

Stefano Poni

**Viticultura
e cambiamento climatico**
Sfide e prospettive



1ª edizione: luglio 2026

Le Figure 1.1 a pagina 4, 1.2 a pagina 5, 1.4 a pagina 10, 1.7 a pagina 17, 1.12 a pagina 26, 2.22 a pagina 84, 3.14 a pagina 163 e 3.17 a pagina 170 sono di Stefano Trainito.



© Copyright 2026 by "Edagricole - Edizioni Agricole di Tecniche Nuove S.p.A.", via Eritrea, 21 - 20157 Milano
Redazione: p.zza G. Galilei, 6 - 40123 Bologna Vendite: tel. 051/6575833
email: libri.edagricole@tecniche nuove.com - www.edagricole.it

Proprietà letteraria riservata - printed in Italy

5686

La riproduzione con qualsiasi processo di duplicazione delle pubblicazioni tutelate dal diritto d'autore è vietata e penalmente perseguibile (art. 171 della legge 22 aprile 1941, n. 633). Quest'opera è protetta ai sensi della legge sul diritto d'autore e delle Convenzioni internazionali per la protezione del diritto d'autore (Convenzione di Berna, Convenzione di Ginevra). Nessuna parte di questa pubblicazione può quindi essere riprodotta, memorizzata o tra-smessa con qualsiasi mezzo e in qualsiasi forma (fotomeccanica, fotocopia, elettronica, ecc.) senza l'autorizzazione scritta dell'editore. In ogni caso di riproduzione abusiva si procederà d'ufficio a norme di legge.

Realizzazione grafica: Exegi snc, Via Pelagio Palagi, 3/2 - 40138 Bologna
Impianti e stampa: DIGITALTEAM srl - Via dei Platani, 4 - 61032 Fano (PU)

Finito di stampare nel luglio 2026

ISBN-978-88-506-5686-8

Presentazione

La ricca produzione manualistica degli ultimi due secoli ha rappresentato uno strumento fondamentale per delineare le caratteristiche della viticoltura moderna. Nella sonnolenta Italia preunitaria, l'azione di divulgazione dei risultati dell'innovazione scientifica, espressione dell'Illuminismo francese ed elaborati dai padri della viticoltura ed enologia europea come Adamo Fabbroni, l'abate Rozier, Luis Pasteur o Jules Guyot, era affidata alle Accademie di Agricoltura, le quali, purtroppo, si rivolgevano solo ai proprietari di grandi aziende. La democratizzazione della comunicazione scientifica avviene in coincidenza della ricostruzione della viticoltura post fillosserica. Per la nascita di questa viticoltura, dalle caratteristiche davvero rivoluzionarie rispetto a quella che aveva attraversato duemila anni di storia del vino europeo, i trattati di viticoltura e le riviste specialistiche furono determinanti nell'indirizzare le scelte dei viticoltori. L'enorme beneficio che queste pubblicazioni portarono al vino europeo non è difficile da dimostrare, vista la rapida diffusione che videro alcune buone pratiche di tecnica viticola. Il grande pregio di queste opere risiedeva anche nel fatto che il linguaggio e gli espedienti comunicativi utilizzati rendevano fruibile i loro contenuti alla grande maggioranza dei viticoltori a cui intendevano rivolgersi. Ci si chiede oggi nell'era dei social media e dell'intelligenza artificiale, se scrivere un libro che affronta i temi cruciali della produzione dell'uva sia un esercizio velleitario. Per poter rispondere in modo adeguato a questa domanda, senza evocare analogie con le calamità provocate dalle "malattie americane", non possiamo ignorare il contesto odierno in cui opera il settore vitivinicolo mondiale che si trova ad affrontare le importanti sfide del cambiamento climatico e della sostenibilità ambientale. Per quanto complessa sia la situazione attuale, possediamo oggi, a differenza di cento anni fa, tutti gli strumenti necessari per rispondere alle principali problematiche. La tecnologia in senso lato, ci fornisce infatti un grande potere predittivo, costituendo un valido supporto alle decisioni che l'agronomo deve prendere, in modo tempestivo ed efficace. Come in passato però, è necessario fornire le conoscenze necessarie per applicare in pratica le innovazioni che vengono da tutti i campi della ricerca: dalla genetica, alla eco fisiologia ed agro meteorologia, dalla bioinformatica, alla *space economy*. Il libro di Stefano Poni rappresenta questo tipo di approccio alla novità che ci permette di guardare alla innovazione non come una minaccia che si ritorce contro l'uomo ma come uno

Presentazione

strumento in grado di ricondurre il viticoltore ad una nuova e più approfondita conoscenza di sé e del suo lavoro. Con la sua ampia esperienza di ricercatore e docente universitario, partendo dalle emergenze climatiche, propone delle soluzioni efficaci e di facile applicazione, relativamente alla struttura del vigneto ed alla sua coltivazione, anche attraverso lo strumento della cosiddetta viticoltura di precisione. Non trascura peraltro l'aspetto, rilevante dal punto di vista della sostenibilità ambientale, del sequestro del carbonio da parte del vigneto. Un testo che per i suoi contenuti teorici e pratici, si rivela indispensabile per l'aggiornamento tecnico di studenti, tecnici e viticoltori. In un contesto sociale dominato da una modernizzazione apparentemente inarrestabile, i temi della scoperta e dei nuovi orizzonti offerti dalla ricerca, affollano le nostre menti inducendoci a riflettere su quale sia l'approccio più umano ed intelligente per abbracciare tali cambiamenti. Ci aiuta in questo, Antoine de Saint Exupery (1900-1944), che in una opera pubblicata postuma dal titolo "Cittadella", affronta il tema della ricerca e dell'educazione utilizzando l'efficace metafora della barca. Si legge infatti: «Se vuoi costruire una barca, non radunare uomini per tagliare legna, dividere i compiti e impartire ordini, ma insegna loro la nostalgia per il mare vasto e infinito».

Attilio Scienza

Premessa

Tante sono le parole chiave che caratterizzano il vigneto moderno, peraltro in continua evoluzione sotto l'impulso di due eventi maggiori che, senza ombra di dubbio, possono essere identificati negli effetti indotti dal cambiamento climatico e nei relativi meccanismi di *adattamento* e *mitigazione* che il medesimo stimola [1], e dall'irruzione di quella che, cedendo per un attimo ad una locuzione anglofona, è la “smart viticulture”, ovvero l'insieme di nuove tecnologie informatiche e digitali abilitanti [2].

