



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI AGRARIA

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente

Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro-Forestali

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

**Validazione della capacità di riconoscimento dello stato idrico nel vitigno Pinot
grigio di un innovativo sistema multi-sensore dotato di stereo camera**

**Validating the capability of an innovative multi-sensor system equipped with a
stereo camera to monitor the vine water status in Pinot gris cv**

Relatore:

Prof.ssa Lucia Bortolini

Correlatore:

Dott.ssa Federica Gaiotti

Laureando:

Carlo Peretti

Anno Accademico 2021-2022

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento alla mia relatrice, prof.ssa Lucia Bortolini dell'Università di Padova e alla mia correlatrice, la dott.ssa Federica Gaiotti del centro di ricerca per la viticoltura di Conegliano CREA-VE (Viticoltura ed Enologia), grazie alle quali mi è stata data l'opportunità di raggiungere questo ulteriore traguardo. Le ringrazio per il sostegno offertomi durante tutto il periodo di rilevamento e di stesura. Ringrazio di cuore il centro di ricerca CREA-VE per avermi concesso la strumentazione durante tutto l'arco della stagione e il supporto dei suoi collaboratori: Alberto Cagnin e Marco Lucchetta; l'azienda S.Agr.V.It per la gentile concessione del vigneto sperimentale e l'azienda "CET-Electronics" per aver fornito oltre il supporto tecnologico quello consulenziale per il quale ringrazio Denise Vicino. Infine, esprimo profonda riconoscenza per il sostegno che mi ha dato la mia famiglia senza la quale non avrei potuto completare questo percorso.

Riassunto

Il settore agro-alimentare e gli stakeholder che vi operano oggi hanno un importantissimo obiettivo da raggiungere per puntare alla crescita sostenibile della filiera vitivinicola in risposta ai cambiamenti climatici. Anche nelle pratiche viticole questo obiettivo coincide con l'urgente necessità di sviluppare metodi e strumenti innovativi che cooperino e aiutino a compiere scelte agronomiche più efficienti per l'utilizzo dell'acqua nei periodi di maggior stress idrico.

L'intento della tesi è stato quello di validare la capacità di un sistema multisensore dotato di stereo camera e termocamera integrata (WCam) di riconoscere l'effetto del deficit idrico in due tesi sottoposte a due strategie d'irrigazione differenti. La tesi aziendale (Az) è stata mantenuta in condizioni idriche ottimali, grazie a supporti idrici costanti, la tesi ad irrigazione ridotta (Ir), al contrario, è stata gestita con apporti idrici più ridotti al fine di determinare condizioni di stress nella stagione 2021.

Al fine di verificare l'effetto della gestione irrigua differenziata sullo stato idrico delle tesi, sono stati monitorati nel corso della stagione il potenziale idrico e la conduttanza stomatica. Le misure relative alla chioma, registrate sia manualmente che dalla videocamera, hanno riguardato la temperatura e l'inclinazione fogliare.

I dati ottenuti da WCam sono stati confrontati con quelli raccolti manualmente; dalla forte correlazione tra i risultati ottenuti dai due metodi è stato possibile affermare che la stereo camera abbia riconosciuto chiaramente lo stress idrico.

Abstract

Today the agri-food sector and its stakeholders have a very important goal to achieve in order to aim for the sustainable growth of the wine supply chain in response to climate change. This objective coincides both with the urgent need to develop innovative methods and tools that cooperate and help to make more efficient agronomic choices for the use of water in periods of great water stress in viticultural practices.

The aim of the thesis was to validate the ability of a multisensor system equipped with stereo camera and integrated thermal camera (WCam) to recognize the effect of water deficit in two theses subjected to two different irrigation rates. The Az thesis has been maintained in optimal water conditions, thanks to constant water supports; the thesis with reduced irrigation (Ir), on the contrary, has been managed with reduced water inputs in order to determine stress conditions in 2021 season.

In order to verify the effect of differentiated irrigation management on the water status of the theses, the water potential and stomatal conductance were monitored during the season. The canopy measurements, recorded both manually and by the camera, concerned the temperature and leaf inclination.

WCam data have been compared with manually collected data; the strong correlation between the results obtained by the two methods shows that the stereo camera has clearly recognized water stress.

INDICE

Ringraziamenti.....	II
Riassunto	IV
Abstract	VI
INTRODUZIONE	1
<i>1.1 Il deficit idrico e la vite</i>	<i>2</i>
<i>1.2 Gli effetti dell'eccesso idrico</i>	<i>4</i>
<i>1.3. L'impiego dell'irrigazione in vigneto</i>	<i>5</i>
<i>1.4 Pratiche agronomiche a supporto della gestione idrica.....</i>	<i>9</i>
<i>1.5 Metodi per misurare il fabbisogno idrico</i>	<i>11</i>
<i>1.5.1 Metodi indiretti</i>	<i>11</i>
<i>1.5.2 Metodi diretti.....</i>	<i>13</i>
OBIETTIVO.....	19
MATERIALI E METODI	20
<i>2.1 Sito sperimentale.....</i>	<i>20</i>
<i>2.1.1 Caratteristiche climatiche dell'area di sperimentazione.....</i>	<i>21</i>
<i>2.1.2 Caratteristiche pedologiche dell'area di studio</i>	<i>23</i>
<i>2.1.3 Caratteristiche del vigneto.....</i>	<i>24</i>
<i>2.1.4 Caratteristiche dell'impianto di irrigazione</i>	<i>25</i>
<i>2.1.5 Descrizione piano sperimentale</i>	<i>26</i>
<i>2.1.6 Il sistema multisensore dotato di stereo camera WCam</i>	<i>28</i>
<i>2.2 Descrizione delle misurazioni in campo</i>	<i>31</i>
<i>2.3 Analisi statistica.....</i>	<i>37</i>
<i>2.4 Approfondimento sulla misura della variazione dell'inclinazione fogliare tra giorno e notte</i>	<i>37</i>
RISULTATI E DISCUSSIONI.....	44
<i>3.1 Caratteristiche climatiche del sito nel periodo di sperimentazione</i>	<i>44</i>
<i>3.2 Analisi degli interventi irrigui in relazione dei fenomeni precipitativi 2021.</i>	<i>46</i>

<i>3.3 Risultati della sperimentazione.....</i>	<i>47</i>
<i>3.4 Validazione delle funzionalità della stereo camera e confronto con i dati acquisiti in campo.....</i>	<i>53</i>
<i>3.5 Valutazione dei risultati ottenuti dal confronto tra programmi Aurora WEB sull'individuazione dell'inclinazione fogliare</i>	<i>57</i>
<i>3.6 Valutazione dei risultati dell'inclinazione fogliare tra il giorno e la notte in relazione allo stress idrico.....</i>	<i>60</i>
<i>3.7 Risultati produttivi e qualitativi</i>	<i>62</i>
CONCLUSIONI.....	65
BIBLIOGRAFIA	68

INTRODUZIONE

L'incertezza che sta caratterizzando l'andamento climatico degli ultimi decenni ci obbliga a riflettere su ogni strategia possibile da attuare al fine di migliorare o per lo meno adeguare i sistemi di gestione agronomica alla ridotta disponibilità idrica. Questa necessità sta interessando sempre più la viticoltura. Secondo dati appresi dal report stilato dall'OIV (2019) a livello globale l'interessamento nei confronti del settore vitivinicolo è in costante aumento. Nonostante i dati relativi al 2018 mostrino come ci sia stato un calo della superficie mondiale coltivata a vite rispetto al 2014 si è passati, infatti, da 7,5 milioni di ha a 7,4 milioni di ha, tale fenomeno non ha colpito la produzione mondiale di vino che è passata da 270 mhl misurati nel 2014 a 292 mhl nel 2018. Sotto il profilo economico il commercio di vino ha un valore di circa 30 miliardi di euro e i principali paesi produttori in Europa sono Italia, Francia e Spagna (Statistical Report On World Vitiviniculture, 2019). A questi paesi è legato, allo stesso tempo un altro dato significativo. La FAO, infatti, indica come negli ultimi anni nell'areale mediterraneo la frequenza e l'intensità di eventi siccitosi siano aumentati (FAO, 2016). Questa tendenza non accenna a diminuire e con le stime risalenti al IPCC del 2018 si prevede che le temperature possano aumentare ulteriormente di 1,5 °C tra il 2030 e il 2050 (IPCC, 2018). Fino agli anni '90, come afferma Miravalle (Miravalle, 2013), la vite poteva definirsi senza alcun dubbio una coltura "rustica" ovvero abbastanza resistente da non richiedere particolari supplementi idrici. Questa prerogativa è legata soprattutto alle caratteristiche intrinseche della pianta che la rendono "water spender" ovvero in grado sviluppare e adeguare fisiologicamente i propri organi in modo da contrastare una situazione di deficit idrico (Zurru et al., 2017). Ad oggi però, queste strategie naturali sono messe a dura prova e i viticoltori, anche in funzione della resa, sono sempre più costretti ad utilizzare modalità di irrigazione che "soccorrano" la vegetazione (Miravalle, 2013). In più, considerando le previsioni non positive relative agli andamenti climatici queste dinamiche sono destinate a peggiorare. L'aumento della temperatura media comporterà cambiamenti, non solo a livello climatico, interessando principalmente l'intensità e la frequenza delle precipitazioni, degli eventi siccitosi e delle "onde di calore", ma anche a livello fisiologico della pianta. Temperature più alte incrementano il livello di evapotraspirazione delle

pianze e di conseguenza incidono sul bilancio idrico durante il ciclo vegetativo (Schultz e Stoll, 2010; van Leeuwen e Destrac-Irvine, 2017). In media, durante il ciclo vegetativo, la vite necessita dai 300 ai 600 mm di acqua nelle aree temperate, fino ad arrivare ad un valore pari a 800 mm nelle zone più aride (Williams, 2014). Note le dinamiche appena descritte, diviene semplice constatare quanto sia urgente trovare soluzioni efficienti per l'irrigazione in vigneto.

Al fine di individuare le strategie migliori da adottare per far fronte ai problemi sopra accennati è di fondamentale importanza conoscere gli effetti che il deficit o l'eccessiva presenza d'acqua possono avere sulla vite. Entrambe le problematiche influenzano in modo negativo la crescita vegeto-riproduttiva della pianta e possono causare ancor più gravi esiti qualora si presentino in concomitanza ad altri stress biotici o abiotici. Eccessivo irradiazione, ventosità e limitata umidità relativa amplificano quelli che possono essere gli effetti già devastanti causati dalla siccità. Contemporaneamente, annate particolarmente piovose, presenza di alta pressione di malattie fungine, sistemi di drenaggio poco efficienti o inesistenti combinati a scelte colturali infelici possono accentuare gli effetti negativi causati dall'eccesso idrico e dalla presenza di ristagno nel suolo.

1.1 Il deficit idrico e la vite

La condizione di stress idrico può manifestarsi nella vite in diversi momenti, con effetti diversi a seconda dello stadio vegetativo in cui si trova la stessa.

