

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente

Corso di Laurea magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie

METODI TRADIZIONALI E INNOVATIVI PER LA DETERMINAZIONE DELLO
STRESS IDRICO. PRIMI RISULTATI DI UNA SPERIMENTAZIONE ANNUALE
IN GLERA

Relatore:

Prof.ssa Lucia Bortolini

Correlatore:

Dott. Nicola Belfiore

Laureando:

Giacomo Parolin

Matricola n.

1243114

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

RIASSUNTO

I cambiamenti climatici, nello specifico le alte temperature e la carenza idrica, sono argomento di importanti discussioni a livello globale e stanno guidando sempre di più le scelte operate.

In particolare, la risorsa idrica viene vista come una risorsa da proteggere e da utilizzare in maniera razionale. Perciò, nel campo agrario, e nello specifico il quello viticolo, si stanno studiando metodi innovativi per la gestione di questa risorsa.

Questa sperimentazione, condotta durante la stagione vegetativa 2021, ha come obiettivo primario la verifica, tramite analisi di alcuni indici come inclinazione fogliare, potenziale idrico, conduttanza stomatica e temperatura fogliare, di eventuali condizioni di stress idrico in due tesi oggetto di studio (irrigata e non irrigata); in secondo luogo, vuole validare un sistema di gestione dell'irrigazione, tramite una stereo camera fissa in vigneto (WCAM), tramite il rilievo di inclinazione e temperatura fogliare, dati utili per la sua calibrazione.

La sperimentazione ha evidenziato come gli episodi di stress idrico si sono concentrati verso la fine del periodo di rilievo (agosto-settembre 2021), probabilmente perché gli eventi piovosi che si sono manifestati nel mese di luglio hanno eguagliato le condizioni delle tesi, portando comunque a un calo della produzione e ripercussioni sulla qualità delle uve.

Per quanto riguarda la validazione del sistema a stereo camera fissa, lo studio di correlazione ha dimostrato come, nel caso della temperatura fogliare vi sia una forte correlazione tra dati misurati e rilevati da WCAM, mentre vi è discordanza nei valori relativi all'angolo fogliare. Quindi, il metodo WCAM, allo stato attuale, non è utilizzabile perché le variabili che influenzano quest'ultima analisi sono molteplici e non sempre ponderabili. Per questo lo studio di affinamento della tecnologia è tutt'ora in essere.

ABSTRACT

Climate change, specifically high temperatures and water scarcity, are the subject of important global discussions and are increasingly driving the choices made.

In particular, the water resource is seen as a resource to be protected and used in a rational way. Therefore, in the agricultural field, and specifically the viticultural one, innovative methods for the management of this resource are being studied.

This experiment, carried out during the 2021 vegetative season, has as its primary objective the verification, by analysis of some indices such as leaf inclination, water potential, stomatal conductance and leaf temperature, of possible water stress conditions in two theses under study (irrigated and not irrigated); secondly, it wants to validate an irrigation management system, through a fixed stereo camera in the vineyard (WCAM), through the elevation of inclination and leaf temperature, useful data for its calibration.

The trial showed that episodes of water stress were concentrated towards the end of the relevant period (August-September 2021), probably because the rainy events that occurred in July matched the conditions of the theses, however leading to a decrease in production and repercussions on the quality of the grapes.

With regard to the validation of the fixed stereo camera system, the correlation study showed that in the case of leaf temperature there is a strong correlation between data measured and detected by WCAM, while there is discordance in the values related to the leaf angle. Therefore, the WCAM method, at present, is not usable because the variables that influence this last analysis are multiple and not always ponderable. This is why the study of technology refinement is still ongoing.

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1. SICCITÀ E CARENZA IDRICA	1
1.2. STATO IRRIGUO DELL'ITALIA	3
1.3. L'IRRIGAZIONE DELLA VITE	4
1.4. SOSTENIBILITÀ DELL'IRRIGAZIONE	5
1.5. STRESS IDRICO E RESISTENZA DELLA VITE	9
1.6. I DANNI NELLA VITE DA SURPLUS IDRICO	12
2. SISTEMI DI MISURA DELLO STATO IDRICO NELLA VITE	13
2.1. METODI INDIRETTI	13
2.2. METODI DIRETTI	15
2.3. TERMOGRAFIA	19
2.4. INCLINAZIONE FOGLIARE	21
3. IL PROGETTO IRRIVISION	22
3.1. OBIETTIVO DELLA TESI	23
4. MATERIALI E METODI	24
4.1. INQUADRAMENTO SITO SPERIMENTALE	24
4.2. INCLINAZIONE FOGLIARE	26
4.3. CONDUTTANZA STOMATICA	27
4.4. POTENZIALE IDRICO	28
4.5. TERMOGRAFIA	29
4.6. VENDEMMIA SPERIMENTALE	30
4.7. POTATURA INVERNALE	32
5. RISULTATI E DISCUSSIONE	32
5.1. CARATTERIZZAZIONE AREA DI STUDIO	32
5.2. INCLINAZIONE FOGLIARE	34
5.3. CONDUTTANZA STOMATICA	36

5.3.1	Correlazione Inclinazione fogliare - conduttanza stomatica	38
5.4.	POTENZIALE IDRICO	39
5.4.1	Correlazione Potenziale idrico – conduttanza stomatica	40
5.5.	TERMOGRAFIA	41
5.6.	VENDEMMIA SPERIMENTALE	42
5.7.	POTATURA INVERNALE	45
5.8.	CORRELAZIONE MISURE WCAM – MISURE MANUALI	45
6.	CONCLUSIONI	48
7.	BIBLIOGRAFIA	50

1. INTRODUZIONE

1.1 SICCIÀ E CARENZA IDRICA

Sebbene siamo passati solamente vent'anni dall'inizio del XXI secolo, i paesi europei e mediterranei hanno già affrontato numerosi eventi siccitosi (ad esempio, nel 2003, 2010, 2013, 2015 e 2018) (Hanel *et al.*, 2018) e si prevede un futuro aumento del numero e dell'intensità di tali eventi (Caloiero *et al.*, 2018). Gli eventi di siccità possono avere gravi ripercussioni sulle risorse idriche, sulla produzione agricola e sulle attività socioeconomiche, causando danni molto costosi (Caloiero, 2018).

La siccità deriva dalla carenza idrica e dalla moltitudine di fattori che determinano la domanda di acqua (es: aumento demografico), a sua volta la carenza idrica è causata da fattori biofisici (es. precipitazioni), riflettendo una mancanza di acqua di qualità.

Questa scarsità idrica, si stima, colpirà il 30% dei terreni coltivati o a pascolo e il 25% nelle colture pluviali, causando un danno del 30% delle colture ogni quattro anni. (Fao, 2020). Dal report Fao 2020 si evince che, sono presenti 1,2 miliardi di persone in aree in cui carenza idrica e siccità sono molto frequenti, aumentando di molto il carico idrico in aree irrigate. Di questi circa la metà vive in aree rurali, ciò sta a significare che una persona su sei sul pianeta deve affrontare gravi carenze idriche.

Se analizziamo i dati in termini di ettari colpiti, 128 milioni di Ha di terreni coltivati senza sistema irriguo e 656 milioni di Ha naturali a pascolo sono soggetti a siccità frequentemente, mentre, 171 milioni di Ha di terreni irrigati sono soggetti ad elevato stress idrico, per mancanza di risorsa. Questo implica che circa l'11% dei terreni non irrigati e il 14% dei pascoli subiscono eventi siccitosi ricorrenti e più del 60% dei terreni coltivati sono fortemente stressati dalla carenza idrica (Fao, 2020).

In tutto il mondo l'utilizzo di acqua dolce è cresciuto di sei volte nel corso degli ultimi 100 anni e continua a crescere ad un tasso annuo pari a circa 1% dagli anni '80. In buona parte la crescita è attribuibile alla combinazione tra crescita della popolazione, sviluppo economico e cambiamenti nei modelli di consumo.

Attualmente l'agricoltura è responsabile di circa l'80% del totale dei prelievi di acqua in tutto il mondo, principalmente per scopi irrigui, ma anche per l'allevamento e l'acquacoltura (Fao, 2020).

A livello mondiale l'agricoltura rappresenta appena il 4% del prodotto interno lordo (PIL), con un contributo medio per paese del 10,39% in trend crescente (Unwater, 2021). Quindi, aumentare i volumi di acqua indirizzati all'agricoltura risulterebbe essere deleterio, perché si destinerebbe un aumento della risorsa ad un settore che, dal punto di vista economico, è poco rilevante.

Secondo stime della FAO del 2017, entro il 2050 il mondo avrà bisogno del 60% di cibo in più, mentre la produzione alimentare da agricoltura irrigua crescerà di oltre il 50%.

Però, i quantitativi di acqua necessari per questi sviluppi non sono disponibili ma potranno aumentare solamente del 10%.

Quindi, l'ottimizzazione dell'uso dell'acqua, un utilizzo sostenibile e l'aumento della resilienza idrica dovrebbero essere obiettivi primari per l'agricoltura. Questo vale in particolare per la viticoltura, dove un compromesso tra perdita di rendimento e guadagno di qualità può essere economicamente molto significativo per i produttori e altamente modificato dall'approvvigionamento idrico (Scholasch e Rienth, 2019).

Il riscaldamento globale porta alla riduzione delle precipitazioni (o ad una diversa distribuzione) e ad un bilancio idrico della vite sempre più negativo durante il ciclo vegetativo (Schultz e Stoll, 2010; van Leeuwen e Destrac-Irvine, 2017). Condizioni, queste, che rendono più difficile il mantenimento delle produzioni agricole e contemporaneamente aumentano i rischi dei periodi di siccità.

Per i viticoltori, esistono diverse strategie di mitigazione della siccità come recensito da Medrano *et al.* (2015). Questi, consistono in diverse pratiche agronomiche come l'adattamento della densità di impianto, la corretta scelta della cultivar e del portinnesto (Ollat *et al.*, 2016; Romero *et al.*, 2018) e, infine, l'installazione di sistemi di irrigazione sempre più efficienti. Questi ultimi, rappresentano un nuovo impegno particolarmente faticoso per la maggior parte dei coltivatori, soprattutto in quelle regioni dove, storicamente, la coltivazione della vite è avvenuta senza che fosse necessario monitorare né lo stato idrico della vite, né la disponibilità della risorsa idrica (Scholasch e Rienth, 2019).

1.2 STATO IRRIGUO DELL'ITALIA

Analizzando il 6° Censimento generale dell'Agricoltura si può desumere che i volumi di acqua irrigua utilizzati in un'annata agraria non particolarmente problematica, sono pari a 11.618 milioni di m³, in 708.449 aziende che irrigano 2.489.914,70 ha. In questa analisi sono stati utilizzati alcuni indicatori quali 1) utilizzo potenzialità irrigue: percentuale superficie irrigata/superficie irrigabile, 2) propensione all'irrigazione: SAU irrigata/SAU irrigabile e volumi di acqua/ha in annata agraria. Questi vengono utilizzati per ricostruire il quadro irriguo nazionale, evidenziare con quale intensità viene utilizzata la pratica irrigua, concentrando l'attenzione sulla sostenibilità ambientale in relazione alle diverse tipologie aziendali.

Nel complesso, la propensione all'utilizzo delle potenzialità irrigue e la propensione all'irrigazione sono rispettivamente del 65,6 e 19,3 per cento; mentre i volumi d'acqua utilizzati per ettaro di superficie irrigata sono pari a 4.666,1 m³ (Istat, 2014).

È interessante il trend di tali fenomeni mostrato dalle aziende in relazione alle dimensioni, in valore assoluto, della superficie irrigata: all'aumentare della superficie irrigata aumentano i volumi irrigui unitari utilizzati, con valori che vanno dai circa 3.000 m³ per le aziende con meno di un ettaro irrigato a più di 7.000 per quelle con 100 ettari e più irrigati; al contempo la propensione all'irrigazione diminuisce da 34,5% della SAU irrigata all'11,6%. Ciò evidenzia da una parte che le aziende più piccole utilizzano con maggiore moderazione l'acqua a disposizione e che le grandi, visto le considerevoli risorse economiche necessarie alla realizzazione dell'irrigazione, attrezzano per tale pratica quote della SAU via via minori.

Oltre a ciò, i valori dei m³ utilizzati per Ha e sistema di irrigazione adottato mostrano un trend che ci riporta direttamente ai tassi di efficienza di utilizzo dell'acqua dei medesimi, crescenti all'aumentare dell'inefficienza: si passa infatti dai circa 3.000 m³/Ha irrigato nel caso della microirrigazione ai 3.500 dell'aspersione, ai 5.500 dello scorrimento superficiale e infiltrazione laterale ai 15.000 della sommersione. È molto importante, quindi, che metodi irrigui scelti abbiano un'efficienza e uniformità di distribuzione corrette, ai fini di un utilizzo oculato e sostenibile dell'acqua evitando sovrairrigazioni, con il conseguente spreco irriguo.

Passando in rassegna le principali aree nazionali, il Nord-ovest rappresenta il sistema agricolo maggiormente idrovorivo con circa 6.800 m³/Ha, mentre nel Nord-est si registrano

valori minimi con 2.500 m³/Ha. Per quanto riguarda Centro e Sud, troviamo valori intorno ai 3.500 m³/Ha e, infine, nelle Isole intorno a 5.000 m³/Ha.

1.3 L'IRRIGAZIONE DELLA VITE

Nonostante sia una coltura tradizionalmente non irrigata, tipica delle regioni semiaride che si è adattata bene al clima mediterraneo (Schultz e Stoll, 2010), la vite può andare incontro a tutta una serie di problematiche che possono derivare sia dalla carenza d'acqua nel suolo sia dalle conseguenze dei cosiddetti stress multipli estivi (radiativi, termici e idrici). Infatti, l'effetto congiunto dell'aumento della temperatura e della riduzione delle piogge durante lo sviluppo vegetativo, possono generare scadimenti qualitativi delle produzioni, inefficienze fisiologiche, sfasamento della maturazione, alterazione dei contenuti zuccherino, acido, aromatico, ecc, fino ad arrivare al disaccoppiamento della maturazione fisiologica da quella tecnologica (Palliotti *et al* 2015).

Per cercare di ovviare a questi inconvenienti e per tutelare le produzioni, si sta diffondendo sempre più la pratica dell'irrigazione che ormai interessa molte regioni viticole mondiali a cui spesso si è obbligati a ricorrere a causa dei cambiamenti climatici in atto che sottopongono sempre di più la vite, come detto, a stress di varia natura.

L'irrigazione, quindi, è una pratica agronomica a cui si fa ricorso diffusamente in molte zone viticole caldo-aride di tutto il mondo, nelle quali diviene irrinunciabile per le condizioni climatiche e pedologiche.

In questi casi si tratta, dunque, dell'irrigazione eseguita per ovviare a momentanei o prolungati periodi di stress idrico. Va, inoltre, valutato l'approccio e l'impatto dell'irrigazione sulla quantità e qualità della produzione viticola destinata a produrre vino. Di fatto, l'irrigazione comporta un incremento di produzione, mentre solo nelle zone caldo-aride conduce a miglioramenti qualitativi, quando la produzione per pianta è contenuta entro limiti sopportabili dall'antagonismo peso/qualità globale (Fregoni, 2013). Potremmo dire, però, che un aumento in termini quantitativi potrebbe portare a maggiori benefici economici (Sullivan, 2002), nell'ipotesi che la quantificazione dei ricavi e, a seguire, dei profitti, venga fatta considerando la maggior quantità di prodotto venduto. Inoltre, grazie alle tecnologie di irrigazione basate sul risparmio idrico (D'odrigo *et al.*, 2018) aumenta la sostenibilità di questa pratica con inevitabili benefici ambientali, ai quali ogni attività agricola deve mirare.

1.4 SOSTENIBILITÀ DELL'IRRIGAZIONE

Paradossalmente si potrebbe verificare che un aumento dell'efficienza dell'irrigazione a livello aziendale riduca i consumi d'acqua propri dell'azienda senza però che tale risparmio si traduca in un reale aumento della disponibilità idrica di bacino (Unver *et al.*, 2017).

Questo fenomeno viene definito “paradosso dell'irrigazione” causato da un aumento del consumo locale grazie a un sistema irriguo più efficiente (Borsato *et al.*, 2019).

La sostenibilità si estrinseca, invece, nelle perdite di acqua non consumata su scala aziendale, le quali vengono recuperate e riutilizzate su scala di bacino e, ancor più, l'aumento dell'efficienza dell'irrigazione su scala aziendale potrebbe anche aumentare il consumo di acqua una volta che l'azienda passa a colture con necessità idriche più elevate (Grafton *et al.*, 2018). Pertanto, le implicazioni sostenibili dell'uso dell'acqua si riferiscono a precondizioni ambientali integrate che soddisfano la domanda della società. In altre parole, una sorta di criterio di "semi-sostenibilità" deve combinare il miglior approccio possibile adottato dalle esigenze umane contro il conseguente impoverimento ambientale (Falkenmark, 1997).

Quindi, nella progettazione di un sistema irriguo è necessario porre l'attenzione alla misura di efficienza e uniformità di distribuzione.

L'efficienza dell'irrigazione definisce l'efficacia di un sistema di irrigazione che fornisce acqua a una data coltura o area erbosa. L'efficienza può essere calcolata come il rapporto tra l'acqua utilizzata e l'acqua applicata ed è espressa in percentuale (Burt *et al.* 1997). L'efficienza dell'irrigazione è difficile da quantificare pertanto, l'uniformità della distribuzione viene spesso misurata come indicatore dell'efficienza potenziale per le aree irrigate. L'irrigazione può essere uniforme e inefficiente a causa di una cattiva gestione, ad esempio la sovrairrigazione, tuttavia, l'irrigazione non può essere non uniforme ed efficiente. Di conseguenza, l'uniformità dell'irrigazione può essere una buona indicazione della potenziale efficienza dell'irrigazione. L'uniformità della distribuzione dell'acqua è una misura della variabilità della profondità di applicazione su una data area. Sono stati sviluppati due metodi per quantificare l'uniformità: l'uniformità di distribuzione (DU) e il coefficiente di uniformità di Christiansen (CU).

