

STATO DELL'ARTE DELLE GELATE TARDIVE

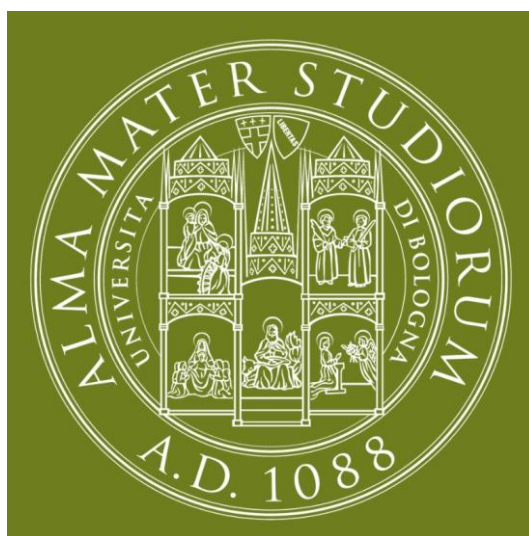
Analisi scientifica, impatti agronomici e strategie di difesa

Autori:

Dr. Lorenzo Pederzoli (Ri.Nova)

Dr. ssa Alexandra Boini (DISTAL Alma Mater Studiorum)

Prof. Luca Corelli Grapadelli (DISTAL Alma Mater Studiorum)



STATO DELL'ARTE GELATE TARDIVE

1. INTRODUZIONE	2
2. ASPETTI DINAMICI DELLE GELATE TARDIVE	3
2.1 TIPOLOGIE DI GELATE	3
2.2 DANNI ALLE COLTURE	4
2.3 AREE SUCETTIBILI	4
3. SENSIBILITÀ DELLE PIANTE DA FRUTTO AI DANNI DA GELO	6
3.1 FISICA CELLULARE DELLE GELATE	6
3.2 CAMBIAMENTI FISIOLOGICI E METABOLICI	6
3.3 VARIABILI CHE INFLUENZANO L'ENTITÀ DEL DANNO	7
4. MECCANISMI DI DIFESA DELLE PIANTE	8
5. METODI DI DIFESA DALLE GELATE TARDIVE E CARATTERISTICHE	9
5.1 METODI PASSIVI	9
5.2 METODI ATTIVI	10
5.2.1 IRRIGAZIONE ANTIBRINA	10
5.2.2 BRUCIATORI	12
5.2.3 VENTILATORI	13
6. METODI DI PREVISIONE DELLE GELATE	14
6.1 RETI DI MONITORAGGIO METEOROLOGICO	14
6.2 PREVISIONI METEOROLOGICHE E MODELLI NUMERICI	14
6.3 MODELLISTICA FENOCLIMATICA	15
6.4 TECNOLOGIE INNOVATIVE E DIGITALIZZAZIONE	16
7. CONCLUSIONI	18
8. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	19

1. INTRODUZIONE

Lo studio del clima applicato alle scienze agrarie ha sempre avuto un ruolo fondamentale nel settore agrario e nel corso della storia ha contribuito in maniera significativa alla comprensione di fenomeni applicati a tale campo. Tuttavia, soprattutto negli ultimi anni, il settore ha dovuto affrontare sfide considerevoli legate alla sostenibilità ambientale e alla competitività economica, a livello globale tra le principali problematiche emerge il rischio delle gelate tardive su alberi da frutto. Il fenomeno è considerato tra le principali cause agro-metereologiche che possano compromettere la produzione di frutta e la contrazione della frutticoltura in aree suscettibili. Negli ultimi decenni, l'anticipo delle fasi fenologiche di molte specie arboree dovuto all'aumento delle temperature primaverili (Zinoni et al., 2002) ha reso momenti critici come fioritura e allegagione più vulnerabili ai geli tardivi, con effetti spesso gravi su resa e qualità delle produzioni.

Le gelate tardive possono verificarsi per diverse ragioni territoriali e metereologiche, ma gli eventi gelivi sono comunemente suddivisi in principalmente tre categorie: gelate avvelte (inversione di masse d'aria polare), radiative (raffreddamento radiativo notturno) e miste (compartecipazione dei due fenomeni) (Zinoni et al., 2000). Contrariamente all'idea che il riscaldamento globale riduca i rischi da gelo, Zohner et al. (2020) dimostrano che le temperature più miti a fine inverno sono correlate a un anticipo della fenologia (aumentando la finestra di vulnerabilità) e l'instabilità atmosferica primaverile può portare a gelate imprevedibili anche dopo lunghi periodi miti.

In alcune regioni, come l'Emilia-Romagna, la frequenza degli eventi dannosi in recenti annate (2017, 2020, 2021, 2023) ha assistito a danni da gelata tardiva record. In questo contesto, l'attenzione si è progressivamente spostata verso l'adozione di pratiche agronomiche sostenibili, con lo scopo di prevenzione del fenomeno e volte a mitigare il danno da evento gelivo (Arpa.it; 2024). Il loro impiego, tuttavia, richiede una comprensione approfondita dei meccanismi di formazione del rischio e della fisiologia e fenologia (Valentini et al., 2001) degli alberi da frutto. Ad oggi sono state proposte alcune strategie di mitigazione di tipo attivo e passivo, ma con linee guida di uso talvolta non completamente chiare e funzionali.

La presente ricerca bibliografica mirerà ad approfondire e ad indagare su vari aspetti delle gelate tardive, partendo dalle cause fino a raggiungere i metodi di prevenzione, offrendo uno sguardo ampio sulla problematica delle gelate tardive.

2. ASPETTI DINAMICI DELLE GELATE TARDIVE

2.1 TIPOLOGIE DI GELATE

Le gelate tardive sono fenomeni meteorologici complessi, che possono manifestarsi con dinamiche diverse a seconda delle condizioni atmosferiche e/o geografiche locali. La letteratura scientifica classifica comunemente questi eventi in tre principali categorie: gelate avvelitive, gelate radiative e gelate di tipo misto (Snyder e Meloabreu, 2005).