Una carenza idrica nelle fasi precedenti la ripresa vegetativa può comportare danni alla differenziazione fiorale a causa del ritardo con cui l'apparato radicale è entrato in azione (Zurro et al., 2008). Nelle prime fasi di sviluppo stagionale la presenza di acqua è fondamentale per supportare adeguatamente la crescita del germoglio, lo sviluppo del fiore ed infine l'allegagione. La mancanza di acqua per le radici riduce la loro capacità di assorbimento dei nutrienti presenti nel terreno. Questa problematica ritarda il germogliamento con conseguenze dirette sullo sviluppo degli organi necessari alla successiva annata di produzione (Mirás-Avalos et al., 2021). In condizioni di carenza, la crescita del germoglio avviene generalmente in modo stentato manifestando internodi

corti e foglie poco sviluppate. Lebon e Pellegrino (Lebon et al., 2006; Pellegrino et al., 2005) sottolineano che, prima della crescita del germoglio principale, ad essere inibita è la crescita dei germogli secondari o laterali. Stress idrici moderati-severi comportano sempre una riduzione della conduttanza stomatica con conseguenze negative sull'efficienza fotosintetica. La regolazione stomatica è frutto dell'interazione tra segnali ormonali e idraulici e l'acido abscissico (ABA) è il principale ormone secreto dalla pianta durante un periodo siccitoso. Questo può essere prodotto dalle foglie o dalle radici con la funzione di regolare la chiusura degli stomi, agendo direttamente sulle cellule di guardia. Insieme a tale strategia, la pianta regola la chiusura degli stomi tramite segnali idraulici. Per ottemperare a situazioni di embolia, e quindi evitare i fenomeni di cavitazione che ridurrebbero la conduttività idraulica compromettendo irreversibilmente la traspirazione (Charrier et al., 2018), la pianta chiude gli stomi preservando così un potenziale idrico adeguato (Thibaut Scholasch et al., 2019). Questa capacità caratterizza alcune cultivar che così comportandosi vengono chiamate iso-idriche o “pessimiste” in quanto riescono, tramite regolazione stomatica, a mantenere costante il potenziale idrico fogliare al calare di quello del suolo (Simonneau et al., 2017).

Dalla fioritura all'allegagione i principali fenomeni visibili in forti casi di stress riguardano la parete fogliare. Lo sviluppo così limitato comporta meno produzione di fotosintetati da trasferire agli organi in formazione. Questa mancanza in genere determina la colatura dei fiori e nei casi più estremi l'aborto dell'intero grappolo florale. L'allegagione, di conseguenza, si verifica in modo stentato con formazione di grappoli piccoli e spargoli ripercuotendosi direttamente sulla produzione. Data la lentezza con cui è avvenuta la moltiplicazione cellulare i grappoli piccoli e acinellati non riescono a crescere in modo significativo. A giovarne potrebbe essere il profilo organolettico del prodotto. Numerosi studi riportano, infatti, l'efficacia che ha l'induzione dello stress idrico controllato durante la fase di maturazione nel produrre vini di eccezionale qualità. La riduzione dell'attività fotosintetica dovuta dal deficit idrico rende i carboidrati maggiormente disponibili per essere allocati verso i *sink* riproduttivi. Ciò partecipa positivamente alla sintesi di composti aromatici, coloranti e zuccherini (van Leeuwen et al., 2009). Da una parte l'incremento del rapporto buccia/polpa, dovuto alla riduzione delle dimensioni della bacca, è responsabile della crescita della concentrazione di

sostanze fenoliche e antociani, dall'altra lo stress idrico amplifica la biosintesi di precursori di molecole coloranti e aromatiche (Munitz et al., 2020).

Nel periodo post-vendemmia, gli effetti più riportati in letteratura, riguardano l'inibizione della crescita radicale. A questa vengono aggiunti casi di inefficienza fotosintetica e abscissione fogliare precoce. Infine, non si evidenziano particolari effetti dello stress idrico sulla pianta durante il periodo di "dormienza".

1.2 Gli effetti dell'eccesso idrico

Non meno pericolosa e rilevante è la problematica opposta alla limitata presenza di acqua, ovvero l'eccessiva umidità nel suolo. Questo fenomeno può presentarsi in annate particolari molto piovose oppure a seguito di una scorretta gestione agronomica del terreno (Zurro et al., 2008). Gli effetti che possono manifestarsi sulla coltura variano a seconda dello stadio vegetativo in cui si trova la pianta e come per la problematica precedente possono essere più o meno significativi. Quantità eccessive di acqua nel suolo lo rendono asfittico. Questa condizione limita la mobilità dell'ossigeno, elemento indisponibile per le radici. La pianta reagisce a tale condizione producendo acetaldeide ed etanolo che trasformati successivamente in etile e ABA regolano la chiusura degli stomi limitando l'attività fotosintetizzante della chioma, portandola nei casi più estremi alla morte (Luise, 2019). A fine stagione un fenomeno di questo tipo può influire negativamente sulla differenziazione delle gemme. Ad inizio stagione invece, la formazione dei germogli viene compromessa procurando nei casi più estremi la morte della pianta. Vigoria eccessiva, limitata allegagione fino alla colatura sono i principali effetti di un prolungato stato di surplus idrico. Le singole bacche si mostrano generalmente più grandi data la forte diluizione, povere in colore, aromi e con concentrazione alta di acidi. L'incremento volumetrico rende sottili le pareti degli acini e aumenta le probabilità di rottura. In alcune varietà tale fragilità si rileva anche a livello del rachide dove se ne può notare il disseccamento (Zurro et al., 2008). Queste dinamiche favoriscono la propagazione di colonie fungine inficiando direttamente la qualità della raccolta. Tale problematica è stata affrontata in uno studio condotto dal CREA-VE di Conegliano in collaborazione con il consorzio Agrario di Ravenna (Gaiotti et al., 2018). In tale studio sono state comparate una tesi "aziendale" senza limitazioni irrigue ed

un'altra sottoposta a “deficit idrico controllato”. In due anni di rilevamenti nella tesi aziendale l'irrigazione è sempre iniziata un mese prima rispetto alla tesi DI e dai risultati ottenuti, si è visto che tale gestione ha comportato una maggiore vigoria e, in conseguenza della limitata aerazione e della maggiore ombreggiatura all'interno della chioma, un peggioramento dello stato sanitario dei frutti.

1.3. L'impiego dell'irrigazione in vigneto

La crescita della vite, come di ogni vegetale terrestre, è il risultato dell'interazione tra pianta, suolo e l'atmosfera. L'irrigazione si pone come mezzo per ottimizzare questa interazione. Secondo i dati ISTAT (2019) l'Italia è tra i paesi europei con il più alto tasso d'utilizzo d'acqua in agricoltura. L'irrigazione, in ogni caso, va distinta per prassi d'intervento. Infatti, può essere definita normale, di soccorso oppure ausiliaria. La prima pratica è continua ed interessa tutto il ciclo vitale della pianta, le ultime due invece, sono mirate e servono per far fronte a deficit idrici oppure al superamento di fasi fenologiche più sensibili a fattori abiotici avversi. Ad oggi esistono numerosi metodi di irrigazione e finalità diverse per cui vengono adoperati, che vanno al di là del semplice apporto idrico. L'irrigazione può infatti essere utilizzata per scopi termici, ad esempio come antibrina; può essere finalizzata a dilavare le alte concentrazioni di sale nel suolo oppure per apportare sostanze ammendanti che possano giovare alla struttura del suolo. Può inoltre essere usata per correggere il pH del terreno oppure come mezzo di trasporto di concimi o antiparassitari.

I metodi irrigui possono essere classificati in base alle modalità con cui l'acqua viene distribuita. Esistono metodi, come quelli che sfruttano la gravità, che prevedono lo scorrimento superficiale o la sommersione dell'appezzamento. Questi sono i più antichi, ma attualmente in via di disuso a causa degli elevati volumi idrici impiegati. Sistemi più moderni, che meglio si adattano alla realtà vitivinicola sono quelli a pressione, quali l'aspersione e la microirrigazione compresa, quella interrata.

La distribuzione “a pioggia” o per aspersione è un metodo contraddistinto da un'efficienza superiore ai tradizionali sistemi per gravità. In assenza di vento durante l'operazione di distribuzione dell'acqua, l'efficienza può superare l'80%. I vantaggi

dell'uso di tale prassi irrigua sono riscontrabili in primis nei volumi d'acqua richiesti, e dalla possibilità di dosare tale quantità. È un metodo polifunzionale poiché si presta bene alla distribuzione di concimi e perché può essere utilizzata per scopi termici e ausiliari. Ciò nonostante, è una prassi che richiede un forte dispendio energetico quindi economico e allo stesso tempo può essere caratterizzato da forti sprechi per deriva e ruscellamento. Ai fini dell'efficienza di distribuzione, perciò, è basilare progettare l'impianto di modo che gli irrigatori siano posizionati correttamente tenendo sempre a mente la topografia del suolo.

Un impianto di microirrigazione differisce totalmente da quello visto in precedenza. Rispetto al metodo ad aspersione, la microirrigazione è caratterizzata sia per la distribuzione a portate e pressioni basse sia per il funzionamento con turni frequenti. Tali prerogative da una parte permettono di aumentare notevolmente sia l'efficienza, che può spingersi fino al 95%, sia l'uniformità di distribuzione dell'impianto, essendo presente una rete fitta di tubi disperdenti con tanti erogatori; dall'altra, però, data la costanza del funzionamento, le ore da dedicare alla supervisione e alla manutenzione aumentano. Livelli così alti di efficienza vengono garantiti dai limitati sprechi di acqua che invece sono maggiori nell'aspersione. L'irrigazione localizzata permette di evitare l'evaporazione, la deriva, il ruscellamento e la percolazione profonda. Tutto ciò evita il sovra-adacquamento dell'area irrigata e il miglior controllo sia di infestanti sia di patogeni fungini. Le minori pressioni richieste per il funzionamento dell'impianto riducono i consumi d'acqua e ne limitano l'energia richiesta. I sistemi "a goccia" sono tra i più utilizzati in vigneto visto che permettono di avere un'alta uniformità di distribuzione su tutto il filare. In particolare si utilizzano solitamente le ali gocciolanti integrali, che presentano dei gocciolatori interni alla tubazione, di tipo autocompensante, in grado di mantenere costante la portata per tutta la lunghezza dell'ala, nel caso di lunghe linee o terreni in pendenza.

La microirrigazione interrata è l'evoluzione del tradizionale impianto a goccia usato in microirrigazione. L'ala gocciolante viene interrata al di sotto del filare, tra i 20 cm e 30 cm di profondità, al fine di distribuire l'acqua direttamente nella zona interessata dall'apparato radicale. Le caratteristiche del sistema offrono un'elevata efficienza irrigua con perdite ridottissime per percolamento, ruscellamento ed evaporazione, oltre a

permettere le possibilità di accesso in campo dei macchinari in qualsiasi momento non bagnando il terreno.

