

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Dipartimento di Agronomia
Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente -
DAFNAE**

Corso di Laurea Triennale in
SCIENZE E TECNOLOGIE VITICOLE ED
ENOLOGICHE

LA DIFESA DALLA GRANDINE IN VIGNETO

Relatore
Prof. Carmelo Maucieri
Correlatore
Dott.ssa Maria Giordano

Laureanda
Laura Pietrovecchio
Matricola n. 1202208

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

RIASSUNTO

La grandine è una delle principali cause di rilevanti danni nel settore vitivinicolo. In questa tesi si analizzano alcuni problemi causati da essa, in particolar modo alla vite e ai grappoli, portando come esempio l'area del Valdobbiadene DOCG, una terra molto evocata per il suo alto livello di qualità nella produzione di Glera, un vitigno a bacca bianca da cui deriva il famoso Prosecco Superiore DOCG di Valdobbiadene.

Ci si focalizza anche sulla correlazione tra grandine e cambiamento climatico poiché le temperature sono in aumento e questo comporta azioni significative su questo evento meteorologico.

Nell'ottica di adottare misure preventive sempre più all'avanguardia per riuscire a non essere colti di sorpresa dalla grandine, si eseguono anche gestioni riparatorie.

Nell'elaborato vengono descritte le varie tecniche di gestione pre e post grandine con lo scopo di valutare quale di esse siano più efficaci.

INDICE

- 1 INTRODUZIONE
 - 1.1 Cenni storici sulla grandine
 - 1.2 Definizione, formazione e dinamica della grandine
- 2 Processo di crescita della grandine
- 3 Caratteristiche della grandine
 - 3.1 Forme e dimensioni
 - 3.2 Caratteristiche fisiche
- 4 Frequenza della grandine
- 5 Danni della grandine in viticoltura
- 6 Distribuzione della grandine in Italia
- 7 Cambiamento climatico
 - 7.1 Influenza del cambiamento climatico sulla grandine
- 8 Difesa dalla grandine
 - 8.1 Gestione pre-grandine
 - 8.1.1 Reti antigrandine
 - 8.1.2 Cloud seeding
 - 8.1.3 Cannoni antigrandine
 - 8.1.4 Agrivoltaico
 - 8.1.5 Nanomateriali
 - 8.1.6 Assicurazioni
 - 8.2 Gestione post-grandine
 - 8.2.1 Potatura e applicazione di prodotti chimici
 - 8.3 Strategie di gestione integrata
- 9 Danni da grandine su vite nell'area del Valdobbiadene DOCG
- 10 Conclusioni

11 Sitografia e Bibliografia

12 Ringraziamenti

1. Introduzione

1.1 Cenni storici

La grandine fa parte della storia umana fin dai tempi antichi, menzionata anche nella Bibbia. Tra i documenti storici si può scoprire un primo riferimento a questo evento meteorologico, noto come la settima piaga d'Egitto a causa del suo impatto devastante sulla crescita del lino e dell'orzo. Questo fenomeno è menzionato anche nell'Apocalisse di Giovanni come uno dei flagelli divini. “*Altro aspetto dell’acqua è la grandine*”, spesso usata in maniera metaforica nella Bibbia ebraica. La grandine è per lo più un’arma di Dio nei confronti dei suoi nemici, come si vede in Giosuè 10:11, dove interviene in soccorso di Giosuè nella sua guerra contro i re amorei: “*Mentre essi fuggivano dinanzi ad Israele ed erano alla discesa di Bet-Coron, il Signore lanciò dal cielo su di essi come grosse pietre fino ad Azeka e molti morirono. Coloro che morirono per le pietre della grandine furono più di quanti ne uccidessero gli Israeliti con la spada*”. Il caso più famoso si trova nell’Esodo, dove la grandine è una delle cosiddette piaghe con cui Dio punisce l’Egitto (Esodo 9:13-35, settima piaga, ricordata anche in Salmo 78:47-48: “*devastò le loro vigne con la grandine, i loro sicomòri con la brina. Consegnò alla peste il loro bestiame, ai fulmini le loro greggi*”).¹ Nel mondo della letteratura troviamo Dante Alighieri che nella sua opera più conosciuta, La Divina Commedia, menziona la grandine nel canto VI dell’inferno come punizione per il girone dei golosi: “*(Il dolore per) la pioggia (fredda, la neve e la grandine) li fa urlare come cani; con un fianco fanno riparo (schermo) all’altro; si girano spesso quegli sciagurati dannati (profani)*”.² Dalla letteratura popolare possiamo citare Davide Lajolo cantore e scrittore milanese della tradizione contadina, che con i suoi scritti ci ha tramandato riti religiosi e usanze popolari legati al maltempo affermando che: “*la grandine, la minaccia più temuta dai contadini, può arrivare all’improvviso, trascinata da un vento flagellante, e distruggere un anno di lavoro*”.³ Un episodio particolarmente curioso che sottolinea la pericolosità di questo evento atmosferico, accadde nel XIV secolo quando una singola grandinata uccise 1000 soldati inglesi.

I decessi dovuti alla grandine sono rari e sono più probabili nelle aree in cui le persone si riuniscono all’aperto senza la protezione degli edifici. Pertanto, in passato si sono verificati molti più decessi rispetto ad oggi. Infatti, nel 1360, circa 1.000 soldati inglesi furono uccisi dalla grandine durante l'invasione della Francia in un giorno noto

come “Lunedì Nero”. Il panico causato dalla tempesta portò il re Edoardo III, convinto che fosse un segno divino, a negoziare la pace con i francesi.

Da questi eventi possiamo dunque affermare che la scienza ha fatto passi da giganti dal punto di vista sia osservativo che cautelativo, tuttavia la grandine è ancora un fenomeno molto variabile nel tempo e nello spazio che può coglierci di sorpresa.

1.2 Definizione, formazione e dinamica della grandine

La grandine è un tipo di precipitazione solida costituita da piccoli grani di ghiaccio di dimensioni superiori a 5 mm che si formano durante i temporali (American Meteorological Society, 2017). Le tempeste che producono grandi volumi di grandine o grandine di grande diametro assiale possono provocare danni significativi all’agricoltura e alle proprietà. Si può infatti arrivare alla completa distruzione dei raccolti, al danneggiamento dei veicoli e, in casi estremi, danni ai tetti, alle finestre delle case, ecc....

Sono necessari una serie di condizione affinché una tempesta produca grandine. Innanzitutto, è necessaria una particella di piccola dimensione piccola che funga da nucleo per l'ulteriore crescita. Qualsiasi particella costituita da particelle di neve fortemente bordate di diametro inferiore a 5 mm è definita graupel (American Meteorological Society, 2017). Queste particelle sono conosciute collettivamente come “embrioni” e tipicamente assumono la forma di graupel o gocce congelate (Carte e Kidder, 1966; Federer et al., 1982; Heymsfield, 1982; Knight, 1981; Knight e Knight, 1970a, 1979; List e de Quervain, 1953) (Figura 1). Queste gocce possono essere generate dalla coalescenza di gocce di pioggia a quote più basse che vengono poi sollevate nella corrente ascensionale. In alternativa, possono derivare dallo scioglimento di graupel, gocce congelate, aggregati o altre particelle di ghiaccio che scendono al di sotto del livello dello zero termico e che vengono successivamente risucchiate nella corrente ascensionale.



Figura 1: Particelle di graupel o gocce congelate

Una volta che si è formato un embrione, il secondo step necessario alla formazione dei chicchi di grandine è l'abbondanza di acqua liquida sopraffusa (sono gocce d'acqua che rimangono allo stato liquido anche a temperature al di sotto della temperatura di congelamento 0°). La crescita avviene quando l'acqua liquida sopraffusa viene raccolta dall'embrione e congela immediatamente o in un secondo momento. La raccolta di acqua liquida sopraffusa è nota come "riming" quando congela immediatamente, o "accrescimento" se rimane liquida. L'acqua liquida sopraffusa viene fornita dalla corrente ascensionale della tempesta convettiva attraverso l'attivazione dei nuclei di condensazione delle nuvole (CCN), successiva condensazione, crescita della coalescenza delle goccioline e ricircolo delle particelle di ghiaccio sciolte o che vanno a sciogliersi. Molti studi hanno suggerito che la maggior parte della crescita della grandine avviene a temperature comprese tra circa -10 e -25°C (Knight et al., 1975; Nelson, 1983; Ziegler et al., 1983), sebbene possa esistere acqua liquida sopraffusa fino alla temperatura di congelamento omogeneo ($\sim -38^{\circ}\text{C}$).

Il terzo step è la crescita del chicco di grandine. Una crescita apprezzabile è ottenibile solo se le particelle rimangono in un ambiente favorevole alla crescita per un lungo periodo di tempo. Alcuni studi suggeriscono che i chicchi di grandine di grandi dimensioni trascorrono fino a 10-15 minuti o più nelle regioni di crescita dei temporali (Nelson, 1983) (Figure 2 e 3).



Figura 2: formazione della grandine

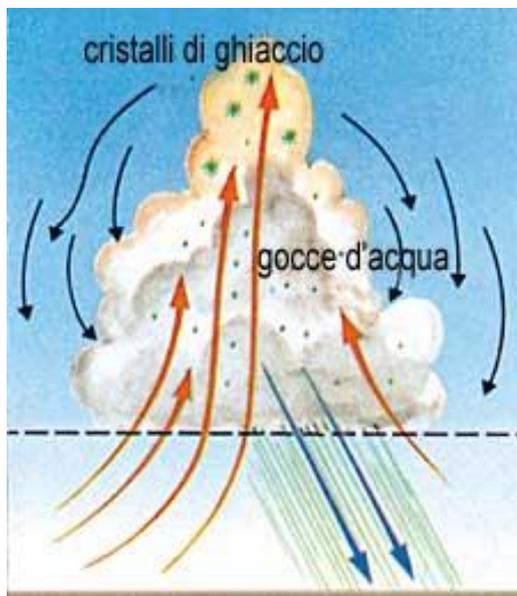


Figura 3: correnti d'aria calda ascendenti e fredda discendente durante la formazione della grandine

I chicchi di grandine si formano all'interno di una nuvola, la cui base si trova "relativamente non molto alta dal suolo (mediamente intorno ai 2000 m alle medie latitudini) che si erge per alcuni chilometri, sino ad arrivare al limite della troposfera ovvero, alle medie latitudini, intorno ai 12000 m, ma con picchi fino a 21.000 m (meno ai poli e di più all'equatore)"⁵. Questa nube, che si sviluppa principalmente in verticale, viene chiamata cumulonembo ad incudine (*Cumulonimbus incus*) (Figura 4). Nel cumulonembo si possono individuare tre zone:

- una zona inferiore, dove avviene la formazione di piccole gocce;

- una zona mediana, caratterizzata dalla presenza di gocce sopraffuse;
- una zona superiore, particolarmente ricca di cristalli di ghiaccio.



Figura 4: immagine del cumulonembo

All'interno del cumulonembo si formano delle forti correnti dovute al riscaldamento del suolo nei bassi strati che viaggiano dal basso verso l'alto, e dall'alto verso il basso, creando turbolenza. L'aria umida e calda si solleva, si raffredda rapidamente ad alta quota e provoca la condensazione del vapore acqueo in essa contenuto dando origine a piccole goccioline d'acqua. Queste minuscole particelle d'acqua, spinte dalle correnti ascensionali, raggiungono quote più alte, dove la temperatura scende anche sotto i 0° (può arrivare a -40°C). Esse aumentano il loro volume grazie all'umidità della nube, per dopo congelare a causa delle basse temperature, formando così i chicchi di grandine. Se quest'ultimi cadendo, incontrano una corrente ascensionale molto forte, possono essere riportati verso la parte intermedia del cumulonembo, dove sono più abbondanti le goccioline di acqua sopraffusa. Il cristallo cattura altre goccioline, provocandone l'immediato ghiacciamento al contatto. Quando questi chicchi diventano troppo pesanti, la corrente ascensionale non riesce più a sostenerli, facendoli cadere. In questo caso si osserverà una grandinata normale con grani di dimensioni medio-piccole. Nel caso i chicchi dovessero incontrare nuovamente l'opposizione di un'altra corrente ascensionale molto forte, il procedimento si ripete, anche per più volte, facendo aumentare di dimensione e peso i grani di grandine, rendendoli ancor più pericolosi, diventando in casi estremi con diametri che possono andare dai 6 ai 10 cm. La grandine ha una struttura a cipolla: alterna strati opachi e trasparenti. Lo strato opaco si forma per

il congelamento istantaneo delle goccioline di acqua sopraffusa nella parte fredda della nube; lo strato trasparente, invece, è dato da un ghiacciamento più lento dell'acqua durante la risalita dei chicchi dalla zona più calda. Alcune particelle mostrano fino a 25 strati di ghiaccio consecutivi e la persistenza dei chicchi di ghiaccio all'interno dei cumulonembi varia da 30 a 45 minuti. La grandine è quasi sempre preannunciata dalla presenza in lontananza di nubi a sviluppo verticale, e da un vento calmo. Tutto ad un tratto inizia a cadere della pioggia, il vento si fa più forte, si osservano tuoni e fulmini, e temperatura e pressione si abbassano rapidamente. Questi fenomeni atmosferici hanno un arco temporale breve, 5-10 minuti, rispetto a quelli di una precipitazione piovosa. Anche in termini di produzione di massa c'è una notevole differenza, la grandine difficilmente supera il 10% della produzione totale di pioggia. Il più delle volte la fascia oraria più soggetta a fenomeni di grandine è quella che va dalle 16.00 alle 19.00. Questo dipende dal fatto che al mattino ci sono valori termici più bassi che determinano un minore sbalzo termico verticale. A differenza della pioggia, la grandine colpisce una superficie molto più ristretta. Le aree colpite da temporali grandigeni vengono chiamate "corridoi", queste possono arrivare a misurare larghezze e lunghezze anche di decine di chilometri. La grandine non cade in maniera uniforme in tutto il "corridoio", infatti quest'ultimo viene diviso in sotto-aree chiamate "chiazze", dove l'intensità di caduta è minore, e interessano aree che vanno dai 5 ai 10 Km.

Il percorso o la traiettoria che un chicco di grandine segue attraverso la corrente ascensionale di un temporale determina il tempo a disposizione per crescere (Figure 6 e 7). Le traiettorie sono una funzione complicata della velocità di caduta del chicco di grandine (che cambia man mano che acquista massa), della velocità della corrente ascensionale locale e dei modelli di flusso d'aria orizzontale all'interno della tempesta che trasportano le particelle attraverso la corrente ascensionale. Inoltre, l'ampiezza (o larghezza) della corrente ascensionale è considerata responsabile nel favorire un maggiore potenziale di crescita della grandine fornendo sia una regione di iniezione dell'embrione più ampia (Nelson, 1983) sia uno spazio più grande attraverso il quale possono passare le traiettorie (Dennis e Kumjian, 2017).