L'uniformità di distribuzione dell'irrigazione con il metodo DU può essere calcolata con la seguente equazione (Merriam e Keller 1978): $DU_{lq} = D_{lq}/D_{tot}$, dove D_{lq} è l'altezza media

di acqua irrigua del quartile inferiore, mentre D_{tot} è l'altezza media di acqua irrigua sull'intera superficie. Il quartile inferiore rappresenta il 25% dell'intera superficie che riceve la minor quantità di acqua.

L'uniformità della distribuzione è solitamente rappresentata come un rapporto, piuttosto che una percentuale (Burt *et al.* 1997) per indicare la differenza tra uniformità ed efficienza. Questo metodo enfatizza le aree che ricevono meno irrigazione concentrandosi sul quartile inferiore. Burt *et al.*, nel 1997 ha definito misure comuni di rendimento dell'irrigazione, che hanno discusso la standardizzazione e il chiarimento delle definizioni dell'irrigazione e le misurazioni quantificate dell'irrigazione. L'uniformità di distribuzione del quartile inferiore utilizza un intervallo minimo definibile piuttosto che il valore minimo assoluto (valore zero).

Il coefficiente di uniformità tratta la sovrairrigazione e la sottoirrigazione in egual misura rispetto alla media, e può essere calcolato con la formula di Christiansen:

$$CU=1-\frac{\sum |V_i-\bar{V}|}{\sum \bar{V}}$$

dove V_i si riferisce al volume del quartile inferiore e \bar{V} si riferisce al volume medio (Christiansen 1942). Il problema è che, sia la sovra-irrigazione che la sotto-irrigazione si verificano nello stesso sistema potrebbero annullarsi a vicenda, il che si tradurrebbe in un valore di CU relativamente elevato (Baum *et al.*, 2005).

Pratiche e tecnologie per un'irrigazione sostenibile

Considerando questi due importanti indicatori, un sistema irriguo interessante è la micro-irrigazione e soprattutto quella a goccia

La micro-irrigazione fornisce un apporto costante d'acqua nella zona radicale delle colture ed è stato dimostrato che aumenta la fertilità del terreno, grazie all'erogazione, nel tempo, di piccole quantità di acqua che ne migliorano l'efficienza rispetto ai metodi di irrigazione convenzionali. I sistemi di micro-irrigazione offrono un controllo di alto livello sulle applicazioni dell'acqua. Questi sistemi sono anche molto economici in quanto utilizzano un basso volume d'acqua, a bassa pressione, con conseguente basso costo energetico (Varma *et al.*, 2006) e azzerano la percolazione e il deflusso superficiale. Inoltre, grazie alla ridotta area umida, viene persa meno acqua per evaporazione. Con questo sistema irriguo, accanto alla produttività dell'azienda (resa e produzione), sono aumentati anche il reddito degli agricoltori e la sicurezza alimentare oltre che la riduzione il costo della

manodopera. Sono stati osservati anche miglioramenti nella qualità delle colture irrigue a goccia (Madramootoo e Rigby, 1991).

In generale, i sistemi di micro-irrigazione sono facili da installare. Il livellamento del terreno non è necessario perché i componenti del sistema, le valvole di regolazione della pressione e gli emettitori di compensazione della pressione, consentono una distribuzione uniforme dell'acqua e un tasso di applicazione. Inoltre, tali sistemi, hanno permesso lo sviluppo e l'applicazione di distributori di fertilizzanti che possono essere collegati a sistemi di micro-irrigazione per consentire la fertirrigazione, migliorando così la gestione dei nutrienti delle colture. Sia l'acqua che il fertilizzante possono essere applicati durante la stagione di crescita in quantità adeguate al fine di soddisfare le esigenze delle colture. Inoltre, l'incidenza dell'invasione e delle infestazioni parassitarie di ogni genere (insetti e funghi), si verifica meno frequentemente grazie a una quantità di acqua bilanciata alle necessità della pianta, evitando così una sovrirrigazione che potrebbe aumentare l'umidità dell'ecosistema, condizione favorevole al proliferare dei parassiti. In questo modo si riduce sia il lavoro necessario per proteggere le colture, sia l'uso di pesticidi/erbicidi ottenendo, contemporaneamente, un risparmio finanziario complessivo per l'agricoltore (Varma *et al.*, 2006).

Importanti progressi sono stati compiuti con questa tecnologia e le innovazioni consentono una serie più diversificata di applicazioni.

L'intasamento e la filtrazione inefficiente dell'acqua sono stati tradizionalmente problemi importanti della micro-irrigazione. L'adozione di dispositivi di filtrazione della sabbia e vaglio funzionali ed economici hanno contribuito a superare questo problema e ha portato alla fine ad un uso esteso della micro-irrigazione in aree con acqua di bassa qualità.

La micro-irrigazione può essere combinata con la programmazione dell'irrigazione di precisione, consentendo l'applicazione di volumi irrigui e di turni d'irrigazione che si basano sul reale fabbisogno idrico di una coltura. Nell'irrigazione di precisione, la programmazione è sincronizzata con le condizioni atmosferiche, con l'umidità del suolo, con lo stato idrico della pianta e con il tasso di evapotraspirazione di una coltura (Jones, 2004). L'irrigazione di precisione consente di risparmiare acqua e denaro, e riduce il dilavamento e il consumo di energia.

Lo sviluppo di sensori di riflettometria a dominio di tempo e frequenza (TDR, FDR) che forniscono informazioni sui livelli di umidità del suolo in tempo reale ha permesso

l'automazione dei sistemi di irrigazione basata su informazioni scientifiche (in passato, gli agricoltori decidevano quando irrigare in base all'intuizione, alle condizioni atmosferiche e allo stato fisico della pianta e del suolo). I sensori utilizzati per la programmazione in tempo reale dell'irrigazione tengono conto del tipo di coltura, della fase di crescita, del tipo e dello stato di umidità del suolo al fine di escludere ipotesi soggettive e irrazionali di irrigazione e fornire agli agricoltori strumenti efficienti e precisi per determinare quando irrigare, il volume e la durata dell'adacquamento. Le moderne tecnologie consentono di disporre direttamente sul campo di dati in tempo reale sullo stato idrico del suolo, consentendo agli agricoltori decisioni in materia di irrigazione. Inoltre, con le suddette tecnologie avanzate, le operazioni di irrigazione possono essere attivate automaticamente, applicando costantemente una quantità accurata di acqua alle colture (evitando inutili eccessi o applicazioni idriche deficitarie) (Madramootoo e Morrison, 2013).

Un recente lavoro di Jaria e Madramootoo (2011) ha dimostrato come i sensori automatici di umidità del suolo e le misurazioni meteorologiche possono essere utilizzati in un sistema computerizzato, per determinare gli inneschi di irrigazione, consentendo così all'agricoltore di programmare in modo migliore e più preciso le applicazioni di irrigazione a goccia. Una migliore conoscenza delle interazioni tra la pianta, il suolo e il continuum dell'acqua ha aperto la strada per meccanismi innovativi di regolazione dell'acqua.

L'essiccazione parziale della zona radicale (PRD, Parzial Root Drying) è un'altra strategia che può essere utilizzata con la micro-irrigazione per un uso più efficiente dell'acqua di irrigazione. La tecnica prevede che solo la metà del sistema radicale di una coltura sia esposta, alternativamente, a bagnatura. In questo modo, le radici del lato irrigato sono mantenute in uno stato idrico favorevole, mentre le radici della zona disidratata sintetizzeranno composti chimici, il più importante dei quali è l'ABA, che vengono trasportati, attraverso il flusso xilematico, alle foglie. In risposta ad ABA, le cellule di guardia perdono turgore e gli stomi si chiudono. In questo modo si riducono la conduttanza stomatica, la traspirazione e la crescita degli organi della pianta favorendo un contemporaneo aumento dell'efficienza nell'uso dell'acqua (WUE) Loveys *et al.*, 2000; Stoll *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2001; Souza *et al.*, 2003. La frequenza alternata è funzione del tipo di coltura, dello stadio di crescita e del fabbisogno idrico specifico. Questa tecnica

si basa sulla comprensione dei meccanismi che controllano la traspirazione, e richiede una gestione sofisticata e un monitoraggio altamente accurato (Mccarthy *et al.*, 2002).

1.5 STRESS IDRICO E RESISTENZA DELLA VITE

Lo stress da deficit idrico è una condizione, temporanea o prolungata, di assenza o di carenza di acqua a livello di terreno. Per definizione, è la condizione in cui l'acqua diventa fattore limitante per lo svolgimento delle normali funzioni delle piante ed è il fattore che più di ogni altro condiziona la crescita delle piante e le produzioni agricole in tutto il mondo (Boyer, 1982).

Questo stato colpisce la crescita vegetativa in diversi modi a seconda della gravità e del momento della stagione in cui si verifica. La prima risposta fisiologica allo stress da deficit idrico è una riduzione della crescita dei germogli, che colpisce principalmente i germogli secondari, prima che la crescita del germoglio principale sia ridotta e l'apertura degli stomi sia regolata (Lebon *et al.*, 2006; Pellegrino *et al.*, 2005). Con l'aumento del deficit idrico, la vite chiude gli stomi (riduzione della conduttanza stomatica) al fine di limitare le perdite d'acqua attraverso la traspirazione. Questa strategia conservativa mantiene alto il potenziale idrico della pianta ma comporta inevitabilmente una riduzione della fotosintesi (Keller, 2010). Poiché la riduzione della crescita precede la riduzione della fotosintesi, durante la fase dello stress idrico aumenta la quantità di glucidi disponibili, una parte dei quali viene destinata alle bacche, che in questa fase rappresentano un sink, migliorandone la qualità attraverso una maggiore produzione di composti aromatici, polifenolici e zuccherini van Leeuwen *et al.*, 2009).

I meccanismi fisiologici alla base della regolazione stomatica coinvolgono sia segnali idraulici che ormonali (Bonada *et al.*, 2018; Tombesi *et al.*, 2015). La regolazione ormonale agisce attraverso l'accumulo dell'acido abscisico (ABA) nelle foglie il quale, come già detto, agendo direttamente sulle cellule di guardia, determina la perdita turgore e la conseguente chiusura degli stomi (Coupel-Ledru *et al.*, 2017).

Studi storici indicano che la sintesi ABA, attraverso la via isoprenoide, avviene principalmente nelle radici, seguita dal trasporto alle foglie, dove agisce sulla regolazione stomatica (Simonneau *et al.*, 1998). Tuttavia, la letteratura scientifica recente sottolinea che la maggior parte di ABA è presumibilmente prodotto all'interno delle foglie e, successivamente trasportato alle radici, dove aiuta a mantenere i livelli normali di ABA,

determinando la crescita radicale. Quindi, la regolazione stomatica è probabilmente innescata dall'ABA prodotto nelle foglie in combinazione con altri segnali più rapidi (Christmann *et al.*, 2007). Questi segnali sono di natura idraulica e causati da cavitazioni che si verificano nei vasi xilematici, quando la domanda di evapotraspirazione non può essere soddisfatta dal contenuto di acqua del suolo. Come dimostrato da Tombesi *et al* 2015, e da Belfiore *et al* 2021, sono proprio i segnali idraulici che innescano la chiusura stomatica nelle prime fasi dello stress idrico.

Questo crea una pressione all'interno dello xilema così alta che le molecole di gas dall'acqua si espandono e riempiono i vasi xilematici, che si traduce nella formazione di emboli e, quindi, una diminuzione della conduttività idraulica (Knipfer *et al.*, 2016; Tramontini *et al.*, 2014). In generale, più organi distali sono più sensibili all'embolia rispetto a più parti basali, come i fusti (Hochberg *et al.*, 2015). La conduttività di questi vasi xilematici, però, può essere riparata in presenza di una pressione radicale positiva, durante la notte, quando la traspirazione è ridotta. In questo modo le radici possono accumulare soluti all'interno dello xilema in concentrazioni superiori a quelle del suolo, riportando l'acqua all'interno del vaso tramite osmosi (Holbrook e Zwieniecki, 1999; Knipfer *et al.*, 2015). Questo processo di riparazione può avvenire in assenza di pressione radicale, ma è guidato da un tessuto associato ai vasi come ad esempio cellule e fibre del parenchima (Knipfer *et al.*, 2016)

Un altro aspetto che può influenzare la regolazione dell'uso di acqua sotto deficit idrico è la tessitura. La tessitura è un parametro pedologico che classifica il terreno in base alla composizione percentuale delle sue particelle solide, distinte in classi granulometriche. Nello specifico, la porzione più interessante è la terra fine, la quale si divide in sabbia, limo ed argilla (Massei, 2018). La diversa combinazione in percentuali variabili, fa sì che si possano classificare diverse tipologie di suoli, con caratteristiche distinte, date dalle percentuali di terra fine diverse.

Per esempio, un terreno ricco di argilla, in condizioni di siccità, sarà un terreno più compatto e di conseguenza potrà aumentare la chiusura stomatica, diminuire il grado di formazione dell'embolia e modulare la concentrazione di ABA nelle foglie (Tramontini *et al.*, 2014). La vite, inoltre, si adatterà morfologicamente a questa condizione, andando così a minimizzare la traspirazione, compresa una riduzione delle dimensioni delle foglie e della superficie (Gómez-del-Campo *et al.*, 2002; Hochberg *et al.*, 2017) e cambiando di

spessore e composizione della cuticola cerosa, limitando la perdita d'acqua (Schreiber e Riederer, 2001).

Per quanto riguarda la crescita delle radici, è generalmente riconosciuto che un lieve stress da deficit idrico aumenta il rapporto tra radici e germogli, perché la crescita delle radici è meno sensibile al deficit idrico rispetto alla crescita dei germogli poiché le piante destinano più risorse agli organi che acquisiscono la risorsa più limitante (Ledo *et al.*, 2018; Poorter *et al.*, 2012). Questo significa che l'apparato radicale, sotto stress idrico, aumenterà in dimensioni e numero di radici proprio per favorire l'esplorazione di maggiori volumi di suolo alla ricerca della risorsa idrica. Però, un deficit idrico troppo grave causerà la completa cessazione della crescita delle radici, perché il motore principale per lo sviluppo delle radici è l'acqua del suolo (Robbins e Dinneny, 2018).

Inoltre, quando la massa e i siti di assorbimento delle radici sono più concentrati vicino alla superficie del suolo, l'approvvigionamento idrico della vite dipende maggiormente dalle variazioni del contenuto di umidità del suolo che si verificano immediatamente al di sotto della superficie (Scholasch, 2018). Gli adattamenti morfologici delle radici dovuti alla disponibilità di acqua variano a seconda del tipo di portainnesto. È tuttavia riconosciuto che le viti più vecchie hanno apparati radicali più profondi e/o più sviluppati che le rendono più resistenti alla siccità rispetto alle viti più giovani (Bou Nader *et al.*, 2019; Grigg *et al.*, 2018).

I portainnesti noti per essere più tolleranti alla siccità sono gli incroci Berlandieri X Rupestris, come, ad esempio, il 110 Richter, il 1103 Paulsen o il 140 Ruggeri i quali hanno un angolo geotropico molto chiuso che in Rupestris è di circa 20°. Portainnesti meno resistenti allo stress idrico sono, per esempio, il Kober 5BB, l'SO4 (Riparia x Berlandieri), Riparia X Rupestris o Vinifera-Berlandieri (41B) (Ollat *et al.*, 2016).

Accanto a quelli già citati, lo stress idrico è responsabile di scadimenti qualitativi che nelle fasi finali della maturazione interessano anche l'aumento dei tannini astringenti nei vinaccioli, la riduzione della percentuale di antociani con la conseguente perdita di colore, l'aumento dell'acidità, e, infine, l'aumento della concentrazione zuccherina per disidratazione degli acini (anche se in Glera è stata osservata una riduzione significativa dopo 8 giorni di stress severo).

In assenza di sintomi visibili, dal punto di visto fisiologico l'aspetto più evidente e misurabile è l'aumento del potenziale fogliare, che in condizioni ottimali varia da -0,6 a -0,8 MPa. (Fregoni, 2013; Zurru *et al.*, 2017).

1.6 I DANNI NELLA VITE DA SURPLUS IDRICO

Per surplus idrico si intende un eccesso della quantità di acqua disponibile sia superficiale che all'interno del terreno. Anche in questo caso è una condizione temporanea o permanente, causata da eventi piovosi abbondanti o da pratiche di gestione irrigua errate, con volumi di adacquamento più elevati rispetto alle necessità e la capacità di assorbimento della pianta, soprattutto nella fase iniziale della stagione, dove, con i limitati consumi da parte della pianta, vi è una buona dotazione naturale nel suolo.

Questa condizione di surplus causa dei danni legati al fatto che l'acqua in eccesso occupa i macropori del suolo, occupando il posto dell'ossigeno e limitando di fatto il rifornimento alle radici (ipossia). I sintomi, a livello fisiologico, sono simili a quelli manifestati in condizioni di stress con la produzione di ABA e la conseguente chiusura degli stomi, diminuzione di attività fotosintetica e fisiologica, perdita di colore delle foglie per assenza di trasporto della linfa ascendente, foglie curvate verso il basso e, se il problema persiste, si assiste a un disseccamento e cascola fogliare. Inoltre, a livello radicale possono crearsi necrosi e marciumi ma la vite risponde a questa problematica con la formazione di un nuovo apparato radicale più superficiale (sempre che la fase sia transitoria altrimenti si arriva alla morte della pianta per asfissia radicale - anossia).

Se questa condizione avviene dalla fase precedente alla schiusura delle gemme fino alla fioritura, l'apparato radice manifesterà l'emissione di nuove radici molto ridotto con basso assorbimento di elementi nutritivi.

Altri effetti attribuibili all'eccesso idrico sono a carico della qualità delle bacche, avversità e gemme.

In primo luogo, la qualità delle bacche si abbassa con minor intensità del colore delle bacche, riduzione dell'aroma e incremento dell'acidità. Se il surplus colpisce varietà sensibili potremmo avere una spaccatura degli acini e riduzione di produzione e, infine, una tendenza degli acini a staccarsi durante le fasi di confezionamento e trasporto.