Le gelate avvelitive si verificano quando movimenti di masse d'aria molto fredda (d'origine polare o continentale) si spostano in maniera veloce e repentina verso medie latitudini. L'arrivo improvviso di un fronte freddo, caratterizzato da una alta pressione, provoca un abbassamento drastico delle temperature che può superare anche i 10 °C in poche ore. Questa tipologia di gelata si manifesta attraverso episodi generalmente estesi su larga scala, caratterizzati da venti forti e bassa umidità relativa. Il binomio di due fattori climatici è la conseguenza dello scontro e incuneamento dei due fronti d'aria con pressione atmosferica differente. Questo tipo di gelata è particolarmente difficile da contrastare poiché la quantità di energia necessaria a riportare le temperature sopra lo zero sarebbe enorme e difficile da raggiungere. Un esempio emblematico è rappresentato dall'evento che ha coinvolto i giorni dal 4 al 9 aprile 2021 in Emilia-Romagna, quando l'irruzione di aria artica determinò un crollo termico con minime fino a -4.2 gradi in pianura, causando danni catastrofici a pereti, meleti e albicocchi (Arpae.it; 2021).

Le gelate radiative, invece, hanno uno sviluppo in condizioni di cielo sereno, calma di vento e umidità relativa elevata. Nelle notti caratterizzate da questo tipo di gelata, il suolo e la vegetazione dissipano calore per irraggiamento dell'atmosfera, che si raffredda rapidamente negli strati più prossimi del terreno. Il fenomeno gelivo è caratterizzato da uno strato di inversione termica, in cui l'aria è più fredda vicino al suolo e più calda a pochi metri di altezza. Questa tipologia di gelata è estremamente dipendente dalla orografia dell'appezzamento colpito. Infatti, la massa d'aria fredda risulta avvantaggiata da areali pianeggianti e da fondivalle dove l'aria fredda (più pesante) tende ad accumularsi e ristagnare. Rispetto alle gelate avvelitive, quelle radiative sono potenzialmente più localizzate e contrastabili, mediante sistemi di prevenzione e tecnologie per il contrasto degli eventi gelivi.

Per quanto riguarda le gelate di tipo misto, si tratta di una combinazione dei fenomeni delle due tipologie di gelate precedentemente descritte. Sostanzialmente l'ingresso di aria fredda, di origine artica o continentale, si accompagna con un forte raffreddamento radiativo notturno, che unisce così l'intensità delle gelate avvelitive alla persistenza di quelle radiative.

2.2 DANNI ALLE COLTURE

Le gelate tardive interessano prevalentemente le colture arboree durante le fasi fenologiche primaverili, in particolare la fioritura e l'allegagione, durante le quali i tessuti vegetali presentano un elevato contenuto idrico, condizione che limita la capacità di acclimatazione e i meccanismi di protezione contro le basse temperature. Di conseguenza, gli organi riproduttivi e i giovani frutti risultano estremamente vulnerabili ai danni da freddo.

Studi hanno dimostrato come anche piccoli abbassamenti di temperatura possano causare gravi danni. Secondo Proebsting e Mills (1978), i fiori di melo subiscono danni significativi già a -2 °C, mentre quelli di pesco e albicocco possono riportare necrosi anche a -1,5 °C. La durata dell'evento e l'intensità giocano un ruolo fondamentale nell'arrecare danni; possono bastare poche ore sotto i limiti di soglia dettati dalla fase fenologica per compromettere un'annata produttiva.

I danni non si limitano alla perdita diretta dei fiori e/o frutticini, ma il danno da gelo può compromettere i tessuti vascolari, soprattutto dei germogli giovani ed in casi più gravi dell'intera pianta. Oltre a un danno diretto, il danno può manifestarsi indirettamente nella stagione vegetativa successiva, innescando alternanza di produzione e inducendo significative conseguenze negative sulle rese delle annate successive.

Questi fenomeni, infine, oltre a generare un danno diretto, possono indirizzare alla scelta decisionale di espanto di varietà storiche e tipiche regionali. Attualmente, si sta verificando in Emilia-Romagna sulla varietà Abate Fetel, in cui nel recente periodo ci sono state numerose perdite per colpa delle gelate tardive.

2.3 AREE SUSCETTIBILI

In Italia le gelate tardive rappresentano una minaccia particolarmente grave nelle regioni settentrionali, caratterizzate storicamente da forti inversioni termiche primaverili. L'Emilia-Romagna è caratterizzata da una topografia pianeggiante, limitata a Sud e Ovest da catene collinari e montuose, ed aperta a Nord e ad Est. Questa morfologia la rende particolarmente suscettibile al ristagno dell'aria fredda e quindi all'incidenza di gelate tardive.

Eventi particolarmente severi si sono manifestati negli anni 2017, 2020, 2021 e 2023 con perdite economiche stimate oltre i 400 milioni di euro solo per il comparto melicolo e pericolo (ArpaE.it; 2024). Anche altre regioni italiane, come il Veneto e il Trentino-Alto Adige, sono fortemente esposte, sebbene la conformazione orografica renda la distribuzione del gelo più variabile. Nei fondivalle

trentini, ad esempio, la concentrazione dell'aria fredda può provocare danni localizzati anche quando le temperature a livello regionale non raggiungono valori critici. La vulnerabilità al fenomeno non è però uniforme; studi dell'ISMEA (2022) hanno evidenziato come i cambiamenti climatici abbiano ampliato l'area di rischio, con episodi di gelo tardivo registrati anche in regioni del Centro-Sud Italia, come Toscana, Marche, Puglia che in passato raramente erano colpite.

3. SENSIBILITÀ DELLE PIANTE DA FRUTTO AI DANNI DA GELO

3.1 DANNO FISICO CELLULARE

Il danno da gelo si manifesta a livello microscopico, coinvolgendo l'acqua contenuta all'interno delle piante e trasformandola in cristalli di ghiaccio. Quando la temperatura scende sotto lo zero, l'acqua extracellulare subisce una transizione di fase, cambiando il suo stato da liquido a solido (ghiaccio). i

Il congelamento è un processo esotermico. Pertanto, quando l'acqua passa allo stato solido, libera calore latente per solidificazione di circa 334 J/g, il quale si disperderà nell'ambiente circostante. La dispersione di calore deve essere totale affinché il ghiaccio possa scendere di temperatura, altrimenti il processo fisico rimarrà a una temperatura costante di 0°C, finché tutta l'acqua non si sarà solidificata (Brini et al. 2017).