Diviene essenziale, a tal proposito, individuare le tempistiche e i quantitativi adatti ai fini dell'ottimizzazione del trattamento irriguo. Tali fattori dipendono principalmente dalle condizioni pedoclimatiche, colturali e dell'impianto irriguo presenti. Il fabbisogno idrico può essere stimato qualora si sappia il peso della sostanza secca prodotta e l'entità relativa della traspirazione (Zurro et al., 2008). Oltre alle caratteristiche colturali, che differiscono in base alla specie, determinandone o meno la propensione a traspirare oppure a conservare il potenziale idrico interno, vanno considerate sia le caratteristiche dell'impianto (di cui si è già parlato), sia quelle del suolo. Suoli sabbiosi drenano maggiormente e più rapidamente l'acqua, infatti i dati mostrano che in media l'acqua disponibile per metro di suolo sabbioso sia pari a 36 mm. I suoli argillosi, invece, possono mantenere l'acqua a disposizione della pianta fino a 167 mm per metro cubo di suolo (Sthockley, 1956). Perciò, nei suoli sabbiosi o ghiaiosi si deve intervenire, anche a giorni alterni o giornalmente, con l'impianto a goccia in subirrigazione. Nei suoli argillosi i turni possono essere meno frequenti (anche settimanali) e i volumi maggiori (10/12 mm ad adacquata) (Miravalle, 2013).

Per ciò che concerne le tempistiche con cui effettuare il trattamento irriguo, come si è già in parte accennato, i fattori di dipendenza sono plurimi. Generalmente però, la vite presenta un periodo in cui il reperimento dell'acqua è fondamentale. Diversi studi riconoscono che gli effetti più visibili sulla produzione si hanno quando lo stress si presenta 2 settimane prima della fioritura oppure 3-4 settimane dopo questa (Miravalle, 2013). Lo studio condotto da Munitz ha voluto constatare quanto detto. I risultati riportano che iniziare ad irrigare durante la primavera, quando il processo di crescita vegetativa è alle prime fasi, comporta un'enfasi di ogni parametro sia vegetativo che fisiologico. Al contrario di quanto si possa credere, fornire acqua a piante mai irrigate durante la fase di germogliamento non ha comportato limitazioni nella crescita, ma anzi incremento degli stessi parametri esaminati nella tesi irrigata fin dal primo momento. Però, nel caso di una irrigazione tardiva, il diametro dei fusti in impianto di sette anni era tre volte inferiore a quello misurato nelle tesi irrigate precocemente. Questo per affermare che, in caso di ridotta disponibilità idrica nel suolo, posporre l'intervento di irrigazione comporta effetti negativi sulla produttività, ma anche sulle strutture vegetative della

stagione corrente, andandone a limitare lo sviluppo dei vasi xilematici, e di quella successiva, comportando una riduzione della produzione di nutrienti stoccabili (Munitz et al., 2020).

Nel pianificare la gestione dell'irrigazione, pertanto, è necessario procedere di pari passo con le varie fasi fenologiche. Inizialmente, è di vitale importanza somministrare acqua fino a coprire dal 75% al 95% la capacità idrica di campo fino ad almeno il 60% dello sviluppo vegetativo della pianta. La capacità idrica di campo o CIC è un valore caratteristico di ogni tipo di suolo ed è l'intervallo di bagnatura del substrato entro il quale si deve mantenere la coltura se vogliamo che non soffra per eccesso o scarsità d'acqua, ovvero esprime la quantità di acqua contenuta nel suolo dal momento in cui smette di percolare (Zurro et al., 2008). La CIC di un suolo è data dalle proprie caratteristiche granulometriche che lo rendono più o meno propenso a contrastare, tramite imbibizione, capillarità e tensione superficiale, la naturale percolazione dell'acqua. Per un miglior controllo sulla vigoria si può pensare di ridurre le percentuali relative alla CIC. Durante la fioritura e l'invaiaitura gli interventi devono essere funzionali, solo nel caso fossero indispensabili, a mantenere una sufficiente umidità nel terreno; altrimenti, un lieve stress durante l'allegagione potrebbe essere funzionale ad equilibrare il rapporto vegeto-produttivo della pianta. Questa condizione va mantenuta anche durante l'invaiaitura, mentre va gradualmente implementata post-maturazione (per limitare le nuove emissioni) fino a raggiungere una capacità di campo pari al 50% una o due settimane prima della raccolta per non compromettere la turgidità degli acini. L'irrigazione va progressivamente ridotta dopo la raccolta. Infatti, gli obiettivi primari devono essere il mantenimento della funzionalità radicale e fogliare fino alla dormienza (Zurro et al., 2008). Evitare di stimolare troppo la crescita della parte aerea in questa fase è basilare. La competizione tra parte aerea e ipogea per l'utilizzo di nutrienti e fotosintetati sarebbe dannosa in questo stadio perché andrebbe ad ostacolare l'accumulo di amido nelle radici e di conseguenza l'induzione al germogliamento nella successiva primavera (Peretti, 2019)

1.4 Pratiche agronomiche a supporto della gestione idrica

Alla gestione idrica vanno associate pratiche agronomiche altrettanto efficienti che portino ad ottimizzare l'uso della risorsa ed evitare gli sprechi. Si può iniziare a pervenire a tale scopo scegliendo viti più resistenti. Una forte incidenza sulla capacità di sopportare lo stress idrico è data dalle qualità intrinseche del portinnesto adottato. La scelta del portinnesto funge da strumento di adattamento alle condizioni di criticità che il cambiamento climatico sta facendo rilevare. Inizialmente adottati per contrastare malattie e parassiti, ad oggi la sfida più grande che devono affrontare è quella di mantenere, o perfino incrementare le rese a prescindere dalle previsioni climatiche restrittive attuali e future. Lo stress idrico, la salinità dei suoli e l'innalzamento delle temperature sono i principali fattori abiotici limitanti soprattutto per i vigneti dei paesi del Mediterraneo. A tale scopo i portinnesti possono essere usati per modificare le caratteristiche della coltura alterandone la vigoria, la fertilità, il periodo di germogliamento e di raccolta (Marín et al., 2021). Tra i tanti quelli più adatti a resistere alla siccità si trovano nella selezione Paulsen, oppure nella Ruggeri il 140 e nella Richter il 110; si comportano in modo discreto il 420A e il 41B della selezione Millardet e de Grasset, ed infine il Fercal selezionato dalla INRA. La loro capacità di resistere alla siccità è frutto della loro parentela. A parte il 420, tutti gli altri sono il risultato dell'incrocio tra *V. berlandieri* e *V. rupestris*. Tra le principali peculiarità, queste specie di origine americana sviluppano un apparato radicale con angolo geotropico che va dai 30° spingendosi fino ai 20°. Si può capire come tali portinnesti si prestino bene a crescere in ambienti dove la mancanza d'acqua è il fattore più presente per cui l'angolo geotropico così pronunciato fa sì che l'80% delle radici della pianta possa arrivare ad una profondità di 60 cm e oltre.

Si è già preso in considerazione l'importanza che ha la capacità di ritenzione dell'acqua da parte del suolo in relazione alla vitalità della pianta. Esistono pratiche che riescono a migliorare tale fattore qualora non fosse così positivo. Tra le prime si ricordano i numerosi successi della pacciamatura in termini di controllo delle infestanti, riduzione dell'erosione del suolo, aumento delle rese, ma soprattutto della ritenzione dell'acqua e rilascio di sostanza organica. Dati indicano che l'uso di acqua venga ridotto fino al 18% utilizzando il materiale derivato dalla potatura invernale in vigneto come pacciamatura (López-Urrea et al., 2020). Allo stesso tempo i valori medi legati al deficit idrico (principalmente

evapotraspirazione) in vigneto non irrigato vengono ridotti del 13% in suoli pacciamati rispetto a quelli privi di tale materiale (Buesa et al., 2021). La seconda possibile opzione è sfruttare le proprietà fisiche che le *cover crops* manifestano in funzione del drenaggio e nel limitare i ruscellamenti. Non è trascurabile il fatto che, le piante nell'interfila possano concorrere con la coltura principale per le risorse fondamentali: perciò, si sono selezionate negli anni specie sempre meno bisognose e in grado di sopportare bene apporti idrici sporadici. Nel caso l'incidenza delle precipitazioni dovesse essere insufficiente, le strategie da adottare prevedono l'utilizzo a interfile alternate di piante non perenni che non crescano durante l'estate, mentre in collina è preferibile seminare un mix di festuche, e in ambienti semi-aridi un mix di graminacee e leguminose. Al contrario, laddove non dovesse mancare la pioggia non è sconsigliato l'utilizzo di specie permanenti o pluriannuali dalla fase di germogliamento della vite (Medrano et al., 2015). Un ulteriore accorgimento da poter effettuare sul piano agronomico è la gestione della chioma. Nonostante la loro efficienza nel contrastare la siccità, risulta poco appetibile scegliere forme di allevamento ad alberello. Potrebbe essere molto più semplice pensare di progettare l'impianto con un orientamento specifico. Studi rilevano che il livello di traspirazione fogliare è superiore in impianti con orientazione est-ovest rispetto a quelli che si espongono in direzione nord-sud; ciò implica direttamente un maggiore utilizzo dell'acqua da parte dei primi rispetto ai secondi (Hunter et al., 2016). Altre ricerche affermano che, in paesi soggetti a periodici eventi siccitosi, riuscire ad esporre il vigneto principalmente alle radiazioni mattutine quindi rivolgendolo ad occidente comporti un aumento dell'efficienza d'uso idrico (Buesa, I. et al., 2020). Allo stesso modo, non è sbagliato pensare di agire sulla densità d'impianto. Piante vicine aumentano la superficie irradiabile e di conseguenza il calore accumulabile portando ad un maggiore consumo idrico, allo stesso tempo però, meno piante comportano una riduzione della produzione e un aumento dei costi marginali (van Leeuwen, C. et al., 2019). A tal proposito è indicato trovare una situazione di compromesso tra le opzioni suggerite. Infine, si può sempre pensare di agire sulla vegetazione tramite defogliazione al fine di ristabilire un equilibrio tra gli organi e ridurre l'esigenza idrica.

1.5 Metodi per misurare il fabbisogno idrico

Le esigenze irrigue della coltura variano a seconda delle necessità traspiratorie e della disponibilità idrica nel suolo (Phogat et al., 2020). Più la coltura è vicina al punto di appassimento più è necessario reintegrare la concentrazione idrica (Milella et al., 1996). Oltre a fattori gravitazionali, la concentrazione di acqua nel suolo diminuisce per evaporazione e per l'uso che ne fa la pianta la quale, traspirando, rilascia nell'atmosfera vapore acqueo. Conoscere il momento in cui tali condizioni si presentano è essenziale ai fini della gestione irrigua. Per misurare il fabbisogno idrico possono essere usati diversi metodi. Questi si dividono tra diretti e indiretti e dipendono dallo scopo per cui è necessario usarli. Infatti, conoscere il fabbisogno idrico è essenziale per costruire un calendario con gli interventi irrigui da fare e di conseguenza conoscere a grandi linee, in base alle risorse utilizzate, l'esito quali-quantitativo dell'annata. Possono servire per comprendere le dinamiche con cui l'acqua si muove nel suolo, perciò, intervenire strutturalmente laddove si creino ristagni oppure eccessive percolazioni. Sono metodi che aiutano a comprendere le reazioni fisiologiche della pianta, e permettono di avere un quadro più dettagliato sulle specie e portinnesti da utilizzare ai fini della resistenza al deficit idrico. I metodi indiretti sono quelli che si basano su dati appresi dall'atmosfera o dal suolo, mentre quelli diretti si basano sulle risposte che la pianta manifesta in presenza di stress (Rienth e Scholasch., 2019).