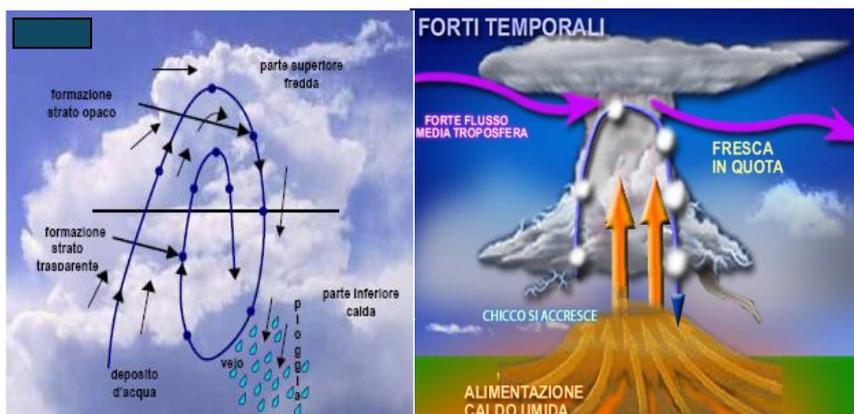


Figura 5 e 6: traiettorie della grandine

Queste traiettorie, quando proiettate su un piano orizzontale (Figura 7) tendono a tracciare un percorso ciclonico attraverso la corrente ascensionale, con un ramo principale ascendente e uno discendente. Si ritiene che percorsi più complicati, come traiettorie elicoidali o ampie escursioni verticali multiple (Browning, 1963; Morgan, 1972), non si verificano (Knight et al., 1975; Nelson, 1983; Ziegler et al., 1983; Zrnich, 1993; Dennis e Kumjian, 2017).

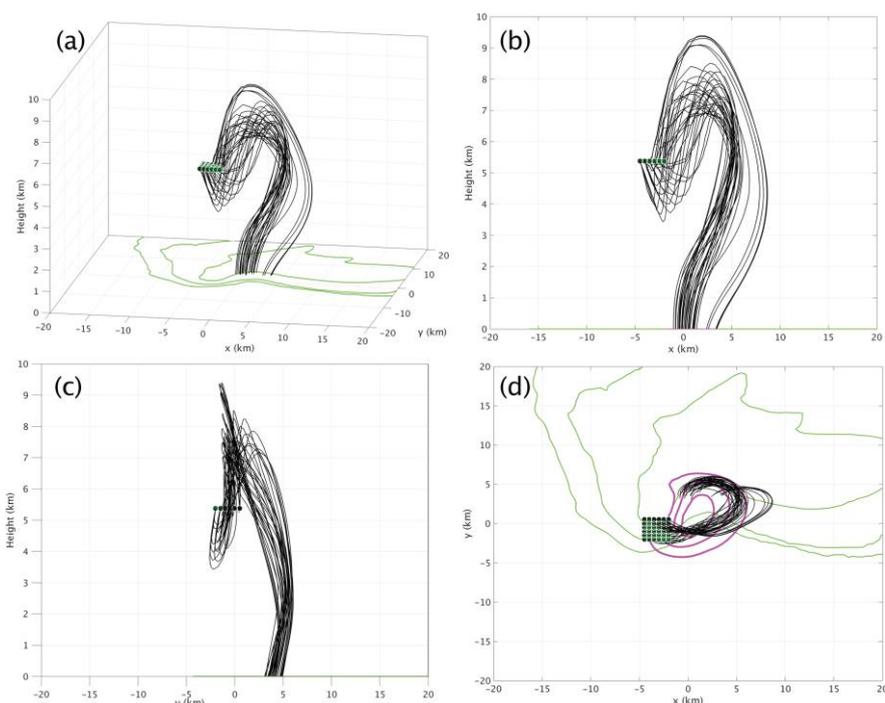


Figura 7: esempio di traiettorie di grandine, da Dennis e Kumjian (2017). (a) Vista prospettica tridimensionale delle traiettorie, (b) Traiettorie nel piano x-z. (c) Traiettorie nel piano y-z. (d) Traiettorie nel piano x-y. Le curve magenta mostrano la posizione della corrente ascensionale di medio livello (sono mostrate le curve di livello di 5, 10 e 15 m/s).

2. Processo di crescita della grandine

Quando gli step sopra descritti si uniscono in forti tempeste convettive, si possono formare grossi chicchi di grandine. In alcuni casi, i chicchi di grandine crescono anche tramite deposizione di vapore (Nelson, 1983; Rasmussen e Heymsfield, 1987a).

Tradizionalmente, i microfisici hanno delineato diversi regimi di crescita per caratterizzare i meccanismi di crescita e le proprietà fisiche dei chicchi di grandine risultanti. Questi diversi regimi di crescita sono definiti dal contenuto di acqua liquida disponibile per la crescita, dalla temperatura dell'ambiente, dalla temperatura superficiale del chicco di grandine e dalla dimensione del chicco di grandine. I due regimi principali sono chiamati "crescita secca" e "crescita bagnata" (Ludlam, 1958; Lamb e Verlinde, 2011), che descrivono rispettivamente se la superficie del chicco di grandine durante la crescita è ghiacciata o liquida. Sono stati identificati altri regimi intermedi (ad esempio, crescita spugnosa, quando il chicco di grandine in crescita contiene liquido intrappolato all'interno di strutture di ghiaccio; List, 1959; Knight, 1968; Lesins e List, 1986).

I modelli teorici sulla crescita dei chicchi di grandine utilizzano un'equazione di bilancio energetico (Lamb e Verlinde, 2011; Pruppacher e Klett, 1997). L'acqua liquida sopraffusa raccolta si congela riscaldando la superficie del chicco di grandine attraverso il rilascio dell'entalpia di fusione. Nella crescita secca, questo riscaldamento è bilanciato da tre effetti: (i) velocità di riscaldamento dovuta alla deposizione di vapore, (ii) riscaldamento dell'acqua della nube accumulata alla temperatura superficiale del chicco di grandine, e (iii) conduzione dell'energia termica in eccesso nell'aria (Pruppacher e Klett, 1997). Ciò aumenta la temperatura superficiale della grandine al di sopra di quella dell'ambiente circostante, allontanando la conduzione dell'energia termica in eccesso dal chicco (Rasmussen e Heymsfield, 1987a, 1987b). A seconda della temperatura e della concentrazione di vapore acqueo vicino alla superficie del chicco di grandine e nell'ambiente circostante, può verificarsi sublimazione o deposizione di vapore, che porta rispettivamente al raffreddamento o al riscaldamento della superficie del chicco di grandine.

In condizioni di crescita rapida, la temperatura superficiale del chicco di grandine può superare sostanzialmente la temperatura ambientale (Heymsfield, 1982, 1983). In tali casi, la sublimazione può avvenire contemporaneamente alla raccolta di acqua liquida sopraffusa, nonostante l'ambiente sia saturo rispetto al liquido (Cober e List, 1993).

Durante una crescita rapida, è possibile che la temperatura superficiale dei chicchi di grandine arrivi fino a 0 °C, anche se la temperatura ambientale è molto più bassa. Se ciò accade, il liquido accumulato può rimanere sulla superficie del chicco e si dice che il chicco sta subendo una crescita umida.

La presenza di liquido non ghiacciato sulla superficie del chicco di grandine è importante per una serie di motivi. Innanzitutto, cambia l'equazione del bilancio dell'energia termica: ora l'energia deve essere trasferita attraverso il liquido, modificando la conduttività termica. Inoltre, il liquido può evaporare dalla superficie del chicco di grandine e le gocce di acqua sopraffusa accumulate devono essere riscaldate a 0 °C. In secondo luogo, il liquido sulla superficie del chicco di grandine aumenta probabilmente l'efficienza di raccolta per piccoli cristalli di ghiaccio, fornendo un ulteriore percorso attraverso il quale il chicco di grandine può acquisire massa. In terzo luogo, il liquido può alterare le caratteristiche di resistenza del chicco di grandine, influenzandone il comportamento e la velocità di caduta. Infine, la presenza di liquido sopra o all'interno di una particella di ghiaccio influenza significativamente le sue proprietà di diffusione elettromagnetica e quindi la sua sezione trasversale di retrodiffusione, con implicazioni per il rilevamento radar e il dimensionamento della grandine.

La maggior parte dei modelli teorici e numerici per i processi di formazione, crescita e fusione dei chicchi di grandine presuppone che i chicchi di grandine siano sferici o sferoidali. Tuttavia, i chicchi di grandine naturali presentano una miriade di forme irregolari e protuberanze chiamate "lobi". Tali irregolarità possono alterare i tassi di crescita e il bilancio energetico termico, complicando il trattamento dei processi microfisici. I lobi osservati nei veri chicchi di grandine sono classificati in due categorie: lobi cuspidi e lobi ghiacciolo (Figura 8).



Figura 8: Fotografia di un chicco di grandine raccolto che mostra i lobi dei ghiaccioli prominenti. Fotografia di H. Pogorzelski.

3. Caratteristiche della grandine

3.1 Forme dimensioni

Le forme, le dimensioni, la massa e la struttura interna dei chicchi di grandine sono interconnesse attraverso i processi di crescita microfisica. Nella crescita secca, in cui l'acqua liquida sopraffusa viene congelata immediatamente sulla superficie del chicco, possono rimanere intrappolate bolle d'aria. Inoltre, il rapido congelamento può causare crepe o fratture nel ghiaccio. Queste bolle e irregolarità nella struttura del ghiaccio diffondono la luce visibile in tutte le direzioni, conferendo al ghiaccio un aspetto bianco o lattiginoso. A causa di queste bolle, angoli e fessure, il ghiaccio incorporato durante la crescita secca ha una densità apparente inferiore a quella del ghiaccio puro. Al contrario, durante la crescita umida, il liquido rimane sulla superficie del chicco e può penetrare in eventuali spazi vuoti nella struttura del ghiaccio.

La bagnatura e il successivo congelamento portano ad un aumento della densità del ghiaccio (Rasmussen e Heymsfield, 1987a). Inoltre, il lento congelamento del liquido sulla superficie consente alle bolle d'aria di fuoriuscire e al liquido di diffondersi in modo più uniforme sulla superficie della grandine, producendo un ghiaccio più limpido e con una maggiore densità apparente. I chicchi di grandine possono alternarsi tra questi regimi di crescita, portando ad anelli di ghiaccio opaco e trasparente (Figura 9). Tuttavia, questi strati alternati non indicano necessariamente molteplici escursioni su e giù nel cumulonembo come si pensa comunemente.



Figura 9: Fotografie dei chicchi di grandine raccolti che mostrano strati alternati di ghiaccio limpido e opaco. Fotografie di M. Kumjian.

I chicchi di grandine sono generalmente sferoidi oblatti con rapporti assiali medi (cioè, rapporto tra i diametri minimo e massimo) vicini a 0,8. Nel tentativo di quantificare ulteriormente la forma dei chicchi di grandine, Heymsfield et al. (2014) hanno utilizzato fotografie digitali di chicchi di grandine per determinare il rapporto tra la superficie dei chicchi di grandine e l'area di un cerchio dello stesso diametro. È stato riscontrato che la distribuzione dei rapporti di area di diverse centinaia di chicchi di grandine ha una media e una mediana rispettivamente di 0,77 e 0,78, a supporto di una forma sferoidale oblata sottostante di base (Heymsfield et al., 2014). È da notare che molti di questi studi si basavano sulla cattura dei chicchi di grandine al suolo dopo che erano caduti, ciò ha potuto influire però sulla forma in quanto lo scioglimento o l'impatto con il terreno hanno potuto arrotondare le protuberanze. Non è inoltre chiaro se la fusione differenziale possa influenzare le osservazioni della grandine al suolo verso una forma più oblata (Figura 10).



Figura 10: chicchi di grandine con differente forma.

3.2 Caratteristiche fisiche

Le proprietà materiali dei chicchi di grandine hanno ricevuto molta meno attenzione rispetto alle proprietà dimensionali di base. La grandine viene spesso definita “dura”, “morbida” o “fangosa” nel contesto degli studi storici. Anche la durezza o la forza della grandine viene spesso descritta come esplicitamente legata alla densità. Queste affermazioni sono state fatte con poche prove quantitative di supporto.

La proprietà di durezza di qualsiasi materiale è governata dalla sua resistenza, sia a trazione che a compressione, quantificata ad esempio determinando duttilità, rigidità elastica, viscoelasticità, ecc...). Per il ghiaccio, la resistenza del materiale è governata dalla temperatura alla quale si sono sviluppati i granelli di ghiaccio, dalle loro dimensioni e dalla velocità con cui viene applicata la deformazione (Kim e Kedward, 2000; Schulson e Duval, 2009; Silva, 2011; Swift, 2013). La capacità di misurare queste proprietà della grandine naturale sul campo si è rivelata difficile date le sfide logistiche legate all'utilizzo di apparecchiature di test di laboratorio standard sul campo sin dagli anni '80.

4. Frequenza della grandine

La frequenza della grandine può essere definita in diversi modi. La definizione più semplice è contare il numero di eventi di grandine all'anno in una determinata località, dove per località si intende un'area molto più piccola di un'intera serie di grandinate, ma abbastanza grande da essere colpita in modo affidabile da una tempesta di passaggio. Questo è il caso delle osservazioni di grandine, che sono tipicamente di circa $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2 \approx 0,1 \text{ m}^2$ di superficie (Palencia et al., 2009), ma anche di resoconti di testimoni oculari e richieste di danni, che si riferiscono a scale da decine a diverse centinaia di metri quadrati (Sioutas et al., 2009). Comune a tutte queste osservazioni puntuali è un periodo di campionamento temporale basso, tipicamente una o solo poche volte al giorno. Più eventi di grandine al giorno per queste piccole aree sono sufficientemente rari e, quindi, possono essere solitamente trascurati. La frequenza della grandine definita in questo modo è generalmente bassa (nella maggior parte delle aree un evento all'anno), quindi è necessaria un'elevata densità di stazioni per ottenere risultati robusti.

A causa della piccola estensione delle serie di grandine, le frequenze della grandine puntuale mostrano spesso una grande variabilità spaziale. Per questo motivo, viene spesso utilizzato il numero totale delle grandinate per un'area di riferimento più ampia in termini di conteggi per area e anno. L'area di riferimento può essere un distretto, uno stato o un intero Paese. Le stazioni di raccolta e gli osservatori sono generalmente raggruppati e gestiti in reti (ad esempio, ANELFA in Francia o la rete del Friuli-Venezia Giulia in Italia). Anche se la densità di queste reti è piuttosto elevata, le strisce di grandine più piccole con una larghezza tipica di 1–2,5 km (Changnon, 1970) potrebbero non essere rilevate. Ciò è ancora più vero per i documenti assicurativi, che sono limitati ai luoghi abitati nel caso degli immobili e ai raccolti assicurati e vulnerabili nel caso dell'agricoltura.