Poi, questo presupposto provoca una maggiore sensibilità ad alcune avversità come Botrytis, marciume radicale e disseccamento del rachide.

Infine, in alcune varietà gli eccessi idrici inducono una minore differenziazione delle gemme e, quindi, una minore produttività nell'annata successiva.

La permanenza idrica nel suolo può essere evitata tramite un accurato utilizzo del sistema irriguo e ad una corretta sistemazione superficiale e del sistema di drenaggio, con affossature o tubi drenanti. È fondamentale, infatti, che gli eccessi idrici (da pioggia o da irrigazione sovrabbondante) possano essere smaltiti nello strato al di sotto del suolo esplorato dalle radici, ripristinando rapidamente il corretto apporto di ossigeno nei macropori (Zurru *et al.*, 2017).

2. SISTEMI DI MISURA DELLO STATO IDRICO NELLA VITE

La determinazione dello stato idrico della vite può avvenire tramite metodi diretti ed indiretti: nel primo caso si stimano le condizioni idriche valutando fattori fisici e ambientali relativi al terreno o all'atmosfera, mentre i secondi misurano la risposta fisiologica della vite in diverse condizioni ambientali.

2.1 METODI INDIRETTI

Questi metodi si focalizzano sul calcolo del contenuto idrico del suolo e della quantità di acqua traspirata per stimare lo stato fisiologico della vite.

- 1) Misurazione del terreno: questa misurazione può seguire diversi livelli. Sono generalmente di facile applicazione, precisi e in parte integrati con sistemi di automazione, ma l'eterogeneità dei suoli richiede l'uso di molti sensori, anche in situazioni relativamente ridotte.

Un primo approccio può essere il metodo gravimetrico, il quale consiste nella pesatura di un'aliquota di campione prima e dopo l'essiccazione a 105 °C. Dalla differenza delle due masse si ottiene il contenuto idrico espresso in percentuale.

Il secondo metodo è quello tensiometrico, nel quale viene misurato il potenziale idrico, ovvero la forza con cui l'acqua è trattenuta nel suolo. Per la misurazione del potenziale possono essere utilizzati tensiometro e psicrometro.

Un altro è il metodo neutronico, ovvero la misura dell'umidità con una sonda a neutroni. Queste sonde, una volta inserite nel terreno, emettono radiazioni sotto forma di neutroni. Il numero di neutroni che tornano alla sonda dopo la collisione

atomica con gli atomi di idrogeno dell'acqua è in stretta correlazione con il contenuto umido del terreno.

Nel caso in cui si voglia utilizzare un approccio più rapido, la soluzione è il metodo elettromagnetico, che si basa sulla variazione della costante dielettrica del terreno, la quale misura la propensione del suolo a contrastare l'intensità di un campo elettrico al suo interno. La misura avviene usando diversi sensori (TDR e FDR) e, quindi, la misura è immediata.

- 2) Misurazioni atmosferiche: si basa sulla determinazione dell'evapotraspirazione. Questa misura si basa sul bilancio energetico totale. La radiazione netta (R_n) rappresenta l'energia disponibile alla superficie che viene in parte trasferita come riscaldamento o raffreddamento del suolo (G), mentre la maggior parte viene ripartita tra calore sensibile (H) e latente (LE).

$$R_n = G + H + LE$$

Ai fini pratici è dunque necessario misurare tutte le componenti del bilancio energetico per poter quantificare l'evapotraspirazione. Per la misura della radiazione netta e del riscaldamento/raffreddamento del suolo esistono in commercio diversi strumenti affidabili. Per quanto concerne, invece alla misura del calore sensibile e latente risulta più complessa, dato che vengono influenzati da diversi fattori, quali fase fenologica o le caratteristiche del vigneto e altrettanto complesso discernere il contributo del suolo da quello della vite.

- 3) Bilancio idrico: deriva dall'utilizzo simultaneo di misure del terreno dell'atmosfera, stimando così l'evapotraspirazione del vigneto nel suo insieme. Inizialmente viene determinata l'acqua traspirabile nel momento di capacità di campo del suolo. Questa sarà la risultante della differenza tra input (irrigazione, precipitazioni e apporti in falda) e output (evapotraspirazione, ruscellamento superficiale e percolazione). Date le difficoltà citate per il calcolo dell'evapotraspirazione, il calcolo dell'evapotraspirazione effettiva o reale E_{Te} , avviene moltiplicando la potenziale ET_0 per il coefficiente colturale K_c , variabile durante il ciclo colturale 0,35 a 0,9.

$$E_{Te} = ET_0 * K_c$$

L'uso contemporaneo di misurazione atmosferiche, modelli di bilancio idrico e dati satellitari rappresenta un approccio promettente per stimare l'ETe del vigneto, ma richiede ancora la calibrazione con misurazione dirette basate sulla pianta.

2.2 METODI DIRETTI

- 1) Analisi visiva: Un metodo semplice e largamente usato è quello dell'analisi visiva. L'osservazione dello stato degli apici vegetativi può fornire un'idea della condizione di stress della vite. Una pianta in buone condizioni idriche presenta gli apici vegetativi eretti, con la prima foglia espansa e posta appena sotto l'apice. La prima risposta al deficit idrico è il rallentamento della crescita con la prima foglia espansa che arriva a ricoprire l'apice. In condizione di forte stress, il germoglio cessa la crescita e l'apice si presenta tronco. Se l'episodio di stress è severo, si può assistere all'epinastia fogliare, ovvero il ripiegamento delle foglie verso il basso in seguito alla diminuzione della pressione di turgore. Questo metodo indiretto però è un metodo empirico, con una buona dose di soggettività, quindi poco affidabile, se non per una valutazione iniziale.
- 2) Potenziale idrico (Ψ_s): ovvero la pressione di suzione che la pianta deve esercitare per estrarre l'acqua dal suolo e tale forza aumenta al diminuire del contenuto idrico del suolo in quanto aumenta il potenziale matriciale. Lo strumento più usato, per misurare questo valore è la camera a pressione (o camera di Scholander). Poiché le misure risentono degli effetti di alcune componenti climatiche (radiazione luminosa, ventilazione, umidità), un'ora prima della misura, la foglia deve essere inserita in un sacchetto rivestito di alluminio (Begg e Turner, 1970). In questo modo si chiudono gli stomi, si arresta la traspirazione e si equilibra il flusso linfatico della foglia con la pianta e con il contenuto idrico del suolo e, inoltre, si annullano i citati effetti ambientali. Dopodiché la foglia viene recisa con un taglio netto ed inserita nella camera con il picciolo rivolto verso l'alto. Al diminuire del potenziale (valori sempre più negativi) aumenta la forza necessaria per estrarre l'acqua dai tessuti. La pressione esercitata (espressa in -MPa) per estrarre la prima gocciolina di linfa viene assunta come valore del potenziale idrico. I valori di potenziale idrico così ottenuti, vengono utilizzati per

classificare lo stress idrico secondo quanto riportato nella tabella 1 (Deloire e Heyns, 2011):

Stem Water Potential (-MPa)	Classificazione dello stress
$\Psi_s \geq -0,6$	Nulla
$-0,7 > \Psi_s > -0,9$	Da medio a moderato
$-1,0 > \Psi_s > -1,2$	Moderato
$-1,2 > \Psi_s > -1,4$	Da moderato a importante
$-1,4 > \Psi_s > -1,6$	Da forte a severo
$< -1,6$	Severo

Tab 1. Classificazione dello stress idrico attraverso i valori del potenziale idrico del fusto o di stem.

- 3) Conduttanza stomatica: è un parametro fisiologico, espresso in $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$, che fornisce informazioni sull'apertura stomatica e su come sta "lavorando" in quel preciso momento lo stoma. I meccanismi stomatici, che regolano l'apertura e la chiusura degli stomi, sono strumenti attraverso cui la pianta mette in atto strategie di difesa atte a preservare l'acqua e la crescita. Questi meccanismi sono regolati da segnali chimici e ormonali (di cui l'ABA è la molecola più importante) oltre che da comportamenti passivi o idraulici (Rodrigues *et al.* 2008. A seconda della velocità con cui avviene regolazione stomatica, le piante vengono classificate in isoidriche o pessimiste e anisoidriche o ottimiste ((Tardieu e Simonneau, 1998). Il meccanismo isoidrico prevede un forte controllo stomatico che porta ad una immediata chiusura degli stomi nel momento in cui si instaurassero condizioni idriche limitanti. In questo modo, la pianta riduce gli scambi gassosi (in genere si registra un calo fotosintetico anche se il ricorso all'utilizzo della CO_2 sottostomatica potrebbe limitare le riduzioni) ma mantiene il più a lungo possibile alto il potenziale idrico. Le piante anisoidriche, invece, non mettono in atto risposte immediate del controllo stomatico: tengono aperti gli stomi a lungo e

subiscono, di conseguenza, gli effetti dello stress idrico. Contrariamente alle isoidriche, le piante anisoidriche mantengono gli scambi gassosi su livelli elevati ma accusano il crollo del potenziale.

La misura della conduttanza stomatica, non distruttiva, è basata sul calcolo del flusso dello scambio gassoso (anidride carbonica in entrata e vapore acqueo in uscita) tra la foglia e l'ambiente esterno e la velocità di scambio dipende dai fattori ambientali (umidità, ventilazione, temperatura, VPD), dalla densità, dalle dimensioni e dal grado di apertura degli stomi. Il flusso viene calcolato in modo diverso a seconda che si utilizzi il porometro, oppure gli analizzatori di gas all'infrarosso (IRGA). Il porometro misura il flusso d'acqua scambiato attraverso il gradiente di umidità relativa tra la superficie evaporante della foglia e la camera dello strumento avendo due conduttanze note calcolate dallo strumento. La differenza di umidità tra elementi di due conduttanze note fornisce il flusso di vapore acqueo. Il gradiente di umidità relativa è misurato attraverso due sensori alloggiati, uno nella testa della pinza e l'altro nella camera di essiccazione. Un apposito essiccante, presente nella camera di essiccazione, crea un forte gradiente di HR tra la foglia e la camera stessa. Gli IRGA, invece, misurano l'attenuazione della radiazione IR proveniente da una sorgente nota di CO₂ e H₂O. Dalla concentrazione di questi due parametri vengono ricavati il tasso di fotosintesi netta e la conduttanza stomatica. Questi due strumenti sono molto precisi, però anche complessi da utilizzare, richiedendo periodiche calibrazioni. Inoltre, il costo è piuttosto sostenuto. I valori della conduttanza stomatica vengono utilizzati per la classificazione dello stress idrico come riportato in tabella 2 (Flexas et al 2002).

g_s (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	Livello di stress idrico
200-500 > g_s > 150	Nulla
150 > g_s > 50	Moderato
g_s < 50	Severo

Tab 2. Classificazione dello stress idrico secondo i valori della conduttanza stomatica.

- 4) Portata linfatica vasi capillari: il metodo più utilizzato è il metodo della dissipazione termica, attuato tramite una coppia di sonde a forma di ago, ciascuna contenente una termocoppia. Quest'ultima è un sensore termico il cui funzionamento è basato sull'effetto termoelettrico. Il funzionamento avviene riscaldando costantemente una sonda, mentre l'altra registra la temperatura del legno (metodo Granier).
- 5) Discriminazione isotopica del carbonio: valevole solamente per la fase di maturazione, è la discriminazione isotopica del carbonio. Tra i due isotopi stabili del carbonio ^{13}C e ^{12}C , il primo viene discriminato nel processo fotosintetico (Farquhar *et al.*, 1989), preferendo la CO_2 atmosferica avente ^{12}C , in quanto il ^{13}C ha una più bassa velocità di diffusione attraverso gli stomi ed una minor velocità di reazione con l'enzima fotosintetico Rubisco (1,5-ribulosio-bifosfato carbossilasi). In condizioni di deficit idrico la discriminazione si riduce e gli zuccheri prodotti risultano più ricchi in ^{13}C rispetto a quelli che si formano in assenza di stress. Con l'ausilio di uno spettrofotometro si può misurare il rapporto $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, avendo indicazione sullo stato idrico della pianta. È sicuramente un metodo di semplice applicazione ma può essere utilizzato solamente nella fase di maturazione.
- 6) Camere termiche: montate su cavalletti, piattaforme o in posizione sopraelevata per il rilevamento della temperatura della chioma o del suolo. Temperature della vegetazione superiore a quella dell'aria indicano uno stress idrico per la vite, che a seguito della chiusura degli stomi, non riuscendo a utilizzare la traspirazione per termoregolarsi dissipando la radiazione incidente si vede costretta a rilasciarla come calore, aumentando la temperatura (Cogato *et al.*, 2021).
- 7) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): è un importante indice che descrive la produttività fotosintetica e la distribuzione su scala dell'ecosistema (Kidwell, 1990), stima la produzione primaria netta di vegetazione, la crescita e le rese delle colture, rileva impatti atmosferici (Kogan, 1987) ma può essere utilizzato anche per condurre una classificazione della copertura del suolo (Chen *et al.*, 2015), una mappatura dell'emissione gassosa del suolo (Valor e Caselles, 1996). Questo indice è calcolato normalizzando il rapporto tra la differenza tra le lunghezze d'onda del vicino infrarosso correlato alla struttura della foglia e del

rosso correlato al contenuto di clorofilla, alla somma tra vicino infrarosso e lunghezza d'onda del rosso (Regan *et al.*, 1992).

$$\text{NDVI} = \text{NIR-Red} / \text{NIR+Red}$$

La vegetazione verde e sana riflette molto meno radiazione nel rosso (Red), rispetto a quelle nel vicino infrarosso (NIR). Quando vi è una situazione di stress, invece, i valori di Red possono aumentare, mentre NIR diminuisce (Kamble *et al.* 2010). Quindi, dalla rilevazione e la normalizzazione di questi due valori e il rapporto tra essi, si può avere un'idea sullo stato idrico della vite.

2.3 TERMOGRAFIA

La termografia, chiamata anche *imaging termico*, è riconosciuta come un'opzione rapida e non invasiva per la determinazione della temperatura della chioma (Cifre *et al.*, 2005, Jones *et al.*, 2002) ed è ampiamente raccomandata per la programmazione dell'irrigazione, in particolare per la viticoltura di precisione (Jones, 2004, Costa *et al.*, 2012). Questa tecnica, quindi, rappresenta un approccio utile e funzionale per misurare la temperatura della chioma delle piante attraverso cui valutare indirettamente la traspirazione delle foglie e lo stato idrico delle piante. La tecnica è basata sul principio che, in condizioni di stress idrico, la pianta chiude gli stomi per limitare la perdita d'acqua. Così facendo, però, la traspirazione, che ha funzione di termoregolazione, rallenta o si arresta e ciò determina l'aumento della temperatura delle foglie che risulta essere più elevata (anche di 6-7 °C) rispetto a quella delle foglie con stomi aperti (Jones, 1999, Araus *et al.*, 2008, Jones *et al.*, 2002, Oerke *et al.*, 2006). Il rapporto tra la temperatura delle foglie e la regolazione stomatica in funzione delle condizioni di stress, è ben conosciuto nella vite (Medrano *et al.*, 2003, Winkel e Rambal, 1993). Quindi, in generale, quando la vite è sotto stress e gli stomi si chiudono (Metherington e Woodward, 2003) e la radiazione assorbita non riesce a dissiparsi, causando un aumento della temperatura delle foglie (Jones *et al.*, 2002, Gates, 1964). Inizialmente si era provato a misurare la temperatura direttamente sulla foglia con risultati fuorvianti, data dall'irregolarità del comportamento stomatico, tipico della vite e, quindi, la risposta non è persistente all'interno della foglia. Si è ovviato a questo problema raccomandando l'uso di immagini a chioma intera (Jones, 1999). L'utilizzo dell'interna copertura riduce la variabilità causata da fattori ambientali come la radiazione solare, ma limita anche gli

effetti dovuti all'architettura della stessa della chioma (Belfiore *et al.*, 2019). Il vento, però, potrebbe essere una fonte di variazione importante perché è causa di bruschi cambiamenti del microclima della chioma, della traspirazione e della conduttanza stomatica (Grant *et al.*, 2007), che possono causare imprecisioni nella stima dello stato idrico delle piante (Jones, 1992, Guilioni *et al.*, 2008).

La determinazione dello stress idrico attraverso la termografia avviene utilizzando due indici termici denominati CWSI (Crop Water Stress Index, 1) e I_g (indice di conduttanza stomatica, 2) calcolati partendo dalle temperature di riferimento (T_{dry} e T_{wet}) e dalla temperatura della chioma secondo le seguenti formule:

$$1) \ CWSI = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (\text{Jones, 2002})$$

$$2) \ I_g = \frac{T_{dry} - T_{canopy}}{T_{canopy} - T_{wet}} \quad (\text{Jones, 2002})$$

Il CWSI è uno dei più utilizzati. Esso considera la misura della temperatura della chioma della pianta nelle condizioni atmosferiche presenti durante la misurazione e si basa sul confronto della temperatura della chioma con le temperature soglie di riferimento: ovvero la temperatura della chioma di piante ben irrigate e di piante in condizioni di stress totale che rappresentano, rispettivamente, la temperatura più bassa e la temperatura più alta che un oggetto traspirante e non traspirante, può raggiungere in quelle condizioni ambientali. (Jones *et al.*, 2002, Jackson *et al.*, 1981, Idso *et al.*, 1982).

Anche l'indice di conduttanza stomatica (I_g) viene calcolato, come già detto, partendo dalla temperatura media della chioma e dalle temperature soglia di riferimento (Jones, 2002) ed è proporzionale alla conduttanza stomatica.

