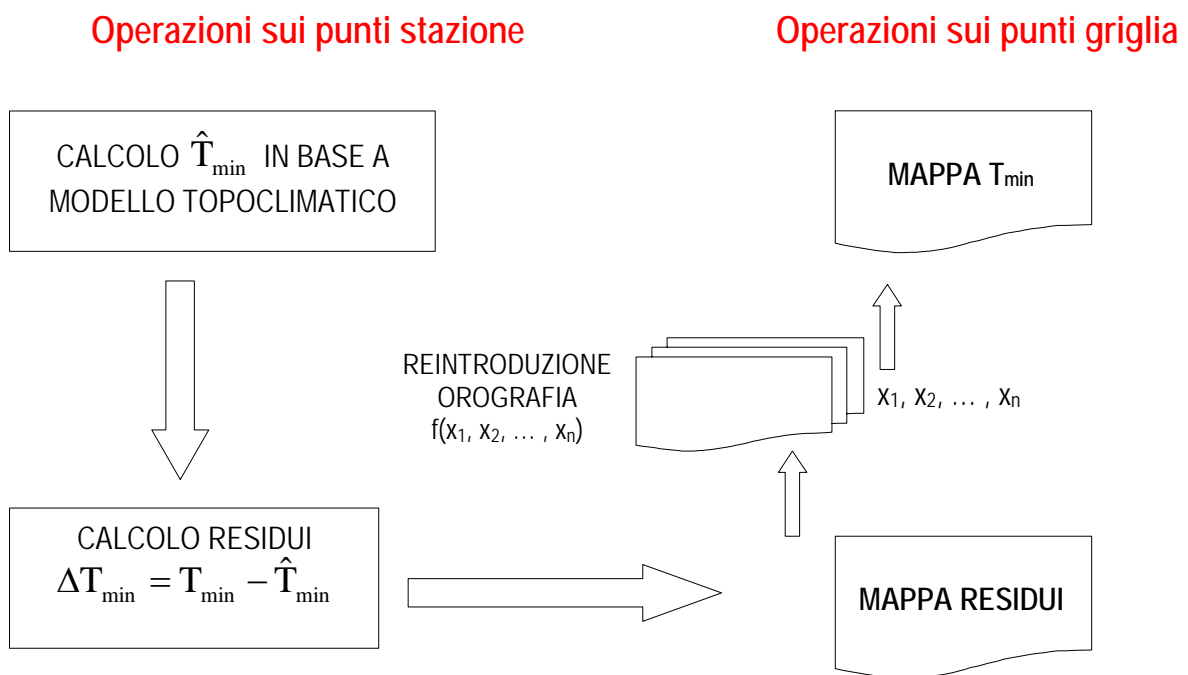


Fig. 16 - Procedura per la realizzazione di mappe meteorologiche in base all'orografia. x_1, x_2, \dots, x_n rappresentano n generici fattori orografici, f una funzione di stima della variabile meteo in base all'orografia.