1.5.1 Metodi indiretti

1. Pedologici:
 - Volumetrici
 - Tensiometrici
2. Atmosferici:
 - Evapotraspirazione
3. Bilancio idrico

I metodi indiretti prevedono di misurare la concentrazione idrica nel suolo, individuano l'entità degli scambi gassosi tra pianta e atmosfera, basandosi su stime del bilancio idrico

della pianta. Per ciò che concerne il primo metodo è indispensabile l'ausilio di sensori per misurare sia il contenuto idrico nel suolo sia il suo potenziale idrico. Nel primo caso i sensori sono definiti volumetrici e servono ad individuare la percentuale di acqua in un dato volume di terreno; nel secondo caso, invece, si misura la forza con cui l'acqua viene trattenuta dal suolo. Da un lato pratico gli strumenti volumetrici più diffusi sono i sensori capacitivi come le sonde TDR. Tali sensori propagano un impulso nel suolo che viene catturato e riflesso da una sonda immersa nel terreno. Il contenuto d'acqua è misurato in base al tempo impiegato dall'impulso a tornare indietro. Affinché questa rilevazione sia il più possibile accurata, la parte elettronica del sensore di umidità TDR, in grado di generare l'impulso elettromagnetico, deve essere calibrata con attenzione (Luise, 2019). Gli strumenti più adatti a misurare il potenziale idrico sono i tensiometri oppure gli psicrometri. Questi sensori ottengono dati elettrici, elettromagnetici, ottici, radiometrici, meccanici, acustici, pneumatici o elettrochimici tramite processi di tipo fisico, chimico o meccanico (Mirás-Avalos et al., 2021). Tra gli aspetti positivi che si trovano nell'utilizzo di tale strumentazione vi sono la costanza e l'autonomia con cui vengono raccolti i dati e la comodità con cui gli stessi possono essere collezionati a distanza. Ciò nonostante, sono numerosi anche i difetti. Infatti, richiedono una regolare manutenzione, e vanno posizionati in un numero sufficiente per tracciare bene un appezzamento che deve essere stato mappato in precedenza. Infine, la loro azione è limitata, perciò, l'individuazione dei dati in senso orizzontale e verticale è limitata e non copre l'intera area di sviluppo dell'apparato radicale della pianta.

Il secondo metodo indiretto si basa sullo studio della traspirazione e dell'evaporazione, fenomeni con cui l'acqua viene "persa" dal sistema suolo-pianta. Questo metodo però riesce a calcolare l'entità dell'evapotraspirazione tramite l'uso di due diverse funzioni: la prima è la *Eddy covariance*, la seconda è il rapporto di Bowen. L'*Eddy covariance* è una tecnica micrometeorologica per la misura diretta dei flussi di energia e di materia. Questa misura direttamente lo scambio di carbonio, acqua, e calore tra le piante e l'atmosfera. (Baldocchi, 2008; Liang et al., 2012). Entrambe le tecniche, tuttavia, sono ancora piuttosto complesse da implementare e necessitano l'impiego di strumentazione sofisticata e costosa. Tuttavia, vi è un altro metodo. Si chiama "SR" e compie un'analisi delle particelle d'aria che circondano e interagiscono con la pianta. Questo metodo,

integrato con la covarianza, compensa i difetti intrinseci riducendo i dati sovra e sottostimati durante la stagione (Kyaw Tha Paw et al., 1995).

L'ultimo metodo che viene analizzato è quello del bilancio idrico già in parte accennato in precedenza. Per compiere la stima della concentrazione traspirabile di acqua contenuta nel suolo vanno prima conosciuti alcuni parametri. Il calcolo non è semplice e necessita di conoscere sia la profondità che la distribuzione delle radici nel suolo. Esso prevede di sottrarre agli input (pioggia e irrigazione) e la riserva idrica già contenuta nel suolo alla data del rilevamento, gli output (evaporazione del suolo, traspirazione della pianta e possibili casi di ruscellamento).

1.5.2 Metodi diretti

1. Osservazione diretta
2. Potenziale idrico
 - Pre-alba
 - Foglia
 - Germoglio
3. Discriminazione del carbonio
4. Misurazione degli scambi gassosi
5. Flusso di linfa
6. *Remote sensing* (NDVI)
7. Termografia

Parallelamente ai metodi indiretti vi sono quelli diretti. Questi possono basarsi unicamente sulla visualizzazione dello stato di alcuni organi-spia della pianta affinché si prenda atto della situazione corrente ed eventualmente intervenire, oppure più articolati come i metodi che misurano il potenziale idrico. Infatti, questi possono essere misurati su diversi organi e con tempistiche diverse. Successivamente si possono misurare gli isotopi del carbonio, gli scambi gassosi oppure il flusso linfatico. Ci si può rifare, infine a tecniche più moderne che utilizzano il telerilevamento supportato da uno specifico indicatore (NDVI) oppure sfruttare dati ottenuti tramite termocamera.

Il primo metodo (osservazione diretta) è molto semplice, ma allo stesso tempo richiede una buona capacità di osservazione da parte di chi effettua il rilievo. Si tratta di osservare un numero definito di meristemi apicali o la sommità della chioma, (elementi più sensibili allo stress iniziale) e classificarli in tre gruppi: il primo si identifica per aver apice ben eretto e prima foglia aperta che copre l'apice; il secondo invece è caratterizzato da un ridotto accrescimento, ma prima foglia ricoprente l'apice; il terzo gruppo interessa quegli apici e germogli la cui crescita è completamente interrotta (Rodriguez-Lovelle et al., 2009). Rientra tra i rilevamenti diretti anche l'osservazione dell'inclinazione della foglia. Una strategia che la pianta adotta per fronteggiare condizioni di stress idrico è cambiare l'angolo di inclinazione delle foglie. Questo cambiamento ha effetti diretti sul bilancio energetico, sulla temperatura e sul tasso sia della fotosintesi sia della traspirazione della foglia. Inclinando maggiormente la lamina, la pianta riduce la superficie esposta alla radiazione incidente, perciò, limita l'innalzamento della temperatura e di conseguenza abbassa le probabilità di danni da fotoinibizione. Nonostante la relazione tra inclinazione fogliare e stato idrico sia evidente, ad oggi in letteratura si trovano poche referenze che attestino come tale meccanismo venga adottato dalla pianta in risposta ad uno stress (Gamon e Pearcy, 1989). Uno stato di deficit idrico può innescare, in presenza di uno stress ossidativo indotto da alte temperature, la fotoinibizione. Questa si misura con danni al fotosistema II (PSII) e alla capacità da parte della pianta di fissare la CO₂. Per evitare il deperimento, la pianta adotta un meccanismo di adattamento. Infatti, come spiega bene lo studio condotto da Palliotti *et al*, la vite Sangiovese riesce tramite fotoinibizione cronica a isolare le foglie basali di modo che non possano traspirare, mentre inclina verticalmente le foglie mediane per limitarne l'area colpita dalle radiazioni evitando che l'attività fotosintetizzante venga bloccata (Palliotti et al., 2008).

La seconda metodologia per misurare il fabbisogno idrico della pianta in modo diretto è misurarne il potenziale. Questa misura indica la pressione con cui la pianta riesce a sottrarre l'acqua dal suolo e farla circolare all'interno dei propri vasi. L'entità del potenziale idrico si esprime con " Ψ " e può essere associato a diversi organi della pianta, ognuno però sempre rapportato alla concentrazione idrica presente nel suolo. Ciò significa che, qualora la reperibilità idrica del suolo diminuisca, così farà anche il potenziale della pianta. Di Ψ se ne possono misurare diversi: il potenziale può essere quello della foglia (Ψ_f), del germoglio (Ψ_g), oppure può rifarsi alle condizioni della pianta

ad una particolare ora del giorno, generalmente si preferisce eseguire il rilevamento poco prima che sorga l'alba (Ψ_{pa}). Ciascun potenziale viene misurato per scopi precisi: Ψ_{pa} serve per comprendere al meglio lo stato di reperibilità idrica del suolo, infatti, si rifà a dati appresi da una foglia matura dopo una intera notte di recupero del potenziale ovvero quando gli stomi sono prevalentemente chiusi (Améglio et al., 1999). I risultati appresi da tale misura, come recenti studi affermano, variano di specie in specie e a seconda del metodo di irrigazione adottato. L'adattabilità del metodo lo rende molto efficace per l'ottimizzazione dell'uso irriguo. Ψ_f , invece si rifà al potenziale della foglia; rispetto alla prima modalità di rilevamento questa viene fatta durante il dì su foglie ben esposte. Tra tutte, questa è la misura più semplice da compiere nonostante presenti dei difetti. Il rilevamento fatto durante le ore più calde del giorno condiziona i risultati. Durante il dì l'evaporazione è massima, perciò, il dato ottenuto è decisamente compromesso da tutti quei fattori che ne determinano l'entità (deficit di pressione del vapore, reperibilità idrica del suolo, temperatura, radiazione etc.) (Mirás-Avalos et al., 2021). Allo stesso tempo però, si è visto che in situazioni di omogeneità climatica questo tipo di rilevamento diviene ottimo strumento per modellare il calendario di interventi irrigui (Williams e Araujo, 2002). L'ultima misura, Ψ_g , si rifà al potenziale del germoglio. La tempistica del rilevamento è la stessa di quella vista in precedenza, cambiano le dinamiche di raccolta del dato. Per eliminare i condizionamenti esterni, si riveste la foglia con un sacchetto oscurante così da bloccare la traspirazione e regolare il potenziale idrico tra questa e il germoglio. Rispetto al precedente metodo, questo è più efficiente e accurato: infatti, il potenziale del germoglio è più stabile rispetto a quello della foglia. Per ciascuno dei metodi visti si adopera lo stesso strumento: la camera a pressione di Scholander. Questa misura la pressione necessaria per estrarre dal picciolo di una foglia in sottovuoto dell'acqua. Maggiore sarà la pressione utilizzata, minore il contenuto di acqua all'interno della foglia di conseguenza maggiore lo stress idrico a cui sottostà la pianta. L'aspetto negativo legato a questo tipo di rilevamento è la durata. Il monitoraggio deve essere costante per tutto l'arco della stagione produttiva (Williams e Araujo, 2002; Yuste et al., 2004).

Un ulteriore metodo per apprendere lo stato idrico della vite è calcolare il rapporto $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ nello zucchero del frutto. È una misura parziale, infatti, si basa su dati disponibili solo al termine della stagione e non durante l'arco della stessa. Questa la rende poco funzionale

alla gestione irrigua stagionale. Generalmente la si può utilizzare nel caso si voglia integrare un'analisi condotta in precedenza. Essa sfrutta le gerarchie che la pianta adotta rispetto l'uso di uno o l'altro isotopo di carbonio tramite processo "discriminatorio". In condizioni normali, gli enzimi coinvolti nella fotosintesi preferiscono utilizzare l'isotopo ^{12}C della anidride carbonica come fonte primaria invece dell'isotopo ^{13}C (Farquhar et al., 1980). In condizioni di stress, invece, questa preferenza tende a venir meno e a fine stagione si riscontrano maggiori concentrazioni di ^{13}C negli zuccheri del frutto. Per individuare l'entità dello stress ci si rifà ad un indice calcolato per mezzo di uno spettrometro di massa a flusso continuo per rapporti isotopici che in uno studio condotto da Gaudillère ha espresso valori che andavano da -20‰ a -26‰ quando l'annata si era presentata da particolarmente siccitosa a mite (Gaudillère et al., 2002).