I valori di CWSI e di I_g vengono utilizzati per classificare il livello dello stress idrico secondo quanto proposto da Pou *et al* nel 2014:

CWSI tra 0,8 e 1: Stress idrico severo

CWSI < 0,8: Stress idrico nullo

$I_g > 0,5$: Stress idrico assente

$I_g < 0,5$: Stress idrico severo

Un dibattito aperto in questa materia riguarda la parte della chioma, illuminata o ombreggiata, in cui le immagini derivante da termografia dovrebbero essere scattate. Alcuni studi mostrano risultati migliori utilizzando la parte illuminata dal sole (Jones *et*

al., 2002), mentre altri sono risultati più coerenti con la porzione ombreggiata (Pou *et al.*, 2014). Altri ancora (Belfiore et al, 2019) hanno verificato che CWSI può essere calcolato indifferentemente su entrambi i lati della chioma mentre l'efficienza di I_g varia al variare del lato della chioma e della varietà: maggiore con immagini provenienti dal lato ombreggiato in Merlot e soleggiato in Moscato. Oltre a ciò, vi è il momento del giorno in cui acquisire le immagini. Alcuni autori hanno verificato che l'acquisizione delle foto con termocamera sia migliore durante la parte più calda della giornata (tra le 12:00 e le 15:00), quando la domanda atmosferica è massima (Fuentes *et al.*, 2012).

2.4 INCLINAZIONE FOGLIARE

La valutazione visiva degli apici vegetativi e delle foglie è diventata, oramai, un metodo obsoleto e superato. Sull'idea di questa teoria, però, nasce la valutazione dell'inclinazione fogliare, che messa in relazione all'assorbimento della luce da parte della foglia, dà una stima sul rapporto foglia /ambiente atmosferico. L'inclinazione e l'assorbimento fogliare della luce influenzano sia la quantità di radiazione solare, che la frazione incidente assorbita. Ad esempio, le piante provenienti da habitat aridi hanno modificato l'angolatura fogliare in modo tale da potersi adattare ad un ambiente avverso (Ehleringer e Comstock, 1987).

Il movimento delle foglie influisce sulle prestazioni fisiologiche della pianta. Il diaeliotropismo, ovvero il tropismo indotto dalla luce, può massimizzare il quantitativo di carbonio assorbito, aumentando la temperatura incidente, d'altra parte il paraeliotropismo, cioè la disposizione di profilo rispetto alla luce, può ridurre la radiazione incidente, con temperatura fogliare e stato idrico della pianta durante episodi siccitosi, inoltre, evita danni da elevata radiazione nelle foglie, chiamata fotoinibizione (Mooney e Ehleringer 1978, Ludlow e Björkman, 1984). Dagli studi di Gamon e Pearcy del 1989 emerge che le foglie, in pieno sole esibivano movimenti stagionali e diurni, con cambiamenti nell'angolo rispetto all'asse verticale. Questi movimenti tendevano a ridurre la radiazione incidente a mezzogiorno in piena estate, quando il potenziale idrico di mezzogiorno era basso (valori più negativi), indice di piante in condizioni di stress idrico e le temperature massime giornaliere dell'aria erano alte. Inoltre, un ritorno di queste foglie in posizione orizzontale indicava che le foglie sono in grado di tollerare livelli di luce più elevati di quelli normalmente riscontrati dalle foglie non cresciute in suddette

condizioni. Invece, le foglie che compiono questo movimento a metà luglio, hanno mostrato un brusco declino e un successivo recupero parziale sia nel picco giornaliero di assorbimento netto di CO₂. Si è assistito, poi, una perdita funzionale di molti componenti fotosintetici e un recupero parziale per diverse settimane.

3. IL PROGETTO IRRIVISION

Irrivision è un progetto di sperimentazione di una tecnologia innovativa per l'irrigazione di precisione delle colture arboree. Il progetto è finanziato nell'ambito del PSR Veneto 2014-2020, focus area 5A: "Rendere più efficiente l'utilizzo dell'acqua".

Questo lavoro propone un particolare sistema di visione il quale, grazie a tecniche di Intelligenza artificiale ed elaborazione automatica delle immagini, permette di effettuare misurazioni del tutto innovative, quali il volume della chioma e la temperatura media fogliare. Nel progetto si vuole dimostrare come la misura automatica di queste variabili permetta di definire dei particolari indici di stress idrico, e sulla base di questi, un algoritmo di gestione automatica dell'irrigazione che miri a: ridurre l'utilizzo e le dosi d'acqua in funzione delle reali necessità della coltura e di migliorare gli aspetti quali/quantitativi della produzione.

Il sistema proposto vuole essere uno strumento di guida per l'agricoltore nella gestione irrigua, che permetta un'ottimizzazione delle risorse e una semplificazione della gestione aziendale.

La soluzione tecnologica che si propone a questo scopo è creata da CET Electronics: il sistema è caratterizzato dall'utilizzo di sensoristica elettronica, tra cui una nuova telecamera fissa nell'impianto. Quest'ultima, denominata WCAM, è in grado di riconoscere la chioma del campione in esame e di realizzare misure su di essa, come il volume, ma anche parametri accurati come perdita di turgore dei tessuti o l'inclinazione fogliare. Tutti i parametri rilevati da sensori, uniti ad un'elaborazione automatica delle immagini andranno ad alimentare un algoritmo decisionale che calcolerà degli innovativi indici di stress idrico, attraverso i quali sarà possibile pilotare razionalmente l'irrigazione. Il progetto presenta numerosi partner: CET Electronics s.n.c., CREA Centro di Ricerca Viticoltura ed Enologia, Consorzio di Bonifica Piave, Villa Sandi, Soc. Agr. CA BIANCA, APOMT, Le Rive e SAGRIVIT.

3.1 OBIETTIVO DELLA TESI

Il lavoro, oggetto della presente tesi, si inserisce all'interno delle attività del progetto IRRIVISION, ed ha lo scopo di validare in campo il sistema per la gestione dell'irrigazione nella vite.

La sperimentazione in campo ha lo scopo di ricavare dati per la calibrazione del sistema. In particolare, con questa tesi si intende:

1. dimostrare la capacità del sistema di definire lo stato idrico della pianta attraverso specifici indici termici, volumetrici della chioma e di inclinazione fogliare e prevenire potenziali condizioni di criticità idrica,
2. dimostrare la flessibilità del sistema e l'adattabilità a diverse colture,
3. quantificare i vantaggi derivanti dall'adozione del sistema da parte delle aziende agricole, valutandoli dal punto di vista agronomico, di impatto ambientale,
4. fornire nuovi dati e metodi che possano essere utili alla pubblica utilità.

A tal fine, sono state condotte analisi in campo per poter, in primo luogo capire se vi fossero degli episodi di stress e, infine, verificare l'efficacia del sistema automatico di misurazione dell'angolo fogliare e della temperatura della chioma.

4. MATERIALI E METODI

4.1 INQUADRAMENTO SITO SPERIMENTALE

La sperimentazione è stata fatta durante la stagione vegetativa 2021 in un vigneto dell'azienda vitivinicola "Villa Sandi" di Crocetta del Montello (TV). L'azienda, dislocata in 5 tenute che si estendono nelle più rinomate aree DOC e DOCG del Veneto e del Friuli Venezia Giulia, produce diverse tipologie di vino, in funzione del terroir specifico. Nel dettaglio, la prova è stata svolta presso la tenuta di Nervesa della Battaglia (TV), coordinate 45°50'29"N 12°11'14" (Fig. 1).

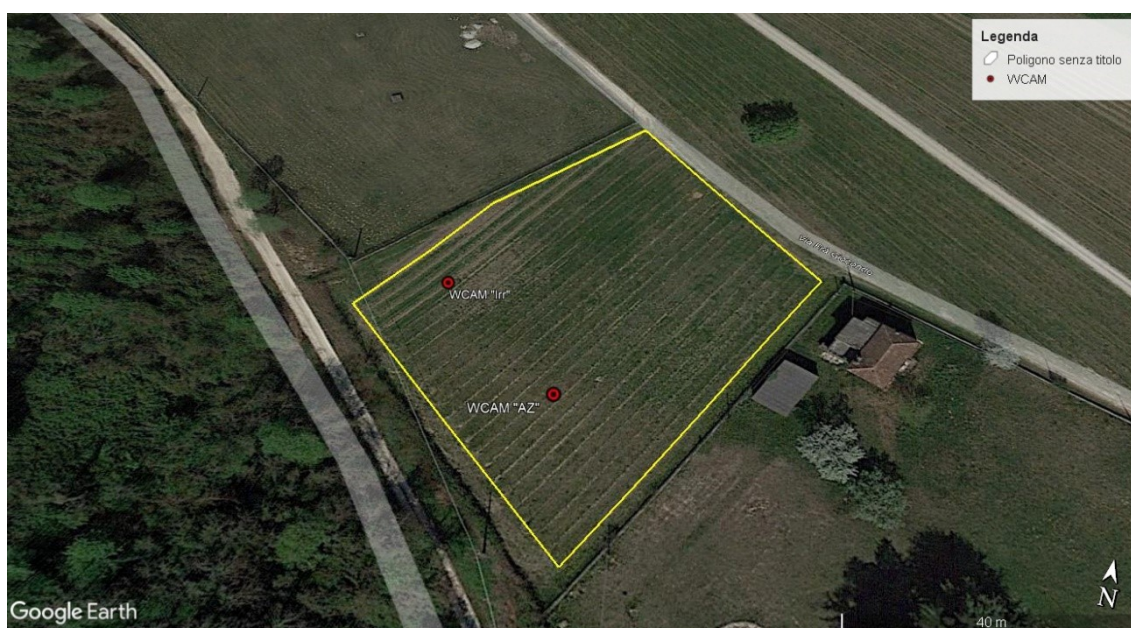


Fig. 1: Sito sperimentale.

Il vigneto, realizzato nel 2016, si estende su una superficie di 4.500 m² ed è condotto in regime convenzionale. La varietà coltivata è il Glera innestato sul portainnesto SO4 (Berlandieri x Riparia), allevato a doppio capovolto con sesto d'impianto di metri 1.30 x metri 2.80. Il Glera, con i suoi 36.200 ettari è la varietà più diffusa in Veneto.

Il piano sperimentale prevedeva il confronto tra due tesi: una tesi irrigata e una tesi non irrigata. Nella tesi irrigata il terreno è stato costantemente tenuto alla capacità di campo grazie alla restituzione giornaliera dell'acqua (persa per traspirazione e per evaporazione) attraverso microirrigazione (sub irrigazione), mentre nella tesi non irrigata non è stata fatta nessuna irrigazione al fine di favorire l'insorgenza delle condizioni di criticità idrica (stress idrico) e poter confrontare il comportamento delle piante nelle due diverse

condizioni idriche. Per fare ciò sono stati scelti due filari distinti ma contigui, in maniera tale che la differenza di terreno non influenzasse la sperimentazione. Ogni tesi era composta da tre repliche di 5 piante ciascuna sulle quali sono stati fatti i rilievi strumentali, produttivi e qualitativi.

Inoltre, in entrambe le tesi è stata collocata una telecamera per monitorare alcuni parametri come l'espansione volumetrica della chioma, l'angolazione e la temperatura fogliare, complementare a due sensori di umidità del terreno.

La gestione irrigua del vigneto avveniva tramite subirrigazione, con ugelli di portata pari a 2,4 lt/ora, distanziati fra di loro di 50 cm, il tutto sviluppato in un unico settore irriguo. Il sistema lavora ad una pressione di 3,5 bar, con l'ausilio di tre elettrovalvole. L'approvvigionamento idrico viene garantito dalla presenza di un pozzo aziendale.

I volumi e il numero degli interventi irrigui dipendono dalle condizioni climatiche dell'annata ma, mediamente, sono quantificabili in cinque/sei interventi/anno con decisioni che vengono affidate ai tecnici agronomi aziendali.

4.1.1. Caratterizzazione climatica dell'area di studio

In generale, il clima dell'area interessata dalla prova, è di tipo temperato-caldo per effetto del mare a Sud-Est e della catena alpina a Nord, che proteggono dai venti freddi provenienti dai paesi nordici.

La caratterizzazione climatica è stata fatta utilizzando i dati della stazione metereologica dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale (ARPAV) n° 620 di Nervesa della Battaglia (TV), situata a breve distanza dal sito sperimentale. È stato studiato l'andamento delle precipitazioni e della temperatura media del periodo marzo-settembre, periodo durante il quale la vite compie il proprio ciclo vegetativo.

4.1.2. Caratterizzazione pedologica del sito sperimentale.

Il terreno è stato caratterizzato attraverso analisi chimico-fisica al fine di definirne il contenuto dei macro elementi (N,P,K) e la tessitura. I campioni sono stati prelevati a una profondità 0-40 cm dopo aver scartato i primi 5 cm allo scopo di eliminare eventuali inquinamenti superficiali. I campioni, una volta etichettati, numerati e sigillati, sono stati inviati al laboratorio per le analisi previste. Il laboratorio in questione è "Laboratorio Analisi Cicognani" in Viale Bidente 172/D, Forlì.

RILIEVI STRUMENTALI, PRODUTTIVI E QUALITATIVI

4.2 INCLINAZIONE FOGLIARE

L'analisi dell'inclinazione fogliare fornisce una prima idea dello stato idrico della pianta attraverso l'angolo che si forma tra la linea verticale, ovvero perpendicolare al terreno, e la lamina fogliare. Propedeutiche alle misure, nel mese di aprile, sono stati selezionati 8 germogli uviferi, quattro per tesi, uno per pianta. Il germoglio è stato scelto in posizione centrale sul cordone permanente e fissato ad un tutore esterno in modo da mantenerlo eretto e verticale. La vegetazione circostante è stata contenuta e distanziata in modo tale da mantener ben visibile il germoglio scelto (*Fig. 2*).



Fig. 2: Particolare delle misure: a) germoglio fruttifero ancorato al tutore b) inclinometro e misura in campo dell'angolatura fogliare.

Il programma prevedeva misure settimanali degli angoli di inclinazione fogliare. Sono stati analizzati tre foglie più rappresentative per ogni germoglio. Per fare ciò ci si è avvalsi di un inclinometro, munito di base d'appoggio e di un corpo pendente al fine di mantenere la linea verticale, sul quale era riportata una scala goniometrica della misura rilevata. I dati così ottenuti sono stati riportati in tabelle cartacee per poi essere trasferiti in formato digitale.

4.3 CONDUTTANZA STOMATICA

La conduttanza stomatica è un importante parametro fisiologico che misura il flusso dello scambio gassoso tra foglia e ambiente esterno e questa velocità dipende da numerosi fattori quali: disponibilità idrica del suolo, luce, temperatura e umidità dell'ambiente, vento. Queste ultime tre grandezze climatiche influenzano in modo determinante il deficit di pressione di vapore (VPD), vera guida della traspirazione. Per calcolare ciò è stato utilizzato il porometro (*Fig. 3*), il

quale presenta due sensori che percepiscono la differenza di umidità tra gli stomi dell'area fogliare considerata e l'ambiente esterno. Da qui viene convertito e restituito un valore in $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2\text{s}$ più semplice da confrontare. Il tempo di misurazione è di 30 secondi. Nel nostro caso lo strumento è il modello SC-1 Leaf Porometer dell'azienda Meter e, in particolare, presenta una risoluzione di $0,1 \text{ mmol}/\text{m}^2\text{s}$, una precisione pari a $\pm 10\%$ della misura da 0 a $500 \text{ mmol}/\text{m}^2\text{s}$ e un intervallo di misurazione di $0 - 1000 \text{ mmol}/\text{m}^2\text{s}$. Altre caratteristiche importanti dello strumento sono: l'intervallo operativo della temperatura che varia da 5 a



Fig. 3: Porometro e misura in campo della conduttanza stomatica.

40°C, dell'umidità la cui scala è 1 a 100% e, infine, il diametro di apertura del sensore di 6,35 mm. Lo strumento può funzionare in modalità “Automatico” o “Manuale”.

Le foglie sono state scelte tra il terzo-quarto nodo dopo il grappolo di un germoglio centrale dell'archetto. Una volta fatto questa operazione preliminare si “pinzava” la lamina fogliare e si avviava lo strumento in modalità automatica. Il tutto veniva ripetuto su otto foglie per ogni tesi. Le misure venivano fatte a metà mattinata.

4.4 POTENZIALE IDRICO

Generalmente il potenziale idrico può essere misurato prima dell'alba (PLWP) o a mezzogiorno su foglie non insacchettate (MLWP o fogliare) oppure insacchettate (SWP o di stelo). Il metodo scelto è stato il potenziale idrico del picciolo (STEM) perché è l'indicatore più stabile e più usato in quanto meno soggetto alle interferenze del microclima circostante la pianta.

La camera di Scholander (*Fig. 4a*) è uno strumento semplice, pratico ed efficace per misurare lo stato idrico della pianta e per il suo funzionamento è necessario il collegamento ad una bombola di gas sotto pressione (200 bar), normalmente aria compressa o azoto, tramite un tubo ad alta pressione. Il gruppo comprende anche il riduttore di pressione, il manometro e una lente di ingrandimento che facilita la lettura.



Fig. 4: a) Camera a pressione di Scholander, b) Preparazione campione, c) Involucro.

Le misure sono state fatte su 6 foglie prelevate da sei diverse piante per ogni singola tesi. I dati giornalieri, mediati, sono stati successivamente elaborati e correlati con altri parametri, come si vedrà nella sezione “risultati e discussione”. Preliminarmente, le foglie sono state insacchettate per almeno 30 minuti prima della misura (*Fig. 4c*). Questa operazione è fondamentale al fine di creare artificialmente il buio che favorisca la chiusura degli stomi, l’arresto della traspirazione e creare l’equilibrio tra il flusso linfatico dello xilema del picciolo fogliare con il resto della pianta e l’umidità del suolo. Le foglie,

una per pianta, sono state scelte con gli stessi criteri adottati per misurare la conduttanza stomatica, ovvero quelle posizionate al terzo-quarto nodo nel germoglio uvifero dopo il grappolo e possibilmente integre. Il potenziale idrico dello stelo è stato generalmente misurato tra le 13:00 e le 14:30 quando, cioè, lo stato idrico della pianta è al minimo (massima traspirazione) e l'equilibrio idrico creato come precedentemente descritto, permette di avere valori generalizzabili all'intera pianta e reali delle condizioni idriche. Trascorso il tempo necessario per equilibrare lo stato idrico della pianta con l'umidità del suolo si è potuto procedere con la misurazione del potenziale. In primo luogo, è stata asportata la foglia (precedentemente insacchettata) con un taglio netto e obliquo a livello del picciolo in modo tale da facilitare la fuoriuscita della linfa e la visione della goccia. Successivamente, la foglia è stata inserita nell'alloggiamento del coperchio (*Fig. 4b*) e poi posta all'interno della camera a pressione con il picciolo rivolto verso l'alto. A questo punto è stata pompata aria compressa all'interno della camera stagna fino a quando il gas sotto pressione non ha spinto all'esterno la linfa. La valvola veniva chiusa non appena la pressione era sufficiente a far fuoriuscire la prima gocciolina di linfa dal picciolo. Dal punto di vista fisico, minore sarà la quantità d'acqua contenuta nei tessuti fogliari, maggiore sarà la forza con cui la pianta la trattiene e, quindi, maggiore sarà la pressione che occorre esercitare per estrarla. Il valore ottenuto è stato moltiplicato per "-0,1" al fine di convertire la misura in bar (riportata sul manometro) della camera, in MegaPascal (Mpa), unità di misura convenzionalmente usata per esprimere i valori del potenziale idrico.