Una parola chiave ormai universalmente adottata è quella della *sostenibilità*, da tutti ricercata e normalmente declinata nelle tre ormai note accezioni di sostenibilità ambientale, economica e sociale[3]. Ci è caro immaginare questo concetto non come un sistema di scatole cinesi o di matrioske in cui esiste una gerarchia tra i vari elementi, quanto piuttosto come insiemi parzialmente sovrapposti tra loro (Fig. 1). Tali sovrapposizioni intendono rappresentare l'integrazione e l'interazione tra le tre anime della sostenibilità ma, paradossalmente, specie nel mondo viticolo, insinuano anche un più che ragionevole dubbio: in che misura e a quale prezzo sostenibilità ambientale e sostenibilità economica sono tra loro conciliabili e compatibili?



Figura 1 – Il concetto di *in-siemistica* applicato alle tre anime della sostenibilità: *Economica, Sociale e Ambientale*.

Premessa

A ben vedere, non sembrano essere tanti gli esempi virtuosi in tal senso anche se la sfida è francamente formidabile. Certamente, un esempio fulgido è quello che riguarda il controllo delle malattie della vite, con enfasi primaria sulle infezioni fungine: grazie ad una sempre più efficiente integrazione tra tecniche di bio-controllo [4, 5], irroratori a rateo variabile e/o a recupero di prodotto [6] e ricorso a sistemi di supporto alle decisioni [7] per l'individuazione, su base modellistica, dell'effettiva epoca di infezione, è oggi possibile immettere nell'ambiente meno prodotti nocivi risparmiando, nel contempo, nei costi della difesa. In altri casi, questa compatibilità tra le due forme di sostenibilità sembra più lontana o, addirittura, in antitesi. Anche in questo caso un esempio di cogente attualità: vi è giusta e crescente sensibilità nei confronti dei vari servizi ecosistemici che il vigneto può offrire e, tra questi, figura la sua capacità di agire in termini di "sequestratore di carbonio" [8-10]. Paradossalmente, però, tra i vari fattori che intrinsecamente "limitano" questa funzione vi è quello della quantità di CO₂ che, fatalmente, viene riemessa in atmosfera a seguito della "produzione" di uva vendemmiata e poi destinata ai processi di trasformazione. A tratti, sembra quasi emergere un dualismo, diremmo poco accettabile da parte dei viticoltori, secondo il quale la massimizzazione della funzione eco-sistemica di "carbon sink" del vigneto debba inevitabilmente transitare attraverso una sensibile limitazione delle rese.

Queste prime pillole ci sembrano sufficienti a fare intravedere la necessità di riconsiderare, anche in maniera profonda, le scelte che riguardano la progettazione e la gestione del vigneto facendo in particolare attenzione a due aspetti:

1. troppo spesso il vigneto viene impiantato senza immaginare quello che sarà il probabile sviluppo vegetativo una volta raggiunta la fase adulta e, di riflesso, inducendo poi il ricorso a soluzioni agronomiche di ripiego o di emergenza, talvolta inefficaci e certamente onerose;
2. l'enorme quantità di conoscenze acquisite sulla eco-fisiologia della vite e, più recentemente, su varie tecniche di viticoltura di precisione, consentono di perseguire due obiettivi solo fino a poco tempo fa impensabili. Il primo è che il viticoltore è, ovviamente entro certi limiti, in grado di monitorare e pilotare la crescita della vite e, soprattutto, la dinamica della maturazione, verso una direzione a lui favorevole; il secondo è, per certi aspetti, ancora più rivoluzionario: l'insieme delle tecniche di viticoltura di precisione, se correttamente applicate e validate, fanno intravedere la concreta possibilità di trasformare la sempre temuta variabilità spaziale e temporale da nemico giurato ad alleato.

In sede di premessa, è doveroso menzionare l'evoluzione dei modelli colturali in viticoltura che, ricordiamo, prende origine dai protocolli di gestione integrata per poi evolvere nella gestione in biologico, di fatto una pietra miliare anche sotto l'aspetto "culturale", ovvero di disponibilità verso un approccio di difesa meno invasivo a beneficio anche dell'ambiente e della collettività [11]. Certamente, la maggiore difficoltà di contenimento di malattie fungine in annate recenti (es. 2023 e 2025) caratterizzate da primavere assai piovose con obiettive difficoltà di

accesso meccanico al vigneto e, in generale, di controllo dei cicli infettivi, consiglia di mantenere, anche nei confronti del biologico, un atteggiamento di continuo aggiornamento ed adattamento a situazioni specifiche così come di attenta valutazione del rischio imprenditoriale [12]. Spiace invece osservare la carenza, diremmo tuttora conclamata, di evidenze scientifiche a sostegno di eventuali miglioramenti agronomici e/o di qualità dei vini connessi all'applicazione di un modello di viticoltura biodinamica [13-15].

Esiste, tuttavia, un comune denominatore per i modelli viticoli prima accennati che consiste nell'impegnarsi a coltivare viti e produrre vino in una condizione di maggiore "naturalità". Tuttavia, mentre il concetto dei vini "naturali" alimenta ormai da tempo un dibattito piuttosto vivo e, per certi aspetti, stimolante [16], è opportuno chiedersi: esiste ed è conseguentemente definibile una "naturalità" anche del vigneto? L'impresa appare ostica se, concedendo per un attimo alla nostra amata vite un frammento di "personalità", confrontiamo la sua "ragione" di vita – essenzialmente disperdere nell'ambiente il seme per il mantenimento della specie – con quella del genere umano, ovvero, "produrre vino". Inoltre, la vite al "naturale" è tipicamente avvezza ad arrampicarsi su tutto ciò che la attorna e, poiché non potata, produce tante foglie e tanti grappoli aventi sviluppo e morfologia così diversi da quelli mostrati da viti "addomesticate". Eppure, come anche ampiamente argomentato in una recente review [17], immaginare un vigneto commerciale ispirato ai principi della "naturalità" è possibile e sfidante. In chiusura di premessa elenchiamo solo alcuni fattori che dovrebbero caratterizzarla:

- uso efficiente delle uniche risorse naturali a costo zero: radiazione solare e precipitazioni;
- combinazione vitigno/portinnesto giusta al posto giusto;
- un vigneto che cresce rapidamente in primavera e poi, gradatamente, si "spegne" senza o con minima necessità di interventi estivi ripetuti, invasivi e costosi;
- all'invaiaatura, un vigneto "equilibrato" che presenta una tolleranza anche "naturale" ad alcuni stress abiotici (es. idrico);
- un vigneto in equilibrio armonico con sé stesso che inizi a presentare esempi di riutilizzo o circolarità.