Il processo di congelamento a livello di parete (apoplastico) genera un gradiente osmotico che richiama l'acqua dal simplasto (citoplasma), il che porta ad una disidratazione cellulare e collasso delle membrane (plasmolisi; Levitt, 1980).

Se invece il fenomeno gelivo si manifesta in maniera più intensa e rapida, i cristalli di ghiaccio possono formarsi direttamente all'interno del citoplasma, in cui però la concentrazione di soluti è maggiore, determinando quindi un punto di congelamento tendenzialmente inferiore rispetto all'apoplasto. L'esatta temperatura di congelamento della cellula è dettata quindi dal suo grado di idratazione e può avere tendenzialmente una soglia critica di -4 / -7 °C.

3.2 CAMBIAMENTI FISIOLOGICI E METABOLICI

Le basse temperature possono provocare nelle piante da frutto risposte fisiologiche e metaboliche, che possono determinare la sopravvivenza o la morte dei tessuti colpiti. Uno dei meccanismi più nocivi è il raffreddamento della membrana citoplasmatica, che ne causa una diminuzione della fluidità, con perdita di funzionalità che scatena un effetto a cascata sul metabolismo cellulare.

Laddove gli alberi abbiano già emesso le prime foglie e, durante basse temperature, la fotosintesi viene alterata: l'attività enzimatica del ciclo di Calvin diminuisce, causando accumulo di intermedi e minore sintesi di carboidrati. Il gelo può inoltre danneggiare i cloroplasti, provocando fotoinibizione, clorosi e necrosi fogliari, con conseguente riduzione della produzione di assimilati utili allo sviluppo dei frutti e al ripristino delle riserve (Quian et al., 2024).

Un altro fenomeno coinvolto è la respirazione cellulare, che durante gli eventi gelivi è fortemente alterata, diventando inefficiente e causando un accumulo di specie reattive dell'ossigeno (ROS) all'interno dei tessuti. Queste, essendo forti ossidanti, possono danneggiare le strutture di molecole azotate come lipidi, proteine e nucleotidi, amplificando i danni da gelo (Feng et al., 2025).

3.3 VARIABILI CHE INFLUENZANO L'ENTITÀ DEL DANNO.

Le gelate tardive presentano un ordine di fattori che possono influenzare la gravità dei danni. Il principale da considerare è la zona di coltivazione, che influenza nella scelta delle specie da piantare. Tale scelta richiede un'analisi approfondita non solo delle condizioni climatiche dell'area, ma anche dello stato idrico del suolo e della morfologia del terreno.

Un altro fattore di grande rilievo è la sensibilità varietale: alcune varietà di Drupaceae e Pomaceae presentano una fioritura più precoce e risultano quindi più vulnerabili ai danni da gelo. Anche la forma di allevamento e le tecniche agronomiche adottate nella gestione dell'impianto possono influenzare in modo significativo la resistenza e la produttività delle colture.

4. MECCANISMI DI DIFESA DELLE PIANTE

Nel corso dell'evoluzione gli alberi da frutto hanno sviluppato meccanismi naturali di difesa dalle gelate che aiutano a tollerare le basse temperature. Questi meccanismi sono differenziati tra le piante da frutto in funzione della specie, della fase fenologica di riferimento e dell'organo colpito.

Il fenomeno più comune è la soprafusione, ovvero il fenomeno per il quale l'acqua all'interno delle cellule rimane liquida a temperature negative. Quando si hanno eventi gelivi di moderata intensità, le cellule (soprattutto delle gemme) riescono a modificare il proprio gradiente cellulare, rilasciando acqua negli spazi extracellulari. Così facendo, le cellule internamente si ritrovano ad una concentrazione dei soluti più alta e un punto di congelamento più basso, sopravvivendo così al congelamento.

Dal punto di vista biochimico, in risposta all'abbassamento delle temperature, le piante possono accumulare zuccheri e zuccheri-alcoli. L'accumulo di queste sostanze aiuta a stabilizzare le membrane e il punto di congelamento (sono diversi in funzione della specie). Oltre ad accumulare sostanze, se stimolate, le piante sono in grado di produrre proteine antigelo, che rallentano la crescita dei cristalli di ghiaccio, proteggendo i tessuti (Thomashow, 1999).

Per quanto riguarda la morfologia, alcune piante hanno sviluppato come strategia quella di concentrare le gemme nella parte più alta della chioma, perchè meno soggette ai ristagni d'aria fredda nei primi metri dal suolo (Wagner et al., 2021). Inoltre, altre piante da frutto hanno sviluppato gemme a fiore più compatte e ricoperte da più strati di tessuti che limitano il danno da gelo. In alcune specie, come vite e kiwi, esistono anche gemme latenti (gemme di "sottocchio" nella vite) che possono produrre un nuovo germoglio, in caso di danneggiamento di quello principale. Tuttavia, la produzione che si ricava da questi germogli non è, in entrambi i casi, sufficiente, in termini qualitativi e quantitativi, a compensare il danno subito.

5. METODI DI DIFESA DALLE GELATE TARDIVE E CARATTERISTICHE

Ad oggi, numerose ed innovative tecnologie sono state proposte per mitigare i fenomeni gelivi. Alla base della scelta del metodo di difesa, è sempre consigliato un attento studio del sito, e sulla tolleranza/suscettibilità della varietà che si vuole allevare.

5.1 METODI PASSIVI

I metodi passivi non agiscono direttamente sul fenomeno, ma lo arginano, e sono i primi metodi applicati per contenere le gelate. Nel caso di zone collinari e di fondo valle, è comune creare zone di protezione in cui si sfruttano barriere vegetative o artificiali, per impedire che l'aria fredda, più densa e pesante fluisca e si convogli nei fondi valle. Questo accorgimento agronomico punta ad evitare ristagni di aria fredda nel caso di frutteti posti in zone di avvallamento.