Una volta atteso il tempo di depressione del sistema, la camera veniva usata per le misure successive.

4.5 TERMOGRAFIA

Questa tecnica è diventata utile per misurare, attraverso le immagini termiche, la temperatura della foglia e stimare indirettamente la traspirazione fogliare e lo stato idrico della pianta. Il principio, ricordiamolo, è basato sul fatto che la pianta in condizione di stress idrico chiude gli stomi per ridurre o arrestare la traspirazione al fine di limitare la perdita d'acqua e mantenere alto il potenziale idrico. In questo modo, però, venendo a mancare la termoregolazione operata dalla traspirazione, si ha un conseguente ed veloce aumento della temperatura della foglia stessa che viene registrata dalla termocamera.

Le immagini termiche (Fig 5) sono state acquisite, contemporaneamente alle immagini nel visibile, ad una distanza di un metro dalla pianta con una termocamera a infrarossi FLIR serie T modello 620 (risoluzione 640 x 480 pixel) (FLIR system AB, Wilsonville – USA) durante le ore più calde della giornata, ovvero a mezzogiorno. Sono state acquisite 8 immagini per tesi, 4 nello spettro del visibile e 4 nello spettro dell'infrarosso per ogni giorno di rilievi. Preventivamente, è stata impostata l'emissività pari a 0,96.

I dati di temperatura delle foglie ottenuti dalle immagini termiche sono stati correlati con i dati delle altre misure (potenziale, conduttanza stomatica -gs- e inclinazione fogliare) sia per verificare la bontà della misura sia per avere un quadro completo dello stato idrico della vite.

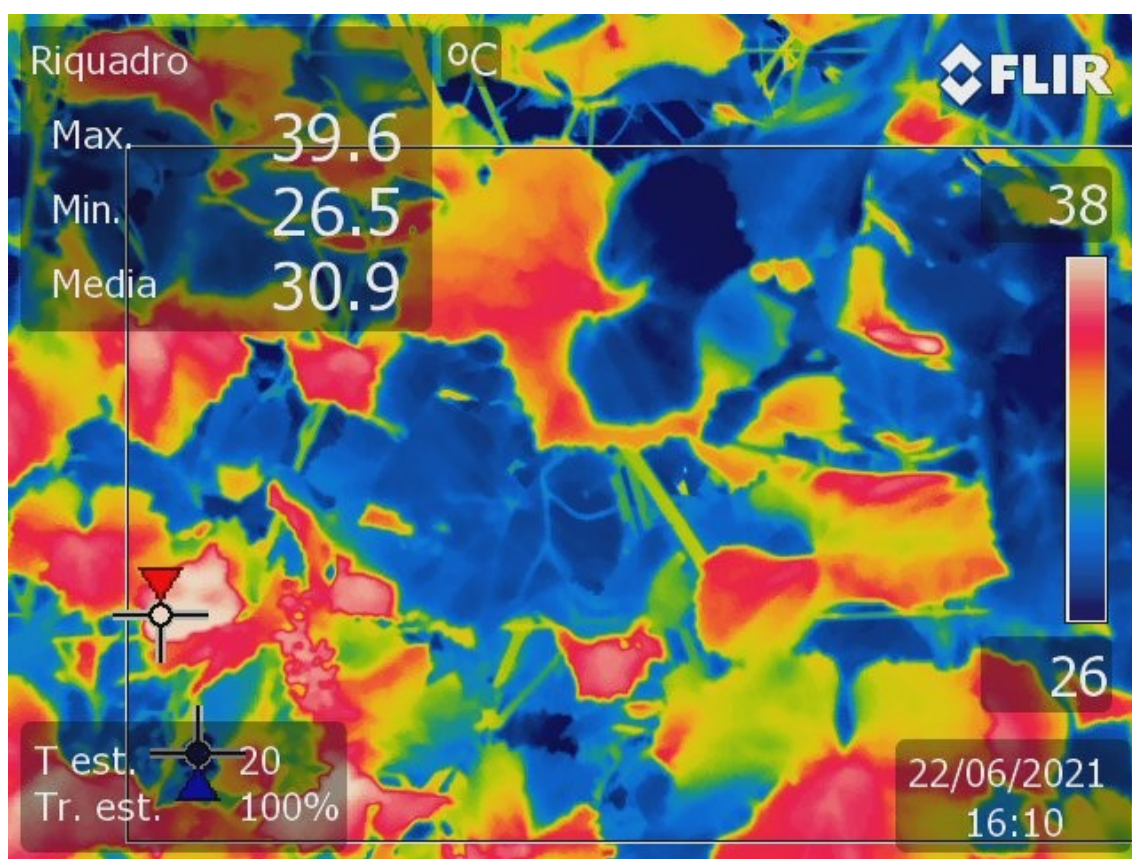


Fig. 5: Visione di una foto termica mediante termocamera.

4.6 VENDEMMIA SPERIMENTALE

La sperimentazione si è conclusa con la vendemmia delle viti oggetto di studio il 21 settembre e lo schema sperimentale prevedeva 4 repliche per tesi da tre piante ciascuna. Su queste piante sono stati fatti i rilievi quali-quantitativi per determinare la produzione

(uva/ceppo, numero di grappoli per ceppo, peso medio del grappolo) e, sui mosti dei campioni d'uva prelevati e trasportati in laboratorio, la qualità (contenuto zuccherino – brix -, acidità totale e pH). In questo modo è stato possibile confrontare e valutare la risposta produttiva (*Fig 6*) e qualitativa delle piante sottoposte a due differenti regimi idrici, di cui uno penalizzante.



Fig. 6: a) Grappolo di viti ben irrigate, b) Grappolo di pianta stressata. Particolare della vendemmia di viti non stressate (c) e di viti stressate, d). Interessante è come il gradiente e lo stress idrico si ripercuotano sulla produzione.

4.7 POTATURA INVERNALE

La sperimentazione in campo si è conclusa con la potatura invernale. Attraverso l'indice di Ravaz, calcolato su 10 piante per tesi, è stato possibile valutare la vigoria della pianta rapportando la produzione d'uva quantificata alla vendemmia precedente con il peso del legno di potatura attuale.

I parametri che indicano un giusto equilibrio vegeto-produttivo vanno da 5 a 7. Valori da 2 a 4 indicano un vigore eccessivo delle viti, mentre valori da 8 a 10 stanno ad indicare una carico produttivo eccessivo, quindi una scarsa vigoria della pianta che comporta ritardi nella maturazione e scadimenti qualitativi delle uve, come potrebbe avvenire in una pianta in condizioni di stress idrico.

5. RISULTATI E DISCUSSIONE

5.1 CARATTERIZZAZIONE AREA DI STUDIO

5.1.1. Caratterizzazione climatica

Dall'analisi dei dati climatici (*Fig. 7*) si evidenzia che la temperatura media del periodo è di 18,5 °C, in linea con l'andamento climatico della zona. Il trend è stato crescente sino al mese di luglio, quando è stato registrato il valore massimo (24,9 °C) e da quel momento si è avuta una graduale diminuzione.

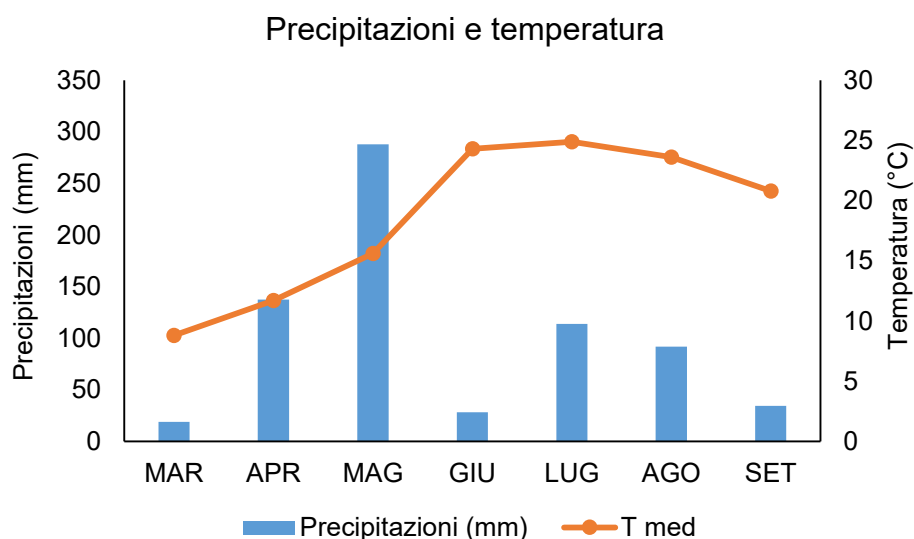


Fig. 7: Andamento della temperatura media e delle precipitazioni nel periodo marzo-settembre 2021.

Il mese di maggio è stato insolitamente fresco a causa delle abbondanti precipitazioni che hanno portato la temperatura media al di sotto dei valori tipici del periodo. A inizio stagione, la temperatura minima (dati non riportati) non è mai scesa sotto lo zero anche se nel mese di marzo c'è stato un lieve abbassamento senza, però, che vi fossero ripercussioni negative sulla vegetazione.

Le precipitazioni, come si evince dalla *Fig. 7*, hanno interessato tutti i mesi della stagione vegetativa durante i quali sono caduti 712 mm di pioggia, non distribuiti in modo omogeneo. In assoluto, il mese più piovoso, come già detto, è stato maggio con 288 mm caduti in 17 giorni, seguito da aprile con 137 mm in 8 giorni. Buone le precipitazioni anche dei mesi di luglio (114 mm) e agosto (92 mm). Per contro, i mesi estivi meno piovosi sono stati giugno (28 mm) e settembre (34 mm). In quest'ultimo caso la scarsità delle piogge non deve essere vista come un aspetto negativo sia perché si era fine stagione sia perché non è stato compromesso lo stato sanitario delle uve, ormai prossime alla vendemmia.

Sebbene, a seguito dei cambiamenti climatici, la piovosità media annuale sia rimasta invariata, o solo leggermente ridotta rispetto alla media storica, nell'ultimo decennio si sta assistendo sempre più ad una crescente variabilità in termini di distribuzione delle piogge. Infatti, sono sempre più frequenti periodi in cui a forti precipitazioni concentrate in archi temporali molto brevi, seguono lunghi periodi siccitosi. Perciò, sempre più spesso, è necessario intervenire con le irrigazioni di soccorso per prevenire l'insorgenza dello stress idrico al fine di annullare o di limitare i danni che da esso potrebbero derivare. Nel nostro caso, è rilevante il fatto che nei mesi estivi, ovvero quelli più caldi, pur essendoci stati ben 18 eventi piovosi che hanno fornito circa 233 mm di pioggia, si sia dovuto intervenire con le irrigazioni di soccorso per evitare che, complici anche le elevate temperature, si creassero condizioni che avrebbero potuto favorire l'insorgenza dello stress idrico e la manifestazione dei classici sintomi ad esso ascrivibili.

5.1.2. Caratterizzazione pedologica

Il vigneto oggetto di tesi è ubicato ai piedi del Montello in un'area di origine fluviale che conferisce al terreno diversi gradienti granulometrici. Nel nostro caso, il gradiente sassoso aumenta man mano ci si sposta verso la collina. Questa caratteristica influenza la ritenzione e la percolazione dell'acqua: di fatto, nella zona sottostante prossima al bosco,

ricca di ciottoli, la percolazione dell'acqua è massima, con i problemi di stress idrico che ne derivano (*Fig. 8*).

La tessitura del terreno, secondo l'USDA, è di tipo sabbioso-limoso, poiché l'analisi granulometrica evidenzia il 42% sabbia, il 49% di limo e il 9% di argilla. La bassa percentuale di argilla avrà una scarsa influenza sulle caratteristiche e sul comportamento del terreno ma l'elevata percentuale di sabbia e di scheletro fa sì che, da un lato, il terreno sia ben areato, non asfittico e abbia una buona permeabilità, evitando quindi ristagni idrici superficiali ma dall'altro lato si hanno elevate probabilità che si creino condizioni di carenza idrica che portano all'insorgenza di livelli critici di stress idrico.

La reazione del terreno, che influenza in modo determinante l'attività della pianta e dei micro e macroorganismi del suolo, è di tipo sub-alcalino (pH8) mentre la fertilità del terreno risulta medio-alta, con valori di S.O. pari a 1,94%, 1,28% di azoto (N), 25 ppm di fosforo (P) e, infine, 73 ppm di potassio (K).



Fig. 8: Gradiente sassoso del sito di studio. Si nota come le prime piante siano in stress idrico; mentre le ultime, più verdi sono in una condizione idrica migliore.

5.2 INCLINAZIONE FOGLIARE

L'inclinazione fogliare elevata è la prima risposta della pianta allo stress idrico e, quindi, questo parametro assume particolare importanza, nel momento in cui, già in campo e visivamente, si può avere un'indicazione di massima dello stato della pianta. Nello specifico l'inclinazione fogliare aumenta, all'aumentare della condizione di stress come dimostrato negli studi di Palliotti *et al.*, 2007.

Come dimostrato da Comstock e Mahall nel 1985, anche nel nostro caso l'orientamento rispetto all'angolo azimutale delle foglie ad inizio stagione vegetativa era distribuito casualmente su tutta la chioma ed indipendentemente dall'altezza della chioma, dalla profondità e dall'esposizione delle foglie (dati non mostrati). Pertanto, un potenziale cambiamento dell'orientamento fogliare rispetto all'angolo incidente dei raggi solari, al fine di ridurre il carico termico e radiativo delle foglie, potrebbe essere ottenuto solo attraverso la regolazione dell'inclinazione fogliare. Potremmo dunque dire che, come già descritto da Werner *et al.* nel 1998, che il passaggio graduale da condizioni idriche normali a condizioni idriche limitanti, determina un forte cambiamento nell'angolo fogliare rispetto ad un ipotetico piano verticale. In assenza di stress, foglia e picciolo hanno un'inclinazione prossima ai 90°: questo permette alla foglia di ottimizzare l'intercettazione luminosa e massimizzare la risposta fotosintetica. Man mano che l'acqua diminuisce e lo stress aumenta, l'angolo fogliare supera i 90° e può raggiungere i 180° (la foglia assume una posizione prevalentemente verticale) quando lo stress idrico raggiunge valori molto critici (severo). Questo comportamento riduce l'intercettazione luminosa limitando la traspirazione e la conseguente perdita d'acqua.

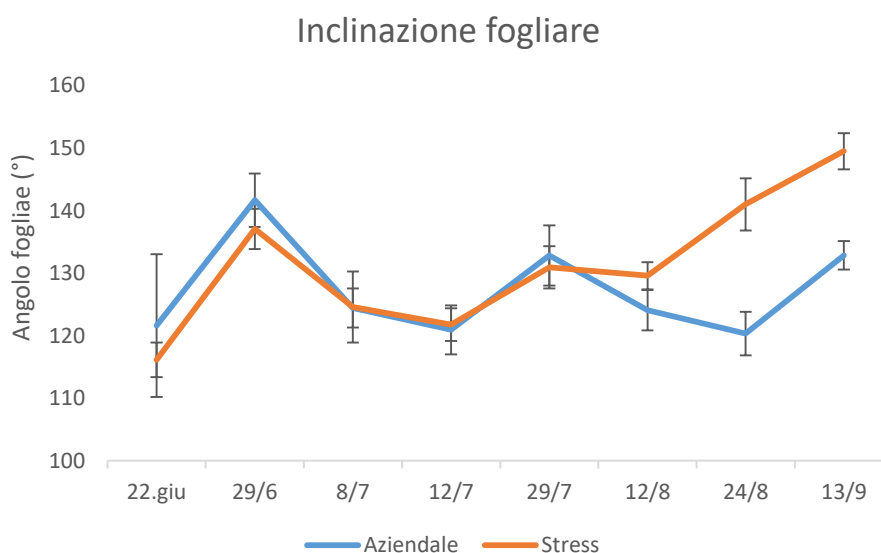


Fig. 9: Andamento dell'inclinazione fogliare. La differenza statistica delle medie è stata valutata con il Test T (p value=0,05). La barra verticale indica l'errore standard della media.

Come si evince dalla *Fig. 9*, l'angolo di inclinazione delle foglie delle due tesi è significativamente diverso solo in due momenti alla fine della stagione: il 24 agosto e il 13 settembre mentre sino a quelle date le due curve hanno avuto un andamento parallelo o perfettamente sovrapponibile. Dal 12 agosto, tuttavia, nella tesi stress, si comincia a delineare un andamento crescente nei valori dell'inclinazione fogliare in concomitanza della riduzione delle piogge e delle temperature alte che caratterizzano il periodo. Il trend è dovuto anche alla riduzione della disponibilità d'acqua nel terreno che, come già detto, ha una importante dotazione in sabbia e scheletro che penalizzano fortemente la ritenzione e la riserva idrica, favorendo l'insorgenza dello stress. Nelle piante della tesi irrigata, invece, dal 12 agosto il trend è dapprima decrescente per poi risalire all'ultimo rilievo pur registrando valori significativamente più bassi rispetto alla tesi stressata. I diversi valori di inclinazione fogliare registrati negli ultimi due rilievi sono perfettamente in linea con i valori di conduttanza stomatica e del potenziale idrico dello stesso periodo (vedi più avanti) ed entrambe le misure sono indice di stress idrico severo. Questo a dimostrazione di come l'irrigazione possa prevenire l'insorgenza dello stress idrico ed evitare o alleviare possibili danni ad esso imputabili e di come la misura dell'angolo fogliare sia rappresentativa dello stato idrico della pianta.