Nella fattispecie, il caso relativamente banale dei residui di potatura invernale che, quando non asportati, rilasciano nel tempo una frazione di elementi nutritivi può essere affiancato da tecniche lungimiranti quali, ad esempio, una pacciamatura organica morta del sottofila ottenuta "riutilizzando" lo sfalcio del cotico che cresce nell'interfilare.

Indice

Presentazione	III
Premessa	V
Ringraziamenti	VIII
1. La fase dell’impianto	1
1.1 Scelta del vitigno	2
1.2 Scelta del portinnesto	15
1.3 Scelta dell’ambiente di coltura	21
1.4 Scelta del sesto di impianto	26
1.5 Scelta della forma di allevamento e dell’orientamento dei filari	28
2. La fase della gestione	39
2.1 Ripensare la gestione del suolo dell’ecosistema vigneto	39
2.1.1 Lavorazione, inerbimento, diserbo, pacciamatura: quale la combinazione migliore?	40
2.1.2 Consumi idrici di essenze da inerbimento in vigneto	43
2.1.3 Tecniche innovative di gestione del suolo in vigneto	47
2.1.4 Rapporti di competizione tra vite e cotico erboso	52
2.1.5 Transizione da lavorazione a inerbimento: tutto semplice?	60
2.2 Ripensare le tecniche di potatura verde del vigneto	64
2.2.1 Il diradamento dei germogli	66
2.2.2 La cimatura dei germogli	69
2.2.3 La defogliazione	74
2.2.4 Il diradamento dei grappoli	78
2.3 Relazione idriche della vite: cose scontate e meno scontate	80
2.4 Irrigazione del vigneto in un contesto di cambiamento climatico: cambia la percezione?	86
2.4.1 Funzione antibrina	92
2.4.2 Funzione climatizzante e irrigazione standard	93
2.5 Utilizzo di biostimolanti	96
	IX

Indice

2.6 Utilizzo di idrogel super-adsorbenti	100
2.7 Tecniche di adattamento di breve periodo al cambio climatico	103
2.7.1 Tecniche utili al posticipo o alla risincronizzazione della maturazione	108
3. Eventi climatici estremi: come difendersi?	127
3.1 Ristagno idrico	127
3.2 Danni da gelo tardivo	130
3.2.1 Protocollo di potatura invernale tardiva (PTI) su cordoni speronati	132
3.2.2 Protocollo di potatura invernale tardiva (PTI) su forme a tralcio rinnovato tipo Guyot	136
3.2.3 Effetti complessivi di PTI su fenologia, produzione e qualità delle uve	137
3.2.4 Cosa fare dopo il danno da gelo tardivo	145
3.3 Danni da grandine	148
3.4 Surriscaldamento e scottature	151
3.4.1 Ruolo di luce e temperatura nel danno da scottatura	152
3.4.2 Danni da scottatura in rapporto ad alcuni fattori culturali	158
Riferimenti bibliografici riferiti alla tabella 3.4	177
4. Sequestro del carbonio: quanto e come contribuisce l'ecosistema vigneto?	179
5. Viticoltura di precisione, nuove tecnologie e cambiamento climatico	189
5.1 Variabilità spaziale e temporale in vigneto: da nemico ad alleato?	190
5.1.1 Mappa di vigore: caso studio Colli Piacentini	192
5.1.2 Mappe di vigore: caso studio Lambrusco Reggiano	195
5.2. Mappe di prescrizione per interventi a rateo variabile	197
5.2.1 Vendemmia a rateo variabile	197
5.2.2 Concimazione a rateo variabile	200
5.2.3 Irrigazione a rateo variabile	203
6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura: utili per adattarsi al clima?	205
7. Conclusioni	217
Glossario	219
Bibliografia	227

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura: utili per adattarsi al clima?

Il termine “modellistica” è un’associazione naturale al concetto di cambiamento climatico. Vi è, in particolare, una definizione, ovvero quella di *General Circulation Models* (GCMs) che è lo strumento che viene ormai universalmente usato per cercare di prevedere cosa succederà, entro una determinata proiezione temporale, in termini di riscaldamento globale, dinamica di scioglimento dei ghiacciai, frequenza di determinati eventi estremi, ecc. Il tutto arricchito da una serie di possibili scenari più o meno pessimistici che tengono conto soprattutto dei risultati attesi in termini di contenimento delle emissioni di gas cosiddetti clima-alteranti [702-703]. Ricordiamo, in proposito, che il *Green Deal* europeo ambisce ad emissioni zero entro il 2050 e ad un abbattimento delle stesse del 55% da qui al 2030 [704]. Tuttavia, uno dei limiti di questi modelli GCM è che, solitamente, diventano piuttosto imprecisi quando devono essere calati su scale regionali o ancora più ristrette. Pertanto, una modellistica diversa deve intervenire a supporto del viticoltore per aiutare a prevedere, con un approccio il più possibile “user friendly”, cosa potrà succedere, anche nel breve periodo, nella propria azienda. Ricordiamo, in proposito, che nessun modello deve avere mai la pretesa di potere duplicare la realtà, quanto piuttosto di produrre previsioni o stime che possano ragionevolmente avvicinarsi a quelle che derivano da valutazioni quantitative del fenomeno osservato. Spesso l'utilizzo della modellistica in viticoltura [705] si associa anche ad un nuovo strumento costituito dai sistemi di supporto alle decisioni (DSS) [705-706], applicativi che dialogano tramite interfacce web con l'utilizzatore per guidarlo ed orientarlo verso le decisioni più opportune.