Temperatura minima del 17/03/2003

Ricostruzione in base all'orografia

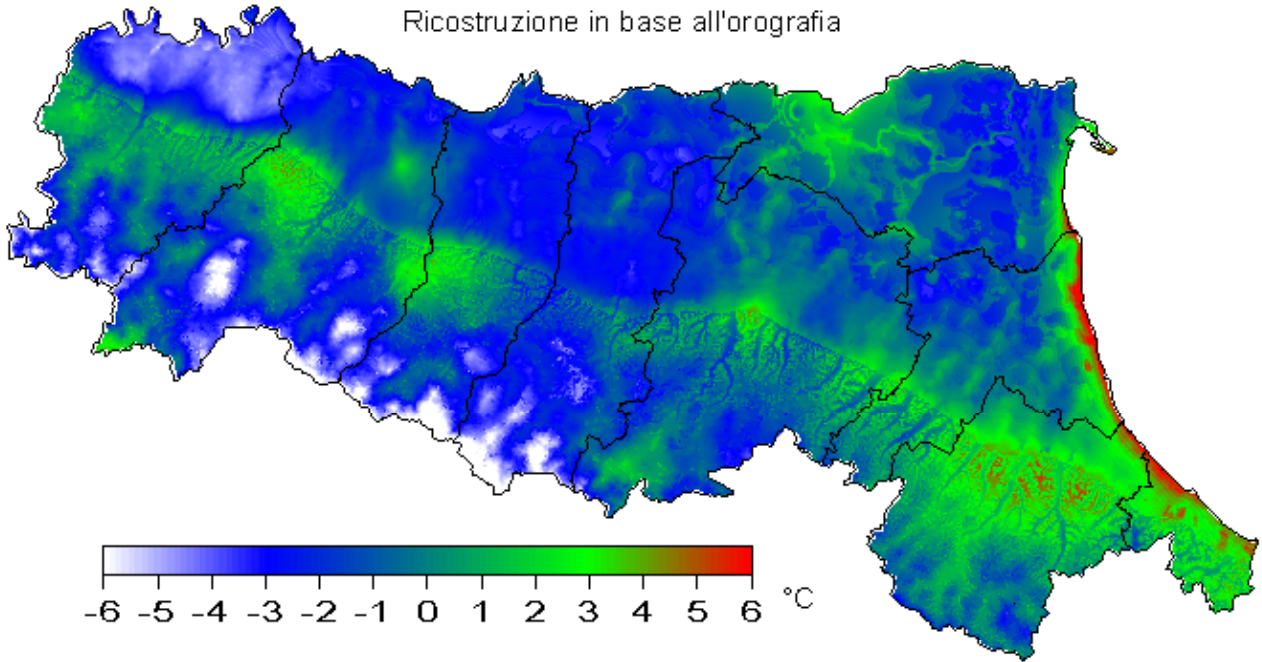


Fig. 17 - Mappa di temperatura minima realizzata con il modello topoclimatico.