Per ragioni pratiche, la frequenza della grandine viene spesso quantificata in termini di giorni di grandine all'anno per una determinata regione invece di contare il numero di tutte le singole tempeste. In questa definizione, per giorno di grandine si intende un giorno in cui la grandine si è verificata in un punto qualsiasi dell'area di riferimento. A differenza del conteggio delle grandinate, il numero specificato di giorni di grandine non aumenterà linearmente con l'estensione dell'area di riferimento, purché quest'ultima sia inferiore o simile all'estensione di una serie di grandinate. Ciò rende

difficile il confronto del conteggio dei giorni di grandine per regioni di diverse dimensioni.

Anche l'attività assicurativa non considera le singole grandinate, ma il danno complessivo che si è verificato in un determinato periodo di tempo su un determinato portafoglio. Un evento dannoso è comunemente definito dall'entità di tutti i sinistri liquidati nell'area di riferimento in un arco temporale di 72 ore, ma l'arco temporale può dipendere dal settore economico e dalla prassi regionale. Ad ogni modo, ci sono solo poche prove meteorologiche per una tale definizione. Le situazioni meteorologiche favorevoli al verificarsi di grandinate sull'Europa, infatti, potrebbero persistere per diversi giorni. Ma le grandinate sono solitamente innescate da effetti (di flusso) su scala locale, che non possono essere direttamente correlati alla situazione sinottica prevalente. Il conteggio basato sugli eventi assicurativi produce evidentemente un numero di eventi annuo molto inferiore rispetto alla definizione basata sui temporali.

È quindi necessaria un'analisi impegnativa quando si combinano e sintetizzano le stime della frequenza della grandine da diverse fonti e per diverse aree. A causa delle dimensioni e forme variabili delle aree di riferimento considerate in letteratura, il conteggio dei giorni di grandine all'anno in una piccola area di riferimento come una piazzola di grandine sembra essere la misura più conveniente.

5. Danni della grandine in viticoltura

Le perdite dei raccolti agricoli sono generalmente correlate inversamente all'aumento delle dimensioni dei chicchi di grandine, con un impatto maggiore all'aumentare della densità della grandine, e dipendono direttamente dalla lunghezza e dalla larghezza del corridoio grandinigeno (Changnon, 1977; Changnon, 1999; Sánchez et al., 1996).

Un ulteriore problema è posto dall'importanza relativa della dimensione dei chicchi di grandine rispetto alle diverse aree esposte al rischio. Per l'agricoltura, un chicco di grandine di 12,5 mm o più grande potrebbe essere estremamente dannoso (Changnon, 1977; Changnon, 1999; Changnon et al., 2002; McMaster, 2001), mentre tipicamente per strutture o veicoli, sono necessari chicchi di grandine di 45 mm o più per causare grandi danni (Cox e Armstrong, 1981; Heysmsfield et al., 2014) (Figura 11)

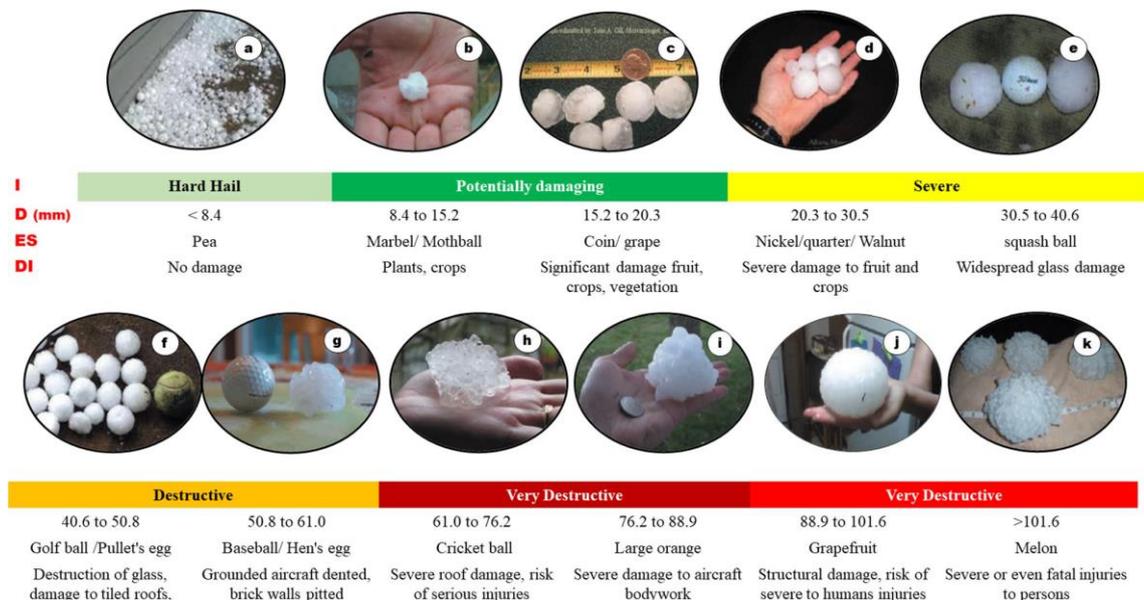


Figura 11: Intensità variabili della grandine e loro potenziale dannoso (I = intensità; D = diametro; ES = dimensione equivalente; DI: impatti dannosi); a-k: l'intensità della grandine in base alle dimensioni, ovvero da grandine forte a natura molto distruttiva e la loro somiglianza con un oggetto (NOAA 2018a; Bal e Minhas2017)

In gran parte dell'Europa, forti grandinate causano spesso ingenti danni a edifici, raccolti e automobili, con conseguenti ingenti perdite economiche. Ad esempio, due supercelle che si sono innescate il 27 e 28 luglio 2013 nelle vicinanze del sistema di bassa pressione Andreas hanno causato in Germania un danno assicurato di 2,8 miliardi di euro,

rappresentando il sinistro assicurato più costoso a livello mondiale nel 2013 (SwissRe, 2014). Un anno dopo, le grandinate legate all'evento Ela dell'8-10 giugno 2014 hanno causato in Francia, Belgio e Germania danni assicurati per 2,3 miliardi di euro. Zimmerli (2005) stima in circa 4 miliardi di euro il potenziale danno assicurato causato da una grandinata europea con un periodo di ritorno di 200–300 anni.

Nonostante i danni sostanziali associati alla grandine di grandi dimensioni, le conoscenze sulla frequenza o probabilità della grandine su scala locale in tutta Europa sono ancora limitate. Rispetto agli Stati Uniti (Changnon et al., 2009), la grandine in Europa tende ad essere meno frequente e grave, principalmente a causa di un diverso orientamento dell'orografia su larga scala (ad esempio, le Alpi) e dei relativi modelli di circolazione (Brooks et al., 2003). D'altra parte, come conseguenza dell'eterogenea percezione e gestione del rischio grandine tra i paesi europei, il tipo e la quantità di dati disponibili sulla frequenza e gravità della grandine varia ampiamente all'interno dell'Europa (Dowell e Bosart, 2003).

La resa e le caratteristiche qualitative delle colture frutticole sono influenzate dal cambiamento delle condizioni ambientali (Rana e Rana, 2003; Jhalegar et al., 2012; Sharma et al., 2018). A causa del riscaldamento globale e dell'andamento irregolare delle precipitazioni, nella stagione autunnale si registra un continuo fallimento dei raccolti di frutta (Nautiyal et al., 2020; Sharma et al., 2021a). Anche un breve periodo di grandine può causare gravi lesioni ai frutti e agli alberi, riducendone la qualità e causando successivamente malattie come fuoco batterico, cancro e marciume della frutta (Choudhary et al., 2015).

È stato riscontrato che le grandinate causano effetti negativi sulla fenologia, sulla fioritura e danni meccanici ai raccolti di frutta (Manja e Aoun, 2019; Kaushal, 2019; Changnon e Kunkel, 2003; Prabhakaran et al., 2020). Ciò porta alla produzione di frutti di scarsa qualità e all'infestazione di insetti nocivi e malattie. Il danno a fiori e frutti durante le fasi di sviluppo diminuisce il nutrimento dei frutti perché le piante dirottano la loro energia verso il processo di riparazione e guarigione (Pawar e Rana, 2019). Ciò è stato convalidato tramite la programmazione trascrizionale e la modifica del profilo proteico dopo l'esposizione all'agente patogeno per promuovere il meccanismo di difesa della pianta (Borges et al., 2013)

È stato riscontrato che le grandinate nei vigneti causano ammaccature parziali degli steli e spaccature degli acini, oltre a una riduzione delle dimensioni degli acini e di altre caratteristiche chimiche (Petoumenou et al., 2019)



Figura 12: possibili danni da grandine su vite

6. Distribuzione della grandine in Italia

In Italia, forti grandinate si verificano più o meno in tutte le regioni, secondo i dati del National Climatic Data Center (NCDC; Baldi et al., 2014), ma più frequentemente nelle zone settentrionali (Morgan, 1973; Punge et al., 2014). La pianura padana settentrionale subisce regolarmente notevoli danni economici: secondo Morgan (1973), le perdite dovute alla grandine in agricoltura erano allora le più elevate a livello mondiale. Roncali (1955) ha riscontrato perdite annuali di raccolto pari o superiori al 4% in una vasta regione a nord del fiume Po, ma anche in regioni adiacenti del Nord Italia come Veneto, Lombardia, parti del Friuli-Veneto Giulia, Piemonte ed Emilia -Romagna. Morgan (1973) trovò anche indicazioni per aree colpite da grandinate eccezionalmente grandi, lunga durata delle tempeste ed elevata densità dei chicchi. Si segnala che ogni anno si verificano chicchi di grandine con diametro superiore a 100 mm.

In nord Italia, Prodi (1974) ha riscontrato la maggiore occorrenza di grandine nel Veneto orientale e nel Piemonte occidentale, con frequenze puntuali fino a 3,5 giorni di grandine all'anno. Queste aree in cui la grandine si verifica con maggiore occorrenza sono confermate dalle recenti climatologie della grandine derivate dai radar (Davini et al., 2011; Sartori, 2012). Per la regione Veneto, Tormena (2011) riporta una media di 13,8 giorni di grandine all'anno sulla base dei dati di rimborso del Fondo Nazionale di Solidarietà (1978–2005), e di 3,9 eventi all'anno per la provincia di Verona. In confronto, Morgan (1973) ha riportato una frequenza di grandine puntuale di 2,5 giorni di grandine all'anno per la città di Verona sulla base di 19 anni di osservazioni.

I documenti storici più longevi sulla frequenza della grandine sono stati pubblicati per la città di Padova nel nord-est d'Italia, risalenti al XIV secolo (Camuffo et al., 2000). Per il periodo dal 1750 al 1900 si sono verificate circa 3-4 grandinate all'anno, valore paragonabile alla media provinciale di 3,2 stimata per i tempi moderni (Tormena, 2011). La conseguente diminuzione delle segnalazioni di grandine è molto probabilmente dovuta ad un ridotto orizzonte di segnalazione, dall'intera città e dintorni del passato fino all'odierna zona aeroportuale. I dati mostrano forti variazioni durante il XVIII e il XIX secolo, ma queste potrebbero essere dovute tanto alle diverse pratiche di segnalazione quanto ai cambiamenti nella frequenza della grandine.

In Trentino ($\approx 3000 \text{ km}^2$) Eccel et al. (2012) hanno rilevato circa 30 giorni di grandine all'anno mediante osservazioni prolungate per 35 anni, un dato anch'esso piuttosto elevato. Il Friuli-Venezia Giulia è un'altra regione soggetta alla grandine: con una rete di oltre 300 stazioni di raccolta, Giaiotti et al. (2003) hanno ottenuto 55 giorni di grandine all'anno in un'area di circa 4500 km^2 . Le frequenze puntuali più alte sono state trovate vicino a Udine, con circa 2,0 giorni di grandine all'anno, rispetto a valori intorno a 1,0 nelle altre zone (1992–2009, Manzato, 2012). Per una rete composta da 370 stazioni in Emilia-Romagna che copre un'area di circa 4000 km^2 , Nanni (2004) riporta un numero medio di 26 giorni di grandine all'anno (1983–1998) con una frequenza media puntuale di 0,7. Infine, Baldi et al. (2014), sulla base di segnalazioni di grandine, denunce e rianalisi, hanno riscontrato un'elevata frequenza di grandine in Campania e nella provincia di Potenza.

7. Cambiamento climatico

Per cambiamento climatico si intendono condizioni atmosferiche anomale, nonché eventi climatici improvvisi e imprevisti, quali inondazioni, uragani, siccità intensa e/o prolungata, temperature estreme, ecc. L'inquinamento ambientale, l'aumento dei livelli di CO₂ nell'atmosfera e l'effetto serra che ne deriva sono strettamente associati al cambiamento climatico in corso e agli eventi climatici estremi a cui stiamo assistendo in tutta la Terra.

La temperatura dell'aria è al centro della ricerca scientifica poiché è in graduale aumento. Nel quarto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC) è stato pubblicato che la temperatura dell'aria è aumentata di 0,2 C ogni decennio (IPCC, 2007). Nel rapporto IPCC del 2014 (Collins et al., 2013; Pachauri et al., 2014) si afferma che entro la fine del XXI secolo la temperatura dell'aria registrerà un aumento di 4,5 °C. L'aumento è stato attribuito all'aumento della CO₂ e di altri gas serra nell'atmosfera (Raza et al., 2019). Le cause principali dell'aumento di CO₂ nell'atmosfera sono l'eccessiva deforestazione e l'uso di combustibili fossili che hanno portato ad un aumento della concentrazione in atmosfera di questo gas da 280 agli attuali circa 420 ppm, valore che crescerà ancora nei prossimi anni (Raza et al., 2019).

L'aumento della temperatura è percepito in modo diverso dalle specie vegetali in tutto il mondo, soprattutto in termini di effetti sulla resa delle colture. Per quanto riguarda l'Europa, ad esempio, è stato stimato che le regioni nord-occidentali registreranno un aumento delle rese, seguendo le tendenze all'aumento della temperatura, mentre le regioni mediterranee andranno incontro ad una significativa riduzione (Olesen et al., 2002). In altre aree geografiche, come il Messico, si prevede che la produzione agricola diminuirà di circa il 26% nel 2080 (Hellin et al., 2014).

La siccità è tra i fattori di stress ambientale che hanno l'impatto più grave sulle colture in tutto il mondo (Kumar et al., 2017). Un terzo dei terreni coltivabili sono già definiti come aridi o semi-aridi (Vurukonda et al., 2016), e la gravità della siccità mostra tendenze in aumento (Okunlola et al., 2017) poiché nei prossimi anni è previsto un aumento di 5°C della temperatura media dell'aria (Gao et al., 2020). Secondo gli esperti, le zone aride sulla Terra aumenteranno del 30% e si prevede che le estati più secche e la

riduzione delle precipitazioni colpiranno soprattutto le regioni centro-continentali dell'Asia, l'Europa meridionale, il Nord e il Sud Africa (IPCC, 2014). La riduzione delle fonti idriche utilizzabili e la continua crescita demografica rendono necessario migliorare l'efficienza nell'uso dell'acqua nel settore agricolo al fine di garantire la sicurezza alimentare per gli anni a venire.