Esiste la possibilità di misurare lo scambio gassoso a livello stomatico tramite due strumenti il porometro o l'IRGA. Il primo misura la conduttanza stomatica basandosi sull'intervallo di tempo impiegato dalla traspirazione a riportare ad un livello definito di umidità l'aria essiccata contenuta in un volume noto. Viene così stabilita la velocità con cui la il vapor d'acqua entra ed esce dalla foglia determinando valori di conduttanza stomatica, misurata in $\text{mmol di acqua/m}^2\text{s}$, che possono indicare stress severo (<50), moderato (50-150) oppure di lieve entità (>250). Il secondo misura sia il vapore acqueo sia la diffusione della CO_2 tramite lettura delle loro frequenze assorbite nell'infrarosso. Ogni gas, infatti, ha uno spettro di assorbimento delle lunghezze d'onda dell'IR caratteristico. Gli IRGA misurano l'attenuazione della radiazione IR proveniente da una sorgente nota da parte di CO_2 e H_2O . L'assorbimento è direttamente proporzionale alla concentrazione dei due gas. Dalla concentrazione di CO_2 e H_2O vengono ricavati il tasso di fotosintesi netta (espressa in $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\text{s}$), ovvero la differenza di concentrazione di CO_2 tra l'aria che entra e quella che fuoriesce dalla camera; e la conduttanza stomatica misurata in $\text{mol H}_2\text{O/m}^2\text{s}$ pervenuta solo conoscendo l'entità della traspirazione ovvero la differenza tra acqua in entrata ed in uscita dalla camera misurata come $\text{mmol H}_2\text{O/m}^2\text{s}$ (Cogato et al., 2021).

Un'altra modalità di analisi del potenziale idrico della pianta prevede la misura del flusso di linfa. Tecnica studiata inizialmente su olivo, secondo diversi studi si presta bene anche nella pianificazione dei trattamenti irrigui nella vite. Questa pratica consiste nel misurare il movimento del flusso xilematico nelle arterie della pianta quindi, dalle radici passando

per gli steli e arrivare infine alle foglie dove, per traspirazione, verrà emesso nell'atmosfera sotto forma di vapore. Esistono due metodi per misurare tale flusso. Uno è poco affidabile e si basa sul misurare la dissipazione termica tra due aghi di cui uno solo riscaldato. Teoricamente la temperatura diminuisce al crescere del flusso, ma i risultati ottenuti sono molto influenzabili dal punto in cui gli aghi sono posti, portando a sovra o sottostime. Il secondo metodo è il medesimo di prima, ma l'utilizzo di aghi si sostituisce con quello di manichette avvolgenti lo stelo molto meno dispersive e conformi alle diverse forme che la pianta può assumere (Rienth et al., 2019).

Il sesto e penultimo metodo si fonda sull'uso della raccolta dati a distanza tramite telerilevamento. Utilizzando specifiche camere installate su supporto aereo è possibile cogliere in linea generale lo stato di salute di un vigneto. La rielaborazione delle immagini catturate tramite sensori ottici in grado di leggere bande RGB e NIR dello spettro elettromagnetico, determina un indice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Questo è il rapporto tra la differenza dell'intensità della radiazione emessa dalla pianta al netto di quella assorbita, rispetto alla somma delle due. Qualora l'indice esprima valori alti si può accertare l'ottimale stato della vegetazione, mentre valori bassi indicano condizione di stress. Indicativamente, una vegetazione sana assorbe una luce nel visibile (RED) a lunghezze d'onda che vanno dai 0,6-0,7 μ m e riflette nel vicino infrarosso (NIR) lunghezze d'onda che vanno da 0,7 a 1,3 μ m. Vegetazioni sotto stress assorbono nel vicino infrarosso e riflettono nel visibile con le stesse intensità viste. Questo fenomeno anche noto come legge di Wien indica come il calore di un corpo aumenti qualora sia colpito da radiazioni di lunghezza d'onda minori, perciò più energetiche.

L'ultimo metodo impiegabile per la misura dello stato idrico della vite è l'uso di una termocamera. Una pianta sana regolarizza la propria temperatura tramite traspirazione. In condizioni di carenza idrica la pianta, per non disperdere ulteriori risorse idriche, rallenta la traspirazione chiudendo gli stomi e facendo inevitabilmente misurare una temperatura più alta rispetto al normale. Differenti studi hanno dimostrato che l'utilizzo della termocamera si presta bene alla individuazione di una condizione di stress idrico e di conseguenza offre un valido supporto per gestire gli interventi irrigui durante la stagione, ad attestarlo sono Costa *et al.*, e Belfiore *et al.* Sia che si tratti di tesi indotte ad uno stress controllato o ben irrigate, la temperatura fogliare si mostra inversamente proporzionale

alla conduttanza stomatica e al potenziale idrico della foglia (Costa et al., 2012; Belfiore et al., 2019).

Si è potuto constatare da questa breve introduzione che vi sono diversi metodi per monitorare lo stato idrico di un vigneto. Molto spesso, tuttavia, in letteratura vengono approfonditi in modo specifico utilizzando uno o in ogni caso solo pochi metodi insieme. Riuscire a monitorare più parametri nell'arco della stagione, integrando metodi diretti con quelli indiretti permette di ottenere un quadro più ampio e dettagliato delle condizioni esterne ed interne alla pianta. Un maggior controllo di questi parametri limita i rischi di stress idrici e di conseguenza aumenta l'efficienza con cui utilizzare una risorsa così preziosa e limitata come l'acqua.

Esiste un sistema multi-sensoristico innovativo per l'irrigazione di precisione in vigneto. Questo strumento, creato da CET Electronics, oltre ai classici sensori per il rilievo di parametri climatici e di umidità del suolo, dispone di una stereo camera che grazie ad un particolare meccanismo di acquisizione delle immagini e ad un software di elaborazione automatica delle stesse, è in grado di ricostruire e monitorare in tempo reale il volume 3D della chioma e di rilevare variazioni nell'inclinazione fogliare. Il sistema di visione artificiale possiede inoltre una termocamera integrata, in grado di rilevare la temperatura della chioma, un ulteriore parametro che ha dimostrato un elevato grado di correlazione con lo stato idrico della pianta.

OBBIETTIVO

Oggi più che mai ciascun produttore della filiera agroalimentare ricopre un ruolo centrale e di elevata responsabilità nella sfida contro il cambiamento climatico. Ciò viene ribadito anche a livello comunitario con la direttiva quadro sulle acque 2000/60/CE che indica di prevenire il deterioramento qualitativo e quantitativo, migliorare lo stato delle acque e assicurare un utilizzo sostenibile basato sulla protezione a lungo termine delle risorse idriche disponibili. Per ottemperare a tali condizionalità è essenziale individuare sistemi tecnologici in grado di supportare le scelte di ogni operatore di modo che si evitino perdite sia economiche che ambientali. Al fine di effettuare stime corrette e precise dello stato idrico del vigneto sulla base delle quali guidare i piani irrigui, si ritiene di fondamentale importanza integrare misure dirette, effettuate sulla pianta, con quelle indirette o ambientali. L'intento del presente studio è stato quello di raccogliere dati utili alla calibrazione e alla validazione di un sistema multi-sensore creato da CET Electronics. Come introdotto, il sistema utilizza sia sensori "tradizionali" la cui efficacia è stata dimostrata da tempo, ma anche sensori più innovativi, in particolare stereo e termocamera. Agendo tramite metodi di rilevamento tradizionali in campo si sono studiati durante la stagione le risposte delle viti sempre irrigate o sottoposte a stress idrico. Dal confronto dei dati acquisiti direttamente con quelli appresi dal sensore si è voluto validare l'affidabilità della tecnologia nel misurare l'entità dello stress. Perciò, si sono confrontate le immagini termiche e i parametri di inclinazione delle foglie con i dati processati dai sensori più innovativi installati sullo strumento (stereo e termocamera). In più, dal confronto dei dati rilevati in campo tramite camera di Scholander e porometro con quelli ottenuti tramite multi-sensore si è voluto verificare la correlazione tra i dati del potenziale idrico e della conduttanza stomatica con lo stato idrico della coltura.

MATERIALI E METODI

2.1 Sito sperimentale

La sperimentazione è stata effettuata durante l'anno 2021 ed è continuata per i primi mesi del 2022 presso l'azienda "S. AGRI.V.IT" in località Bosco, Spresiano (TV). La società agricola, tra le più grandi dello Stato, gestisce 14 aziende storiche lungo tutta la penisola e in Veneto, in provincia di Treviso, troviamo le aziende di Spresiano, Chiarano, Giavera del Montello e Nervesa della Battaglia. Il sito sperimentale è rappresentato da un appezzamento di nove ha coltivati a vigneto.