In questo contesto, sicuramente complesso, il salto di qualità che ci si attende rispetto a metodi tradizionali e “puntiformi” usati per valutare lo stato idrico del vigneto (tra tutti, le misure di potenziale idrico con camera a pressione) è quello di arrivare a produrre, in continuo, un output di un determinato indicatore di stress idrico che possa rivelarsi sufficientemente accurato. Tra questi indicatori, uno dei più popolari è il cosiddetto *Crop Water Stress Index* (CWSI) che, nella sua forma più empirica, si basa su una relazione lineare tra la differenza tra la temperatura della chioma e quella dell'aria ($T_c - T_a$) e il deficit di pressione di vapore (VPD) per una coltura ben irrigata durante il giorno e in condizioni omogenee e cielo sereno [708]. Si stanno dunque moltiplicando gli approcci basati su DSS che,

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura

utilizzando una sensoristica IoT, sfornano in continuo il valore di CWSI consentendo, almeno teoricamente, un allarme idrico tempestivo [709]. Tuttavia, le difficoltà non mancano: in un lavoro quadriennale condotto in Idaho [710], la migliore correlazione lineare ottenuta, quella tra CWSI e la frazione di acqua disponibile nel suolo, arriva ad un non esaltante $R^2 = 0.58$ e gli stessi autori riconoscono che la sensoristica necessaria per arrivare al calcolo del CWSI è obiettivamente troppo onerosa. Decisamente più incoraggiante il riscontro proveniente da una prova biennale condotta in Israele su Cabernet Sauvignon [711] dove, sfruttando un approccio modellistico di *machine learning*, la correlazione tra CWSI misurato e stimato è risultata molto buona ($r = 0,94$). Tuttavia, il più interessante elemento di novità è che la previsione di CWSI è stata prodotta da parametri di pendenza, esposizione, indice di umidità topografica, conduttività elettrica apparente del suolo (ECa) integrati con rilievi NDVI senza, quindi, la necessità di messa in opera di sensoristica costosa né di esecuzione di onerose campagne di calibrazione. Altrettanto interessante, ma per motivi diversi, quanto riportato su Cabernet Sauvignon in areale cileno [712] in cui, utilizzando una rete di sensori wireless, si è giunti ad una correlazione non lineare tra CWSI e il potenziale del fusto con valori di R^2 di 0,71-0,72 in due vigneti di piccole dimensioni utilizzando sensori a termometria infrarossa MLX90614 (Melexis, Ypres, Belgio) caratterizzati davvero da un basso costo (circa 10 euro cadauno). Interessante anche l'approccio proposto da [713] che unisce le potenzialità del remote sensing e del *machine learning*. Su di un vigneto californiano di Merlot di ampie dimensioni (10 ha), si è valutato la precisione con la quale indici derivati da fotogrammetria a bassa risoluzione (pixel di 30 m) acquisita tramite Landsat8 possano restituire, su base di variabilità spaziale e temporale, stime accettabili di Ψ_{fusto} , P_n e g_s fogliare. L'approccio di *machine learning* utilizzato, una volta integrato da dati elementari di anagrafe aziendale, dati climatici classici e l'input di tessitura del suolo, ha restituito predizioni piuttosto accurate ($R^2 > 0,80$) che, tuttavia, hanno raggiunto la massima precisione quando il parametro di stress considerato è stato il Ψ_{fusto} . Non vi è dubbio che analisi dei Big-Data e sistemi DSS possano costituire un connubio vincente per raggiungere, in particolare, due obiettivi:

1. mettere a disposizione del viticoltore strumenti diagnostici semplici e affidabili che si ispirano all'utilizzo del suolo e della pianta stessa come "sensori" ambientali che limitano drasticamente, o addirittura rendono non necessario, la messa in opera di sensori fissi di vario genere i quali, a prescindere dal costo, rappresentano sempre un ostacolo per la gestione ordinaria del vigneto;
2. aiutare a superare un manifesto timore reverenziale che ancora sussiste in termini di trasferimento, nella pratica viticola, delle ormai innumerevoli applicazioni che vengono sfornate a ritmo assai sostenuto dal "digital farming", ma che hanno ancora un grado di accoglimento e, se vogliamo, di gradimento, piuttosto scarso.

L'esempio che vogliamo portare all'attenzione dei lettori fa riferimento ad una problematica che è straordinariamente sentita, diremmo in modo trasversale,

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura

dalla viticoltura italiana e che consta nella necessità di riuscire a produrre diagnosi sufficientemente precoci di stati di stress idrico per potere poi pianificare eventuali e mirati interventi di reintegro irriguo.

Uno dei progetti finanziati dalla Regione Emilia-Romagna nell'ambito del settennato di Piano di Sviluppo Rurale (PSR 2014-2020), denominato Big-VITE, affronta nello specifico il tema del riuscire a fornire allarmi affidabili di insorgenza di stress idrico a partire da semplici input di anagrafe aziendale e dati climatici standard sfruttando le potenzialità offerte dall'analisi Big-Data e dai processi di "machine learning". Il filo logico lungo il quale la previsione si struttura e viene erogata è il seguente:

- per una determinata località, a partire dai dati elementari di tessitura del suolo e contenuto in sostanza organica, l'algoritmo calcola facilmente, per una data profondità di suolo (all'occorrenza variabile a seconda delle specifiche condizioni) la cosiddetta riserva idrica utile (RIU), tipicamente contenuta tra gli estremi di capacità idrica di campo e coefficiente di appassimento [714];
- successivamente, l'algoritmo di *machine learning*, una volta alimentato con alcuni dati di anagrafe aziendale quali coordinate geografiche, pendenza, giacitura, altezza/spessore chioma, distanza tra le file, orientamento dei filari, sforna un coefficiente culturale (K_c) di tipo geometrico, ovvero rappresentativo della frazione di luce intercettata dal vigneto rispetto a quella incidente [552, 715-716]. Si noti che, proprio grazie alle potenzialità del *machine learning*, questo dato può essere fornito, in tempo reale, per qualsiasi località, data, pendenza ed esposizione prescelta sul globo terrestre;
- segue un ulteriore affinamento di calcolo che dal K_c di tipo geometrico consente di esprimere un K_c funzionale. In altri termini, un valore di K_c geometrico di 0,5 (indicativo del fatto che, a fronte di un 100% di radiazione incidente, nell'arco della giornata, un 50% viene effettivamente intercettato dalle chiome mentre la frazione rimanente colpisce direttamente il suolo) deve potere essere trasformato in un parametro direttamente correlato con il consumo idrico di acqua. Ecco allora che K_c deve subire due tipi di correzione: la prima dipendente dalla intensità della radiazione incidente e la seconda dalla richiesta evapo-traspiratoria dell'atmosfera, bene rappresentata dal VPD, parametro che varia principalmente in funzione di temperatura e umidità relativa. Una volta calcolato il valore di K_c funzionale, il medesimo può essere facilmente convertito in mm di acqua traspirata/giorno, ovvero nella cosiddetta evapo-traspirazione effettiva (ET_e). L'algoritmo di calcolo ha massima flessibilità nel computare anche un K_c riferito ad un eventuale cotico erboso che, evidentemente, rappresenta un'ulteriore fonte di dispersione idrica [717];
- lo step finale è quello di detrarre, giornalmente, dal serbatoio definito dalla RIU, il valore di ET_e fino a quando, con il procedere della stagione, vengono raggiunti due stadi di depauperamento della RIU che, solitamente, corrispondono ad un consumo, nell'ordine, del 40% e del 60% della riserva iniziale (Fig. 6.1). Al raggiungimento del primo livello di allarme, l'operatore riceve un sms che lo allerta e viene invitato ad un esame visivo della situazione del vigneto