7.1 Influenza del cambiamento climatico sulla grandine

Esistono correlazioni positive tra indicatori climatici come la temperatura e i danni assicurati dovuti alla grandine (Dessens, 1995; Kunz et al., 2009; Raupach et al., 2021). I ricercatori hanno stimato che il danno annuale causato dalle grandinate sarà pari al 25-50% entro il 2050 (Rymbai et al., 2019). I costi dei danni per l'orticoltura in serra e l'agricoltura in pien area sono distinti, poiché sembrano essere influenzati in modo diverso dalla variabilità meteorologica (Sharma et al., 2022a). C'è molta incertezza riguardo alle conseguenze dei cambiamenti climatici di origine antropica sulla frequenza e sull'intensità degli eventi meteorologici estremi come le grandinate, nonché sulle conseguenti perdite economiche.

L'influenza del cambiamento climatico sulla grandine è legata a tre eventi principali:

1) l'aumento dell'umidità a basso livello, che comporterà una maggiore instabilità convettiva e aumenterà la forza delle correnti ascensionali.

A causa del riscaldamento antropico, si prevede che il vapore acqueo troposferico nell'atmosfera futura aumenterà. Un livello più alto di umidità combinato con temperature più elevate significa che una maggiore quantità di energia potenziale può essere rilasciata attraverso la condensazione del vapore acqueo in una particella d'aria ascendente, aumentando così l'instabilità convettiva. Si prevede che un aumento dell'instabilità convettiva porterà alla produzione di grandine di maggiori dimensioni a causa di correnti ascensionali più forti (Raupach et al., 2021),

2) un innalzamento del livello di fusione (melting level height, MLH), che comporta una maggiore fusione dei chicchi di grandine;

3) un cambiamento nella struttura delle tempeste che comporterà il cambiamento della traiettoria della grandine.

Le tendenze osservate e le proiezioni modellate, insieme forniscono indicazioni generali che la frequenza della grandine diminuirà nell'Asia orientale e negli Stati Uniti, aumenterà leggermente in Europa e aumenterà in Australia. In diverse regioni, ci sono indicazioni di uno spostamento verso un aumento della gravità delle grandinate, anche con una diminuzione della frequenza della grandine, a causa degli effetti combinati dell'aumento dell'instabilità convettiva e dell'aumento del MLH. Tuttavia, i principali processi che determinano la formazione della grandine all'interno dei cumulonembi sono ancora solo parzialmente compresi e le incertezze sono quindi ampie (Raupach et al., 2021).

Sebbene i cambiamenti alle grandinate e alle proprietà della grandine siano chiaramente osservati e previsti in alcune regioni, sono necessari studi di attribuzione dedicati per collegare in modo definitivo cambiamenti specifici al cambiamento climatico di origine antropica.

8. Difesa dalla grandine

L'uso di tecniche come reti antigrandine, cloud seeding (semina delle nuvole), cannoni antigrandine e nanocompositi per ridurre l'impatto delle tempeste di grandine è la necessità del momento (Manja e Aoun, 2019). Le reti hanno alcuni vantaggi aggiuntivi come la protezione dei frutti dai danni di uccelli, pipistrelli, insetti, vento, tempeste di sabbia e radiazione solare (Arthurs et al., 2013; Manja e Aoun, 2019; Gullo et al., 2021). Il controllo della grandine con mezzi artificiali è un nuovo approccio per evitare e mitigare i disastri (Bal e Minhas, 2017).

C'è una grande necessità di sviluppare misure pre-grandine e strategie post-grandinata per ridurre al minimo le perdite di prodotto nel settore agricolo.

8.1 Gestione pre-grandine

Le strategie applicate prima del verificarsi di un evento grandinato sono conosciute come gestione pre-grandine e includono reti antigrandine, cloud seeding, cannoni antigrandine, fotovoltaico e nanomateriali.

8.1.1 Reti antigrandine

La coltivazione protetta della frutta con l'aiuto di approcci ecocompatibili è considerata una nuova alternativa per affrontare la sfida dei diversi stress biotici e abiotici in scenari climatici in cambiamento (Bhattacharyya et al., 2017; Sivakumar e Jifon, 2018). Le reti antigrandine vengono utilizzate per proteggere le colture da condizioni ambientali sfavorevoli come grandinate, vento forte, luce solare eccessiva e insetti nocivi (Castellano et al., 2008; Manja e Aoun, 2019). Ciò potrebbe migliorare la crescita e lo sviluppo delle colture, nonché la qualità dei prodotti (Serra et al., 2020). Inoltre, questo approccio riduce la dipendenza dei coltivatori dagli agrofarmaci, favorendo un approccio ecocompatibile (Giannoulis et al., 2021).

L'applicazione delle reti antigrandine nella produzione di frutta come mele, fragole, albicocche e uva è praticata da molto tempo. In precedenza, queste reti erano trasparenti, cristalline o bianche e venivano utilizzate per proteggere gli alberi da frutto dalla grandine e dalle tempeste di vento (Briassoulis et al., 2007). Ora vengono applicate

anche reti di colore scuro per proteggere le colture frutticole dalle grandinate (Briassoulis et al., 2007; Giannoulis et al., 2021). In questo modo, tali reti, fungono anche da scudo contro le radiazioni ultraviolette (Amarante et al., 2009; Manja e Aoun, 2019).

Per mantenere le colture frutticole libere da insetti nocivi sono state utilizzate anche reti di esclusione costituite da fili trasparenti o cristallini con maglie di dimensioni comprese tra 1 e 7 mm di diametro (Briassoulis et al., 2007; Chouinard et al., 2016). Queste reti proteggono l'intero albero da frutto da *Cydia pomonella*, *Zeuzera pyrina*, miridi, acari, moscerini della frutta e uccelli (Alaphilippe et al., 2016; Chouinard et al., 2016; Rana et al., 2022).

8.1.2 Cloud seeding

Il cloud seeding è una nuova forma di modificazione meteorologica che si concentra su nuvole con acqua soprassatura e in fase mista (Behrane et al., 2021). La soppressione della grandine attraverso la tecnica del cloud seeding si basa sull'idea della microfisica delle nuvole (Huanbin e Jinfang, 2017; Bal et al., 2014). Esistono due tipi di metodi di seeding delle nuvole, vale a dire il seeding delle nuvole convenzionale e non convenzionale (Dabade et al., 2020; Andronache, 2018). Il seeding convenzionale delle nuvole è di tre tipi, vale a dire, a nube statica, dinamica e igroscopica (Dabade et al., 2020). L'inseminazione statica delle nubi è il processo mediante il quale avviene la dispersione dello ioduro d'argento nei cumulonembi (Andronache, 2018). È la strategia adottata più frequentemente, spesso nota come approccio della concorrenza vantaggiosa (Witt, 2016). L'inseminazione statica delle nuvole funziona secondo il principio che non ci sono abbastanza nuclei di ghiaccio naturali nell'ambiente e l'introduzione di ioduro d'argento nell'atmosfera aiuterà nella produzione di nuclei di ghiaccio artificiali (Witt, 2016; Dabade et al., 2020). Sia i tipi di cristalli di ghiaccio naturali che quelli artificiali competono per l'acqua soprassatura, grazie alla quale i chicchi di grandine rimangono di dimensioni più piccole e causano meno danni (Wu et al., 2018). La minuscola grandine si dovrebbe sciogliere completamente prima di raggiungere la superficie terrestre (Bal et al., 2014).

L'inseminazione delle nuvole non compete direttamente con l'energia e la dinamica della tempesta (Pokharel et al., 2021). La semina può essere effettuata con aerei specializzati o razzi antigrandine durante o prima dell'inizio del processo di formazione della grandine (Bal et al., 2014).

L'inseminazione di nuvole igroscopiche è un metodo per promuovere la pioggia, in concomitanza con l'inseminazione di nuvole calde (Wang et al., 2019). L'obiettivo principale di questo processo è quello di aumentare la pioggia promuovendo la procedura di coalescenza utilizzando nuclei di sale igroscopici prodotti da scintille pirotecniche o da uno spruzzo sottile di una soluzione salina altamente intensa (Tai et al., 2017). La semina igroscopica ha un impatto sulle precipitazioni attraverso due meccanismi distinti, vale a dire l'ingresso degli embrioni nella forma di gocce di pioggia e l'aumento delle dimensioni iniziali delle goccioline, con conseguente accelerazione del processo di coalescenza (Wang et al., 2019). Al giorno d'oggi, gli aerosol vengono utilizzati principalmente per caricare l'atmosfera unipolare e sono dieci volte più efficaci (Pokharel et al., 2021). Le molecole di aerosol migliorano il processo di collisione-coalescenza sotto la nuvola, producendo goccioline nell'intervallo 40-70 μm e aumentando l'accumulo di umidità del 58,8%.

L'approccio dinamico è un altro metodo di semina delle nuvole che può aumentare le correnti d'aria verticali, incoraggiando più acqua a passare attraverso le nuvole e convertendo le molecole in pioggia (Woodley, 1970; Andronache, 2018). Nell'approccio dinamico vengono utilizzati più di cento volte i cristalli di ghiaccio rispetto al metodo statico (Andronache, 2018). La complessità di questo processo dipende da eventi sequenziali (Malik et al., 2018; Shukla et al., 2021). Al giorno d'oggi, vengono utilizzati molti altri metodi di semina delle nuvole come semina delle nuvole basata su aerei, semina delle nuvole basata su droni, generatori di terra, tecnologia elettrica per la produzione della pioggia, semina delle nuvole basata su razzi, tecnologie laser e onde acustiche (Shukla et al. 2021).

L'inseminazione delle nuvole su un piano è un processo in cui alcuni sali igroscopici sono legati ai bordi dispersi delle ali degli aerei e si disperdono appena sotto la base delle nuvole (Bruintjes, 1999; Wang et al., 2019; Pokharel et al., 2021). Una semina di nuvole basata su droni come la seminatrice Sandoval Silver State è stata recentemente sviluppata dal Desert Research Institute (DRI 2021). I generatori terrestri sono ampiamente utilizzati per la modificazione del clima con la tenacia delle precipitazioni negli Stati Uniti, in Marocco, a Cuba e per la soppressione della grandine in Francia, Spagna e Brasile (Sioutas, 2017). La tecnologia elettrica per la produzione della pioggia attraverso gli ioni produce pioggia e non richiede nuvole per il processo

(Chodkaveekityada e Wardkein, 2019). Si tratta di una tecnologia più economica in quanto non richiede alcun aereo per la dispersione delle sostanze chimiche (Chodkaveekityada e Wardkein, 2019).

Il cloud seeding basato su razzi viene eseguito in paesi sviluppati come Cina e Stati Uniti, e diverse agenzie stanno attualmente utilizzando strategie abilitate ai razzi attraverso una rete avanzata di intelligenza artificiale (Vukelic et al., 2018). Questa tecnologia richiede strumenti avanzati come razzi su microscala, sensori climatici a griglia e tecnologie di diffusione per l'inseminazione delle nuvole (Shukla et al., 2021). Il sistema di protezione missilistica LOZA viene utilizzato per la dispersione di reagenti chimici e funziona contro nuvole pesanti (Davitashvili et al., 2021). Nell'era moderna, le tecnologie indotte dal laser vengono utilizzate anche per le piogge artificiali (Leisner et al., 2013). Questa tecnica funziona come fonte alternativa di semina di nuvole igroscopiche e cristallizzate (Shukla et al., 2021). L'uso dei laser genera nuclei di condensazione delle nuvole nell'aria sub-satura e aumenta le precipitazioni invece della grandine (Williamson et al., 2019; Zheng et al., 2020).

Le onde acustiche, note anche come cannoni acustici, sono anche un modo alternativo per rimuovere le nuvole che causano grandine (Wei et al., 2021). Il cannone disloca la fase di crescita della grandinata.

L'applicazione combinata di prodotti chimici e onde d'urto può ridurre il costo della protezione antigrandine insieme ad una riduzione dell'inquinamento dei campi agricoli e dell'ambiente (Shukla et al., 2021). Gli effetti integrati di queste tecniche possono proteggere efficacemente dai danni della grandine (Bal e Minhas, 2017). La letteratura disponibile sull'uso della semina delle nuvole nei frutteti è limitata. Tuttavia, questo approccio offre maggiori vantaggi nella coltivazione della frutta, soprattutto in situazioni come la siccità e la riduzione dei raccolti a causa dei danni causati dalla grandine, e ha un grande potenziale per regolare il clima. L'applicazione di cannoni o pistole antigrandine alla modificazione meteorologica è discussa nella sezione successiva.

8.1.3 Cannoni antigrandine

Nel corso del XX secolo sono state condotte sperimentazioni sull'uso di onde d'urto o acustiche per la dispersione della nebbia, l'arricchimento delle precipitazioni e i temporali con grandine (She et al. 2019). Le onde d'urto venivano generate con l'aiuto della polvere da sparo, che aveva un grande impatto sulla natura e richiedeva più tempo

per ricaricare. Il principio di funzionamento di un'ampolla antigrandine è quello di generare onde d'urto ad alta energia mediate verticalmente con la combustione della miscela di acetilene e aria nell'unità di combustione posta nel bacino dell'ampolla (Aramyan et al., 2011). L'operazione del cannone antigrandine può essere avviata 20 minuti prima della formazione della grandine. Se si verificasse un ritardo nel processo di avvio, l'efficienza potrebbe essere ridotta (Bal et al., 2014). Allo stesso modo, se il dispositivo viene attivato quando la grandine è proprio sopra il cannone, la sua efficienza operativa sarà molto scarsa (Amiranashvili et al., 2015).

È stato anche sostenuto l'uso combinato di dispositivi di localizzazione della grandine come il radar Doppler (Davitashvili et al., 2021). Questi strumenti sono molto efficaci ma sono ancora in fase di miglioramento.

La Georgia meridionale ha recentemente subito gravi danni a centinaia di vigneti a causa di una forte grandinata. È stato installato un sistema missilistico antigrandine per proteggere l'intera regione di Kakheti (Gagua et al. 2017). Tuttavia, per un utilizzo efficace di un moderno sistema antigrandine, è necessaria una combinazione di modelli di previsione meteorologica attraverso applicazioni ambientali in tempo reale e un sistema di visualizzazione. I dati del moderno radar meteorologico Meteor sono stati utilizzati per stimare le condizioni termodinamiche dell'atmosfera e lo sviluppo di progressioni convettive (Davitashvili et al. 2021) (Figura 13, 14).