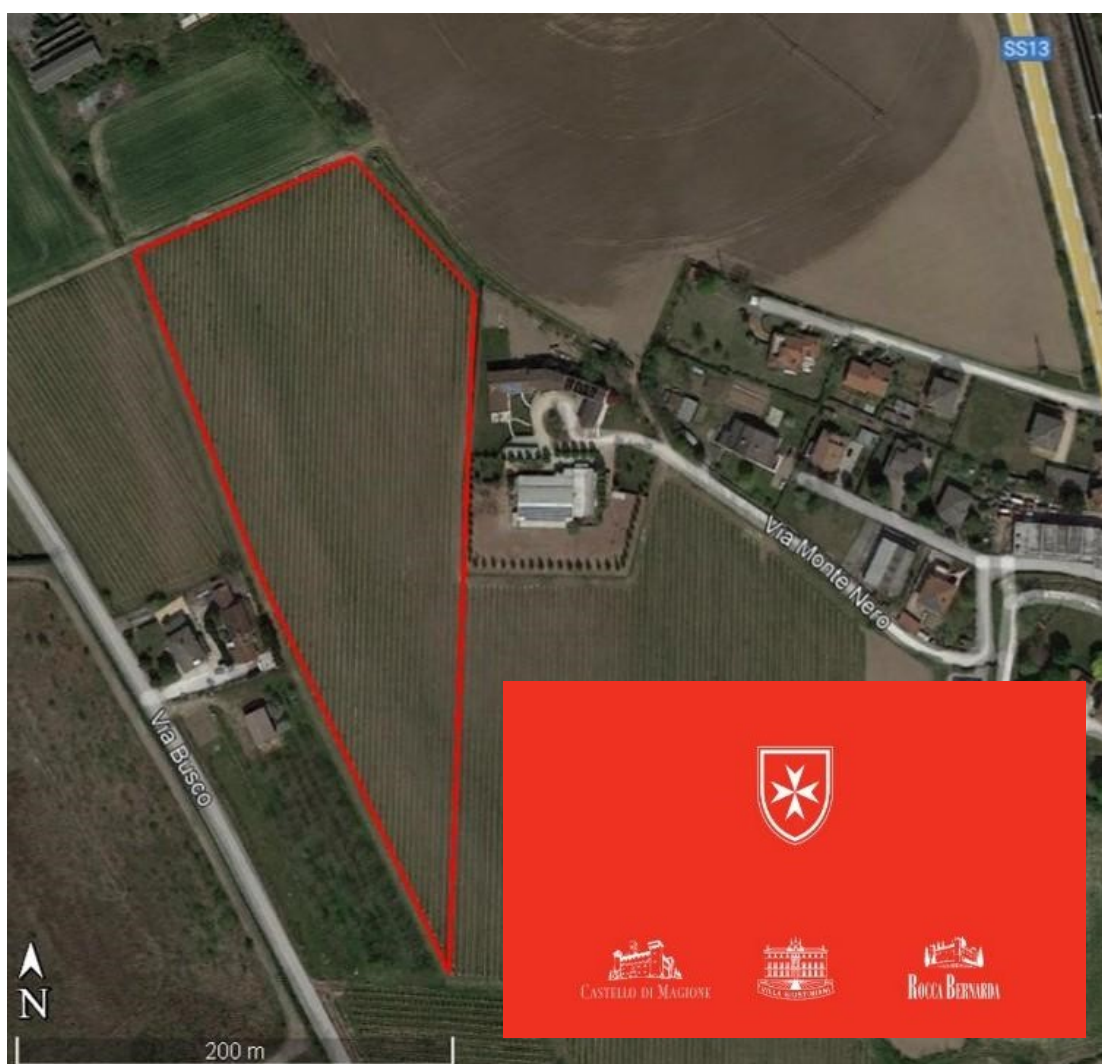


Fig. 2.1 Mappa del sito sperimentale: Azienda S.AGRI.V.IT

2.1.1 Caratteristiche climatiche dell'area di sperimentazione

Clima: Il sito sperimentale si trova nel tipico paesaggio che contraddistingue la “Marca Trevigiana” in cui la notevole produzione viticola è da sempre stata favorita dalla conformazione pedoclimatica del territorio. Le colline, che si estendono per tutta la fascia nord-occidentale della provincia con l'esposizione a sud dei vigneti, proteggono dai venti del nord, ma rendono l'ambiente ventilato e luminoso, in favore dell'espletamento di tutte le funzioni vegeto-produttive della pianta e offrendo un clima adatto particolarmente alla produzione viticola. I terreni sciolti di origine detritico-fluviale delle zone di pianura sono particolarmente adatti all'allevamento di molti vitigni, tra cui anche quelli internazionali come il Pinot grigio. Tali terreni favoriscono un equilibrio tra le componenti aromatiche e di intensità di colore in particolare nelle bucce delle uve a bacca rossa (D.M. 10.06.2014). Il clima può definirsi sub-continentale temperato grazie all'azione mitigante della brezza marina proveniente da Sud e delle Alpi che proteggono dalle correnti fredde provenienti da Nord.

Temperatura: I dati sulle temperature medie storiche sono stati acquisiti dalla stazione Arpav di Vazzola – Tezze posizionata a 40 m.s.l.m, a circa 5 Km di distanza in linea d'aria dal sito sperimentale. A riprova del fatto che il clima dell'areale in studio è temperato, la temperatura media degli ultimi 27 anni è pari a 13,2°C. Nel grafico (fig. 2.2) vengono identificati gli andamenti delle temperature minime, medie e massime degli ultimi 27 anni rilevate a 2m di altezza rispetto al suolo. I mesi più caldi sono luglio con temperature medie e massime pari a 23,4°C e 30°C e agosto con 22,9°C e 29,8°C. I mesi più freddi invece sono gennaio e dicembre dove le temperature medie massime del periodo che va dal 1994 al 2021 hanno fatto registrare 8°C e 8,8°C.

Precipitazioni: Nel grafico (fig. 2.3) si sono raccolti i dati relativi alle precipitazioni cumulate annue (mm) degli ultimi 27 anni. La media di tale periodo corrisponde a 1184 mm. Si è constatato che alcuni anni hanno avuto pluviometrie molto differenti rispetto a questo valore. In rosso si sono identificati gli anni in cui le precipitazioni hanno superato i 1500 mm. In questa categoria l'anno più piovoso è stato il 2014. In azzurro, invece, si riportano gli anni in cui la pioggia accumulata non ha superato la media calcolata e allo stesso tempo si trovano al di sotto della soglia dei 1000 mm. Tra tutti il 1994 è stato l'anno più siccitoso con solo 799 mm di pioggia rilevati, segue l'anno 2015 con 826 mm. Entra

di poco in questa categoria anche il 2021 dove la piovosità annuale ha fatto misurare 938 mm.

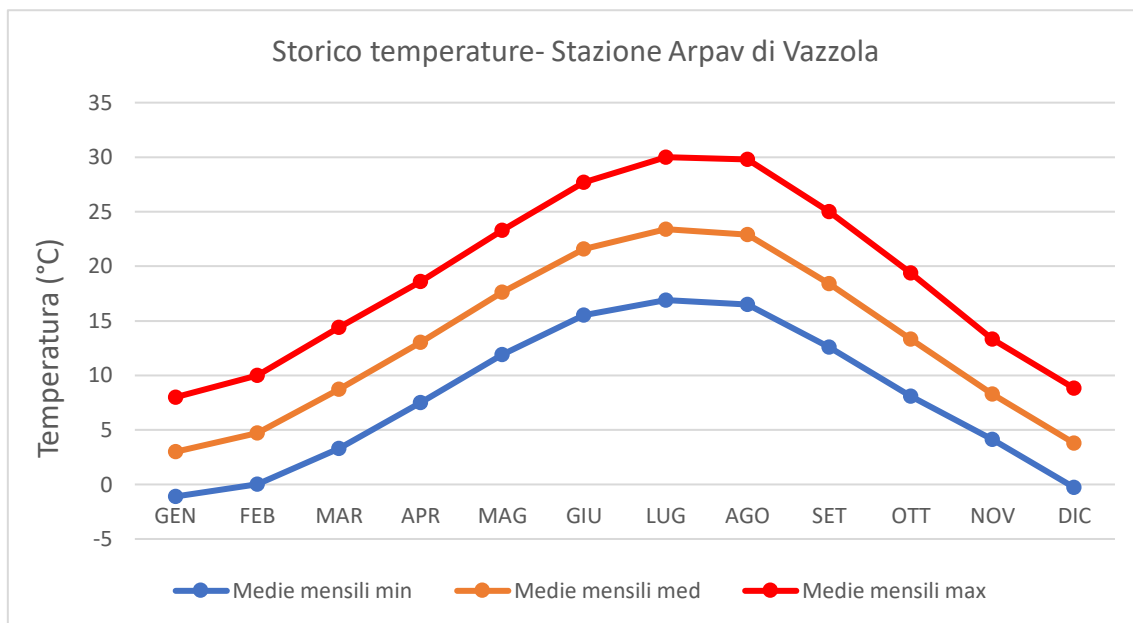


Fig. 2.2 Andamento delle temperature massime, medie e minime mensili (media 1994 - 2021)

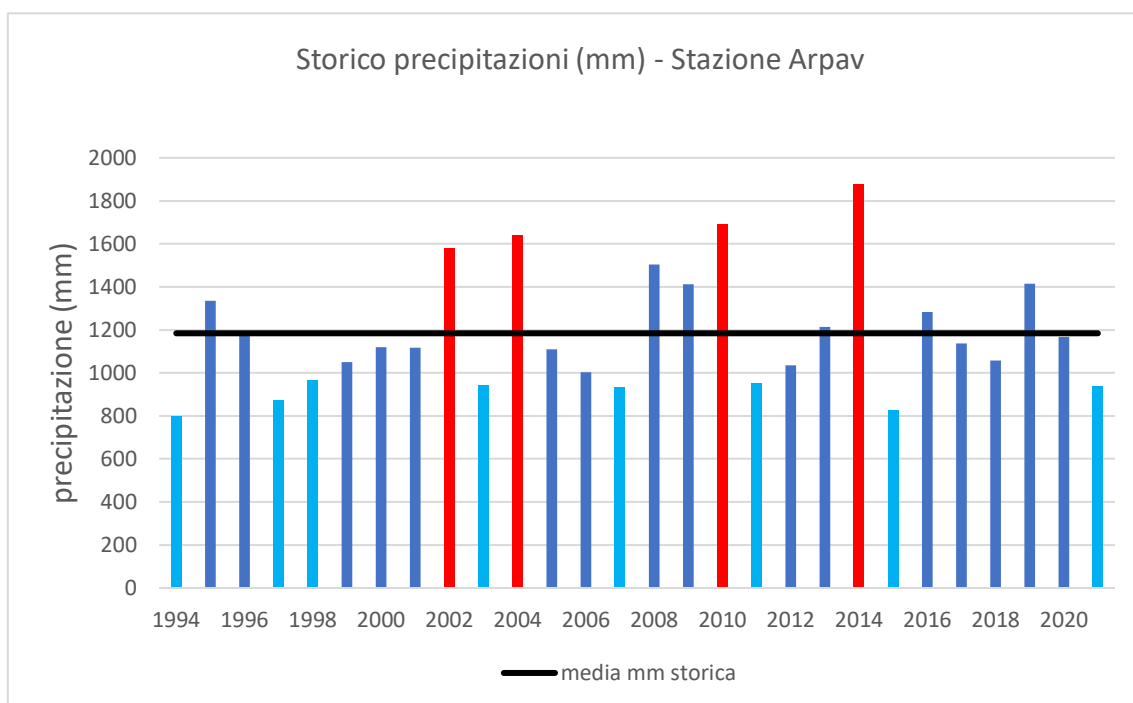


Fig. 2.3 Andamento delle precipitazioni annuali dal 1994 al 2021 e media storica

2.1.2 Caratteristiche pedologiche dell'area di studio

Il vigneto si posiziona in località Busco, Spresiano (TV) su di una zona pianeggiante e dal punto di vista idraulico, ottimamente servita. Questo facilita anche la coltivazione di diversi seminativi coltivati vicino all'impianto. Dalle analisi condotte nel 2020 si comprendono le peculiarità del suolo su cui cresce il vigneto. Osservando la tab. 2.1, esso presenta pH sub-alcalino, con percentuali molto alte di carbonati totali. La sostanza organica è presente in percentuali medio-alte; si rilevano quantità elevate di azoto totale fosforo assimilabile e magnesio scambiabile.