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura



Figura 6.1 – Uno screenshot estratto dal progetto Big-VITE (PSR Regione Emilia-Romagna 2014-2020) che visualizza il cruscotto di controllo del bilancio idrico del vigneto, esclusivamente basato su dati meteo, dati di anagrafe aziendale e dati pregressi di validazione fisiologica. Ripreso da [43].

finalizzato a confermare o a smentire la fondatezza dell'allarme ricevuto. In quest'ultimo caso, si attende il raggiungimento del secondo livello d'allarme (60% di RIU utilizzata) e si ripete la medesima verifica. Se, anche in questa circostanza, si dovesse rilevare un'assenza di sintomatologia visiva da stress, occorre con ogni probabilità apportare una correzione all'ampiezza del serbatoio iniziale definito come volume della RIU. Solitamente, tale serbatoio è riferito ad una profondità di suolo di 1 m; tuttavia, specie in vigneti maturi, accade spesso di avere alcune radici profonde che riescono ad attingere da strati più umidi e che consentono alla vite di non mostrare condizioni di sofferenza. Ipotizzando, quindi, di estendere il serbatoio a 140 mm di profondità, la RIU di riflesso aumenterà e, forzatamente, l'allarme verrà in un certo senso "revocato". Poi, ovviamente, si riprende lo stesso tipo di monitoraggio fino all'erogazione di nuovi allarmi. La finalità del tool di monitoraggio è di calibrare, almeno una volta, la sincronia tra allarme erogato e rilievo visivo di sintomi di stress iniziale. Il significato di tale calibrazione è duplice: ha caratteristiche di *una tantum* ed è specificamente riferita alle condizioni di quello specifico appezzamento. All'interno di questo progetto, le equazioni e gli algoritmi utilizzati per passare dal K_c geometrico al K_c funzionale sono derivate da una validazione scientifica assai ampia e robusta [31-33].

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura

L'agricoltura digitale sta offrendo anche altre interessanti soluzioni per arrivare a stime affidabili di situazioni critiche che riguardano, generalmente, l'insorgenza di stress di natura abiotica (idrici, termici, nutrizionali, ecc.). Il tutto anche coadiuvato dall'avvento dell'"Internet delle Cose" (*Internet of Things*, IoT) [718] che fa intravedere una prospettiva decisamente allettante, ovvero avere a disposizione applicativi o sensori finalmente a basso costo e, al tempo stesso, idonei a fornire misure di adeguata precisione.

Un ottimo esempio, su vite, sono alcuni applicativi recenti, in formato "pocket", ovvero applicazioni su mobile che, sfruttando anche gli accelerometri di cui tutti i dispositivi cellulari sono dotati, sono in grado di acquisire e processare immagini in tempi rapidissimi con rilascio di output in tempo reale [719-721]. Banalmente, una delle misure che è possibile ottenere da queste applicazioni è quella del *Leaf Area Index* (LAI), definito come la quantità di superficie fogliare (m^2) che insiste sull'area di ombra proiettata a terra dalla chioma e la cui quantificazione, per coperture vegetali discontinue quali il vigneto, può essere di notevole complessità oppure, all'opposto, relativamente semplice ma derogata a strumentazioni di costo decisamente poco abbordabile [722-724]. Su vite, l'applicazione denominata PocketLAI, che prevede di scattare fotografie della chioma ad una angolazione di $57,5^\circ$, ha dato eccellenti risultati in termini di accuratezza nei confronti di metodi distruttivi tradizionali [721, 725-726]. Sapere, in tempo reale, con qualche scatto fotografico, che il LAI della mia chioma è, in quel momento, pari a $1,8 m^2 m^{-2}$ è un'informazione di inestimabile importanza: infatti, 1,8 può essere considerato il numero medio di strati fogliari che la radiazione luminosa incontra nel suo percorso di attraversamento della chioma e che, nel caso specifico, ci consente di avere due informazioni assai preziose:

1. la chioma è abbastanza densa per poter intercettare gran parte della radiazione incidente;
2. la chioma non è altresì troppo densa, caratteristica sappiamo deleteria a fine di mantenimento della sanità delle uve e del raggiungimento di determinati standard qualitativi.

Un'evoluzione naturale del dispositivo appena descritto consente di stimare la conduttanza stomatica fogliare (g_s) da scansioni fogliari 3D ottenute utilizzando uno smartphone [727]. Il metodo si basa:

1. sull'uso delle scansioni fogliari 3D per derivare il parametro χ della distribuzione dell'angolo fogliare di Campbell (più basso è il χ , maggiore è la tendenza della foglia a essere verticale);
2. sui cambiamenti nell'orientamento fogliare dovuti alla diminuzione del turgore fogliare.

Sono stati raccolti dati sperimentali su *Vitis vinifera* (cv. Malvasia e Chardonnay) in sette esperimenti condotti in vigneti nel Nord Italia nel corso del 2021 e del 2022. I risultati hanno rivelato relazioni lineari significative ($p < 0,01$) tra g_s e χ ($R^2 \geq 0,79$ per entrambe le cultivar). Dai dati raccolti, 13 foglie (90 s per

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura

effettuare le misurazioni) in ogni punto (vite) e sette punti ha⁻¹ sono stati identificati come la dimensione ottimale del campione per catturare l'eterogeneità del vigneto. Un elemento positivo che sempre si associa ad approcci simili a quello appena descritto è quello di richiedere all'utilizzatore finale un impegno minimo in termini di sensoristica fissa e di complessità informatica, limitando il tutto al semplice utilizzo di una app sul cellulare con istruzioni particolarmente semplici ed immediate. Sempre in tema di applicazioni che girano su mobile, di rilievo quella di recente proposta da [728] che, sempre su base di machine learning, mette a disposizione un algoritmo che eroga, con previsioni decisamente accurate, la probabilità di incorrere in un danno da scottatura agli acini.