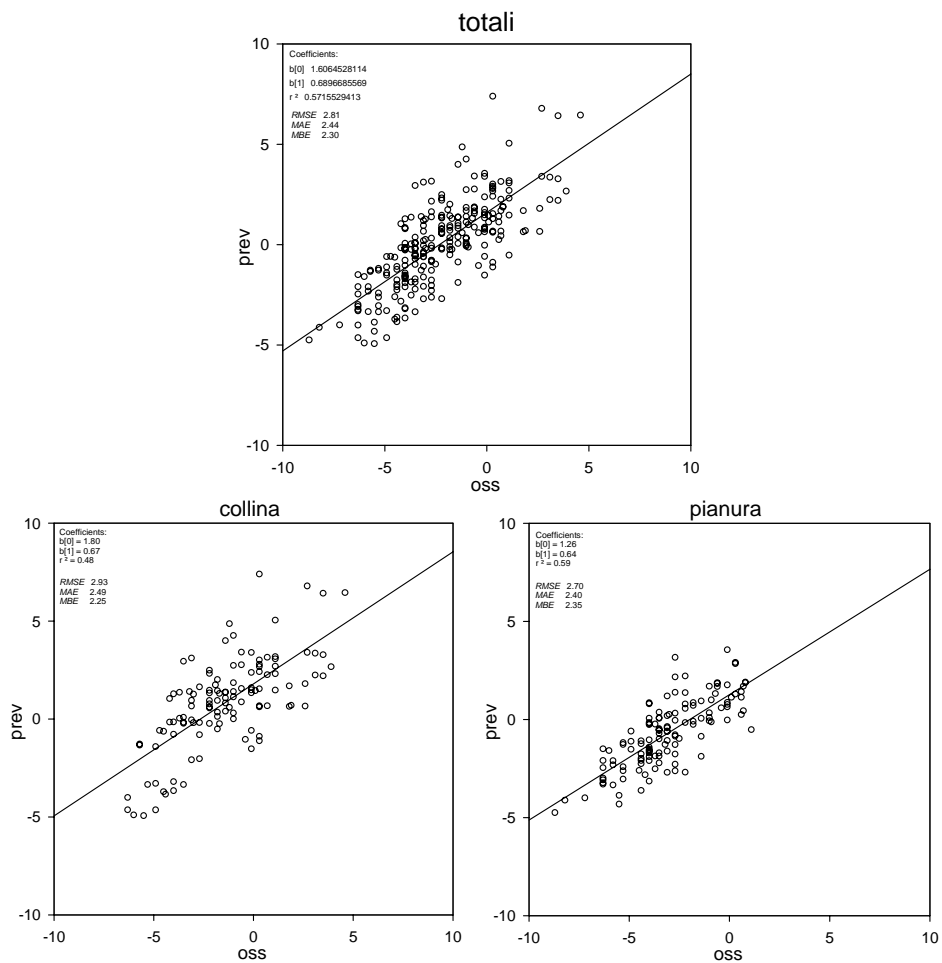


Fig. 18 – Validazione del modello topoclimatico: temperatura misurata in aziende sperimentali e ricavata dalla mappa.

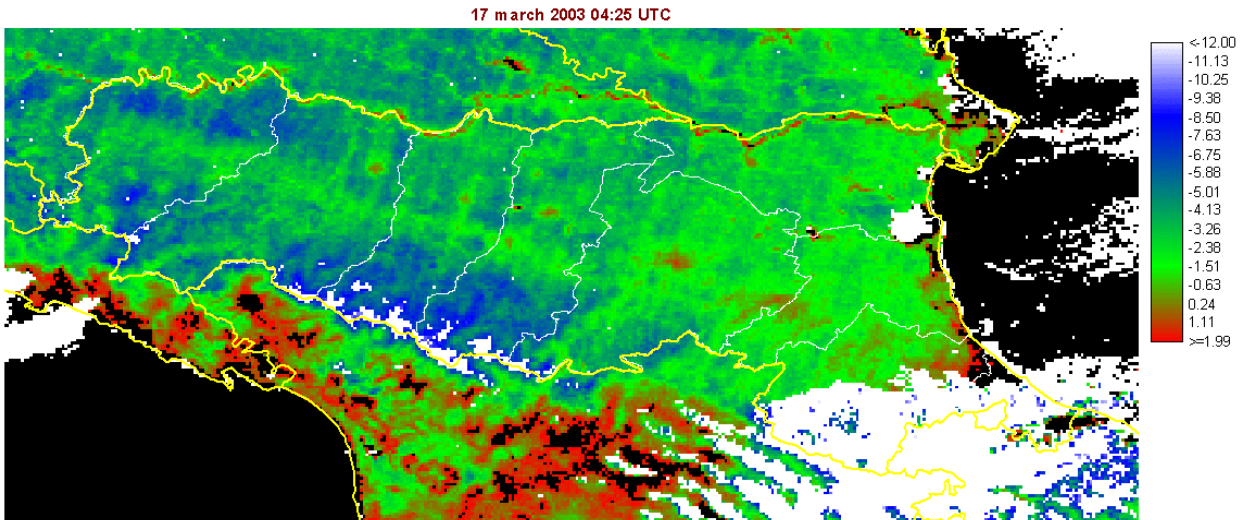


Fig. 19 - Mappa di temperatura superficiale terrestre del 17 marzo 2003, ore 04:25 UTC (da NOAA-AVHRR).