Tra le difese passive è praticata l'imbiancatura dei tronchi. Questa tecnica prevede a filloptosi completa di imbiancare le piante con caolino, un minerale silicato di argilla di colore bianco. La caolinite viene principalmente usata per scopi disinfettanti in fitopatologia, ma nella prevenzione delle gelate tardive funge da ritardante della fioritura, poiché grazie al suo colore bianco riflette i raggi solari ritardando così l'accumulo di gradi giorno per la fioritura (Duner et al., 1990; Zermeno-González et al., 2022). Oltre all'imbiancatura delle piante vengono utilizzate tecniche di verniciatura a base di biossido di titanio (TiO_2) tra le file dei frutteti. La tecnica sfrutta in maniera analoga il principio del caolino, ma su una superficie più estesa ed evitando di "sporcare" le piante.

Negli ultimi anni, si sono aggiunte nuove strategie come l'impiego di crioprotettori. Si tratta di composti in grado di mitigare i danni cellulari indotti dal congelamento, mediante la stabilizzazione di membrane e proteine, esposte a temperature sotto 0°C (Pearce, 2001). Parallelamente, l'impiego di biostimolanti microbici si è concentrato su ceppi selezionati di batteri produttori di proteine antigelo, come alcuni isolati di *Pseudomonas syringae*, capaci di modulare il punto di congelamento intracellulare e di incrementare la tolleranza delle piante allo stress da freddo (Griffith & Yaish, 2004). Studi recenti evidenziano come la combinazione di crioprotettori chimici e sostanze a base microbiologica possa potenziare l'efficacia delle difese passive (Yuri et al. 2024; Azuara et al. 2023).

Un'ulteriore pratica è stata sperimentata recentemente da Mitteilungen Klosterneuburg (2023). Lo studio ha dimostrato che l'applicazione di reti ombreggianti sulle chiome di albicocchi può ritardare la fioritura di 8–12 giorni, offrendo una strategia per ridurre i danni da gelate primaverili tardive.

Tendenzialmente, i sistemi di difesa passivi hanno costi di realizzazione e di esercizio minori rispetto alle tecnologie di difesa attiva, al contempo hanno un'azione mitigante inferiore in termini di protezione da temperature primaverili estreme.

5.2 METODI ATTIVI

I sistemi di difesa attiva intervengono direttamente sul fenomeno gelivo, agendo sul microclima o sulla temperatura del frutteto. Tutte le strategie hanno l'obiettivo di mitigare gli effetti del gelo, mantenendo la temperatura delle piante al di sopra dello zero e fornendo energia per preservare i tessuti vegetali, prossimi al punto di congelamento.

5.2.1 IRRIGAZIONE ANTIBRINA

Durante le gelate tardive, gli impianti produttivi possono essere dotati di sistema di irrigazione antibrina. La tecnica consiste nel mantenere in prossimità di 0°C la temperatura degli organi vegetali, ricoprendoli di uno strato di ghiaccio in continua formazione, fino al termine della gelata.

Il fenomeno sfrutta la capacità dell'acqua di rilasciare energia sotto forma di calore quando congela. La protezione è assicurata dall'energia liberata al momento della sua trasformazione in ghiaccio: infatti, ogni grammo d'acqua liquida libera, approssimativamente, 1 caloria per ogni °C di abbassamento della sua temperatura fino a 0°C. Nel passaggio da liquido a ghiaccio, rilascia 80 calorie nell'ambiente circostante. Il metodo è particolarmente efficace contro le gelate per irraggiamento, mentre in condizioni di vento, o gelate miste, l'irrigazione antibrina risulta meno efficace. Questa proprietà dell'acqua è sfruttata da diversi metodi irrigui di applicazione:

- 1- IRRIGAZIONE ANTIBRINA SOPRACHIOMA: utilizzata soprattutto per gelate di tipo radiativo o misto. Vengono utilizzati aspersioni soprachioma fissi, con irrigatori a schiaffo con fori del diametro di 3,5-4,5 mm. La portata è in genere di 0,25-0,4 L/s ovvero un volume che permetta di bagnare le piante interamente. In funzione dell'impianto, possono essere messi a distanze variabili come 15x15 o 20x20. La portata dell'impianto deve essere compresa tra 5 e 6 mm/h, con una buona frantumazione delle gocce, in grado di mantenere la temperatura degli organi vegetali prossima allo zero. Utilizzando la perdita di calore per irraggiamento, pari a 3,762 MJ/ha/ora, insieme ai valori di velocità del vento e umidità dell'aria, è possibile determinare il fabbisogno energetico. Successivamente, confrontando questo fabbisogno con il calore rilasciato dal congelamento di 1 litro d'acqua, si può calcolare il numero di litri necessari e, di conseguenza, la quantità di acqua in mm/ora da applicare (Zinoni et al., 2000).

Per l'utilizzo di questo sistema è necessario impostare turni di irrigazioni brevi e intermittenti per garantire sufficiente copertura delle piante con l'acqua. L'impianto si potrà poi arrestare quando la temperatura esterna avrà raggiunto i 2°C, per evitare che il calore del sole possa far evaporare direttamente il ghiaccio, poiché questo fenomeno assorbirebbe calore dalla pianta e dall'ambiente circostante, danneggiando i tessuti.

- 2- IRRIGAZIONE ANTIBRINA SOPRACHIOMA CON MICRO-IRRIGATORI: questo sistema sfrutta il principio dell'irrigazione tradizionale soprachioma, ma utilizza micro-irrigatori con portate di 20-90 L/h e un diametro di bagnatura di 2-4,5 metri montati con delle astine 20-50 cm sopra alla vegetazione. Gli irrigatori sono in grado di concentrare il volume irriguo localizzato sulla chioma escludendo così l'interfilare e riducendo la pluviometria media a 2-3,5 mm/h. Questa soluzione ha il vantaggio di poter ridurre i volumi irrigui, fino al 30% in meno, mantenendo comunque una buona efficacia antibrina. Come modalità di azionamenti e arresti, funziona in maniera simile alla classica irrigazione soprachioma, in cui bisogna controllare che la temperatura sia ritornata su valori positivi di 2-3 °C.
- 3- IRRIGAZIONE ANTIBRINA SOTTOCHIOMA: consiste nel bagnare, tramite micro-irrigazione a spruzzo sottochioma, solo l'interfilare inerbito e non la pianta. Il principio sfrutta la capacità che l'acqua possiede di cedere calore nel passaggio a fase solida. In questo caso il manto erboso costituisce il supporto su cui ghiaccia l'acqua d'irrigazione. Pertanto, più alta è l'erba e maggiore sarà la superficie su cui si libera il calore. In funzione dell'irrigatore utilizzato, il volume di irrigazione è in media 1,5/2 mm/h, dove l'irrorazione viene eseguita ad intermittenza, in quanto è necessario far congelare l'acqua sulla vegetazione e dare tempo per liberare calore latente di solidificazione. L'irrigazione sottochioma è un metodo ampiamente utilizzato in caso di gelata di tipo radiativo. Grazie al calore ceduto dal suolo inerbito riesce ad aumentare la temperatura (soprattutto della parte più bassa del frutteto) di qualche grado.