Sussiste, infine, un ulteriore recente approccio che, soprattutto sfruttando la sensoristica a basso costo IoT, [718], ambisce ad un monitoraggio continuo dello stato idrico della pianta, in contrapposizione ai già citati rilievi puntiformi e, spesso, tediosi, di potenziale idrico fogliare. In realtà, questa tecnologia riprende lavori precedenti in cui si era tentato di valutare se il parametro di restringimento massimo giornaliero del tronco (MDS) misurato in continuo per via dendrometrica fosse un buon predittore dello stato idrico della chioma. Su vite, i risultati non furono esaustivi soprattutto a causa del noto calo di sensibilità delle contrazioni giornaliere del diametro del tronco che si registrano a partire dall'invasatura [281, 729]. Questo approccio ha tratto nuova linfa dalla pubblicazione di alcuni lavori su sensori micro-tensiometrici con microchip incorporato nel tronco e/o nelle branche per il monitoraggio continuo e a lungo termine del potenziale idrico [730-733]. Su mandorlo e melo, la correlazione tra il potenziale idrico del fusto stimato con i micro-sensori e quello misurato con camera a pressione è stata decisamente buona ($r > 0,90$) [730]. Tuttavia, gli stessi sensori testati su Shiraz e Cabernet Sauvignon nel clima più caldo dell'Australia Meridionale [731] hanno fornito risultati meno accurati con valori di R^2 compresi tra 0,21 e 0,45. È interessante notare che il grado di correlazione è diventato minore con un elevato deficit di pressione di vapore (VPD) in entrambe le cultivar. Nel complesso, l'approccio micro-tensiometrico unisce varie funzioni ideali per un sensore di campo:

1. la capacità di misurazioni dirette del potenziale idrico della pianta;
2. accuratezza e stabilità su un intervallo di potenziale idrico di interesse fisiologico per la maggior parte delle specie arboree da frutto;
3. capacità di produrre letture affidabili, continue, non presidiate e in tempo reale su orizzonti temporali lunghi (anche settimane o mesi).

D'altro canto, a prescindere dai non entusiasmanti risultati ottenuti su vite, questi sensori implicano di forare il tronco alla ricerca del contatto con lo xilema (operazione non sempre facile per un normale utilizzatore) ed il loro costo è tutt'altro che trascurabile.

Sullo stesso filone di misure di stato idrico della pianta automatizzate e continue, [734] hanno calibrato un sensore a cella di carico (CC) di nuova concezione e a basso costo applicato al tronco della vite, che produce un'uscita elettrica in mV [734]. Il sensore può essere immaginato come una sorta di micro-bilancia in

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura

appoggio sul tronco (Fig. 6.2). La calibrazione è stata condotta per 47 giorni (24 agosto-9 ottobre 2022) su sei viti adulte di Cabernet Sauvignon mature ben irrigate, racchiuse in camere di plastica per un monitoraggio ininterrotto della traspirazione (T) dell'intera chioma. Per ampliare l'intervallo dei valori di T, metà delle viti è stata cimata alla fioritura a otto foglie principali.

Le correlazioni tra la T media giornaliera misurata con il sistema ad inclusione e il valore di CC, calcolato come massimo diurno meno la lettura istantanea per 27 giorni per lo più sereni, hanno dato una corrispondenza molto stretta ($R^2 = 0,95-0,97$) per entrambi i livelli di superficie fogliare. Allo stesso modo, le stesse regressioni eseguite su dati mediati su quattro giorni prevalentemente nuvolosi hanno mantenuto una precisione simile ($R^2 = 0,93-0,94$). In sintesi, questi sensori, autocostruiti, si sono rivelati sufficientemente sensibili nel rilevare differenze

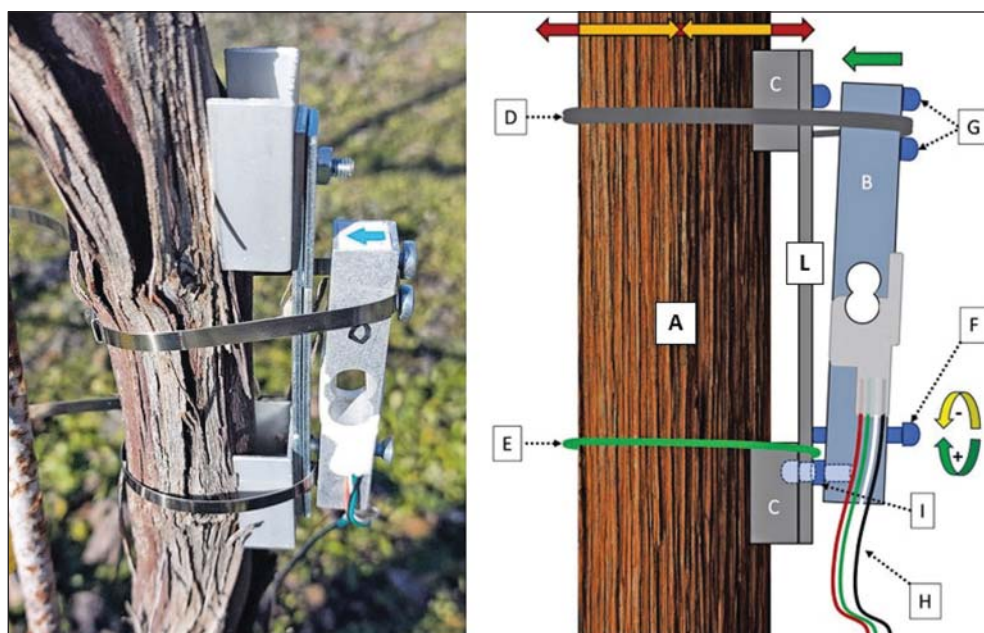


Figura 6.2 – Vista reale (sinistra) e rappresentazione schematica (destra) del sensore a cella di carico (LCW) installato sul tronco di una vite di Cabernet Sauvignon coltivata in campo. Nel pannello di destra, i singoli componenti sono mostrati come (A) tronco della vite; (B) corpo del sensore della cella di carico; (C) supporti a forma di U ancorati al tronco; (D) fascetta in acciaio inossidabile che tiene il carico della cella; (E) cavo in acciaio inossidabile che tiene il ponte metallico; (F) vite (20 × 4 mm) per la regolazione della pressione della cella di carico (girare a destra per + e a sinistra per –); (G) viti (10 × 4 mm) per il bloccaggio della cella di carico al ponte metallico; (H) cavi di cablaggio; (I) vite (20 × 4 mm) che sostiene la base di carico della cella e il tubo cilindrico elastico in poliuretano; e (L) piastra del ponte metallico. Ripreso da [734].