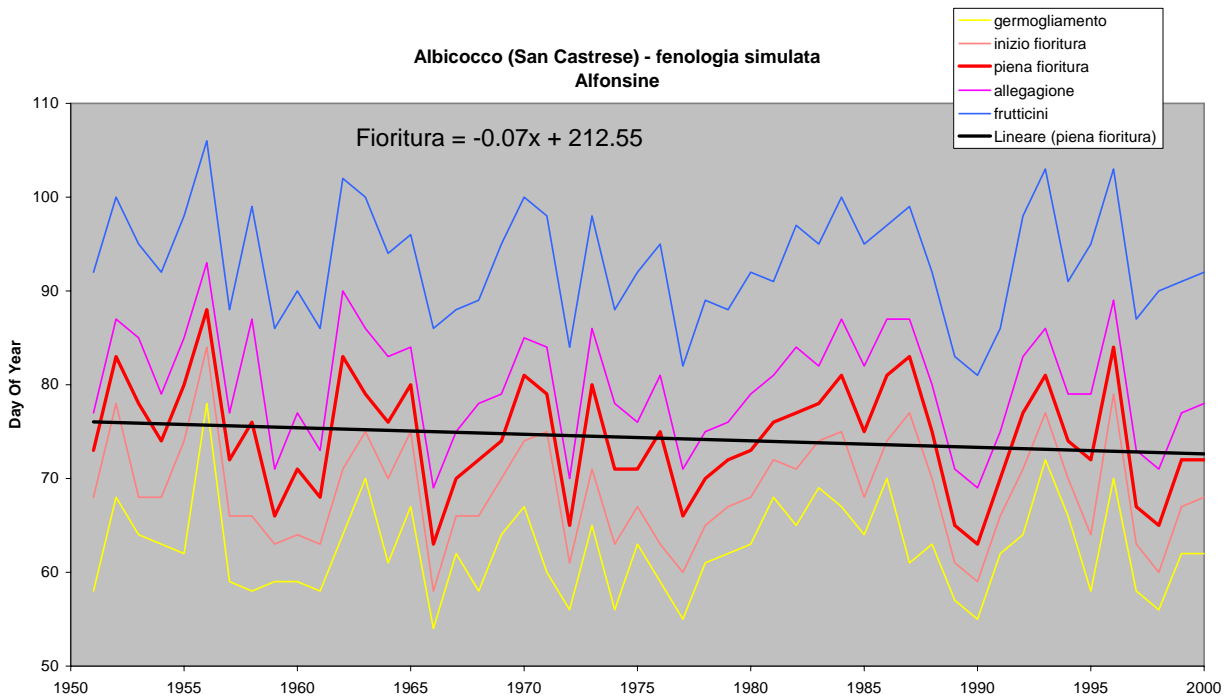


Fig. 20 – Simulazione delle principali fasi fenologiche per il periodo 1951-2000, per la stazione di Alfonsine (RA), e la varietà albicocco San Castrese, e trend statistico della fioritura.

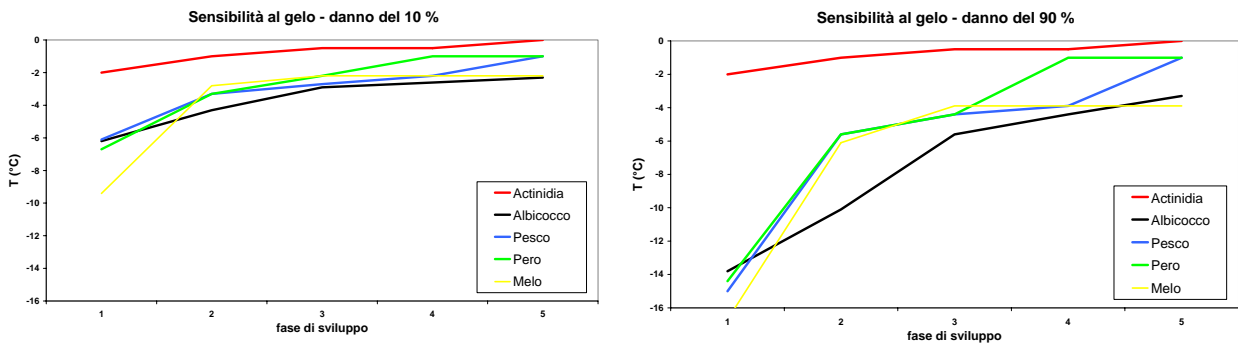


Fig. 21 – Sensibilità al gelo per colture frutticole. Gli stadi di sviluppo sono diversi per ogni coltura. Le fasi riportate nell'asse delle ascisse sono codificate in tab. 3.