Durante il mese di luglio non si è osservato alcun episodio di stress (come confermato dai valori del potenziale idrico) e questo, come detto in precedenza, spiega la sovrapposizione quasi totale delle curve dei valori dell'inclinazione fogliare delle due tesi. Questo, probabilmente, è dovuto al fatto che in tale periodo vi sono state numerose precipitazioni che hanno eguagliato le condizioni idriche delle due tesi annullando, di fatto gli effetti il diverso regime idrico al quale le piante sono state sottoposte.

5.3 CONDUTTANZA STOMATICA

La conduttanza stomatica è un'ulteriore parametro che indica direttamente in campo lo stato idrico della vite. Viene considerata una misura fisiologica importante e per la sua misura necessita di un semplice strumento (nel nostro caso il porometro) oppure di strumenti molto più complessi, come i misuratori di scambi gassosi altrimenti definiti IRGA (Infrared Gas Analyzer). In entrambi i casi la misura è piuttosto rapida necessitando di uno-due minuti di tempo.

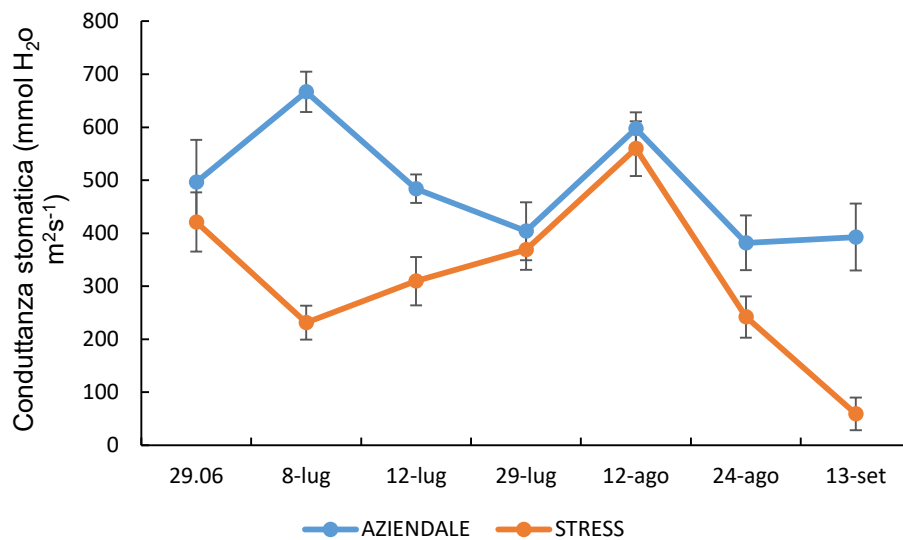


Fig. 10: Andamento della conduttanza stomatica. La differenza statistica delle medie è stata valutata con il Test T (p value=0,05). La barra verticale indica l'errore standard della media.

Analizzando il trend della curva della tesi irrigata possiamo notare come non si presenti nessun episodio di stress, a conferma di come un'irrigazione oculata possa evitare la manifestazione di questo stato fisiologico. Al contrario, nella tesi non irrigata si assiste ad un andamento inizialmente decrescente, poi crescente fino al 12 agosto e, infine, ancora decrescente fino alla fine dell'esperimento (13 settembre) quando sono state accertate condizioni di stress idrico severo. Questo a conferma del fatto che, come detto precedentemente nell'analisi dell'inclinazione fogliare, la riduzione delle piogge e il terreno con scarse capacità di ritenzione idrica accentuano le manifestazioni dello stress idrico.

Anche nel caso della conduttanza stomatica è evidente come episodi piovosi del mese di Luglio vadano ad equilibrare lo stato idrico della pianta, però, in risposta meno completa rispetto all'inclinazione fogliare, infatti non si manifesta una sovrapposizione totale delle due curve.

Potremmo dire, quindi, che la conduttanza stomatica è inversamente proporzionale allo stress idrico: all'aumentare di quest'ultimo, si riducono gli scambi gassosi (e , quindi la traspirazione) con l'ambiente esterno in quanto la pianta ha necessità di preservare l'acqua nei tessuti al fine evitare il crollo del potenziale. Palliotti *et al.* nel 2008 hanno dimostrato che la costante limitazione dell'acqua, tradotta in evidenti condizioni di stress

idrico, porta ad una riduzione significativa delle dimensioni stomatiche, circa -26% rispetto alle condizioni ordinarie. Inoltre, questo cambiamento porta alla riduzione delle superficie occupata dagli stomi, che passa da valori intorno al 3% della superficie totale a valori di 2,5% in conduzioni di stress, favorendo così la conservazione dell'acqua e riducendo notevolmente la conduttanza stomatica.

5.3.1. *Correlazione Inclinazione fogliare - Conduttanza stomatica*

Anche nel nostro studio l'inclinazione dell'angolo fogliare, come già ampiamente discusso, si è dimostrato essere un valido indicatore di stress idrico e la conferma viene fornita dalla buona correlazione tra questo parametro e la conduttanza stomatica (Fig 11). Il valore di R^2 (0,62) e la correlazione di Pearson molto significativa (0,006) indicano che è possibile avere una buona stima dello stress idrico attraverso i valori della conduttanza stomatica ovvero, che c'è una probabilità del 62% di stimare in modo corretto il valore della conduttanza stomatica partendo dal valore dell'angolo fogliare. Nel caso specifico, la pendenza negativa della retta di regressione dice che all'aumentare dell'angolo di inclinazione della foglia diminuisce il valore della conduttanza stomatica che, come appena detto, è inversamente proporzionale all'entità dello stress idrico. I valori di conduttanza stomatica riportati nel grafico, sono indice di stress idrico severo solo all'ultimo rilievo (13 settembre) ma quello che si vuole sottolineare è la netta tendenza di detti valori a diminuire all'aumentare dell'angolo di inclinazione che, a sua volta, aumenta all'aumentare dello stress idrico.

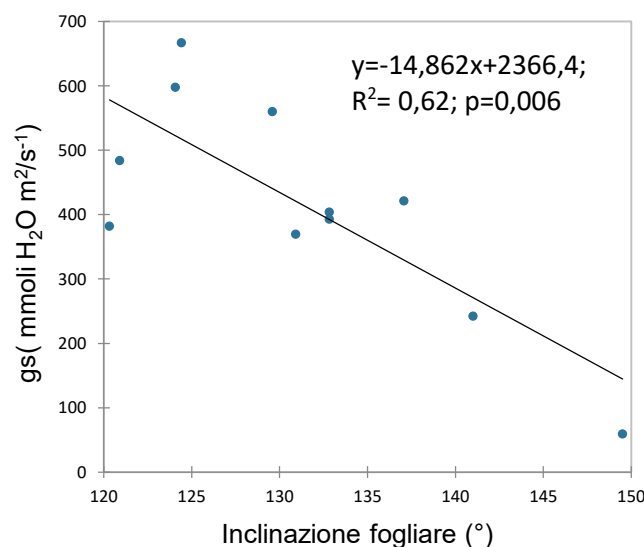


Fig. 11: Correlazione inclinazione fogliare-conduttanza stomatica (gs).

5.4. POTENZIALE IDRICO

Tra gli strumenti disponibili per misurare lo stato idrico della vite, il metodo del potenziale idrico fogliare è sicuramente uno dei più efficaci ed accurati. Basti pensare che questa misura è stata alla base della calibrazione di altre tecnologie per valutare lo stato idrico del suolo e della vite, compresi sensori di umidità del terreno, sensori di portata di linfa e strumenti ad infrarossi (Deloire *et al.*,2020).

Nel nostro studio, il valore del potenziale idrico (Ψ_{stem}) misurato nelle due tesi durante i primi due rilievi era molto simile ma già dall'8 luglio, e per tutta la durata della prova, erano significativamente diversi. Nella tesi aziendale i valori oscillavano tra -0,6 MPa del primo rilievo e -1 MPa all'ultimo con il valore massimo misurato il 29 luglio: -0,38 MPa.

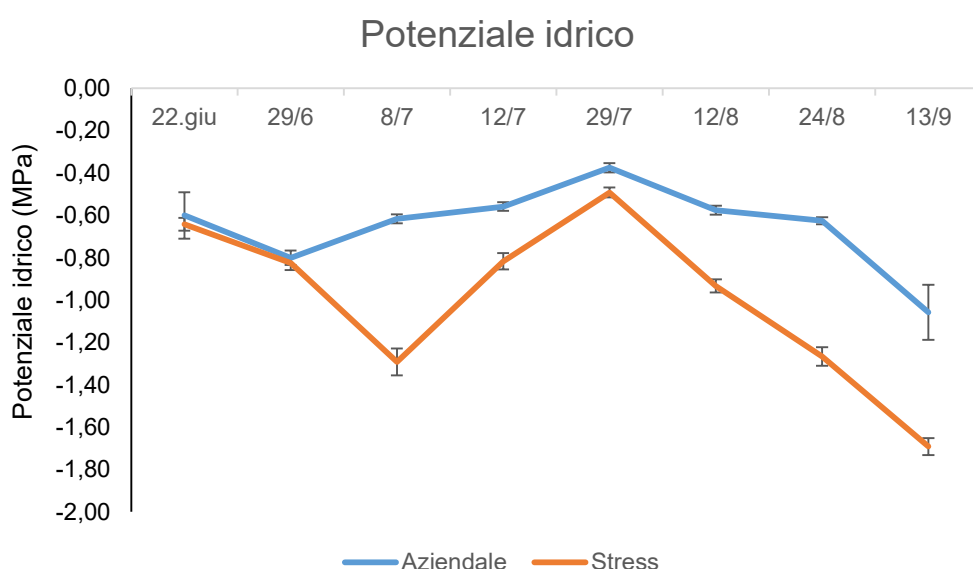


Fig. 12: Potenziale idrico misurato con la camera a pressione di Scholander. La differenza statistica delle medie è stata valutata con il Test T (p value=0,05). La barra verticale indica l'errore standard della media.

Si è, dunque, passati da una situazione di assenza di stress iniziale a una di inizio stress “moderato” finale.

Nella tesi “stress” dopo il crollo del potenziale registrato l'8 luglio, si è assistito ad una risalita dei valori grazie alle precipitazioni che si sono avute nel mese di luglio che hanno riportato il valore del potenziale al suo punto massimo il 29 di quel mese: -0,5 MPa. Da questo momento in poi si è assistito ad una continua diminuzione dei valori del potenziale

idrico che ha raggiunto il valore minimo all'ultimo rilievo, il 13 settembre: -1,7 MPa. Questo valore è indice di stress idrico severo.

Quindi, potremmo concludere dicendo che, nonostante la pioggia, i valori Ψ_{stem} della tesi non irrigata indicano una condizione di stress moderato in due momenti (8 luglio e 12 agosto), importante il 24 agosto, severo all'ultimo rilievo (13 settembre) e leggero nelle altre date.

Inoltre, Deloire e Heyns, sulla base dei loro studi e di Ojeda *et al.* 2002, Willams e Araujo 2002 e Deloire *et al.* 2005, hanno rielaborato una possibile relazione tra tipologia di stress idrico e conseguenze nel funzionamento della vite. Nel nostro caso specifico, secondo Deloire e Heyns la tesi non irrigata nei momenti di stress severo ha ridotto la crescita della vegetazione e degli acini e ridotto la produzione di fotosintesi; in condizione di forte stress, invece, la crescita vegetativa e degli acini è inibita, così come la fotosintesi, il tutto tradotto in una parziale o totale inibizione della maturazione del grappolo, con cali produttivi notevoli.

5.4.1. *Correlazione Potenziale idrico – Inclinazione fogliare*

Anche la correlazione inclinazione fogliare-potenziale idrico è molto interessante. Infatti dalla Fig 13 si evince una marcata tendenza alla diminuzione del potenziale idrico quando aumenta l'angolo fogliare. La correlazione lineare negativa è molto significativa e il valore di R^2 , pari circa a 0,6, è indice di una buona stima del potenziale idrico a partire dal valore dell'angolo di inclinazione fogliare. Questa correlazione ci conferma ancora una volta la validità dell'angolo fogliare quale elemento per esprimere in modo attendibile condizioni di stress idrico in vite.

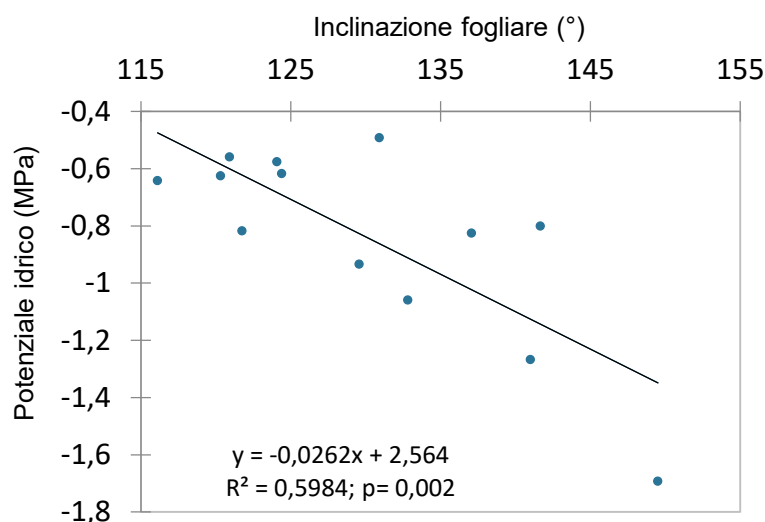


Fig. 13:
Correlazione
inclinazione fogliare
– potenziale idrico.

5.5 TERMOGRAFIA

Lo stato idrico della vite è stato valutato anche attraverso la misura della temperatura fogliare. Questo parametro è fortemente correlato con lo stress idrico poiché, come già spiegato, una pianta in condizione di stress idrico, chiude gli stomi per limitare la perdita dell'acqua riducendo, contestualmente, gli scambi con l'ambiente esterno e, quindi, la traspirazione che porta ad un aumento della temperatura della foglia (Fig 14).

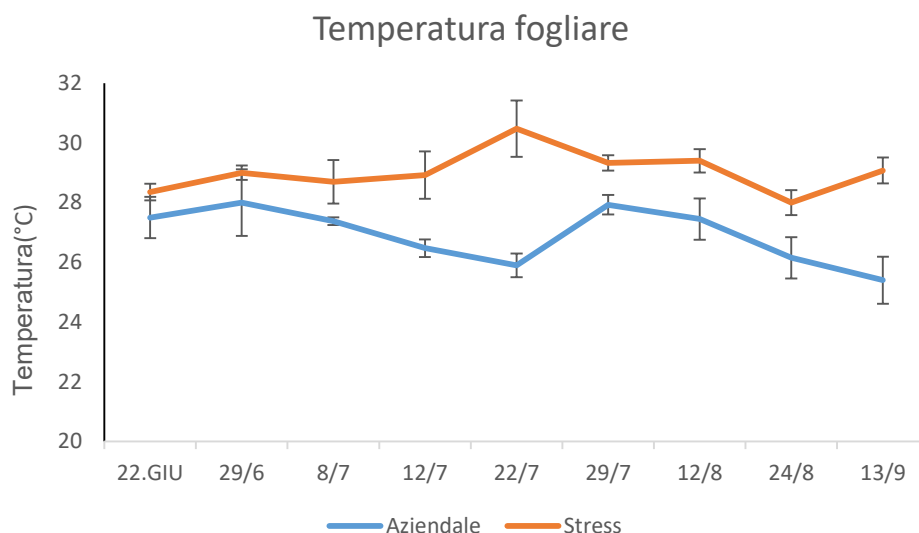


Fig. 14: Andamento della temperatura fogliare. La differenza statistica delle medie è stata valutata con il Test T (p value=0,05). La barra verticale indica l'errore standard della media.

Nella nostra prova, il valore di temperatura fogliare misurato in entrambe le tesi, nei primi due rilievi era simile, con valori differenziati di circa 1 °C, per poi differenziarsi in modo significativo durante tutta la durata della prova.

Analizzando il trend della curva della tesi irrigata possiamo osservare come la temperatura fogliare oscilla tra 25,4 e 28 °C, costantemente (tendenzialmente o significativamente) sotto i valori registrati nella tesi stress ed è caratterizzata da un iniziale andamento decrescente fino al 22 luglio (grazie alle abbondanti precipitazioni avute nel periodo); crescente fino al 29 luglio e ancora decrescente fino all'ultimo rilievo quando è stato registrato il valore più basso (25,4 °C).

Nella tesi non irrigata si ha un andamento crescente fino al 22 luglio (con il picco massimo di temperatura che era di 30,5 °C), decrescente fino al 24 agosto (quando è stato registrato

il punto di minima - 28 °C- e, infine, ancora crescente fino all'ultimo giorno di rilievi avvenuto il 13 settembre (29°). Come abbiamo visto, quindi, l'aumento della temperatura fogliare è la conseguenza diretta della chiusura stomatica attivata a causa della carenza d'acqua nel suolo.

Da qui la necessità di irrigare le colture al fine di prevenire l'insorgenza di manifestazioni deleterie per la fisiologia della pianta.

5.6 VENDEMMIA SPERIMENTALE

Lo stress idrico può avere anche ripercussioni dal punto di vista quali-quantitativo poiché la carenza d'acqua durante la stagione vegetativa e, soprattutto, in certe fasi fenologiche, ha un profondo effetto sull'attività fisiologica della vite. Il deficit idrico causerà la chiusura degli stomi e la riduzione degli scambi gassosi che si tradurranno anche in cali dell'efficienza fotosintetica delle piante e del vigneto intero.