Figure 13 e 14: Cannone antigrandine

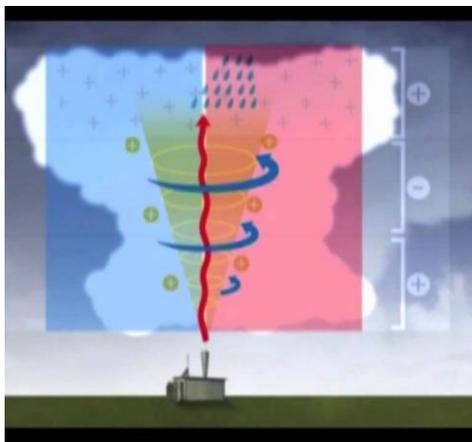


Figura 15: funzionamento cannone antigrandine nel vigneto

8.1.4 Agrivoltaico

Rendimenti più elevati e qualità dei frutti dipendono dalla capacità di proteggere il raccolto da stress abiotici come siccità, grandinate e intercettazione sfavorevole della luce e temperature elevate (Dinesh e Pearce, 2016; SDG 2016). Ciò può essere ottenuto attraverso moderne pratiche come l'agrivoltaico (SDG 2016). Gli agricoltori hanno un'ottima opzione per coltivare sotto pannelli solari, che consentono loro di gestire il microclima (Malu et al., 2017) (Figura 16).

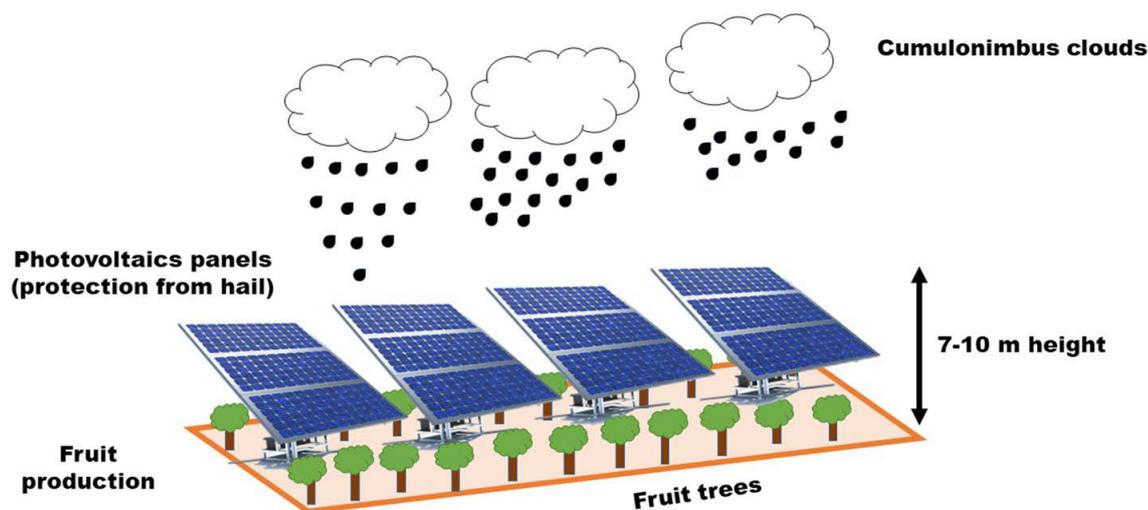


Figura 16: Impianto agrivoltaico per mitigare le grandinate nei frutteti e applicabile alle colture da frutto che amano l'ombra e richiedono meno luce.

L'agrofotovoltaico può essere un'opzione vantaggiosa per ottenere energia e proteggere le colture dalle grandinate (Malu et al., 2017; Santra et al., 2017).

I film plastici organici fotovoltaici possono essere posizionati sopra le strutture della rete antigrandine che diventano una fonte di energia per ridurre i danni da grandine (Lakomiak e Zhichkin, 2019). Inoltre, l'effetto ombreggiante dei film plastici fotovoltaici organici può anche mantenere il contenuto di umidità, migliorando così l'efficienza nell'uso dell'acqua nei frutteti (López-Luque et al., 2015), sebbene possa anche creare condizioni favorevoli per attacchi fungini. Questa tecnologia può essere adottata anche nell'ambito della gestione di precisione di un frutteto. La letteratura disponibile su questa tecnologia nei frutteti è scarsa.

8.1.5 Nanomateriali

La nanotecnologia è un campo emergente che prevede il recente sviluppo di nanocompositi a matrice polimerica (Giraud et al., 2021). Il materiale è incorporato con nanoparticelle che moltiplicano le proprietà fisico-chimiche e meccaniche della matrice polimerica (Armentano et al., 2010). Tali materiali possono essere utilizzati come componenti di un sistema antigrandine (Majka e Majka, 2012; Al-Thani et al., 2016). I sistemi antigrandine attualmente disponibili non sono facili da distruggere ma molto suscettibili alla corrosione, oltre a essere colpiti da danni meccanici (Al-Thani, 2016). Pertanto, è auspicabile l'uso di prodotti nano-ingegnerizzati al posto dei sistemi antigrandine costruiti con materiali comuni. Questi miglioramenti includono moduli elevati, forza, resistenza al calore e biodegradabilità dei polimeri (Gilman et al., 1997; Kojima et al., 1993; Yano et al., 1993; Biswas et al., 2001; Kawazoe et al., 2013; Zhang et al., 2018).

La chimica di intercalazione dei polimeri quando miscelati con silicati stratificati opportunamente modificati e silicati stratificati sintetici è nota da tempo (Majka e Majka, 2012). Recentemente sono stati utilizzati nanocompositi di silicato stratificati con polimeri (Al-Thani et al., 2016). La rapida crescita della produzione di nanomateriali sta inoltre sollevando preoccupazioni in merito ai potenziali effetti negativi sull'ambiente (Barbero e Yslas, 2017). Il vantaggio di questi materiali è la leggerezza, la velocità di fabbricazione, il basso costo di produzione e la capacità di realizzare qualsiasi forma desiderata in condizioni più blande (Majka e Majka, 2012; Arakelyan, 2019; Li et al., 2020). Un nuovo sistema antigrandine comprendente cannoni di nanocompositi polimerici genera onde ad alta energia e disturba l'atmosfera (Holleman et al., 2000; Majka e Majka, 2012). Il nanocomposito antigrandine funziona con gas acetilene, che può causare una lieve esplosione se combinato con N_2 e O_2 (Majka e Majka, 2012). Tre bombole di gas acetilene vengono pompate in un serbatoio e combinate con il motore turbo nel sistema antigrandine. Il gas si accende ogni 7 s, provocando un'onda d'urto. Tutti i componenti come connettori, cavi, tubi flessibili e lunghi tubi luminosi sono realizzati in nanocompositi polimerici (Hyonny et al., 2003; Lance et al., 2008; Ismael et al., 2007). Un cannone copre circa 1 km^2 equivalente a 80 ettari. Il cannone ha dimostrato un'efficacia assoluta in diversi paesi come Belgio, Olanda, Germania, Polonia e Ungheria (Majka e Majka, 2012; Bagotia et al., 2017; Arakelyan, 2018; Causapè et al., 2021).

8.1.6 Assicurazioni

Un particolare rischio nei frutteti è rappresentato dalla grandine che causa preoccupazioni economiche negative nel campo. Le grandinate rappresentano un tipo particolare di rischio che può avere importanti conseguenze economiche per i frutteti (Gandorfer et al., 2016; Rogna et al., 2021). La gestione del rischio grandine è fondamentale per una gestione fruttuosa dell'azienda agricola. Per gestire la grandine, i frutticoltori possono scegliere varie opzioni, ma a volte questi approcci non sono economicamente sostenibili a causa degli elevati investimenti (Rogna et al., 2021). L'assicurazione contro la grandine è una decisione a breve termine che può essere presa annualmente (Babcock, 2015). Per mitigare le conseguenze indesiderate della grandine, oggi sono disponibili contratti assicurativi aziendali (Gobbo et al., 2021).

Il rischio nella gestione dei frutteti è attribuito alla maggiore instabilità dei prezzi, alla variazione della struttura aziendale e alla produzione variabile in scenari climatici mutevoli (Kimura e Thi, 2011). Le principali cause delle perdite di rendimento dovute a grandine e gelo sono problemi di rischio pertinenti nelle zone di coltivazione della frutta fresca in tutto il mondo (Rogna et al., 2021). Nello specifico, il rischio grandine sta acquisendo importanza poiché la frequenza della grandine e le perdite associate sono oggi in aumento (Kunz et al., 2009; Menapace et al., 2013; Belasco et al., 2013; Rogna et al., 2021). L'assicurazione contro la grandine analizza fattori come il meccanismo di copertura e i costi, il rischio residuo e la flessibilità.

Nell'assicurazione contro la grandine è possibile calcolare il rendimento economico e la perdita di qualità e assegnare la somma assicurata. L'assicurazione contro la grandine è per sua natura flessibile e può essere adottata su base annuale. Ha un'importanza vitale per frutteti o vigneti con elevati rapporti debito/patrimonio (Rogna et al., 2021).

L'importo medio del premio assicurativo contro la grandine ammonta circa all'11% per ettaro. A causa dell'elevata variazione del rischio grandine, esiste un'ampia gamma di premi su base per ettaro. I premi annuali dell'assicurazione hanno una correlazione significativa con i ricavi annuali (Gobbo et al., 2021). Nell'assicurazione contro la grandine, l'aumento del rendimento sito-specifico porta a costi di copertura costanti per tonnellata di raccolto di frutta perché anche il premio assicurativo aumenta in modo lineare (Rogna et al., 2021). Gli agricoltori e il mercato assicurativo richiedono sempre un metodo affidabile e meno dispendioso in termini di manodopera per valutare i

danni alle colture causati dalla grandine (Gobbo et al., 2021). L'assimilazione del telerilevamento e della modellazione delle colture offre una prospettiva esclusiva per il mercato assicurativo delle colture con un obiettivo di autosufficienza e un metodo meno dipendente dalla manodopera per calcolare i danni da grandine (Peters et al., 2000; Zhao et al., 2012; Gobbo et al., 2021).

Le perdite di raccolto legate alle grandinate possono essere calcolate utilizzando varie immagini, raccolta di dati reali dopo l'evento e confrontando i dati delle immagini prima e dopo il danno da grandine (Peters et al., 2000; Zhao et al., 2012; Gobbo et al., 2021). L'indice di differenza di vegetazione normalizzata (NDVI) può essere utilizzato anche per calcolare il livello di danno da grandine e il terreno danneggiato dopo la grandinata con una precisione dell'86%. L'NDVI verde e l'NDVI corretto per il suolo prevedono i danni da grandine nelle fasi iniziali (De Leeuw et al., 2014).

Recentemente, Hail Track è stato utilizzato per stimare la caduta della grandine in superficie utilizzando osservazioni radar (Brook et al., 2021). Il modello funziona rilevando, tracciando e raccogliendo le traiettorie dei chicchi di grandine utilizzando recuperi radar a doppia polarizzazione e doppio doppler.

8.2 Gestione post grandinata

Alcune delle strategie di gestione post grandinata sono spiegate di seguito.

8.2.1 Potatura e applicazione di prodotti chimici

Misure preventive come la piantagione di cinture di protezione possono ridurre efficacemente l'impatto dei danni da grandine quando la grandine è solitamente associata a forti venti (Bal et al., 2014). Ciò accade a causa della deviazione del flusso d'aria in modo da ridurre il movimento delle particelle di grandine (Geogory, 2019).

Le grandinate possono variare in intensità e durata quando si verificano durante la stagione di crescita (Prein et al., 2020). Le perdite dovute alla grandine potrebbero essere molto elevate perché danneggiano il raccolto con gravità da bassa ad alta (Mupambi et al., 2018a, 2018b; Rymbai et al., 2019). Il danno può potenzialmente aumentare la suscettibilità alla decomposizione degli alberi che favorisce l'incidenza di funghi e insetti nocivi (Fearnley e Dodds, 2019). Dopo una forte grandinata, è necessario conoscere la cura delle piante danneggiate dalla grandine e impegnarsi per ripristinarle (Bal et al., 2014; Bal e Minhas, 2017; Fearnley e Dodds, 2019).

La protezione delle colture da frutto dopo i danni causati dalla grandine non è sempre possibile (Mupambi et al. 2018a, 2018b). L'approccio migliore è ripulire i detriti e tagliare gli steli e le foglie rotti (Bal e Minhas, 2017). Se la grandine si verifica in primavera, l'applicazione del fertilizzante può favorire il nuovo fogliame. I frutti danneggiati possono anche essere rimossi per evitare l'incidenza di insetti, parassiti e malattie (Bal e Minhas, 2017; Fearnley e Dodds, 2019). L'albero gravemente colpito potrebbe non essere riparato. Le lesioni minori possono essere sanate con l'applicazione di prodotti agrochimici (Sharma et al., 2015; Sharma, 2006; Rymbai et al., 2019). Le ferite sui germogli, sui rami e sulle impalcature possono essere sensibili a diversi agenti patogeni batterici e fungini. La strategia di mitigazione cruciale dopo il verificarsi di un evento di grandine consiste nell'applicare prodotti chimici per l'agricoltura come fungicidi, battericidi e insetticidi (Fearnley e Dodds, 2019). I principali raccolti di frutta come banane e papaia sono colpiti principalmente dalla grandine, che subisce perdite permanenti fino al 50%; pertanto, si consiglia di sradicare tali piante (MIDH 2021).

La suscettibilità ad agenti patogeni secondari come *Aspergillus*, *Penicillium* e *Alternaria* può aumentare i danni ai frutti dovuti alla grandine (Fearnley e Dodds, 2019). Per prevenire l'attività degli agenti patogeni secondari al loro livello di soglia, fungicidi preventivi come mancozeb (2 g/l), clorotalonil (2 g/l) e idrossido di rame (2 g/l) si sono rivelati efficaci (MIDH, 2021). Anche l'applicazione post-raccolta di fungicidi come tiabendazolo, iprodione e imazalil ha ridotto il rischio (Adaskaveg et al., 2021).

8.3 Strategie di gestione integrata

La combinazione di varie tecniche generalmente utilizzate per mitigare i danni da grandine rappresenta anche un approccio per combattere efficacemente i danni da grandine (Bal et al., 2014; Steyn, 2020). Queste strategie includono la valutazione delle perdite per le piante e la pronta rimozione dei rami gravemente spezzati, la fertilizzazione, l'irrigazione e l'applicazione di un pacciame largo 5–8 cm attorno al bacino dell'albero danneggiato (Rymbai et al., 2019).

Se tutte le tattiche non si rivelano efficaci, allora possiamo applicare i prodotti agrochimici per controllare l'incidenza di malattie e insetti nocivi (Bal et al., 2014). Gli

agenti assicurativi del raccolto dovrebbero essere contattati immediatamente dopo l'evento di grandinata per i frutteti assicurati (Steyn, 2020; Rogna et al. 2021).