Progetto Climagri

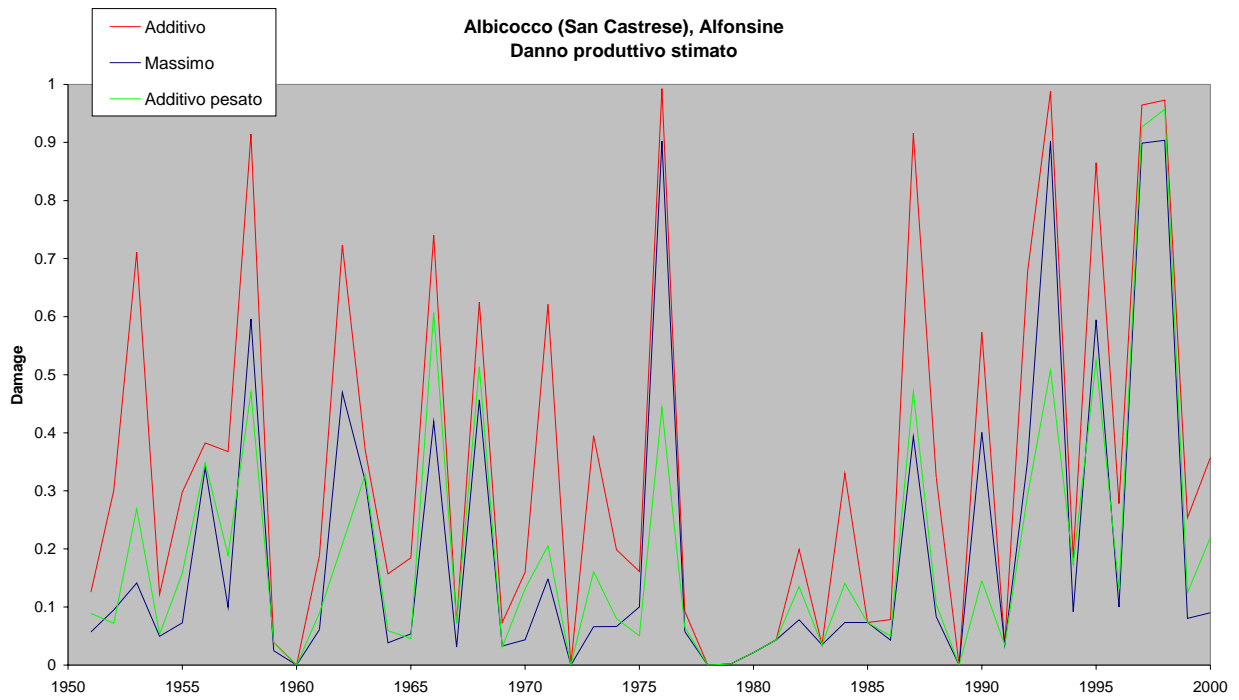


Fig. 22 – Indice di rischio da gelo calcolato con i tre diversi metodi, per il periodo 1951-2000, per la stazione di Alfonsine (RA), e la varietà albicocco San Castrese.