Per quanto concerne l'analisi quantitativa i parametri analizzati alla vendemmia sono: il numero grappoli, la produzione/ceppo e il peso medio del grappolo. Come si può osservare dalla *Tab 3*, tutti i parametri indagati hanno valori più bassi nella tesi non irrigata. Quindi, una corretta irrigazione mirata al mantenimento del fabbisogno idrico giornaliero della pianta può, non solo garantire buoni e normali livelli fisiologici ma evita anche pericolosi e deleteri scadimenti produttivi e reddituali. Infatti, la presenza di una condizione di stress idrico porta a una riduzione delle riserve idriche. Questo si traduce in una diminuzione dell'acqua disponibile da destinare al frutto, con la conseguenza diretta che acini e grappoli saranno più leggeri.

PARAMETRO	MEDIE AZIENDALE	MEDIE STRESS
N° grappoli/ceppo	53.0 a	34 b
Produzione/ceppo (kg)	10.4 a	6.8 b
Peso medio grappolo (kg)	0.41 a	0.38 a

Tab. 3: Vendemmia sperimentale. La differenza statistica delle medie è stata valutata con il Test T (p value=0,05). Lettere diverse sulla stessa riga indicano differenze statisticamente significative.

L'analisi statistica per coppia di dati fatta usando il test T per accettare o rifiutare l'ipotesi nulla, dimostrano, nei primi due parametri differenze statisticamente significative, mentre per quanto concerne il peso medio del grappolo non è stata trovata alcuna differenza significativa probabilmente a causa della ridotta fase di stress. La differenza produttiva è da imputare al diverso numero di grappoli.

L'analisi qualitativa ha riguardato la determinazione del contenuto zuccherino, dell'acidità totale titolabile e del pH.

Dalla *Fig. 15* si può notare come i valori dei solidi solubili e dell'acidità totale siano significativamente diversi: i primi oscillano tra 14,4 e 16,3 rispettivamente nelle tesi stress e aziendale mentre l'acidità totale ha valori che oscillano tra 7,9 e 11,2 rispettivamente nelle tesi stress e aziendale.

Nel primo caso, come dimostrato da Van Leeuwen *et al.* nel 2009, un deficit idrico moderato, in prossimità dell'invasatura favorisce una rapida maturazione, sposta il metabolismo da vegetativo a riproduttivo favorendo, quindi, l'accumulo zuccherino nelle bacche, limita le dimensioni delle bacche stesse e determina anche un effetto concentrazione. Inoltre, riduce anche la competizione dei carboidrati tra l'acino e i germogli, consentendo una maggiore concentrazione negli acini degli zuccheri prodotti dalla fotosintesi.

Ancora Van Leeuwen *et al.* nel 2009 dimostrò che, nel caso in cui la vite sia in una condizione di stress idrico oppure ci sia stata, la concentrazione di acido malico cala a favore dei polifenoli. Non solo, in condizione di stress idrico, l'acido malico entra nel ciclo di Krebs e viene respirato: questo porta ad una riduzione dell'acidità totale, soprattutto nella componente malica

Nessuna differenza significativa è stata riscontrata nei valori del pH.

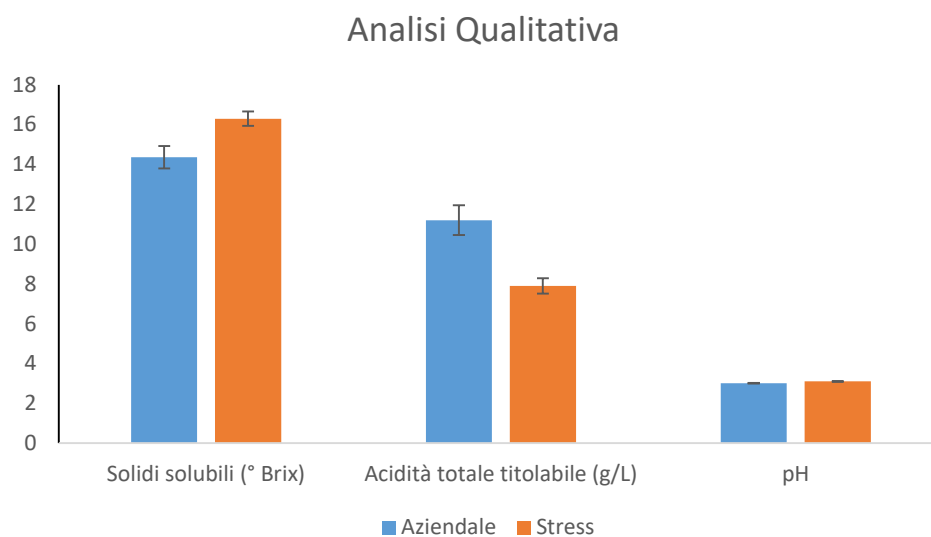


Fig. 15: Vendemmia sperimentale – La differenza statistica delle medie è stata valutata con il Test T (p value=0,05). La barra verticale indica l'errore standard della media.

Pertanto, come proposto da Trégoat *et al* nel 2002, dal punto di vista qualitativo quando il deficit idrico è lieve (in pre-invaiatura) gli effetti positivi superano quelli negativi; le uve contengono meno acido malico e sono più ricche in zuccheri e polifenoli. Quando lo stress idrico è invece eccessivo, la fotosintesi è eccessivamente limitata e la maturazione del grappolo può essere ritardata.

5.7 POTATURA INVERNALE

Alla vendemmia è stata definita la vigoria delle viti attraverso l'indice di Ravaz e questo parametro può aiutarci a capire gli effetti dello stress idrico sulla vigoria delle piante.

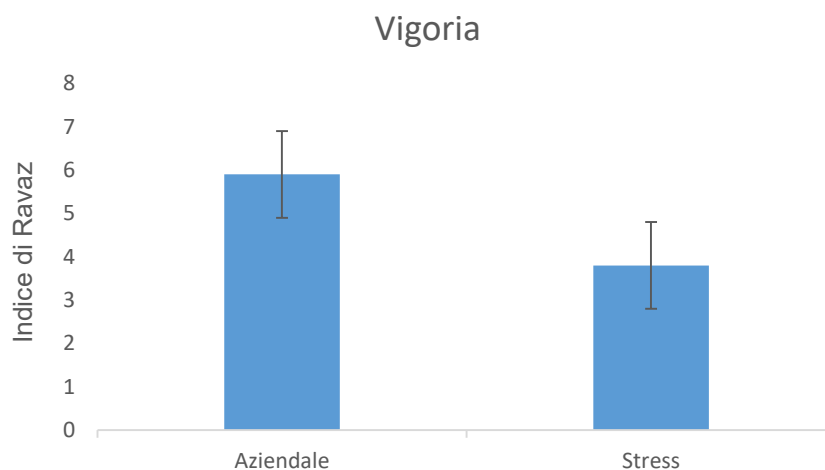


Fig. 16: Potature invernali. La differenza statistica delle medie è stata valutata con il Test T (p value=0,05). La barra verticale indica l'errore standard della media.

Come si può vedere dalla *Fig. 16*, i valori di IR (maggiori di 4) calcolati nelle due tesi non sono significativamente diversi ($p=0,25$) a causa, probabilmente, del ridotto periodo di stress che, come abbiamo visto, è limitato solo al periodo finale, quindi, non ha avuto ripercussioni sullo sviluppo vegetativo. I nostri risultati evidenziano una condizione di squilibrio vegetativo imputabile ad un eccesso di vigore e non ad un carico produttivo eccessivo.

Si nota, tuttavia, una minore vigoria delle piante della tesi stress, seppur solo tendenziale.

5.8 CORRELAZIONE MISURE WCAM – MISURE MANUALI

Poiché la temperatura della chioma è stata misurata sia con la termocamera che per mezzo delle stazioni WCAM installate nei vigneti studio dall'azienda CET-Electronics, si è provveduto a correlare i valori provenienti dalle due fonti al fine di verificare la bontà del metodo automatizzato.

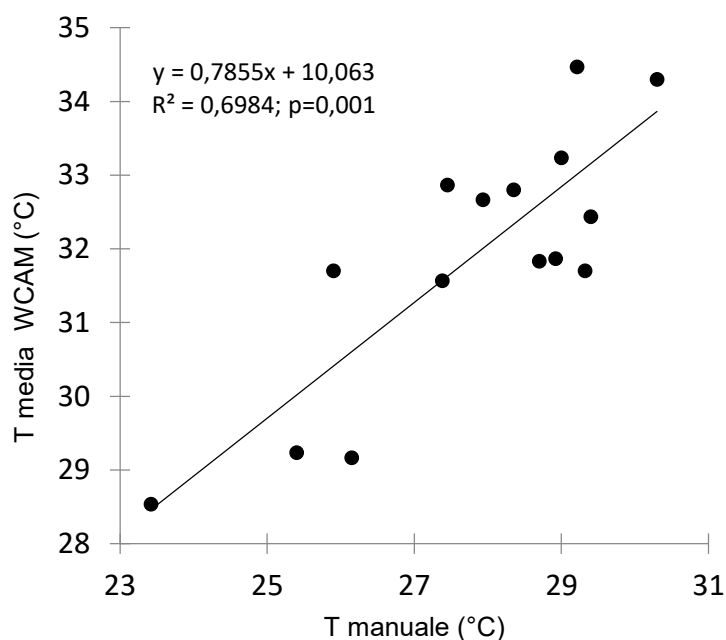


Fig. 17: Correlazione T manuale – T media WCAM. WCAM = stereo camera CET-Electronics.

Come si evince dalla *Fig. 17*, vi è un’alta correlazione tra questi due parametri. Nello specifico il valore di R^2 (circa 0,7) e la correlazione di Pearson altamente significativa (0,001) indicano che la stima della temperatura fogliare attraverso i due metodi, è molto valida. Nello specifico, la correttezza della stima della temperatura fogliare attraverso il sistema automatizzato partendo dalla temperatura misurata attraverso la termocamera è pari al 70%. Poiché la temperatura fogliare è un indice attraverso cui definire lo stato idrico della pianta e poiché la temperatura della chioma misurata automaticamente è altamente correlata con la temperatura misurata manualmente con l’uso della termocamera, possiamo concludere dicendo che il sistema automatizzato, benchè ancora in fase avanzata studio e, quindi, ancora perfezionabile, è un valido strumento da impiegare nella viticoltura di precisione al fine di programmare l’irrigazione del vigneto. Per quanto riguarda l’inclinazione fogliare, come si evince dalle tabelle 4 e 5, in entrambi i casi vi è una discordanza tra le misure manuali e quelle effettuate dalla WCAM.

Nella maggior parte dei casi la stereo camera fissa in vigneto sovrastima l’angolo rispetto all’altra misura, solo in tre casi, indicati con il segno negativo, avviene l’effetto contrario, ovvero una sottostima.

Data rilievo	INCL WC RIEL	INCL MANUALE	Differenza in gradi
22/06/2021	138,8	153,13	-14,33
29/06/2021	141,3	141,67	-0,37
08/07/2021	144,2	124,42	19,78
12/07/2021	137,1	120,92	16,18
29/07/2021	133	132,83	0,17
12/08/2021	136,8	124,08	12,72
24/08/2021	136,9	120,33	16,57
13/09/2021	144,1	132,83	11,27

Tab. 4: Correlazione inclinazione manuale – WCAM, tesi irrigata. WCAM = stereo camera CET-Electronics.

Data rilievo	INCL WC RIEL	INCL MANUALE	Differenza gradi
22/06/2021	137	116,13	20,88
29/06/2021	147,4	137,08	10,32
08/07/2021	141,9	124,58	17,32
12/07/2021	141,8	121,75	20,05
29/07/2021	138,4	130,92	7,48
12/08/2021	138,3	129,58	8,72
24/08/2021	142	141,00	1,00
13/09/2021	137,5	149,50	-12,00

Tab. 5: Correlazione inclinazione manuale – WCAM, tesi non irrigata. WCAM = stereo camera CET-Electronics.

Queste differenze possono essere dovute a tre fattori.

In primo luogo, vi è una differenza fisica nel campione analizzato: nella misura manuale vengono sempre misurate le foglie presenti nello stesso germoglio fruttifero selezionato e in un punto preciso della foglia (nervatura centrale), mentre la WCAM rileva la temperatura fogliare su una vasta area della chioma.

In secondo luogo, il valore medio restituito dalla stereo camera non viene calcolato come numero di foglie, ma come superficie fogliare, dando così più peso alle foglie più sviluppate.

Infine, la WCAM crea una mappa di profondità del settore analizzato e, poi, può lavorare secondo due principi, “Leaf Detection” o “Depth Profile”. Nella “Leaf Detection” avviene un’annotazione delle singole foglie, riconoscendo alcune come “foglie

campione” e, in base al loro orientamento nello spazio, viene calcolata l’inclinazione del piano che le interpola. Di contro, “Depth Profile” non riconosce le singole foglie, ma sulla base del riconoscimento della chioma, divide l’immagine in sezioni verticali e da ciascuno di queste si ottiene un profilo che corrisponde alla posizione delle varie foglie lungo esso. Perciò, lungo il profilo troveremo tratti continui (stessa foglia), ovvero segmenti con la stessa inclinazione, e tratti discontinui (passaggio tra foglia e foglia). Si cerca, pertanto, dei segmenti che avessero una buona continuità e si mettono in relazione. Rispetto al metodo precedente c’è la possibilità di scansionare più foglie, ma senza la possibilità di condurre una cernita delle foglie non rappresentative.

Essendoci tutte queste variabili in gioco diventa difficile confrontare le due misure e allo stato delle cose il sistema appare ancora non utilizzabile. Gli studi sono in itinere e l’obiettivo è perfezionarlo al fine di limare le differenze e renderlo affidabile.

6. CONCLUSIONI

Analizzando i dati ricavati dalla sperimentazione è stato possibile stabilire che, oltre ai metodi ampiamente studiati e applicati per valutare lo stato idrico della vite (potenziale idrico e conduttanza stomatica), esistono altri, come l’inclinazione fogliare e la temperatura fogliare rilevata attraverso metodi automatizzati, altrettanto validi per misurare lo stress idrico in vite.

Per quanto riguarda le manifestazioni di carenza idrica nelle tesi del nostro piano sperimentale, nella tesi irrigata non si è assistito ad episodi di stress. Al contrario, nella tesi non irrigata, in concomitanza con un terreno con poche capacità di ritenzione idrica, si è assistito a due episodi di stress ben definiti nella parte terminale del periodo di rilievo. Questo a dimostrazione del fatto che un’irrigazione oculata e mirata ai fabbisogni idrici della vite, può evitare l’insediarsi di questa condizione fisiologica sfavorevole.

Inoltre, è stato possibile verificare l’esistenza di buone correlazioni tra inclinazione fogliare e potenziale idrico e tra inclinazione fogliare e conduttanza stomatica, con dei buoni valori in entrambi i casi.

Da un punto di vista qualitativo, i mosti della tesi stressata avevano un contenuto in solidi solubili maggiore a causa dell’effetto concentrazione. Al contrario, se lo stress idrico fosse stato prolungato, ci sarebbero state ripercussioni sugli enzimi implicati nel meccanismo della fotosintesi (Rubisco su tutti) e sulla struttura del PSII: in questo caso

ci sarebbero stati, molto probabilmente, anche significativi cali qualitativi come ampiamente dimostrato dalla ricca letteratura che tratta questo focus. L'acidità più bassa nei mosti delle viti stressate è da imputare alla degradazione dell'acidi organici ed è tipica delle viti allevate in areali caldi e/o in condizioni di stress.

L'obiettivo principale del nostro studio è stato verificare l'efficacia del sistema automatico di misurazione dell'angolo fogliare e della temperatura della chioma.

Come abbiamo visto, le misure della temperatura fogliare fatte attraverso la termocamera e con i sensori montati nella stazione WCAM, hanno mostrato forti correlazioni per cui, come già detto, questa tecnologia può essere impiegata nella viticoltura di precisione al fine di programmare l'irrigazione del vigneto.

Al contrario non esiste alcuna correlazione nella misura dell'angolo fogliare fatta con i due metodi: il metodo WCAM, allo stato attuale, non è utilizzabile perché le variabili che influenzano quest'ultima analisi sono molteplici e non sempre ponderabili. Lo studio di affinamento della tecnologia è tutt'ora in essere.

7. BIBLIOGRAFIA

BAUM M.C., DUKES M.D. MILLER G.L. 2005. *Analysis of residential irrigation distributio uniformity*. Journal of irrigation and drainage engineering, 131, 336-341.

BEGG J.E. TURNER N.C. 1970. *Water potential gradients in field tobacco*. Plant Physiology, 46, 343-341.

BELFIORE N., NERVA L., FASOLINI R., GAIOTTI F., LOVAT LORENZO, CHITARRA W. 2021. *Leaf gas exchange and abscisic acid in leaves of Glera grape variety during drought and recovery*. Brazilian Society of Plant Phisiology.

BELFIORE N., VINTI R., LOVAT L., CHITARRA W., TOMASI D., DE BEI R., MEGGIO F., GAIOTTI F. 2019. *Infrared thermography to estimate vine water status: optimizing canopy measurements and thermal indices for the varieties merlot and moscato in Northen Italy*. Agronomy, 9, 821.

BONADA M., BEUSA I., MORAN M., SADRAS V. 2018. *Interactive effects of warming and water deficit on Shiraz vine transpiration*. OENO One, 52, 189-202.

BORSATO E., MARTELLO M., MARINELLO F., BORTOLINI L. 2019. *Environmental and economic sustainability asesment for two different sprinkler and drip irrigation system: a case study in maize cropping*. Agriculture-Basel, 9, 187.

BOU NADER K., STOLL M., RAUHUT D., PATZ C.-D., JUNG R., LOEHNERTZ O., SCHULTZ H.R., HILBERT G., RENAUD C., ROBY J.-P., DELROT S., GOMES E. 2019. *Impact of grapevine age on water status and productivity of Vitis vinifera L. cv. Riesling*. European journal of agronomy, 104, 1-12.

BOYER J.S. 1982. *Plant productivity and environment*. Science, 218, 443-448.

BURT C.M., CLEMMENS A.J., STRELKOFF K.H. 1997. *Irrigation performance measures: efficiency and uniformity*. Journal of irrigation and drainage engineering, 123, 423-442.