L'irrigazione antibrina ha numerosi vantaggi, ma presenta anche diverse criticità, tra cui quella legata alla disponibilità di acqua che, in alcuni areali, può non esserci nel periodo dell'anno soggetto a rischio gelata tardiva, o non essere sufficiente per l'intero evento gelivo. Inoltre, l'apporto massiccio di acqua in un breve lasso di tempo, per diverse specie, fra cui actinidia e drupacee, può causare fenomeni di asfissia radicale. Laddove pronunciato, il fenomeno dell'asfissia può compromettere o limitare la produzione degli alberi da frutto anche in maniera drastica, con possibili morti radicali e di conseguenza perdita delle piante. Queste ripercussioni vanificherebbero le strategie di difesa per le gelate, creando comunque un danno.

Un'altra criticità, nel caso di irrigazione soprachioma, riguarda il carico di ghiaccio che i rami e le branche riescono a sopportare. L'acqua, solidificandosi, si stratifica sulla chioma: questo comporta un aumento di peso che, soprattutto nelle porzioni di ramo più fragili e meno sviluppate, può provocare rotture. Il danno deriva quindi dalla perdita dei rami a frutto e dalla formazione di ferite sulla pianta, le quali rappresentano un canale di esposizione diretta ai patogeni e agli agenti atmosferici esterni.

L'irrigazione antibrina è comunque fra i metodi più diffusi, poiché meglio integrabile: infatti, in molti casi è possibile adattare i comuni sistemi irrigui alla funzione antibrina con opportune modifiche alla sistemazione idraulica del campo.

5.2.2 BRUCIATORI

I sistemi a combustione sfruttano l'energia liberata dal combustibile durante la reazione di ossidazione. La quantità di calore prodotta è proporzionale al potere calorifico del combustibile e alla sua quantità. L'energia termica così generata si disperde nell'ambiente principalmente attraverso due processi: l'irraggiamento e la convezione, quest'ultima generalmente prevalente. Questi metodi hanno un uso flessibile poiché la loro distribuzione e il loro numero possono essere modificati durante episodi gelivi.

Tra i metodi che sfruttano la combustione, ad oggi, vengono utilizzati i bruciatori mobili e fissi. Sono macchinari a gas, che attraverso convogliatori e un sistema di ventilazione investono di aria calda i frutteti, mantenendoli al di sopra dello zero. Il macchinario sfrutta il principio di desublimazione del vapore in brina, un processo esotermico, evitando che i tessuti si congelino, grazie alla brina che si deposita su di essi.

Un ulteriore metodo consiste nell'impiego di stufe a gasolio e candele in pani di paraffina, le quali, opportunamente collocate tra le file e lungo i margini dell'appezzamento, consentono di mitigare l'intensità degli eventi gelivi intervenendo direttamente sul microclima del frutteto incrementandone la temperatura. Tale tecnica prevede la disposizione dei centri di fuoco in posizioni strategiche, al fine di favorire la circolazione e la distribuzione dell'aria riscaldata all'interno del frutteto e nelle aree maggiormente suscettibili ai danni da gelo.

I limiti dei sistemi a combustione sono principalmente in termini eco-ambientali ed economici. L'impiego di candele di paraffina e stufe a combustibile comporta costi elevati, poiché le candele (una volta utilizzate) non sono riutilizzabili e richiedono sostituzioni frequenti in caso di più notti a rischio di gelo. Inoltre, dal punto di vista ambientale, si tratta di una tecnologia basata, talvolta, su

fonti energetiche fossili e non rinnovabili, con potenziali implicazioni in termini di inquinamento atmosferico e contributo al riscaldamento globale.

Un aspetto poco studiato, ma che potrebbe avere un impatto negativo sulla efficacia di questi sistemi riguarda la produzione di etilene causata dalle fiamme. Questo ormone è infatti deputato alla senescenza dei tessuti, e sono noti gli effetti che esso può causare sulle gemme, per esempio nelle cellule in cui si conservano le marze.

5.2.3 VENTILATORI

I ventilatori antigelo sono strutture meccaniche formate da eliche con diametri variabili dai 5 ai 6 metri, inserite su delle torri metalliche tubolari la cui altezza da terra è variabile tra i 10 e 11 metri. L'asse di rotazione dell'elica è inclinato di circa 5° - 7° , che permette così di convogliare l'aria verso il basso e raggiungere la vegetazione del frutteto. Oltre ai modelli a ventilatore fisso, ad oggi esistono soluzioni commerciali che permettono di roteare di 360° il sistema di ventilazione. Al sistema di ventilazione è, inoltre, possibile integrare dei bruciatori che aiutano il sistema a impedire che l'aria fredda accumulata non precipiti sotto gli 0°C .

Il principio della ventilazione antibrina si applica in caso di gelate radiative e si basa sul rimescolamento degli strati d'aria: il ventilatore convoglia l'aria più calda e meno densa verso il basso, favorendo lo scambio termico con l'aria fredda e mitigando l'inversione termica, così da prevenire il raggiungimento di temperature critiche per le colture. Una possibile alternativa ai ventilatori può essere, in casi estremi, una pianificazione di voli a bassa quota con elicotteri, che grazie al vento generato dalle proprie pale propulsive rimescolano l'aria.