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura

di traspirazione indotte da una variazione delle dimensioni della chioma dovuta alla cimatura precoce. Il loro costo estremamente contenuto (circa 12 euro cadauno), un'installazione facile e completamente non invasiva e requisiti di manutenzione davvero minimi, incoraggiano un'adozione su più ampia scala.

Infine, un altro settore in cui si sta assistendo ad una crescente interazione tra strumenti genericamente riferibili alle tecnologie di “remote sensing” e alla necessità di fare fronte ai danni causati dai cosiddetti “eventi estremi” è relativo alla stima, da remoto, di danni da gelata tardiva o da grandine in vigneto [735]. In un paragrafo precedente abbiamo esaminato la fisiologia del danno da gelata tardiva e da grandine in vigneto e alcuni accorgimenti per “sfuggire” al danno o per “mitigarlo”. Considerando l'impatto potenzialmente devastante sulla produttività (spesso messa a repentaglio per due annate consecutive a seconda di gravità ed epoca del danno) il ricorso, dopo adeguata valutazione del rischio, ad un approccio di difesa passiva consistente nella stipula di un'assicurazione è certamente una delle opzioni principali. Tradizionalmente, la valutazione dei danni è affidata a periti assicurativi che si basano su campioni di campo e sulla loro esperienza, ma questa metodica è intrinsecamente soggettiva e non sempre rappresentativa della variabilità spaziale dei danni. Con l'aumento della frequenza di tali eventi, il trend in un certo senso “naturale” è quello di un probabile aumento delle polizze e, anche per questo motivo, entrambe le parti (aziende viticole e compagnie assicurative) mostrano un crescente e comune interesse nei confronti di metodi di stima del danno meno laboriosi, meno soggettivi e intrinsecamente più potenti in termini di discernimento e valutazione della variabilità spaziale del danno.

La figura 6.3 descrive una situazione che ben si accosta a quanto descritto: sul medesimo cordone permanente, due speroni, posizionati l'uno accanto all'altro, e quindi alla stessa altezza dal suolo, presentano danni da gelo tardivo totalmente diversi. Un ottimo esempio di “variabilità del danno” entro vite.

Non mancano le prime applicazioni di successo relative all'utilizzo di varie tecniche di remote sensing per la stima di danni da gelata tardiva o grandine. Alcuni indici di vegetazione (VI) come Red-Edge 7, NIR, EVI, MTVI1 e CARI, tutti calcolati da dati acquisiti da Sentinel-2 a media risoluzione, si sono dimostrati efficaci nello stimare una minore riflettanza della luce nei vigneti allevati a pergola dopo gravi danni da gelo tardivo [736] rispetto a vigneti non danneggiati. Inoltre, le stesse bande spettrali hanno avvalorato il ripristino di chiome pressoché complete a circa 40 giorni di distanza dopo la minima termica critica. È indubbiamente incoraggiante che, probabilmente grazie al breve intervallo di rivisitazione della costellazione Sentinel-2, la generazione di serie temporali e spaziali sia stata efficace per cogliere l'impatto della gelata tardiva. Il tipo di forma di allevamento a pergola, che forma una copertura verde continua quasi orizzontale, probabilmente facilita le prestazioni degli indici calcolati da risoluzioni spaziali basse o medie. Tuttavia, la robustezza di questo metodo richiederà l'associazione con i dati sulla resa o sulla qualità dell'uva e l'estensione a forme di allevamento a controspalliera che pongono, ovviamente, problematiche diverse di procedura di

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura



Figura 6.3 – Un'immagine ravvicinata di una porzione di un cordone speronato che presenta uno sperone in vegetazione non danneggiato e uno sperone adiacente invece pesantemente interessato da un danno da gelo tardivo. La vicinanza spaziale dei due speroni e, in pratica, la stessa distanza dal suolo, evidenziano una variabilità del danno “entro” vite comunque elevata e con ogni probabilità imputabile al tipo di gelata tardiva occorsa nel caso specifico. Foto dell'Autore.

acquisizione delle immagini. Il problema, peraltro, è stato di recente affrontato all'interno del progetto PRIN “Frost-UAV” che ambisce a definire un flusso di lavoro efficace per quantificare il grado di danno nei vigneti utilizzando immagini ad alta risoluzione catturate da UAV. L'analisi preliminare dei dati al termine della prima stagione monitorata (2024) si è focalizzata sulla valutazione del miglior protocollo operativo, prendendo in esame sia il piano di volo (quota, velocità, sovrapposizione delle immagini, angolo di utilizzo del sensore, ecc.), sia il tipo di sensore e relativa elaborazione delle immagini. In particolare, è stato previsto un duplice approccio, spettrale e geometrico, non solo per identificare i giovani germogli danneggiati, ma soprattutto per quantificare l'incidenza di danno. I rilievi sono stati effettuati pochi giorni dopo gli eventi di gelata (Fig. 6.4) e grandine (Fig. 6.5) e, ancora, a circa 2-3 mesi di distanza, allo scopo di valutare l'entità della reazione vegetativa stimolata dal danno. La metodologia messa a punto è il risultato di test in cui sono stati modulati 3 parametri operativi: quota di volo (10, 25, 50, 100 m), velocità operative (1, 3, 5 m/s), punto di vista della camera (nadirale o angolata 45°). Il risultato migliore come compromesso tra velocità operativa di acquisizione, processamento delle immagini e accuratezza del dato è stato ottenuto con quota volo 25 m, velocità di avanzamento 3m/s e camera in posizione nadirale. Punti di forza di questo approccio sono: il ridotto budget di