CALOIERO T. 2018. *SPI trend analysis of New Zealand applying the ITA technique*. Geosciences, 8, 101.

CALOIERO T., VELTRI S., CALOIERO P., FRUSTACI F. 2018. *Drought analysis in Europe and in the Mediterranean basin using the standardized precipitation index*. Water, 10, 1043.

CHEN X., YANG D., CHEN J., CAO X. 2015. *An improved automated land cover updating approach by integrating with downscaled NDVI time series data*. Remote Sensing, 6, 29-38.

CHRISTIANSEN J.E. 1942. *Irrigation by sprinkling*. California agricultural exp. Stn. Bull, 670.

CHRISTMANN A., WEILER E.W., STEUDLE E., GRILL E. 2007. *A hydraulic signal in root-to-shoot signalling of water shortage*. The plant journal: for cell and molecular biology, 52, 167-174.

CIFRE J., BOTA J., ESCALONA J.M., MEDRANO H., FLEXAS J. 2005. *Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (Vitis vinifera L.). An open gate to improve water-use efficiency?* Agriculture ecosystem environmental, 106, 169-170.

COGATO A., MARINELLO F., MEGGIO F., 2021. *Rilevare il deficit idrico della vite per irrigare al meglio*. L'informatore agrario, 12, 53-56.

COMSTOCK J.P., MAHALL B.E. 1985. *Drought and changes in leaf orientation for two California chaparral shrubs: Ceanothus megacarpus and Ceanothus crassifolius*. Oecologia, 65. 531-535.

COSTA J.M., ORTUNO M.F., LOPES C.M., CHAVES M.M. 2012. *Grapevine variety exhibiting differences in stomatal response to water deficit*. Functional plant biology, 39, 179-189.

COUPEL-LEDRU A., TYERMAN S.D., MASCLEF D., LEBON E., CHRISTOPHE A., EDWARDS E.J., SIMONNEAU T. 2017. *Abscisic acid down-regulates hydraulic conductance of grapevine leaves in isohydric genotypes only*. Plant physiology, 173, 1121-1134.

DELOIRE A., HEYNS D. 2011. *The leaf water potentials: principles, method and thresholds*. Wineland, 129-130.

DELOIRE A., PELLEGRINO A., ROGIERS S. 2020. *Cenni sul potenziale idrico delle foglie di vite*.

IVES Technical Reviews.

DELOIRE A., VAUDOUR E., CAREY V., BONNARDOT V., VAN LEEUWEN C. 2005. *Grapevine responses to terroir, a global approach*. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 39, 149-162.

D'ODORICO P., DAVIS K.F., ROSA L., CARR J.A., CHIARELLI D., DELL'ANGELO J., GEPHART J., MACDONALD G.K., SEEKELL D.A., SUWEIS S. 2018. *The global food-energy-water nexus*. Geophys, 59, 456-531.

EHLERINGER J.R., COMSTOCK J. 1987. *Leaf absorptance and leaf angle: mechanisms for stress avoidance*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

FALKENMARK M. 1997. *Society's interaction with the water cycle: a conceptual framework for a more holistic approach*. Hydrological science, 42, 451-466.

FAO, 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

FAO, 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *The state of food and agriculture*. 26-28.

FARQUHAR G.D., EHLERINGER J.R., HUBICK K.T. 1989. *Carbon isotope discrimination and photosynthesis*. Annual review of plant physiology and plant molecular biology, 40, 503-537.

FLEXAS J., BOTA J., ESCALONA J.M., SAMPOL B., MEDRANO H. 2002. *Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: an evaluation of stomatal and mesophyll limitations*. Functional Plant Biology, 29, 461-471.

FREGONI M., 2013. *Viticultura di qualità. III edizione*.

FUENTES S., DE BEI R., PECH J., TYERMAN S. 2012. *Computational water stress indices obtained from thermal image analysis of grapevine canopies*. Irrigation Sciences, 30, 523–536.

GAMON J.A., PEARCY R.W. 1989. *Leaf movement, stress avoidance and photosynthesis in Vitis californica*. Oecologia, 79, 475-481.

GATES D.M. 1964. *Transpiration and leaf temperature*. Annual review of plant physiology, 19, 211-238.

GÓMEZ-DEL-CAMPO M., RUIZ C., LISSARRAGUE J.R. 2002. *Effect of water stress on leaf area development, photosynthesis and productivity in Chardonnay and Airen grapevines*. Amer journal enology viticulture, 53, 138-143.

GRAFTON R.Q.Q., WILLIAM J., PERRY C.J.J., MOLLE F., RINGLER C., STEDUTO P., UDALL B., WHEELER S.A.A., WANG Y., GARRICK D. 2018. *The paradox of irrigation efficiency*. Science, 316, 748-750.

GRANT O.M., TRONINA L., JONES H.G., CHAVES M.M. 2007. *Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes*. Journal of experimental botany, 58, 815-825.

GRIGG D., METHVEN D., DEI BEI R., RODRIGUEZ LOPEZ C.M., DRY P., COLLINS C. 2018. *Effect of vine age on vine performance of Shiraz in the Barossa valley, Australia*. Australian Journal grape wine res, 24, 75-87.

GUILIONI L., JONES H.G., LEINONEN I., LHOMME J.P. 2008. *On the relationships between stomatal resistance and leaf temperatures in thermography*. Agriculture meteorology, 148, 1908–1912.

HANEL M., RAKOVEC O., MARKONIS Y., MÁCA P., SAMANIEGO L., KYSELY J., KUMAR R., 2018. *Revisiting the recent European droughts from a long-term perspective*. Sci. Rep., 8, 1-11.

HETHERINGTON A.M., WOODWARD I. 2003. *The role of stomata in sensing and driving environmental change*. Nature, 424, 901-908.

HOCHBERG U., DEGU A., CRAMER G.R., RACHMILEVITCH S., FAIT A. 2015. *Cultivar specific metabolic changes in grapevines berry skins in relation to deficit irrigation and hydraulic behavior*. Plant physiology and biochemistry, 88, 42-52.

HOCHBERG U., BONEL A.G., DAVID-SCWARTZ R., DEGU A., FAIT A., COCHARD H., PETERLUNGER E., HERRERA J.C. 2017. *Grapevine acclimation to water deficit: the adjustment of stomatal and hydraulic conductance differs from petiole embolism vulnerability*. Planta, 245, 1091-1104.

HOLBROOK N.M., ZWIENIECKI M.A. 1999. *Embolism repair and xylem tension: do we need a miracle?* Plant physiology, 120, 7-10.

IDSO S.B., ROSELYNE I., ABUTALEB K., AHMED F. 1982. *Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress*. Agriculture meteorology, 27, 59–70.

ISTAT, 2014. *6° Censimento generale dell'agricoltura – utilizzo della risorsa idrica a fini irrigui in agricoltura*, 19-23.

JARIA F., MADRAMOOTOO C.A. 2011. *Irrigation scheduling of field tomatoes based on stand-alone continuous, real time soil moisture sensor data*. Presented at the northeast agricultural and biological conference.

JACKSON R.D., IDSO S.B., REGINATO R.J., PINTER P.J. 1981. *Canopy temperature as a crop water stress indicator*. Water Resources, 17, 1133–1138.

JONES H.G. 1992. *Plant and microclimate*, Cambridge university, 428

JONES H.G. 1999. *Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling*. Agricultural and forest meteorology, 95, 139-149.

JONES H.G. 2004. *Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods*. Journal of experimental botany, 55, 2427-2436.

JONES H.G., STOLL M., SANTOS T., DE SOUSA C., CHAVES M.M., GRANT O.M. 2002. *Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine*. Journal experimental botany, 53, 2249-2260.

KAMBLE M.V., GHOSH K., RAJEEVAN M., SAMUI R.P. 2010. *Drought monitoring over Indiaa through Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. MASUAM, 61, 537-546.

KELLER M. 2010. *The science of grapevines; anatomy and physiology*. Elsevier Inc.

KIDWELL K.B. 1990. *Global vegetation index user's guide*. U.S. Department of commerce/national oceanic and atmospheric

KNIPFER T., CUNEO I.F., BRODERSEN C.R., MCELDRONE A.J. 2016. *In situ visualization of the dynamics in xylem embolism formation and removal in the absence of root pressure: a study on excised grapevine stems*, 171, 1024-1036.

KNIPFER T., EUSTIS A., BRODERSEN C., WALKER A., MCELDRONE A. 2015. *Grapevine species from varied native habitats exhibit with differences in embolism formation/repair associated with leaf gas exchange and root pressure*. *Plant, cell e environment*, 38, 1503-1513.

KOGAN F.N. 1987. *Vegetation index for areal analysis of crop conditions*. Proceedings of 18th conference on agricultural and forest meteorology, Indiana, USA, 103-106.

LEBON E., PELLEGRINO A., LOUARN G., JERERMIE L. 2006. *Branch development controls leaf area dynamics in grapevine (Vitis vinifera) growing in drying soil*. *Annals of botany*, 98, 175-185.

LEDO A., PAUL K.I., BURSLEM D.F. R.P., EWEL J.J., BARTON C., BATTAGLIA M., BROOKSBANK K., CARTER J., EID T.H., ENGLAND J.R., FITZGERALD A., JONSON J., MENCUCCINI M., MONTAGU K.D., MONTERO G., MUGASHA W.A., PINKARD E., ROXBURGH S., RYAN C.M., RUIZ-PEINADO R., SOCHACKI S., SPECHT A., WILDY D., WIRTH C., ZERIHUN A., CHAVE J. 2018. *Tree size and climatic water deficit control root to shoot ratio in individual trees globally*. 217, 8-11.

LIU L., MCDONALD A.J.S., STADENBERG I., DAVIES W.J. 2001. *Stomatal and leaf growth responses to partial drying of root tips in willow*. *Tree physiology*, 21, 765-770.

LOVEYS B.R., DRY P.R., STOLL M., MCCARTHY M.G. 2000. *Using plant physiology to improve the water efficiency of horticultural crops*. *Acta Horticulturae*, 537, 187-197.

LUDLOW M.M., BJÖRKMAN O. 1984. *Paraheliotropic leaf movement in Siratro as a protective mechanism against drought-induced damage to primary photosynthetic reactions: damage by excessive light and heat*. *Planta*, 161, 505-518.

MADRAMOOTOO C.A., MORRISON J. 2013. *Advances and challenges with micro-irrigation*. *Irrigation and drainage*, 62, 255-261.

MADRAMOOTOO C.A., RIGBY M. 1991. *Effects of trickle irrigation on the growth and sunscald of bell peppers (*Capsicum annum L.*) in southern Quebec*. *Agricultural water management*, 19, 181-189.

MASSEI G. 2018. *Elaborazione di mappe della tessitura dei suoli in ambiente GIS open source. Analisi dei tools disponibili e applicazione ai suoli del bacino del Topino-Marroggia*. Rapporto tecnico 14 settembre 2018.

MCCARTHY M.G., LOVEYS B.R., DRY P.R., STOLL M. 2002. *Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines*. Food and agriculture of the united nations.

MEDRANO H., ESCALONA J.M., CIFRE J., BOTA J., FLEXAS J. 2003. *A ten-year study on the physiology of two spanish grapevine varieties under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality*. *Functional plant biology*, 30, 607-619.

MEDRANO H., TOMÁS M., MARTORELL S., ESCALONA J.M., POU A., FUENTES S., FLEXAS J. AND BOT J. 2015. *Improving water use efficiency of vineyards in semiarid regions*. *Agron Sustain*, 35, 499-517.

MERRIAM J.L., KELLER J. 1978. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Dept. of agricultural and irrigation engineering.

MOONEY H.A., EHLERINGER J.R. 1978. *The carbon gain benefits of solar tracking in a desert annual*. Plant cell environmental, 1, 307-311.

OERKE E.C., STEINER U., DEHNE H.W., LINDENTHAL M. 2006. *Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew under environmental conditions*. Journal experimental botany, 57, 2121-2132.

OJEDA H., ANDARY C., KRAEVA E., CARBONNEAU A., DELOIRE A. 2002. *Influence of pre- and post-veraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of Vitis vinifera L. cv Shiraz*. American Journal of Enological and Viticulture.

OLLAT N., PECCOUX A., PAPURA D., ESMENJAUD D., MARGUERIT E., TANDONNET J., BORDENAVE L., COOKSON S., BARRIEU F., ROSSDEUTSCH L., LECOURT J., LAUVERGEAT V., VIVIN P., BERT P., DELROT S. 2016. *Rootstocks as a component of adaptation to environment*. Grapevine in a changing environment.

PALLIOTTI A., PONI S., SILVESTRONI O. 2015. *La nuova viticoltura. Innovazioni tecniche per modelli produttivi, efficienti e sostenibili*. 32-35.

PELLEGRINO A., LEBON E., SIMONNEAU T., WERY J. 2005. *Towards a simple indicator of water stress in grapevine (Vitis vinifera L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components*. Australian journal grape wine, 11, 306-315.

POORTER H., NIKLAS K.J., REICH P.B., OLEKSYN J., POOT P., MOMMER L. 2012. *Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control*. The new phytologist, 193, 30-50.

SCHOLASCH T. 2018. *Improving winegrowing with sap flow driven irrigation*. Acta hortica, 1222, 155-168.

POU A., DIAGO M.P., MEDRANO H., BALUJA J., TARDAGUILA J. 2014. *Validation of thermal indices for water status identification in grapevine*. Agriculture Water Management, 134, 60–72.

RODRIGUES M.L., SANTOS T.P., RODRIGUES A.P., DE SOUZA C.R., LOPES C.M., MAROCO J.P., PEREIRA J.S., CHAVES M.M. 2008. *Hydraulic and chemical signaling in the regulation of stomatal conductance and plant water use in field grapevines growing under deficit irrigation*. Functional Plant Biology, 35, 565-579.

SCHOLASCH T. AND RIENTH M., 2019. *Review of water deficit mediated changes in vine and berry physiology: consequences for the optimization of irrigation strategies*. OENO One, 3, 423-444.

SCHREIBER L, RIEDERER M. 2001. *Protecting against water loss: analysis of the barrier properties of plant cuticles*. Journal of experimental botany, 52, 2023-2032.

SHULTZ H.R. AND STOLL M., 2010. *Some critical issues in environmental physiology of grapevines: future challenges and current limitation*. Australian Journal of Graoe and Wine Research, 16, 4-24.

SIMONNEAU T., BARRIEU P., TARDIEU F. 1998. *Accumulation rate of ABA in detached maize roots correlates with root water potential regardless of age and branching order*. Plant, cell e environment, 21, 1113-1122.

SOUZA C.R., MAROCO J.P., SANTOS T., RODRIGUES M.L., LOPES C., PEREIRA J.S., CHAVES M.M. 2003. *Partial rootzonedrying; regulation of stomatal aperture and carbon assimilation in field grown grapevines (Vitis vinifera cv Moscatel)*. Fuctional plant biology, 30, 653, 662.

STOLL M., LOVERYS B.R., DRY P.R. 2000. *Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine*. Journal of experimental botany, 51, 1627-1634.

SULLIVAN C. 2002. *Calculating a water poverty index*. *Word Dev*, 30, 1195-1210.

TARDIEU F., SIMONNEAU T. 1998. *Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours*. *Journal of Experimental Botany*, 49, 419-432.

TOMBESI S., NARDINI A., FRIONI T., SOCCOLINI M., ZADRA C., FARINELLI D., PONI S., PALLIOTTI A. 2015. *Stomatal closure is induced by hydraulic signals and maintained by ABA in drought-stressed grapevine*. *Scientific reports*, 5, 12449.

TRAMONTINI S., DÖRING J., VITALI M., FERRANDINO A., STOLL M., LOVISOLO C. 2014. *Soil water-holding capacity mediates hydraulic and hormonal signals of near-isohydric and near-anisohydric Vitis cultivars in potted grapevines*. *Functional plant biology*, 41, 1119-1128.

REGAN K.L., SIDDIQUE K.H.M., TURNER B.N.C., WHAN B.R. 1992. *Potential for increasing early vigour and total biomass in spring wheat II. Characteristics associated with early vigour*. *Australian Journal Agriculture Research*, 43, 541-553.

ROMERO M., LUO T., SU B., FUENTES S. 2018. *Vineyard water status estimation using multispectral imagery from an UAV platform and machine learning algorithms for irrigation scheduling management*. *Computer and electronics in agriculture*, 147, 109-117.

ROBBINS N.E., DINNENY J.R. 2018. *Growth is required for perception of water availability to pattern root branches in plants*. *Proceedings of the national academy of sciences*, 154, 822-831.

UNVER O., BHADURI A., HOOGEVEEN J. 2017. *Water-use efficiency and productivity improvements towards a sustainable pathway for meeting future water demand*. *Water*, 2017, 21-27.

UNWATER, 2021. *Il valore dell'acqua, fatti e cifre*.

VALOR E., CASELLES V. 1996. *Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African and South American areas*. Remote sensing environmental, 57, 167-184.

VAN LEEUWEN C. AND DESTRAK-IRVINE A., 2017. *Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard*. OENO One, 51, 147-154.

VAN LEEUWEN C., TREGOAT O., CHONÉ X., BOIS B., PERNET D., GAUDILLÈRE J.P. 2009. *Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes?* Journal international science vigne vin, 43, 121-134.

VARMA S., VERMA S., NAMARA R. 2006. *Promoting micro-irrigation technologies that reduce poverty*. International water management institute, Water policy briefing, 23.

WERNER C., CORREIA O., BEYSCHLANG W. 1998. *Two different strategies of Mediterranean macchia plants to avoid photoinhibitory damage by excessive radiation levels during summer drought*. Acta Oecologica, 20.

WILLIAMS L.E., ARAUJO F.J. 2002. *Correlations among leaf, midday leaf and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in Vitis vinifera*. American Journal of Enology and Viticulture, 127, 448-454.

WINKEL T., RAMBAL S. 1993. *Influence of water stress on grapevines growing in the field: from leaf to whole-plant response*. Australian journal plant physiology, 20, 143-157.

ZURRU R., MULAS M., PIRAS F. 2017. *L'irrigazione. La coltivazione dell'uva da tavola in ambiente mediterraneo*, 139-156.