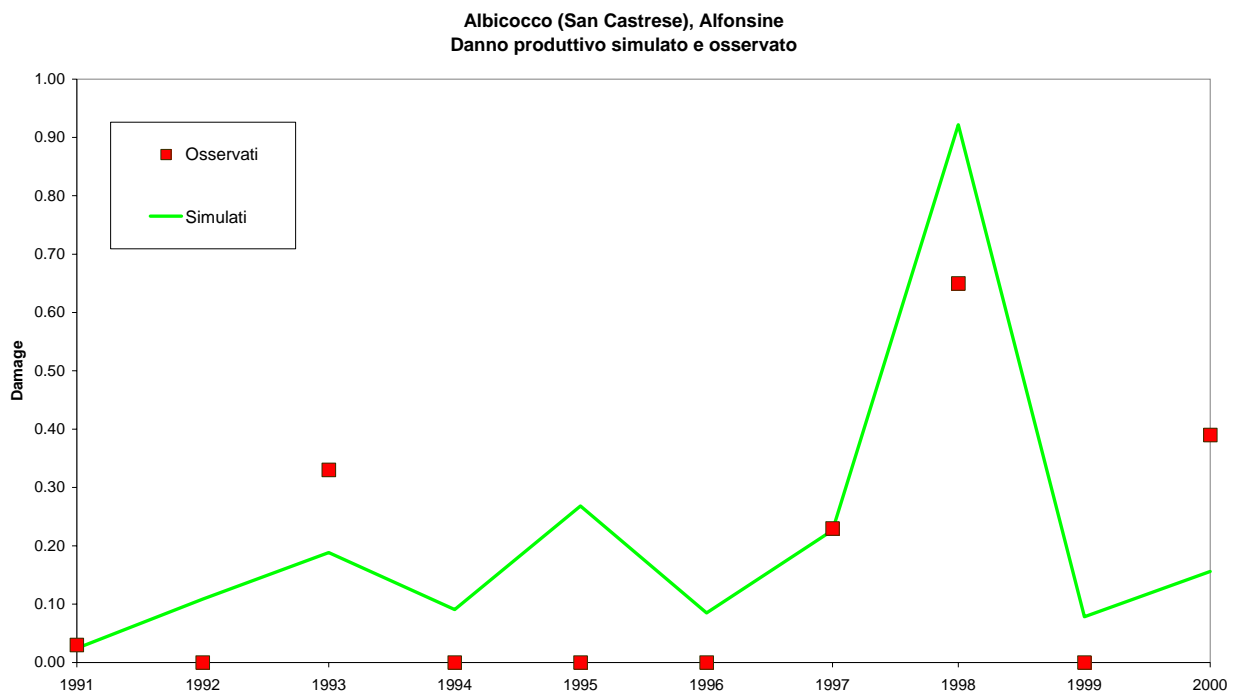


Fig. 23 – Indice di rischio da gelo calcolato con il modello “additivo pesato”, per il periodo 1991-2000, per la stazione di Alfonsine (RA), e la varietà albicocco San Castrese: confronto con valori di danno produttivo osservati a livello regionale.

Probabilità di x anni liberi da gelo ($T < -3$ nel periodo 1apr-30apr)

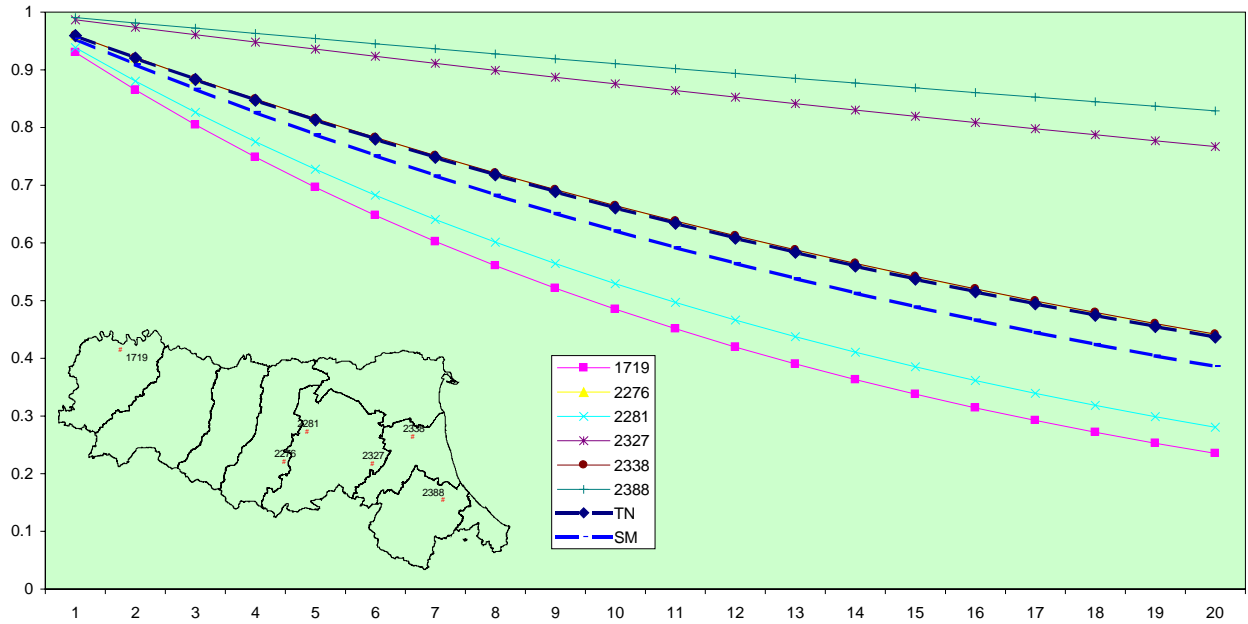


Fig. 24 – Indice di rischio climatologico da gelo in base al metodo Haan, (1979). Confronto tra 6 stazioni in Emilia-Romagna e 2 stazioni della Valle dell'Adige (TN: Trento; SM: San Michele all'Adige).