9. Danni da grandine nell'area di Valdobbiadene (SANTO STEFANO DI VALDOBBIADENE)

Nell'area Valdobbiadene (Treviso) la grandine è uno dei più pericolosi eventi atmosferici che si possono presentare in vigneto e i danni che può causare sono molteplici a seconda del periodo che possono presentarsi, dove tendenzialmente sono più frequenti da metà maggio a fine agosto. Di seguito sono presentati gli aspetti più frequenti osservati durante le grandinate nella frazione di Santo Stefano (Figura 17), una zona molto evocata come il cuore produttivo del Valdobbiadene Prosecco Superiore DOCG.

1. Danni molto precoci prima della fioritura della vite.

I danni possono essere totali o parziali e se parziali, dove non vi sono presenti gravi ferite sul rachide, è ottenibile una fioritura con pochi acini sani, ma di ottima qualità.

2. Danni precoci su grappoli allegati.

L'allegagione della vite avviene attorno ai mesi di maggio-giugno ed è il processo che porta allo sviluppo dei fiori impollinati in grappoli compatti. Durante questa epoca, anche se il danno sembra grave, la pianta, nella maggior parte dei casi, può riprendersi molto bene. Infatti, se il rachide ed alcuni racimoli non sono intaccati, essi possono proseguire il normale accrescimento, anche grazie al maggior spazio che vi si crea quando gli acini colpiti dalla grandine cadono. Anzi, molto frequentemente, i grappoli superstiti alla grandine, migliorano la resa e la qualità.

3. Danni estivi prima dell'invaiaitura.

L'invaiaitura è l'attività della vite che può durare dalle 3 alle 6 settimane, ricoprendo quel periodo che va dalle ultime settimane di luglio fino ai primi di settembre.

Quindi prima dell'invaiaitura, se la grandinata è violenta, i danni sui grappoli in genere sono molto gravi in quantità e qualità, compromettendo la vendemmia.

Le ferite faticano a cicatrizzarsi e gli acini, in parte o totalmente colpiti, di solito non si staccano ma vanno incontro a un rapido disseccamento o a fenomeni di marcescenza.

4. Danni dall'invaiaitura alla vendemmia

Come accennato prima, l'invaiatura può durare qualche settimana, “ma l'evento che sancisce in maniera più adeguata ed efficace l'inizio di essa, è il progressivo rammollimento o intenerimento dell'acino che deriva principalmente da una sorta di smantellamento della struttura della parete cellulare del mesocarpo” (Palliotti et al., 2018). I temporali grandigeni prossimi alla vendemmia possono essere un vero e proprio pericolo e possono compromettere il lavoro di un anno (Figura 18). Durante questo periodo, la dannosità collegata alla violenza della grandine, è talvolta inferiore al previsto, perché l'abbondante massa fogliare presente in questa fase fenologica, può contribuire a proteggere gli acini già maturi, ricchi di acqua e con un alto contenuto zuccherino. Questa caratteristica si rispecchia molto bene sulla forma di allevamento a Guyot (Figura 19) in quanto la pergola gode di numerosi strati fogliari in grado di mitigare la violenza dei chicchi di grandine che scendono, ad eccezione naturalmente delle zone con poca vigoria. Ma per il sistema di allevamento Sylvoz e Doppio Capovolto (Figure 20 e 21), molto comune dell'area del Conegliano-Valdobbiadene DOCG, la situazione è molto diversa. In questi due sistemi di allevamento, dove il fogliame è meno presente, dopo una violenta grandinata occorre effettuare una vendemmia precoce perché vi si possono presentare acini con gravi lesioni e quindi tendenti al marciume. Questo, di conseguenza, può dare al vino, anche dopo un'adeguata e soffice pressatura, problemi di acidità volatile e quindi una qualità molto scarsa del prodotto a livello aromatico, un pH alterato e instabilità proteica.



Figura 17: Santo Stefano di Valdobbiadene all'alba.



Figura 18: Danni da grandine a luglio del 2023 nella zona del Cartizze a Santo Stefano di Valdobbiadene

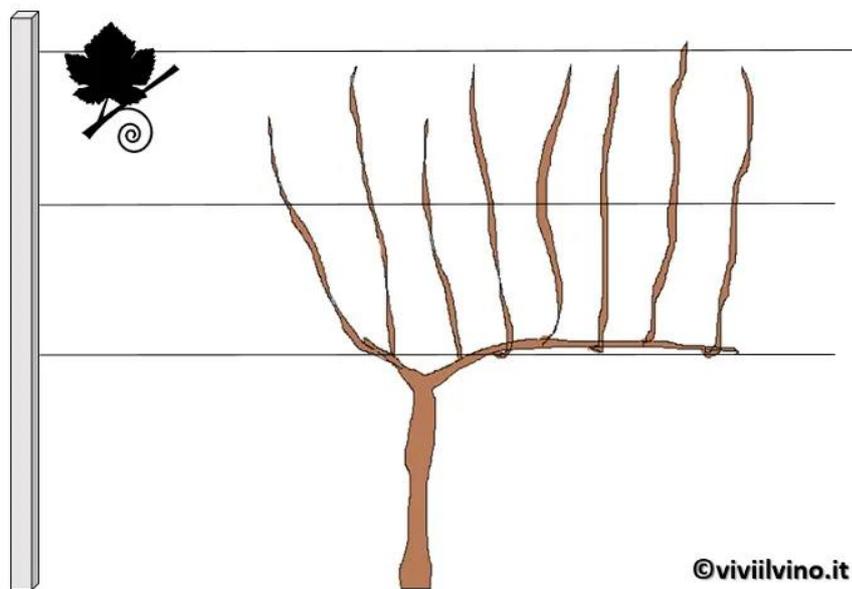


Figura 19: schema rappresentativo di viti allevate a Guyot.

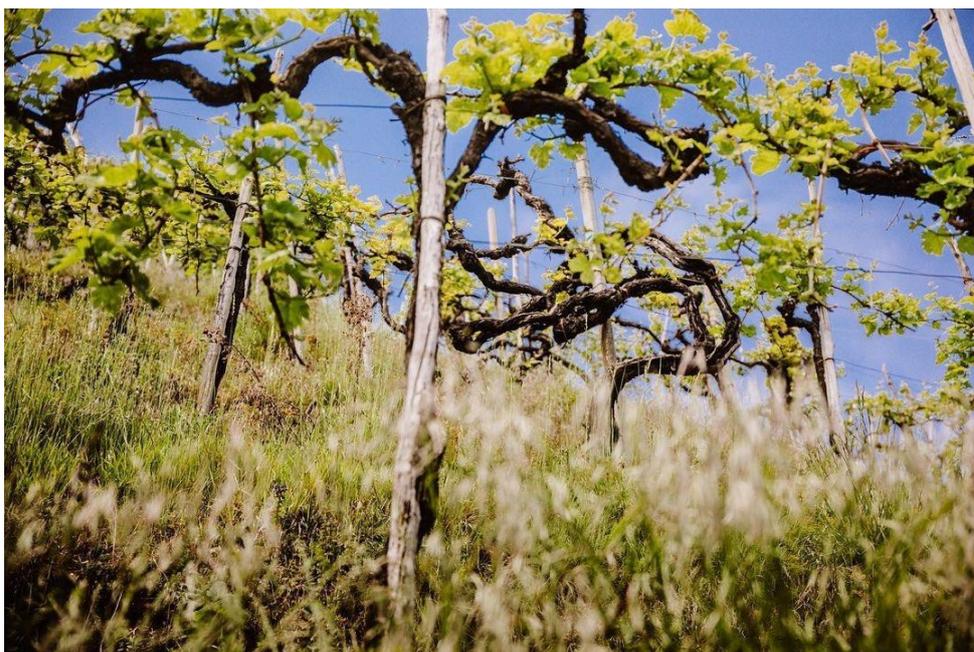


Figura 20: Vite coltivata con sistema di allevamento Doppio Capovolto nella zona di Santo Stefano di Valdobbiadene (TV).



Figura 21: Titolare dell'Azienda Vitivinicola Pietrovecchio Bruno mentre esegue la potatura invernale con sistema di allevamento Doppio Capovolto.

10. Conclusioni

Il cambiamento climatico rappresenta oggi una delle principali sfide ambientali per il mondo, con minacce significative agli ecosistemi, alla sicurezza alimentare e alla stabilità economica. I futuri sistemi agricoli e alimentari dovranno essere meglio adattati a una serie di stress biotici e abiotici per far fronte alle conseguenze dirette e indirette del clima in progressivo cambiamento. Da quanto riportato in questa tesi si può concludere che la grandine è un evento meteorologico che ha un impatto molto negativo sul settore agricolo. Gli effetti negativi causati dalle grandinate hanno impatti maggiori nelle fasi di fioritura, allegagione e maturazione dei frutti.

Sebbene le misure preventive di difesa dalla grandine come le reti antigrandine, il cloud seeding e i nanocompositi siano più efficaci di quelli post-grandinata, è urgente sviluppare strategie post-grandinata per ridurre al minimo le perdite di prodotto. Inoltre, sono auspicabili i sistemi di assicurazione del raccolto più vicine alle esigenze degli agricoltori.

11. SITOGRAFIA

1. Martone, C. (2018). Dall'inizio alla fine del mondo. Percorsi dell'acqua nella Bibbia ebraica. *Status Quaestionis*, 14, 47-60.
2. Alighieri, D. (2007). *La divina commedia*. Canto VI
3. Lajolo, L. (2011). *Conversare con gli antenati, tra oralità e letteratura*.
4. <https://www.focus.it/scienza/scienze/come-si-forma-grandine-perche>
5. <https://www.theweatherprediction.com/habyhints2/536/>

BIBLIOGRAFIA

- Alaphilippe A, Capowiez Y, Severac G, Simon S, Saudreau M, Caruso S, Vergnani S (2016) Codling moth exclusion netting: an overview of French and Italian experiences. *IOBC-WPRS Bull* 112:31–35
- Al-Thani NJ, Bhadra J, Zadeh KM (2016) Polyolefin composites and nanocomposites. In: Al-Ali M, Krupa I (eds) *Polyolefin compounds and materials*. Springer Series on Polymer and Composite Materials, Springer, Cham, pp 157–179
- Amarante CV, Steffens CA, Miqueloto A, Zanardi OZ, Santos HP (2009) Light supply to Fuji apple trees covered with hail protection nets and its effects on photosynthesis, yield and fruit quality. *Rev Bras De Frut* 31:664–670. [https:// doi. org/ 10. 1590/ S0100-29452 00900 03000 07](https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000300007)
- American Meteorological Society (2017). Hail. Glossary of meteorology. Available online at: <http://glossary.ametsoc.org/wiki/hail>
- Amiranashvili A, Chikhladze V, Dzodzuashvili UV, Ghlonti NY, Sauri IP (2015) Reconstruction of anti-hail system in Kakheti (Georgia). *J Georg Geophy Soc* 18:92–106
- Aramyan AR, Aramyan GR, Haroyan KP, Galechyan GA, Vardanyan AA, Danielyan GA, Nersisyan HB, Bilen S (2011) A study of acoustic waves generated by the shock wave of an anti-hail gun. *Acoust Phys* 57:432–440. [https:// doi. org/ 10. 1134/ S1063 77101 10300 31](https://doi.org/10.1134/S1063771011030031)
- Armentano I, Dottori M, Fortunati E, Mattioli S, Kenny JM (2010) Biodegradable polymer matrix nanocomposites for tissue engineering: a review. *Poly Degrad Stability* 95:2126–2146. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. polym degra dstab. 2010. 06. 007](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.06.007)
- Arthurs S, Stamps R, Giglia F (2013) Environmental Modification inside photosensitive shadehouses. *HortSci* 48:975–979. [https:// doi. org/ 10. 21273/ horts ci. 48.8. 975](https://doi.org/10.21273/horts.48.8.975)
- Babcock BA (2015) Using cumulative prospect theory to explain anomalous crop insurance coverage choice. *Am J Agric Econ* 97:1371–1384
- Bagotia N, Mohite H, Tanaliy N, Sharma DK (2017) A comparative study of electrical, EMI shielding and thermal properties of graphene and multiwalled carbon nanotubes filled polystyrene nanocomposites. *Polym Compos* 39:1041–1051. [https:// doi. org/ 10. 1002/ pc. 24465](https://doi.org/10.1002/pc.24465)

- Bal SK, Minhas PS (2017) Atmospheric stressors: challenges and coping strategies. In: Minhas P, Rane J, Pasala R (eds) *Abiotic stress management for resilient agriculture*, 1st edn. Springer, Singapore, pp 9–50
- Bal SK, Saha S, Fand BB, Singh NP, Rane J, Minhas PS (2014) Hailstorms: causes, damage and post-hail management in agriculture. *Tech Bull* 1–44
- Baldi, M., Ciardini, V., Dalu, J.D., Filippis, T.D., Maracchi, G., Dalu, G., 2014. Hail occurrence in Italy: towards a national database and climatology. *Atmos. Res.* 138, 268–277.
- Barbero CA, Yslas EI (2017) Ecotoxicity effects of nanomaterials on aquatic organisms: nanotoxicology of materials on aquatic organisms. In: Joo SH (ed) *Applying nanotechnology for environmental sustainability*. IGI Global, USA, pp 330–351
- Belasco E, Galinato S, Marsh T, Miles C, Wallace R (2013) High tunnels are my crop insurance: an assessment of risk management tools for small-scale specialty crop producers. *Agric Resour EconRev* 42:403–418
- Bhattacharyya M (2017) The push-pull strategy: a new approach to the eco-friendly method of pest management in agriculture. *J Entomol and Zool Stud* 5:604–607
- Biswas M, Sinha Ray S (2001) Recent progress in synthesis and evaluation of polymer–montmorillonite nanocomposites. *Adv Polym Sci* 155:167–221
- Borges LL, Santana FA, Castro IL, Arruda KMA, Ramos HJD, Moreira MA, De Arros EG (2013) Differentially expressed proteins during an incompatible interaction between common bean and the fungus *Pseudocercospora griseola*. *Mol Breed* 32:933–942. <https://doi.org/10.1007/s11032-013-9922-0>
- Briassoulis D, Mistriotis A, Eleftherakis D (2007) Mechanical behaviour and properties of agricultural nets—Part I: testing methods for agricultural nets. *Polym Testing* 26:822–832. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.05.007>
- Brook JP, Protat A, Soderholm J, Carlin JT, McGowan H, Warren RA (2021) HailTrack—improving radar-based hailfall estimates by modeling hail trajectories. *J App Met Climato* 60:237–254
- Brooks, H.E., Lee, J.W., Craven, J.P., 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmos. Res.* 67-68, 73–94.
- Browning, K. (1963). The growth of large hail within a steady updraught. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(382), 490–506. <https://doi.org/10.1002/qj.49708938206>
- Bruintjes RT (1999) A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. *Bull Am Meteorol Soc* 80:805–820
- Camuffo, D., Cocheo, C., Enzi, S., 2000. Seasonality of instability phenomena (hailstorms and thunderstorms) in Padova, northern Italy, from archive and instrumental sources since AD 1300. *The Holocene* 10 (5), 635–642.
- Carte, A., & Kidder, R. (1966). Transvaal hailstones. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 92(393), 382–391. <https://doi.org/10.1002/qj.49709239307>