I sistemi di ventilazione per le gelate tardive presentano alcuni limiti. In primo luogo, in caso di gelata per advezione, il sistema è completamente inefficiente poiché la massa d'aria fredda è mossa tramite una corrente di vento, che impedisce quindi la stratificazione dell'aria. Un'altra problematica è il rumore generato dall'azione del motore e delle ventole che spostano l'aria, creando un forte inquinamento acustico; pertanto, in alcuni comuni è vietato il loro utilizzo per tale motivazione. Per quanto riguarda l'utilizzo degli elicotteri, le problematiche si spostano invece su alti costi di utilizzo, che comprendono numerose ore di volo e personale di intervento altamente specializzato.

6. METODI DI PREVISIONE DELLE GELATE

6.1 RETI DI MONITORAGGIO METEOROLOGICO

La previsione delle gelate tardive rappresenta uno degli strumenti fondamentali per ridurre i danni alle colture, in quanto consente agli agricoltori di attuare tempestivamente le strategie di difesa. L'accuratezza delle previsioni dipende da un insieme di fattori: qualità dei dati meteorologici, densità delle reti di monitoraggio, modelli previsionali e capacità interpretativa dell'operatore agricolo.

Le reti di monitoraggio meteorologico rappresentano la base operativa per la previsione delle gelate. I sistemi raccolgono dati in continuo su parametri fondamentali come: temperatura, umidità relativa, radiazione solare, velocità e direzione del vento. Tali variabili consentono non solo di individuare condizioni predisponenti all'evento gelivo, ma anche di costruire serie storiche utili alla definizione del rischio climatico in un determinato areale.

In Emilia-Romagna, la rete agrometeorologica gestita da ARPAE costituisce un esempio di sistema avanzato e capillare che fornisce dati aggiornati in tempo reale e mappe di previsione. Le mappe vengono integrate con osservazioni di campo e consentono di elaborare allerte mirate. La densità delle stazioni è particolarmente importante nei casi di gelate radiative (caratterizzate da forte variabilità spaziale), dove pochi chilometri di distanza possono determinare differenze significative in termini di temperatura minima raggiunta.

6.2 PREVISIONI METEOROLOGICHE E MODELLI NUMERICI

Con l'utilizzo dei dati meteorologici ad oggi vengono stimate previsioni sui fenomeni gelivi. Le previsioni meteorologiche si dividono in due categorie: a breve termine (nowcasting, fino a 48 ore) e a medio termine (3–10 giorni). L'evoluzione dei modelli numerici ad alta risoluzione ha migliorato la capacità di stimare le temperature minime notturne, soprattutto grazie all'integrazione tra dati da satellite, radar meteorologici e osservazioni al suolo.

Tra i modelli numerici specifici per le gelate, due approcci risultano predominanti:

- Modelli statistici, che correlano eventi gelivi passati con determinati pattern meteorologici, permettendo di stimare la probabilità di gelata in base a scenari climatici simili.
- Modelli fisico-matematici, che simulano il bilancio energetico della superficie del suolo e della chioma vegetale, considerando fattori come la perdita di calore per irraggiamento, la conducibilità termica del suolo e l'umidità atmosferica (Snyder & Melo-Abreu, 2005).

Questi strumenti consentono di individuare i siti a maggior rischio e di definire strategie di difesa mirate, ottimizzando le risorse disponibili e riducendo l'incertezza nella gestione del rischio climatico. Nonostante i progressi compiuti, tali modelli presentano limiti intrinseci, poiché rischiano di essere troppo empirici e poco rappresentativi della complessità reale dei fenomeni naturali. Nella realtà agro-fisica esistono infatti numerose variabili non facilmente quantificabili, come: la microvariabilità topografica, le condizioni del suolo, lo stato fisiologico delle piante o le variazioni improvvise di vento e umidità. Numerose variabili possono alterare significativamente l'effettiva manifestazione del fenomeno gelivo. In questo senso, i modelli costituiscono un utile strumento di supporto decisionale.

6.3 MODELLISTICA FENOCLIMATICA

I modelli feno-climatici rappresentano uno strumento fondamentale per la previsione dello sviluppo fenologico delle specie arboree e per la valutazione del rischio di danni da gelo in relazione alle fasi di dormienza e ripresa vegetativa. Tali modelli quantificano l'accumulo di freddo necessario al superamento della dormienza endogena, traducendo l'andamento termico in “unità di freddo” (chilling units) o “porzioni di freddo” (chill portions) a seconda dell'approccio utilizzato.

Il metodo di Weinberger (Weinberger, 1950) è tra i primi approcci per la quantificazione del fabbisogno in freddo delle specie arboree da frutto. Tale metodo si basa sul conteggio delle ore di esposizione a temperature comprese tra 0 °C e 7 °C: ogni ora in cui la temperatura rientra in questo intervallo viene considerata equivalente e contribuisce con 1 “ora di freddo” al totale accumulato durante la stagione invernale. Le ore con temperature superiori a 7 °C oppure inferiori a 0 °C vengono escluse dal computo poiché ritenute inefficaci per il superamento della dormienza delle gemme.

Tra i modelli più diffusi, vi è il modello Utah (Richardson et al., 1974), un sistema che attribuisce valori ponderati alle diverse fasce di temperatura. Temperature comprese tra circa 0 e 7 °C contribuiscono positivamente all'accumulo del freddo, mentre temperature superiori ai 15,9 °C possono determinare una perdita parziale delle unità già accumulate. Questo approccio consente di rappresentare più realisticamente l'efficacia termica del periodo invernale, ma risulta meno affidabile in contesti climatici caratterizzati da inverni miti e frequenti oscillazioni termiche. Infatti, in zone tendenzialmente miti possono verificarsi valori negativi o non coerenti di accumulo di “unità di freddo” (Luedeling et al., 2009; Fernandez et al., 2020).

Per superare tali limitazioni, è stato sviluppato il modello dinamico (Dynamic Model), proposto da Fishman et al. (1987) che interpreta l'accumulo del freddo come un processo a due stadi: nella prima fase si forma un intermedio instabile in seguito all'esposizione a temperature favorevoli, mentre nella

seconda fase tale intermedio si converte in “porzioni di freddo” stabili, non reversibili in presenza di riscaldamenti temporanei. Questo schema consente di rappresentare in modo più robusto gli effetti delle variazioni termiche diurne e stagionali, rendendo il modello particolarmente adatto per ambienti mediterranei o soggetti a frequenti fluttuazioni termiche (Luedeling et al., 2009; Fernandez et al., 2020).