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura

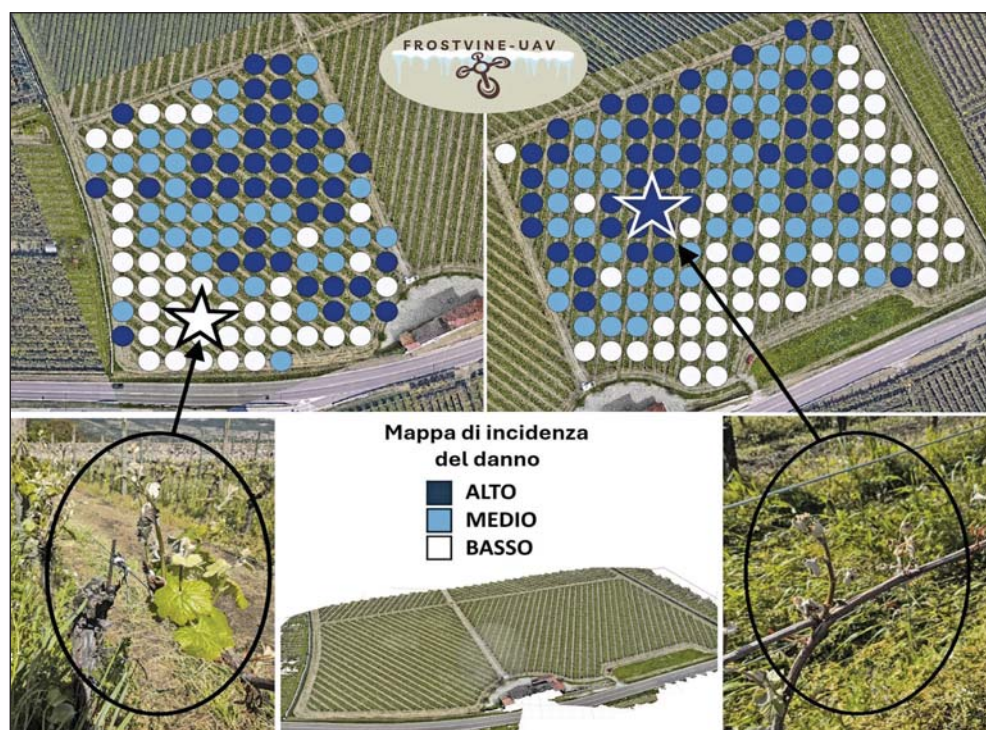


Figura 6.4 – *Mappa tematica di intensità del danno da gelata tardiva a livello spaziale ottenuta con drone commerciale equipaggiato con camera RGB da 20 Megapixel. Le immagini sono state acquisite nella primavera 2024 in vigneti trentini in cui il danno variava da basso (foto in basso a sinistra) ad elevato (foto in basso a destra). Foto di Salvatore Di Gennaro.*

acquisto di un drone in grado di effettuare questo monitoraggio (2.000-3.000€), la semplicità di utilizzo che non richiede know-how avanzato per effettuare correzione radiometrica delle immagini, la disponibilità di software commerciali e gratuiti ad alto livello di automazione per processare le immagini e la possibilità di monitorare una superficie di 1 ettaro in circa 4 minuti.

Le mappe di danno ottenute con questa metodologia, disponibili a breve distanza di tempo dal verificarsi dell'evento estremo, raggiungono una precisione di stima non inferiore all'85% e, pertanto, meritano crescente attenzione per tempestività e affidabilità delle stime ottenute.

Infine, l'ultimo arrivato, in termini di modellistica, è un approccio che unisce la creazione di ideotipi ideali e l'utilizzo di tecniche di meta-analisi dei dati. Un esempio su tutti: in presenza di un impatto crescente di stress idrici e termici severi, potrebbe essere molto utile prevedere quali sono le architetture della chioma che posso resistere meglio alle alte temperature mantenendo una buona efficienza in termini di scambio gassoso. Il modello impiegato è un generatore

6. Modelli, tool informatici e sistemi di supporto alle decisioni in viticoltura

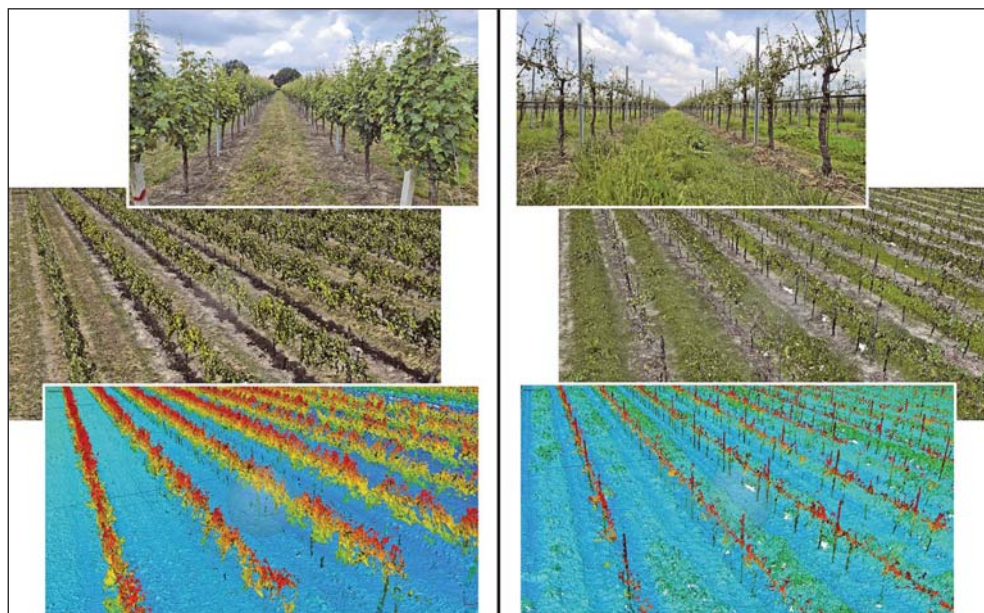


Figura 6.5 – A sinistra, dall'alto verso il basso, vista ravvicinata, panoramica e mappa tematica 3D di chiome integre ottenuta con volo da drone in tarda primavera 2024 in un vigneto di Trebbiano romagnolo del ravennate; a destra la medesima sequenza di immagini riferita ad un vigneto limitrofo fortemente danneggiato dalla grandine. I settaggi del piano di volo del drone sono gli stessi già descritti nella figura precedente. Foto di Salvatore Di Gennaro.

3D che eroga versioni strutturali diverse delle chiome in funzione di alcuni parametri critici di riferimento – nel caso specifico superficie fogliare, angolo fogliare e lunghezza dell'internodo – processando migliaia di dati ricavati da ricerche pregresse [737]. La principale conclusione di questo lavoro è che, mediando varie condizioni ambientali, i tratti di elevata superficie fogliare, internodi corti e angolo fogliare elevato (ovvero foglie tendenti alla verticalità) sono quelli che assicurano massime termiche fogliari più contenute ed effetti moderati su assimilazione ed efficienza di uso dell'acqua.

Stefano Poni



edagricole

Viticoltura e cambiamento climatico

Sfide e prospettive

Coltivazioni arboree/Viticoltura



Per informazioni

Acquista

Scopri i libri
del catalogo
Edagricole

Contattaci

Servizio clienti libri:
libri.edagricole@tecnichenuove.com
Tel. 051.6575833