- Castellano S, Mugnozza GS, Russo G, Briassoulis D, Mistrotis A et al (2008) Design and use criteria of netting systems for agricultural production in Italy. *J Agric Eng* 39:31–42
- Causapé J, Orellana-Macías JM, Valero-Garcés B, Vázquez I (2021) Influence of hail suppression systems over silver content in the environment in Aragón (Spain). *Sci Tot Environ* 20:779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146403>
- Changnon, D., Changnon, S. A., & Changnon, S. S. (2002). A method for estimating crop losses from hail in uninsured periods and regions. *Journal of Applied Meteorology*, 40(1), 84–91.
- Changnon, S. A. (1977). The scales of hail. *Journal of Applied Meteorology*, 16(6), 626–648. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0626:TSOH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0626:TSOH>2.0.CO;2)
- Changnon, S. A. (1999). Data and approaches for determining hail risk in the contiguous United States. *Journal of Applied Meteorology*, 38(12), 1730–1739. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1730:DAAFDH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1730:DAAFDH>2.0.CO;2)
- Changnon, S.A., 1970. Hailstreaks. *J. Atmos. Sci.* 27, 109–125.
- Chodkaveekityada P, Wardkein P (2019) Design and development of a high-and-low-altitude air observation system for rainmaking process in Thailand. *Int J Mach Learn Comp* 9:310–315
- Choudhary ML, Patel VB, Siddiqui MW, Mahdl SS (2015) Climate dynamics in horticultural science. Apple Academic Press, Oakville, 385 p 7
- Chouinard G, Firlej A, Cormier D (2016) Going beyond sprays and killing agents: exclusion, sterilization and disruption for insect pest control in pome and stone fruit orchards. *Sci Hort* 208:13–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.03.014>
- Cober, S. G., & List, R. (1993). Measurements of the heat and mass transfer parameters characterizing conical graupel growth. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50(11), 1591–1609. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050<1591:MOTHAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<1591:MOTHAM>2.0.CO;2)
- Collins, M.R.; Knutti, J.; Arblaster, J.-L.; Dufresne, T.; Fichet, P.; Friedlingstein, X.; Gao, W.J.; Gutowski, T.; Johns, G.; Krinner, M.; et al. Long-Term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013.
- Cox, M., & Armstrong, P. R. (1981). A statistical model for the incidence of large hailstones on solar collectors. *Solar Energy*, 26(2), 97–111. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90072-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90072-4)
- Dabade SG, Mahesh BK, Hrushikesh NV, Vishal VS, Datta SA (2020) Cloud seeding by non-convective methods. *Int J Sci Eng Res* 11:58–60
- Davini, P., Bechini, R., Cremonini, R., Cassardo, C., 2011. Radar-based analysis of convective storms over Northwestern Italy. *Atmosphere* 3 (1), 33 URL <http://www.mdpi.com/2073-4433/3/1/33>.

- Davitashvili T, Samkharadze I, Megreladze L, Kvatadze R (2021) Using modern technology to protect vineyards from hail amid climate change. *EDP Sci* 234:1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123400034>
- De Leeuw J, Vrieling A, Shee A, Atzberger C, Hadgu KM et al (2014) The potential and uptake of remote sensing in insurance: a review. *Remote Sens* 6:10888–10912
- Dennis, E. J., & Kumjian, M. R. (2017). The impact of vertical wind shear on hail growth in simulated supercells. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 74(3), 641–663. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-16-0066.1>
- Dessens J (1995) Severe convective weather in the context of a night time global warming. *Geophys Res Lett* 22:1241–1244. <https://doi.org/10.1029/95gl00952>
- Dinesh H, Pearce JM (2016) The potential of agrivoltaic systems. *Renew Sus Energy Rev* 54:299–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- DRI (2021) What is cloud seeding? <https://www.dri.edu/cloudseeding/about-the-program>. Accessed 01 Jul 2020.
- Eccel, E., Cau, P., Riemann-Campe, K., Biasioli, F., 2012. Quantitative hail monitoring in an alpine area: 35-year climatology and links with atmospheric variables. *Int. J. Climatol.* 32 (4), 503–517.
- Fearnley J, Dodds K (2019) Hail damage and your apple orchard. https://www.dpi.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0011/936731/Hail-damage-and-your-orchard.pdf. Accessed 10 July 2021
- Federer, B., Thalmann, B., & Jouzel, J. (1982). Stable isotopes in hailstones: Part II: Embryo and hailstone growth in different storms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 39(6), 1336–1355. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1982\)039<1336:SIHPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<1336:SIHPI>2.0.CO;2)
- Gagua G, Gongadze M, Chichinadze T (2017) Effective ways to improve agro-ecological conditions of vine–kakheti Region. *Earth Sci* 6:62–65
- Gandorfer M, Hartwich A, Bitsch V (2016) Hail risk management in fruit production: anti-hail net versus hail insurance in Germany. *Acta Hort* 1132:141–146. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2016.1132.19>
- Gao, S.; Wanga, Y.; Yua, S.; Huang, Y.; Liua, H.; Chena, W.; He, X. Effects of drought stress on growth, physiology and secondary metabolites of two Adonis species in Northeast China. *Sci. Hortic.* 2020, 259, 108795
- Geogory KJ (2019) *Man and environmental processes: a physical geography perspective*. CRC Press, USA
- Giaiotti, D., Nordio, S., Stel, F., 2003. The climatology of hail in the plain of Friuli Venezia Giulia. *Atmos. Res.* 67-68, 247–259.
- Giannoulis A, Briassoulis D, Papardaki NG, Mistriotis A (2021) Evaluation of insect-proof agricultural nets with enhanced functionality. *Biosyst Eng* 208:98–112. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.05.012>
- Gilman JW, Kashiwagi T, Lichtenhan JD (1997) Flammability studies of polymer-layered silicate nanocomposites. *Sampej* 33:40–45

- Giraud L, Tourrette A, Flahaut E (2021) Carbon nanomaterials-based polymer-matrix nanocomposites for antimicrobial applications: a review. *Carbon*. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. carbon. 2021. 06. 002](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.06.002)
- Gobbo S, Ghiraldini A, Dramis A, Dal Ferro N, Morari F (2021) Estimation of hail damage using crop models and remote sensing. *Remote Sens* 13:1–13
- Gullo G, Dattola A, Vonella V, Zappia R (2021) Effects of photosensitive colour nets on the vegetative, productive, and qualitative behaviour of kiwifruit, jintao cultivar. *J Berry Res* 11:1–19. [https:// doi. org/ 10. 3233/ JBR- 200530](https://doi.org/10.3233/JBR-200530)
- Hellin, J.; Bellon, M.R.; Hearne, S.J. Maize landraces and adaptation to climate change in Mexico. *J. Crop Improv.* 2014, 28, 484–501.
- Heymsfield, A. J. (1982). A comparative study of the rates of development of potential graupel and hail embryos in High Plains storms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 39(12), 2867–2897. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1982\)039<2867:ACSOTR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<2867:ACSOTR>2.0.CO;2)
- Heymsfield, A. J. (1983). Case-study of a hailstorm in Colorado, Part IV: Graupel and hail growth mechanisms deduced through particle trajectory calculations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(6), 1482–1509. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040 <1482:CSOAH1>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1482:CSOAH1>2.0.CO;2)
- Heymsfield, A. J., & Wright, R. (2014). Graupel and hail terminal velocities: Does a supercritical Reynolds Number apply. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(9), 3392–3403. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0034.1>
- Holleman I, Wessels HR, Onvlee JRA, Barlag SJM (2000) Development of a hail-detection-product. *Hydrol Oec Atmosp* 25:1293–1297
<https://sciforum.net/paper/view/932>
- Huanbin XU, Jinfang YIN (2017) Key issues in developing numerical models for artificial weather modification. *Meteor Res* 31:1007–1017. [https:// doi. org/ 10. 1007/ s13351- 017- 7113-3](https://doi.org/10.1007/s13351-017-7113-3)
- Hyonny K, Douglas A, Keith T (2003) Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels. *Composites* 34:25–41
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007–The Physical Science Basis*. In *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007.
- IPCC. Intergovernmental panel on climate change. In *Proceeding of the 5th Assessment Report, WGII, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2014; Available online: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (accessed on 16 July 2018).
- Ismael SA, Francisco M, Fermín E (2007) Development and behaviour of a radar-based operational tool for hailstorms identification. *Atmos Res* 83:306–314
- Jhalegar MJ, Sharma RR, Pal RK, Rana V (2012) Effect of postharvest treatments with polyamines on physiological and biochemical attributes of kiwifruit (*Actinidia Deliciosa*) cv. allison. *Fruits* 67:13–22. [https:// doi. org/ 10. 1051/ fruits/ 20110 62](https://doi.org/10.1051/fruits/2011062)

- Kaushal M (2019) Climatic resilient agriculture for root, tuber, and banana crops using plant growth-promoting microbes In: Kumar K, Kumar A, Singh AK (eds) Climate change and agricultural ecosystems. Woodhead Publishing, pp 307–329. [https:// doi.org/ 10. 1016/ B978-0- 12- 816483- 9. 00012-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816483-9.00012-8)
- Kawazoe Y, Kondow T, Ohno K (2013) Clusters and nanomaterials: theory and experiment. Springer, Singapore
- Kim, H., & Kedward, K.-T. (2000). Modeling hail ice impacts and predicting impact damage initiation in composite structures. *AIAA*, 38(7), 1278–1288. <https://doi.org/10.2514/2.1099>
- Kimura S, Thi CL (2011) Farm level analysis of risk and risk management strategies and policies. OECD Food, Agriculture and Fisheries Working Papers <https://doi.org/10.1787/5kg6z83f0s34-en>
- Knight, C. A. (1968). On the mechanism of spongy hailstone growth. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 25(3), 440–444. [https://doi.org/ 10.1175/1520-0469\(1968\)025<0440:OTMOSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1968)025<0440:OTMOSH>2.0.CO;2)
- Knight, C. A., & Knight, N. C. (1970a). Hailstone embryos. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 27(4), 659–666. [https://doi.org/10.1175/ 1520-0469\(1970\)027<0659:HE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1970)027<0659:HE>2.0.CO;2)
- Knight, C. A., & Knight, N. C. (1979). Results of a randomized hail suppression experiment in northeast Colorado: Part V: Hailstone embryo types. *Journal of Applied Meteorology*, 18(12), 1583–1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<1583:ROARHS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1583:ROARHS>2.0.CO;2)
- Knight, C. A., Ehhalt, D. H., Roper, N., & Knight, N. C. (1975). Radial and tangential variation of deuterium in hailstones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32(10), 1990–2000. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<1990:RATVOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<1990:RATVOD>2.0.CO;2)
- Knight, N. C. (1981). The climatology of hailstone embryos. *Journal of Applied Meteorology*, 20(7), 750–755. [https://doi.org/10.1175/ 1520-0450\(1981\)020<0750:TCOHE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<0750:TCOHE>2.0.CO;2)
- Kojima Y, Usuki A, Kawasumi M, Fukushima Y, Okada A, Kurauchi T, Kamigaito O (1993) Mechanical properties of nylon 6–clay hybrid. *J Mater Res* 8:1179–1184
- Kumar, D.; Al Hassan, M.; Naranjo, M.A.; Agrawal, V.; Boscaiu, M.; Vicente, O. Effects of salinity and drought on growth, ionic relations, compatible solutes and activation of antioxidant systems in oleander (*Nerium oleander* L.). *PLoS ONE* 2017, 12, e0185017
- Kunz M, Sander J, Kottmeier C (2009) Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *Int J Climato* 29:2283–2297. [https:// doi.org/ 10. 1002/ joc. 1865](https://doi.org/10.1002/joc.1865)
- Lamb, D., & Verlinde, J. (2011). *Physics and chemistry of clouds* (1st ed., p. 584). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Lance M, Mark L, Buckley B (2008) Estimating future trends in severe hailstorms over the Sydney Basin: a climate modelling study. *Atmos Res* 87:37–51
- Leisner T, Duft D, Möhler O, Saathoff H, Schnaiter M, Henin S, Stelmaszczyk K, Petrarca M, Delagrangé R, Hao Z, Lüder J (2013) Laser-induced plasma cloud interaction and

- ice multiplication under cirrus cloud conditions. *Proc Natl Acad Sci* 110:10106– 10110. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222190110>
- Lesins, G. B., & List, R. (1986). Sponginess and drop shedding of gyrating hailstones in a pressure-controlled icing wind tunnel. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43(23), 2813–2825. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<2813:SADSOG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<2813:SADSOG>2.0.CO;2)
- Li W, Liu Q, Zhang Y, Li CA, He Z, Choy WC, Low PJ, Sonar P, Kyaw AK (2020) Biodegradable materials and green processing for green electronics. *Adv Mater* 32:2001591. <https://doi.org/10.1002/adma.202001591>
- List, R. (1959). Wachstum von eis-wassergemischen im hagelversuchskanal. *Helv. Phys. Acta* (in German), 32, 293–296.
- List, R., & de Quervain, M. (1953). Zur struktur von hagelkörnern. *Z. Angew. Math. Phys.*, 4, 492–496.
- López-Luque R, Reza J, Martínez J (2015) Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaic system for deficit irrigation of olive orchards. *Appl Energy* 149:13–23
- Ludlam, F. H. (1958). The hail problem. *Nubila*, 1, 13–96.
- Malik S, Bano H, Rather RA, Ahmad S (2018) Cloud seeding; its prospects and concerns in the modern world-a review. *Int J Pure Appl Biosci* 6:791–796
- Malu PR, Sharma US, Pearce JM (2017) Agrovoltatics potential on grape farms in India. *Sus Energy Technol Assess* 23:104–110
- Manja K, Mirella A (2019) The use of nets for tree fruit crops and their impact on the production: a review. *Sci Horticult* 246:110–122. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.050>
- Manzato, A., 2012. Hail in northeast Italy: climatology and bivariate analysis with the sounding-derived indices. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51 (3), 449–467.
- McMaster, H. (2001). Hailstorm risk assessment in rural New South Wales. *Natural Hazards*, 24(2), 187–196. <https://doi.org/10.1023/A:1011820206279>
- Menapace L, Colson G, Rafealli R (2013) Risk aversion, subjective beliefs, and farmer risk management strategies. *Am J Agric Eco* 95:384–389
- MIDH (2021) Advisory for care of hail storm affected horticulture crops. https://www.midh.gov.in/PDF/ADVISORY%20from_HC.pdf. Assessed 10 July, 2021
- Morgan, G. M. (1972). On the growth of large hail. *Monthly Weather Review*, 100(3), 196–205. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0196:OTGOLH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0196:OTGOLH>2.3.CO;2)
- Morgan, G.M., 1973. A general description of the hail problem in the Po Valley of northern Italy. *J. Appl. Meteorol.* 12, 338–353.
- Mupambi G, Anthony BM, Layne DR et al (2018a) The influence of protective netting on tree physiology and fruit quality of apple: a review. *Sci Horticult* 236:60–72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.014>
- Mupambi G, Anthony BM, Layne DR, Musacchi S, Serra S, Schmidt T, Kalcsits LA (2018b) The influence of protective netting on tree physiology and fruit quality of apple: a review. *Sci Horticult* 236:60–72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.014>