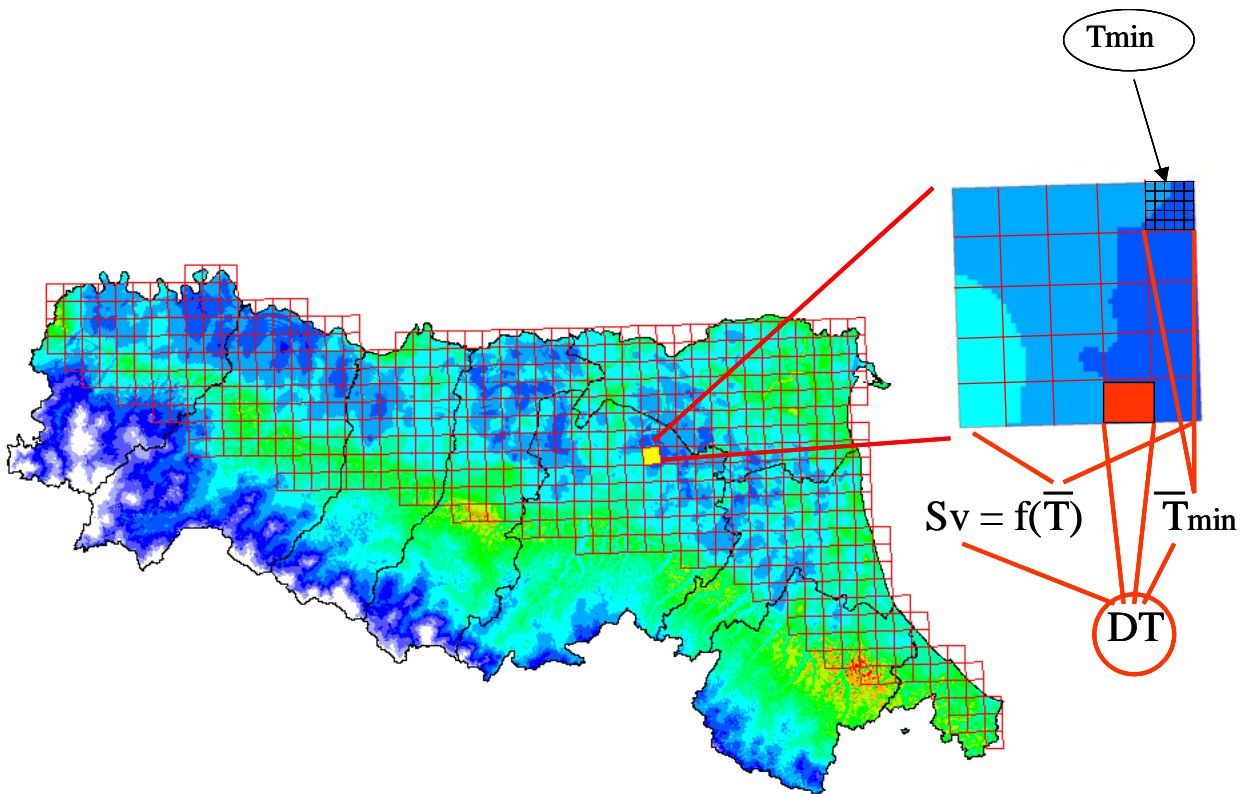


Fig. 25 – Schema metodologico per la valutazione del rischio da gelo a livello territoriale. T_{min} : temperatura minima; Sv: stadio di sviluppo; \bar{T} : temperatura media; \bar{T}_{min} : temperatura minima mediata; DT: danno produttivo.