L'integrazione di modelli feno-climatici con le previsioni meteorologiche e con modelli di bilancio energetico consente di stimare in modo più accurato il rischio effettivo di danno da gelo, tenendo conto non solo dell'intensità dell'evento termico, ma anche dello stato fisiologico della pianta. In tale ottica, la comprensione del grado di dormienza e del momento di ripresa vegetativa risulta cruciale.

6.4 TECNOLOGIE INNOVATIVE E DIGITALIZZAZIONE

L'innovazione tecnologica sta rivoluzionando la previsione delle gelate. L'integrazione di *big data* climatici, con immagini satellitari, e algoritmi di intelligenza artificiale, consente di generare modelli previsionali sempre più accurati. Sistemi di supporto decisionale (Decision Support Systems, DSS) sono già utilizzati in molte aziende agricole: attraverso applicazioni digitali o notifiche SMS, gli agricoltori ricevono allerte personalizzate che consentono di attivare per tempo i sistemi di difesa (Caffarra et al., 2011).

Un ruolo crescente è svolto dalle reti di sensori IoT (Internet of Things), installate direttamente nei frutteti, capaci di misurare con grande precisione la temperatura a livello della chioma e del suolo. Ciò permette di rilevare differenze microclimatiche non misurabili dalle stazioni meteorologiche standard. In prospettiva, l'interconnessione di tali sensori con sistemi di attivazione automatica delle difese (es. avvio di impianti antibrina) costituirà un passaggio fondamentale verso la cosiddetta agricoltura 4.0.

Un esempio significativo è fornito da Guillén-Navarro et al. (2021), che ha sviluppato una piattaforma IoT ad alte prestazioni per ridurre i danni da gelo nei frutteti di drupaceae. Il sistema, basato su sensori distribuiti e algoritmi di elaborazione dei dati, ha dimostrato di migliorare l'accuratezza nella rilevazione dei punti critici di accumulo di aria fredda, permettendo l'attivazione mirata dei sistemi di difesa.

Parallelamente, l'integrazione con tecniche di intelligenza artificiale e *machine learning* apre nuove prospettive. Diedrichs et al. (2018) hanno mostrato come l'utilizzo combinato di sensori IoT e algoritmi predittivi possa consentire la previsione automatica di eventi di gelo, con maggiore affidabilità rispetto ai modelli meteorologici tradizionali. Tali approcci permettono di generare allerte

precoci e personalizzate, contribuendo a una gestione più efficiente delle risorse idriche ed energetiche.

Nonostante i progressi, la previsione delle gelate presenta ancora criticità, infatti, la complessità atmosferica rende difficile stimare con assoluta precisione la temperatura minima, soprattutto in aree con forte variabilità orografica. La disponibilità e l'accessibilità dei dati possono risultare limitate in alcune regioni. Le prospettive future vedono lo sviluppo di sistemi integrati che uniranno previsioni meteorologiche, modelli fenologici, dati satellitari e sensori locali, in grado di restituire un quadro dinamico e personalizzato per ciascun areale produttivo. In tale direzione, la collaborazione tra enti di ricerca, servizi meteorologici e aziende agricole rappresenta la chiave per ridurre i rischi e aumentare la resilienza del comparto frutticolo.

7. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha analizzato la problematica delle gelate tardive, evidenziandone le caratteristiche, i danni alle colture, la sensibilità delle piante, i meccanismi di difesa naturali e i metodi di protezione disponibili. Dall'analisi, emerge chiaramente come le gelate tardive rappresentino una delle principali minacce per la frutticoltura, soprattutto in areali ad alta specializzazione come l'Emilia-Romagna, caratterizzati da sfavorevoli condizioni orografiche. La combinazione di anticipo fenologico e instabilità atmosferica primaverile, accentuata dai cambiamenti climatici, ha aumentato la frequenza e l'intensità degli eventi gelivi negli ultimi decenni, con gravi ripercussioni economiche e sociali.

La difesa delle colture non può più basarsi unicamente su strategie passive o su sistemi tradizionali: è necessario adottare un approccio integrato che includa la conoscenza fisiologica, l'innovazione tecnologica e l'impiego di strumenti previsionali avanzati.

Le difese attive come irrigazione antibrina, bruciatori e ventilatori rappresentano soluzioni efficaci ma energivore, che richiedono pianificazione e risorse, mentre i metodi passivi, seppur meno costosi, hanno un'efficacia limitata.

In questo contesto, la previsione delle gelate diventa il fulcro di una gestione moderna del rischio. Poter anticipare con precisione l'arrivo di un evento gelivo consente di ottimizzare l'uso delle risorse e ridurre drasticamente le perdite produttive. Le reti meteorologiche, i modelli previsionali e le nuove tecnologie digitali costituiscono strumenti indispensabili per supportare le decisioni degli agricoltori.

Un ulteriore elemento emerso è la necessità di una visione sistemica: affrontare il problema delle gelate tardive significa non solo difendere le produzioni, ma anche promuovere pratiche sostenibili, valorizzare la biodiversità varietale e sviluppare politiche di supporto al settore agricolo. Solo in questo modo sarà possibile coniugare resilienza produttiva, sostenibilità ambientale e competitività economica.

In conclusione, la sfida delle gelate tardive richiede un'evoluzione continua delle conoscenze scientifiche e delle tecnologie applicative. L'integrazione di previsioni meteorologiche avanzate, innovazioni digitali e pratiche agronomiche mirate, rappresenta oggi la strada più promettente per ridurre l'impatto di questi eventi e garantire un futuro solido e sostenibile alla frutticoltura italiana ed europea.

8. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Azuara, Marie & González, M.R. & Mangas, Rafael & Martín, P.. (2023). Kaolin foliar-application improves the photosynthetic performance and fruit quality of Verdejo grapevines. *BIO Web of Conferences*. 68. 10.1051/bioconf/20236801024.
- Brini E, Fennell CJ, Fernandez-Serra M, Hribar-Lee B, Lukšič M, Dill KA. How Water's Properties Are Encoded in Its Molecular Structure and Energies. *Chem Rev*. 2017 Oct 11;117(19):12385-12414. doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00259. Epub 2017 Sep 26. PMID: 28949513; PMCID: PMC5639468.
- Caffarra, Amelia & Donnelly, Alison & Chuine, Isabelle. (2011). Modelling the timing of *Betula pubescens* budburst. II. Integrating complex effects of photoperiod into process-based models. *Climate Research*. 46. 159-170. 10.3354/cr00983.
- Diedrichs, Ana & Bromberg, Facundo & Dujovne, Diego & Brun-Laguna, Keoma & Watteyne, Thomas. (2018). Prediction of Frost Events Using Machine Learning and IoT Sensing Devices. *IEEE Internet of Things Journal*. PP. 1-1. 10.1109/JIOT.2018.2867333.
- Durner, Edward & Gianfagna, Thomas. (1990). Peach Pistil Growth Inhibition and Subsequent Bloom Delay by Midwinter Bud Whitewashing. *HortScience*. 25. 10.21273/HORTSCI.25.10.1222.
- Eduardo Fernandez, Cory Whitney, Eike Luedeling, The importance of chill model selection — a multi-site analysis, *European Journal of Agronomy*, Volume 119, 2020, 126103, ISSN 1161-0301, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126103>.
- F, Zinoni & Antolini, Gabriele & Campisi, Tiziana & Marletto, Vittorio & Rossi, Federica. (2002). Characterisation of Emilia-Romagna in relation with late frost risk. *Physics and Chemistry of The Earth*. 27. 1091-1101. 10.1016/S1474-7065(02)00145-6.
- Feng, Y.; Li, Z.; Kong, X.; Khan, A.; Ullah, N.; Zhang, X. Plant Coping with Cold Stress: Molecular and Physiological Adaptive Mechanisms with Future Perspectives. *Cells* 2025, 14, 110. <https://doi.org/10.3390/cells14020110>
- Fishman, S.; Erez, A.; Couvillon, G. A. The temperature dependence of dormancy breaking in plants: Mathematical analysis of a two-step model involving a cooperative transition. *Journal of Theoretical Biology*, 1987, vol. 124, no. 4, pp. 473–483. DOI: 10.1016/S0022-5193(87)80221-7.
- Griffith, M., & Yaish, M. W. F. (2004). Antifreeze proteins in overwintering plants: A tale of two activities. *Trends in Plant Science*, 9(8), 399–405.

- Guillén-Navarro, Miguel & Martínez-España, Raquel & Ayuso, Belen & Cecilia, José. (2019). A high-performance IoT solution to reduce frost damages in stone fruits. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 33. e5299. 10.1002/cpe.5299.
- Mitteilungen Klosterneuburg. (2023). Shading nets to delay flowering on apricot trees. 73, pp. 176–187. ISSN 0007-5922.
- Levitt, J. (1980) *Responses of Plant to Environmental Stress: Water, Radiation, Salt and Other Stresses*. Academic Press, New York, 365.
- Luedeling, E., Brown, P.H. A global analysis of the comparability of winter chill models for fruit and nut trees. *Int J Biometeorol* 55, 411–421 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0352-y>
- Proebsting, E.L. & Mills, H.H. (1978). Low Temperature Resistance of Developing Flower Buds of Six Deciduous Fruit Species1. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*. 103. 192-198. 10.21273/JASHS.103.2.192.
- Qian, Budong & Jing, Qi & Bélanger, Gilles & Jégo, Guillaume & Smith, Ward & VanderZaag, Andy & Shang, Jiali & Liu, Jiangui & Grant, Brian & Crépeau, Marianne. (2024). Projected changes in risks of winter damage to fruit trees and plant hardiness zones in Canada. *Canadian Journal of Plant Science*. 105. 1-17. 10.1139/cjps-2024-0178.
- Roger S. Pearce, Plant Freezing and Damage, *Annals of Botany*, Volume 87, Issue 4, April 2001, Pages 417–424, <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1352>
- Snyder, Richard & Melo-Abreu, J.. (2005). *Frost protection: fundamentals, practice and economics*, Vol. I.
- Thomashow MF. PLANT COLD ACCLIMATION: Freezing Tolerance Genes and Regulatory Mechanisms. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*. 1999 Jun;50:571-599. doi: 10.1146/annurev.arplant.50.1.571. PMID: 15012220.
- 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.
- Wagner, J.; Gruber, K.; Ladinig, U.; Buchner, O.; Neuner, G. Winter Frosts Reduce Flower Bud Survival in High-Mountain Plants. *Plants* 2021, 10, 1507. <https://doi.org/10.3390/plants10081507>
- Weinberger, J. H. (1950). *Chilling requirements of fruits*. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, **56**, 122-128.
- Yuri, José Antonio, Miguel Palma, Álvaro Sepúlveda, Javier Sánchez-Contreras, and Mariana Moya. 2024. “Use of the Biostimulant Retard Cherry® As a Strategy to Delay

- Blooming Period in Sweet Cherry Trees”. *Advances in Horticultural Science* 37 (4):427-32. <https://doi.org/10.36253/ahsc-13659>.
- Zermeño-González, A., Gil-Marín, J.A., Ramírez-Rodríguez, H., Melendres-Alvarez, A.I. and Cadena-Zapata, M. (2022) Entire Whitening of Apple Trees to Increase Chill Units in Regions of Warm Temperatures during the Fall-Winter Seasons. *American Journal of Plant Sciences*, 13, 1100-1115. <https://doi.org/10.4236/ajps.2022.138074>
 - Zinoni, F., & Centro ricerche produzioni vegetali Cesena. (2000). *Metodi di previsione e difesa dalle gelate tardive*. Calderini Edagricole.
 - Zohner, Constantin & Mo, Lidong & Renner, Susanne & Khan, Mohammed & Saikia, Purabi & Korjus, Henn & Jaroszewicz, Bogdan & Miguel, Sergio de & Bastin, Jean-François & Liang, Jingjing & Šebeň, Vladimír. (2020). Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117. 12192-12200. 10.1073/pnas.1920816117.
 - <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/meteo/previsioni-meteo/previsioni-agrometeo/previsioni-gelate-tardive>
 - https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/meteo/report-meteo/bollettini-e-rapporti-agrometeo/rapporti-agrometeo/gelate_2021/view.
 - <https://www.ismeamercati.it/analisi-e-studio-filiere-agroalimentari>