- Nanni, S., 2004. Grandine, un nemico terribile — genesi e previsione. Tech. Rep. II Divulgatore (in Italian)
- Nautiyal P, Bhaskar R, Papnai G, Joshi N, Supyal V (2020) Impact of climate change on apple phenology and adaptability of Anna variety (low chilling cultivar) in lower hills of Uttarakhand. *Int J Curr Microbiol App Sci* 9:453–460. <https://doi.org/10.20546/ijemas.2020.909.057>
- Nelson, S. P. (1983). The influence of storm flow structure on hail growth. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(8), 1965–1983. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040<1965:TIOSFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1965:TIOSFS>2.0.CO;2)
- NOAA (2018a) National Oceanic and Atmospheric Administration, National Severe Storms Lab (NSSL) Severe Weather 101: Hail Basics, <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/hail/>. Assessed 15 July 2021
- Okunlola, G.O.; Olatunji, O.A.; Akinwale, R.O.; Tariq, A.; Adelusi, A.A. Physiological response of the three most cultivated pepper species (*Capsicum* spp.) in Africa to drought stress imposed at three stages of growth and development. *Sci. Hortic.* 2017, 224, 198–205
- Olesen, J.E.; Bindi, M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *Eur. J. Agron.* 2002, 16, 239–262.
- Pachauri, R.K.; Allen, M.R.; Barros, V.R.; Broome, J.; Cramer, W.; Christ, R.; Church, J.A.; Clarke, L.; Dahe, Q.; Dasgupta, P. *Climate Change 2014: Synthesis Report; Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014.
- Palencia, C., Castro, A., Giaiotti, D., Stel, F., Vinet, F., Fraile, R., 2009. Hailpad-based research: a bibliometric review. *Atmos. Res.* 93 (1-3), 664–670.
- Palliotti A., Poni S., Silvestroni O. 2018. *Manuale di Viticoltura*. Bologna: Edagricole – Edizioni Agricole di New Business Media srl.
- Peters AJ, Grifn SC, Viña A, Ji L (2000) Use of remotely sensed data for assessing crop hail damage. PE and RS, photogramm. *Eng Remote Sens* 66:1349–1355
- Petoumenou DG, Biniari K, Xyrafis E, Mavronasios D, Daskalakis I, Palliotti A (2019) Effects of natural hail on the growth, physiological characteristics, yield, and quality of *Vitis vinifera* L. cv. Thompson Seedless under Mediterranean growing conditions. *Agronomy*. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy9040197>
- Pokharel B, Wang SY, Gu H, LaPlante MD, Serago J, Gillies R, Meyer J, Beall S, Ikeda K (2021) A modeling examination of cloud seeding conditions under the warmer climate in Utah, USA. *Atmos Res* 248:105239. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105239>
- Prabhakaran P, Kinney G, Cantrell W, Shaw RA, Bodenschatz E (2020) High supersaturation in the wake of falling hydrometeors: implications for cloud invigoration and ice nucleation. *Geophys Res Lett* 47:e2020GL088055. <https://doi.org/10.1029/2020GL088055>
- Prein AF, Heymsfield AJ (2020) Increased melting level height impacts surface precipitation phase and intensity. *Nat Clim Chang* 10:771–776. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0825-x>

- Prodi, F., 1974. Climatologia della grandine nella Valle Padana (1968–1972). Riv. It. Geofis. 23 (5/6), 283–290 (in Italian).
- Pruppacher, H. R., & Klett, J. D. (1997). Microphysics of clouds and precipitation (2nd ed., p. 954). Springer: Was Kluwer Academic Publishers.
- Punge, H., Bedka, K., Kunz, M., Werner, A., 2014. A new physically based stochastic event catalog for hail in Europe. Nat. Hazards 73 (3), 1625–1645.
- Rana VS, Rana NS (2003) Studies on fruit growth and organic metabolites in developing kiwifruit. Ind J Plant Physiol 8:138–140
- Rana VS, Sharma S, Rana N et al (2022) Sustainable production through biostimulants under fruit orchards. CABI Agric Biosci 3:1–10. <https://doi.org/10.1186/s43170-022-00102-w>
- Rasmussen, R. M., & Heymsfield, A. J. (1987a). Melting and shedding of graupel and hail. Part I: Model physics. Journal of the Atmospheric Sciences, 44(19), 2754–2763. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044<2754:MASOGA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<2754:MASOGA>2.0.CO;2)
- Rasmussen, R. M., & Heymsfield, A. J. (1987b). Melting and shedding of graupel and hail. Part II: Sensitivity study. Journal of the Atmospheric Sciences, 44(19), 2764–2782. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044<2764:MASOGA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<2764:MASOGA>2.0.CO;2)
- Raupach TH, Martius O, Allen JT, Kunz M, Lasher-Trapp S, Mohr S, Rasmussen KL, Trapp RJ, Zhang Q (2021) The effects of climate change on hailstorms. Nat Rev Ear Env 2:213–226. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>
- Raupach Timothy H. Olivia Martius, John T. Allen 4, Michael Kunz Sonia Lasher- Trapp, Susanna Mohr, Kristen L. Rasmussen, Robert J. Trapp and Qinghong Zhang. The effects of climate change on hailstorms. NaTure RevIeWS EARtH & EnviRONment volume 2 March 2021, 213.
- Raza, A.; Razzaq, A.; Mehmood, S.S.; Zou, X.; Zhang, X.; Lv, Y.; Xu, J. Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. Plants 2019, 8, 34.
- Rogna M, Schamel G, Weissensteiner A (2021) The apple producers' choice between hail insurance and anti-hail nets. Agric Fin Rev 82:20–48
- Roncali, G., 1955. Sui danni della grandine in Italia. Tech. rep. Ufficio Centrale di Ecologia Agraria, Rome (in Italian).
- Rymbai H, Deshmukh NA, Verma VK, Talang HD, Devi MB, Jha AK (2019) Impact assessment of hailstorm on khasi mandarin and other horticultural crops in Umiam, Meghalaya. Ind J Hill Farm. 56–61
- Sánchez, J., Fraile, R., De LaMadrid, J., De La Fuente, M., Rodríguez, P., & Castro, A. (1996). Crop damage: The hail size factor. Journal of Applied Meteorology, 35(9), 1535–1541. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<1535:CDTHSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<1535:CDTHSF>2.0.CO;2)
- Santra P, Pande PC, Kumar S, Mishra D, Singh RK (2017) Agrovoltaics or Solar farming: the concept of integrating solar PV based electricity generation and crop production in a single land use system. Int J Renew Energy Res 7:694–699
- Sartori, G., 2012. Eventi meteorologici estremi — dati e valutazioni sulla radicalizzazione del clima in Veneto. Tech. Rep. Consiglio regionale del Veneto (in Italian)

- Schulson, E. M., & Duval, P. (2009). Creep and fracture of ice (p. 416). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- SDG (2016) Sustainable development goals. <https://sdgs.un.org/goals>. Accessed 01 Jul 2020
- Serra S, Borghi S, Mupambi G, Camargo-Alvarez H, Layne D, Schmidt T, Kalcsits L, Musacchi S (2020) Photosensitive protective netting improves Honeycrisp fruit quality. *Plants* 9:1708–1718
- Sharma DK (2006) Bioprospecting for drug research and functional foods for the prevention of diseases: role of flavonoids in drug development. *J Sci Ind Res* 65:391–401
- Sharma DK (2015) Emerging biomass conversion technologies for obtaining value-added chemicals and fuels from biomass. *Proc Indian Natl Sci Acad* 81:755–764
- Sharma DK, Giri CC (2016) CO₂ gasification reactivity and kinetics studies of raw coal, super clean coal and residual coals obtained after organo-refining (Solvent extraction). *J Power Technol* 96:157–169
- Sharma R, Sharma DK (2010) Emerging trends in the sequestration of CO₂ role of geomicrobiology, biosequestration, knowledge management and industrial approaches. *J Appl Geochem* 12:520–527
- Sharma S, Rana VS, Kumari M, Mishra P (2018) Biofertilizers: boon for fruit production. *J Pharmacogn Phytochem* 7:3244–3247
- Sharma S, Rana VS, Pawar R, Lakra J, Racchapannavar V (2021a) Nanofertilizers for sustainable fruit production: a review. *Environ Chem Lett* 19:1693–1714. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01125-3>
- Sharma S, Rana VS, Pawar R, Lakra J, Racchapannavar V (2021a) Nanofertilizers for sustainable fruit production: a review. *Environ Chem Lett* 19:1693–1714. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01125-3>
- Sharma S, Rana VS, Rana N, Bhardwaj V, Pawar R (2022a) Influence of organic amendments on growth, yield, fruiting and nutritional status of kiwifruit vineyard. *Ind J Hort* 79:56–61
- Sharma S, Rana VS, Rana N, Prasad H, Umesh S, Vikrant P (2022b) Biochar from fruit crops waste and its potential impact on fruit crops. *Sci Hort* 299:1–13
- She Y, Chen L, Zhang Y (2019) Design of the artificial operation directing-system based on weather radar and anti-aircraft-gun & rocket for hail suppression. *International Conf Meteorol Observ IEEE* pp 1–4
- Shukla S, Singh G, Sarkar SK, Mehta PL (2021) Novel umbrella 360 cloud seeding based on self-landing reusable hybrid rocket. *International conference on innovative computing and communications*. Springer, Singapore, pp 999–1011
- Silva, V. Q. (2011), Design of protective covers against natural hazards, Master's thesis. Auburn, AL: Auburn University.
- Sioutas, M., Meaden, T., Webb, J.D., 2009. Hail frequency, distribution and intensity in northern Greece. *Atmos. Res.* 93 (1-3), 526–533.

- Sivakumar D, Jifon J (2018) Influence of photosensitive shade nettings on postharvest quality of vegetables. In: Wasim MS (ed) Preharvest modulation of postharvest fruit and vegetable quality. Academic press, USA, pp 121–138
- Steyn TC (2020) Comparing hail risk management strategies through whole-farm multi-period stochastic budgeting for avocado production in South Africa, Doctoral dissertation, Stellenbosch:Stellenbosch University 103p.https://scholar.sun.ac.za/bitstream/handle/10019.1/108243/steyn_hail_2020.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Assessed 10 Jul 2021
- Swift, J. M. (2013). Simulated hail ice mechanical properties and failure mechanisms at quasi-static strain rates, Master's thesis. Seattle, Washington: University of Washington.
- SwissRe, 2014. Sigma: Natural- and Man-made Catastrophes 2013. Tech. Rep.Swiss Re Economic Research and Consulting
- Tai Y, Liang H, Zaki A, El Hadri N et al (2017) Core/shell microstructure induced synergistic effect for efficient water-droplet formation and cloud-seeding application. ACS Nano 11:12318–12325. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b06114>
- Tormena, E., 2011. La grandine, Serenissima Meteo. [in Italian; online; accessed 27-February-2014]. URL <http://www.serenissimameteo.eu/ambiente-e-territorio/11-lagrandine.html>.
- Vukelić G, Cvetković O, Gržetić I, Simić M, Miodragović Z, Lazić L, Zarić M, Pešić A, Vulić P (2018) Anti-hail protection assessment of financial effects on the territory of Belgrade. Sustain 10:1239–1245. <https://doi.org/10.3390/su10041239>
- Vurukonda, S.S.K.P.; Vardharajula, S.; Shrivastava, M.; SkZ, A. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. Microbiol. Res. 2016, 184, 13–24.
- Wang F, Li Z, Jiang Q, Wang G, Jia S, Duan J, Zhou Y (2019) Evaluation of hygroscopic cloud seeding in liquid-water clouds: a feasibility study. Atmos Chem Phys 19:14967–14977. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14967-2019>
- Wei J, Qiu J, Li T, Huang Y, Qiao Z, Cao J, Zhong D, Wang G (2021) Cloud and precipitation interference by strong low-frequency sound wave. Sci China Techno Sci 64:261–272
- Williamson CJ, Kupc A, Axisa D et al (2019) A large source of cloud condensation nuclei from new particle formation in the tropics. Nature 574:399–403. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1638-9>
- Witt AW (2016) Seeding clouds of uncertainty. Jurim 57:105–144 Woodley WL (1970) Rainfall enhancement by dynamic cloud modification. Science 170:127–132
- Woodley WL (1970) Rainfall enhancement by dynamic cloud modification. Science 170:127–132
- Wu X, Yan N, Yu H, Niu S, Meng F, Liu W, Sun H (2018) Advances in the evaluation of cloud seeding: statistical evidence for the enhancement of precipitation. Ear Spa Sci 5:425–439

- Yano K, Usuki A, Okada A, Kurauchi T, Kamigaito O (1993) Synthesis and properties of polyimide–clay hybrid. *J Polym Sci* 31:2493–2498
- Zhang S, Pelligra CI, Feng X, Osuji CO (2018) Directed assembly of hybrid nanomaterials and nanocomposites. *Adv Mater* 30:1705794. <https://doi.org/10.1002/adma.201705794>
- Zhao JL, Zhang DY, Luo JH, Huang SL, Dong YY, Huang WJ (2012) Detection and mapping of hail damage to corn using domestic remotely sensed data in China. *Aust J Crop Sci* 6:101–110
- Zheng G, Kuang C, Uin J, Watson T, Wang J (2020) Large contribution of organics to condensational growth and formation of cloud condensation nuclei (CCN) in the remote marine boundary layer. *Atmos Chem Phys* 20:12515–12525
- Ziegler, C. L., Ray, P. S., & Knight, N. C. (1983). Hail growth in an Oklahoma multicell storm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(7), 1768–1791.
- Zimmerli, P., 2005. Hailstorms in Europe — A New Look at a Familiar Risk, Swiss Re Fokus Report, Zurich

RINGRAZIAMENTI

A mia madre.

La mia più grande sostenitrice, a cui mi aggrappo ogni giorno per poter affrontare i momenti difficili e nello stesso tempo godere insieme delle mie vittorie. E se inizialmente parlavo di questa laurea come la seconda vittoria della mia vita è proprio perché la prima è lei.

Al mio compagno Michele.

Grazie per il sostegno costante e affettuoso di ogni giorno, per avermi incoraggiata, sostenuta e per avermi fatto sempre sentire quanto tu credessi in me.

E infine grazie a me.

Che con determinazione e sacrificio mi sono spinta a non mollare mai e a puntare sempre in alto, fino a raggiungere anche questo traguardo.