Tab. 2.1 Risultati delle analisi pedologiche del sito sperimentale condotte a giugno del 2020 dal laboratorio analisi Cicognani - Forlì

CARATTERISTICHE CHIMICHE		
DESCRIZIONE	RISULTATO	VALORE
pH in H ₂ O	7,83	
Carbonati totali (CaCO ₃)	45	%
Calcare attivo (CaCO ₃)	2,1	%
Sostanza organica	2,37	%
Azoto totale (N)	1,55	%
Fosforo assimilabile (P)	26	ppm
Fosforo assimilabile (P ₂ O ₅)	60	ppm
Potassio scambiabile (K)	124	ppm
Potassio scambiabile (K ₂ O)	149	ppm
Sodio scambiabile (Na)	38	ppm
Calcio scambiabile (Ca)	2542	ppm
Magnesio scambiabile (Mg)	372	ppm
CARATTERISTICHE FISICHE		
Sabbia (2.000-0.050 mm)	46	%
Limo (0.050-0.002 mm)	43	%
Argilla (< 0.002 mm)	11	%

Anche rispetto alla C.S.C. il magnesio si presenta in percentuali elevate, al contrario del potassio. Dalle analisi tessiturali si sono constatati livelli di sabbia pari al 46%, quelli di limo al 43% e di argilla al 11%, perciò, il suolo può definirsi franco.

2.1.3 Caratteristiche del vigneto



Fig. 2.4 Grappolo di Pinot grigio. Fotografia scattata alla vendemmia 2021

Nel sito interessato dalle prove sperimentali viene coltivato il Pinot grigio. La varietà ha origini in Francia, nella Borgogna e deve il suo nome alla peculiare forma del grappolo che data la forma appuntita assomiglia ad una pigna di pino (*pin* in francese). La coltivazione del Pinot grigio è particolarmente complessa poiché richiede condizioni climatiche abbastanza conformi a quelle che si trovano nel paese d'origine, perciò, preferisce climi freddi e terreni prevalentemente calcarei. Il vitigno si distingue per le foglie di piccole dimensioni, dalla forma trilobata, cordiforme e per avere un grappolo corto (13 cm circa), dalla struttura cilindrica e compatta. Gli acini hanno una forma

ellittica con una buccia di medio spessore, pruinosa e di colore grigio-violetto (Catalogo nazionale delle varietà di vite, 2022). Il vigneto sperimentale, piantato nel 2017, presenta un sesto d'impianto di 2,80 m tra filari e 1,10 m tra le piante. Il portinnesto utilizzato è il Kober 5BB e la forma di allevamento è il doppio capovolto, forma tipica dell'areale del Triveneto.

2.1.4 Caratteristiche dell'impianto di irrigazione

L'impianto di irrigazione consta di un sistema di mandata che attinge dal condotto del Consorzio di Bonifica ed eroga l'acqua tramite elettrovalvole alle ali gocciolanti interrate di diametro esterno pari a 20 mm. Gli erogatori autocompensanti sono posizionati a 60 cm tra di loro hanno una portata di 2,2 L/h. Generalmente la durata del trattamento irriguo aziendale varia dalle due alle tre ore ed è generalmente effettuato prima dell'alba approssimativamente dalle 3.00 alle 5.00/6.00 del mattino. Nel periodo compreso tra il 10 giugno e il 20 agosto sono stati effettuati un totale di 47 interventi irrigui nella tesi Az (irrigazione standard aziendale) mentre la tesi Ir (irrigazione ridotta), che secondo il piano originario non doveva essere supportata da alcun apporto idrico è stata interessata da 18 interventi, tra il 9 luglio e il 13 agosto. Quando in funzione, la pressione a cui il sistema è sottoposto non ha mai visto superati i 2,2 bar di media in testata. Da un rapido conteggio si è potuto calcolare la portata distribuita dall'impianto per ettaro e quindi la pluviometria sulla base del sesto d'impianto (2,8 m) e distanza tra i gocciolatori (0,6 m). Sapendo che la portata degli ugelli è pari a 2,2 L/h si è calcolata una pluviometria di 1,31 mm/h che, ipotizzando un'efficienza di distribuzione del 95%, corrisponde a circa 1,25 mm/h. Perciò, nei casi studiati venivano distribuiti, per intervento, dai 2,5 mm ai 3,75 mm di acqua a seconda che il trattamento durasse due o tre ore.

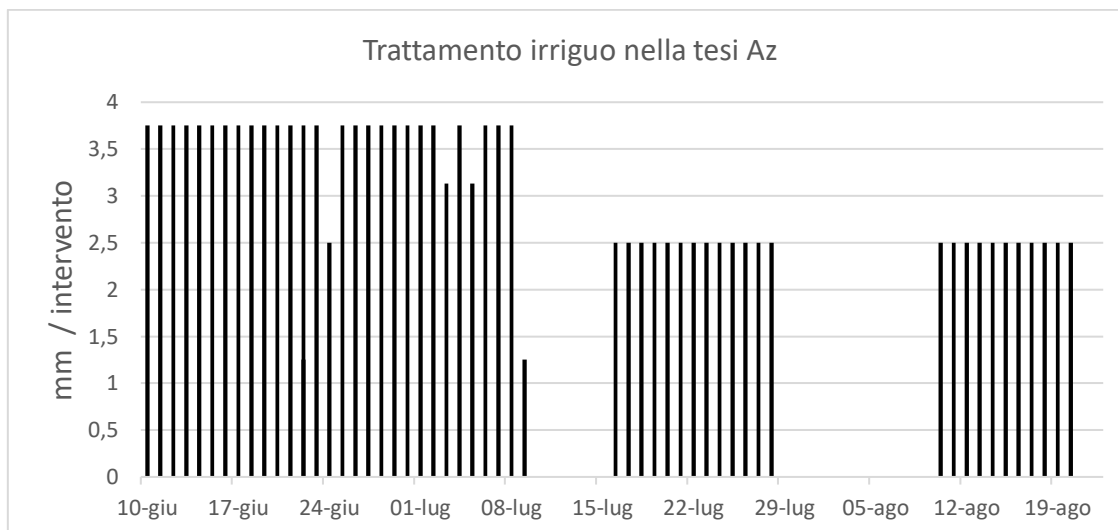


Fig. 2.5 Interventi e volumi idrici distribuiti dall'impianto irriguo nella tesi Az considerando una efficienza pari al 95% durante la stagione sperimentale.

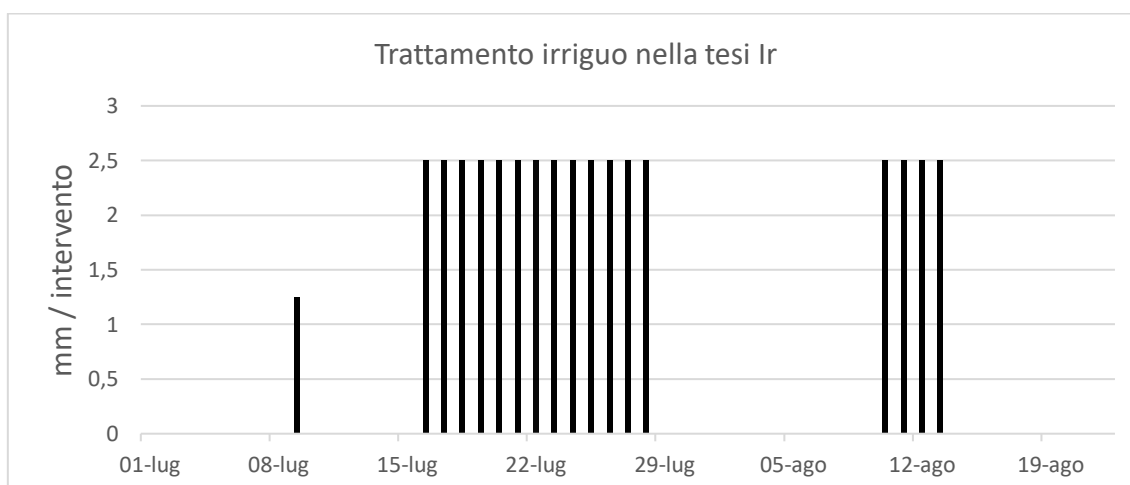


Fig. 2.6 Interventi e volumi idrici distribuiti dall'impianto irriguo nella tesi Ir considerando una efficienza pari al 95% durante la stagione sperimentale.

2.1.5 Descrizione piano sperimentale

Il piano ha previsto l'individuazione di due tesi in filari della lunghezza di 250 m circa. Per ciascuna tesi è stato individuato un filare all'interno del quale è stata selezionata una parcella di 24 piante sulle quali effettuare le misurazioni sia manualmente che con i sensori. Le tesi sono state sottoposte a due diversi trattamenti irrigui durante l'arco della stagione: la tesi aziendale (Az) è stata gestita seguendo un piano irriguo aziendale a calendario, che ha previsto trattamenti giornalieri per l'assenza di precipitazioni dal mese di giugno con l'obiettivo di mantenere le piante in uno stato idrico ottimale; la seconda

tesi, denominata irrigazione ridotta (Ir), è stata invece sottoposta ad un regime idrico che ha supportato la coltura solo nel periodo (30 giorni) più caldo della stagione.

Con una tale impostazione della prova è stato possibile creare condizioni differenziate di stato idrico nelle parcelle a confronto al fine di determinare le variazioni nei parametri della vegetazione rilevabili dalla video-termocamera testata in questa sperimentazione.

Ad inizio stagione due multi-sensori sono stati installati nei filari opposti a quelli sotto studio, di modo che il visore della telecamera inquadrasse le tesi. Giorno per giorno ciascuna stereo camera ha scattato le foto di quattro piante in modo che si potesse apprenderne al meglio l'evoluzione durante l'annata (febbraio - settembre). Contemporaneamente all'installazione delle stereo camere si sono installati una coppia di sensori di umidità per tesi: SAM1 a 30 cm e SAM2 a 60 cm di profondità. Questi sono sensori di tipo FDR ad alta frequenza, con elettrodo a forchetta a tre punte in acciaio inox.

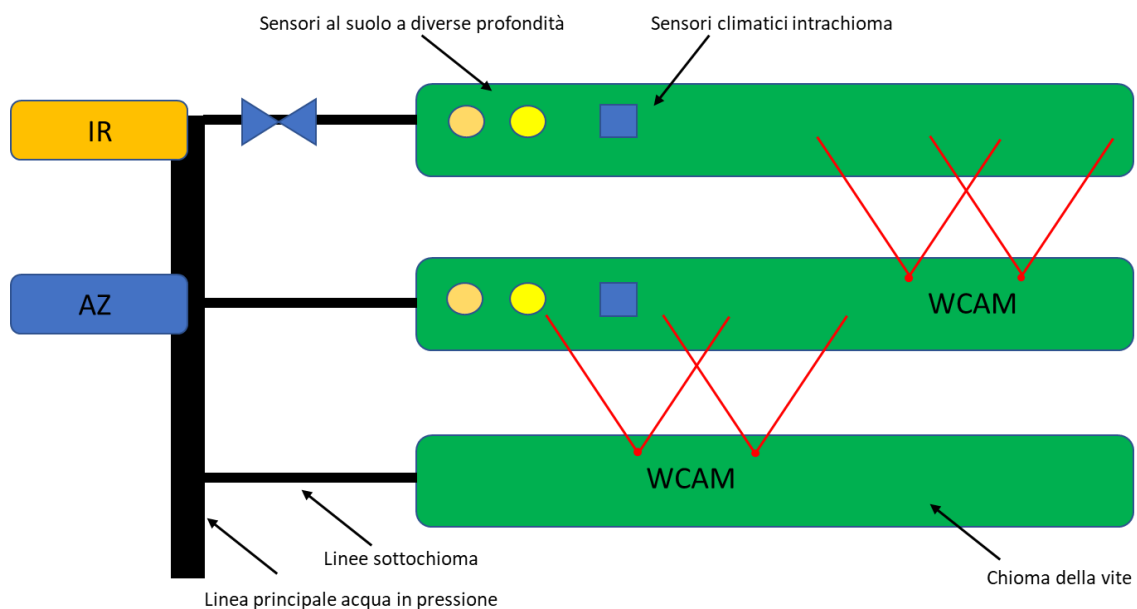


Fig. 2.7 Schema del piano sperimentale adottato per i rilievi

2.1.6 Il sistema multisensore dotato di stereo camera WCam



*Fig. 2.8 Stereo camera (WCam)
installata nel sito sperimentale*

WCam è una stereo camera costituita da 2 sensori RGB, distanziati fra loro di circa 15 cm, che permette di acquisire foto da due punti di vista leggermente differenti, e quindi di ricostruire la tridimensionalità della pianta grazie all'elaborazione delle immagini con particolari algoritmi. La stereo camera è integrata anche con un sensore termico a infrarossi, di risoluzione 8x8 pixel. L'uso di tale dispositivo, nel progetto, è stato associato a sensori climatici di diverso tipo collocati ciascuno in posizioni diverse nelle tesi a seconda dei dati registrati. Una volta registrati, i dati dei sensori e le immagini sono trasmessi via internet tramite una SIM dati e visualizzati nel portale "Aurora WEB". Su tale piattaforma i dati acquisiti dai vari sensori vengono visualizzati in tre sezioni. La prima sezione è "IRRI", il nodo di comando dell'elettrovalvola per la tesi Ir, dove sono visualizzati:

- lo stato di apertura/chiusura dell'elettrovalvola (0-100) della tesi Ir (fig. 2.9).

- i dati dei sensori di pressione il cui segnale manifesta lo stato di attività dell'impianto irriguo, per capire quando e per quanto tempo l'impianto è stato messo in pressione (secondo la conduzione irrigua aziendale). Il campionamento di questi dati avviene ogni cinque minuti, perciò, bisogna sempre tenere conto che il dato non ha corrispondenza perfetta con i tempi di attivazione dell'impianto e può comprendere un ritardo entro cinque minuti all'apertura e alla chiusura.

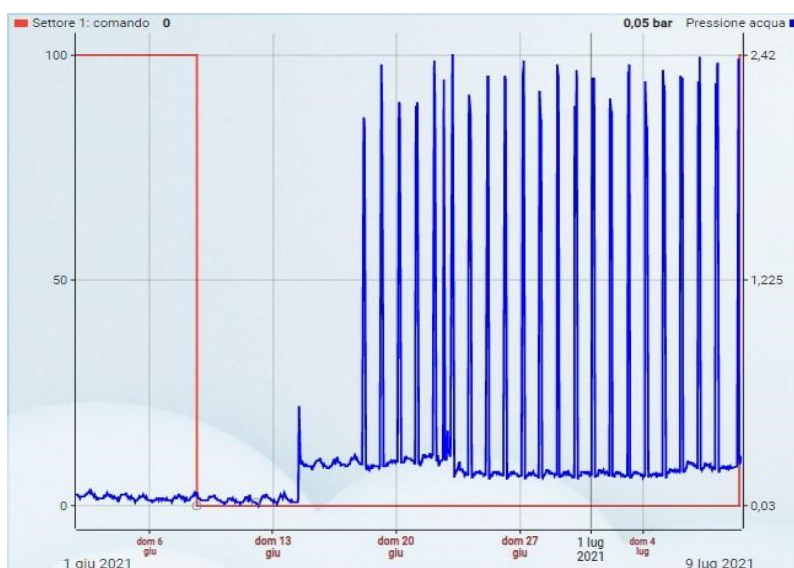


Fig. 2.9 Messa in funzione dell'impianto irriguo. Fonte: software Aurora

Nelle sezioni AZ (corrispondente alla tesi Az) e IR (corrispondente alla tesi Ir) della piattaforma venivano visualizzate le immagini dei rispettivi dispositivi WCam e l'elaborazione automatica delle stesse eseguita da un software. Nella sezione AZ nella piattaforma, erano visualizzati anche i dati ottenuti dai sensori climatici di una stazione meteo completa: pluviometro, anemometro radiazione solare, bagnatura fogliare, considerati rappresentativi dell'intero appezzamento, e sensori di umidità volumetrica del substrato (due a profondità rispettivamente di 30 e 60 cm), rappresentativi della specifica tesi Az. Il pluviometro ha una sensibilità di 0,2 mm. Qualora il sensore rilevi unicamente 0,2 mm, è molto probabile che venga registrata anche solo la rugiada mattutina, mentre al di sopra di questo valore, il sistema rileva quasi sicuramente un evento precipitativo.

Per quanto riguarda i dati rilevati dai sensori al suolo, era sufficiente, ai fini del nostro obiettivo, osservare quelli dei sensori installati sulla tesi Ir. Nella sezione si

visualizzavano come dati climatici solo quelli relativi al substrato in quanto a variare è il dosaggio idrico tra le tesi ed era nostro interesse monitorarne l'andamento per confrontare i dati ottenuti con gli effetti che si manifestano sulla pianta. Nella fig. 2.10 si è estrapolato il rilevamento dei sensori di umidità nel periodo di aprile dalla piattaforma “Aurora WEB” sezione Ir. Le due curve indicano la percentuale di umidità rilevata ad una profondità di 30 cm (SAM1) e di 60 cm (SAM2). Si fa presente che questi sensori (di tipo FDR) forniscono misure molto localizzate e sono pertanto sensibili a disomogeneità locali dovuti per esempio alla presenza di scheletro, che crea interstizi d'aria e possibili ruscellamenti d'acqua, rendendo la misura poco rappresentativa. Anche la distanza dai gocciolatori, in terreni con molto scheletro, può avere un'influenza significativa nel determinare o meno una variazione del segnale rilevato da tali sensori. Per tali motivi, la differenza fra le tesi AZ e IR non può essere totalmente osservata tramite questa tipologia di sensori.

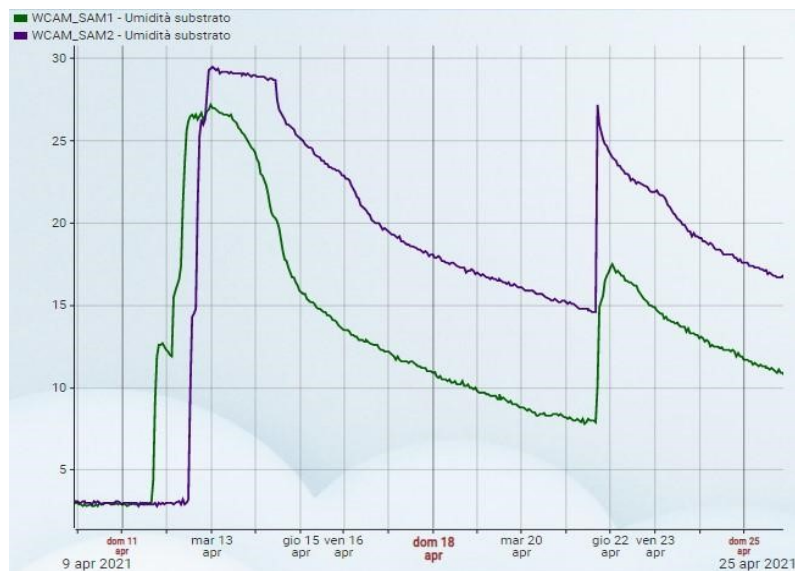


Fig. 2.10 Umidità del substrato in percentuale della tesi Ir. Sensore al suolo SAM1 a 30 cm di profondità (In verde); SAM2 a 60 cm di profondità (in violetto). Fonte: software Aurora WEB

2.2 Descrizione delle misurazioni in campo

Nel corso della sperimentazione sono stati rilevati:

- Dati relativi allo stato idrico della pianta (potenziale idrico e conduttanza stomatica); questi dati hanno avuto l'obiettivo di valutare l'effetto della gestione irrigua (Aziendale e con Irrigazione ridotta) sull'effettivo stato idrico della pianta, verificando i momenti in cui la tesi Ir si è differenziata dalla tesi Az e ha manifestato condizioni di stress idrico da lieve a severo.
- Dati relativi all'inclinazione fogliare e alla temperatura fogliare. Tali dati sono stati registrati sia dal sistema multisensore che misurati manualmente. Le analisi sui dati raccolti hanno pertanto a) confrontato la corrispondenza tra misure strumentali e misure manuali al fine di verificare la capacità del sistema di rilevare correttamente questi parametri in campo; b) verificato attraverso correlazioni se i dati di temperatura e inclinazione registrati sia manualmente che dallo strumento risultavano correlati allo stato idrico della pianta.
- Dati relativi ai parametri produttivi e qualitativi, con l'obiettivo di verificare l'effetto delle due gestioni irrigue sulle produzioni.

Potenziale idrico: Nelle due tesi (Az e Ir) circa ogni due settimane (dal 22 giugno fino al 24 agosto), si sono effettuate le misurazioni del potenziale idrico del germoglio. Il rilevamento necessitava di una fase preliminare. Infatti, la misurazione del potenziale del germoglio richiede che la foglia venga isolata per circa un paio di ore dall'ambiente circostante, cosicché gli scambi gassosi vengano interrotti e il flusso idrico tra germoglio e foglia si equilibrino. Entro gli intervalli prestabiliti nelle tesi, a ridosso delle ore 12.00 venivano scelte su 6 piante 6 foglie dal terzo nodo dopo il grappolo. Nella misurazione del potenziale sono stati esclusi quei germogli, individuati ad inizio stagione, di cui le foglie sono servite per il rilevamento dell'inclinazione. Su quelle compatibili, invece, si è applicato un sacchetto isolante per circa 1 ora. Al termine di questo lasso di tempo, ciascuna foglia è stata accuratamente tagliata circa a metà picciolo in senso obliquo per garantire una maggiore superficie di osservazione. Una volta recisa, è stata velocemente portata alla postazione di misurazione e sistemata all'interno della camera a pressione in modo che solamente il picciolo fuoriesca da essa. Collegata alla camera, la bombola di azoto assicurava la messa in pressione dello strumento e il manometro permetteva di



Fig. 2.11 Foglia avvolta dal sacchetto isolante

visualizzarne il valore. Una volta posizionata la foglia, tramite apposita valvola la pressione nella camera, era fatta aumentare fino al momento in cui dal punto reciso del picciolo fuoriusciva la prima goccia di liquido xilematico o linfa grezza. Raggiunto questo punto, si prendeva nota del valore indicato sul manometro, ed era chiusa la valvola. Il valore indicato dalla camera a pressione esprime la pressione che serve per pressurizzare la foglia, perciò, la pressione necessaria a fare uscire la goccia linfatica è uguale e contraria al potenziale idrico registrato dal manometro (Cogato et al., 2021). Il valore positivo nel manometro deve essere moltiplicato per “-0,1” per essere convertito da bar in MPa. Va inteso negativamente perché esprime la forza di ritenzione idrica della pianta ovvero la capacità con cui essa riesce a sottrarre dal suolo la risorsa idrica. Più questo valore è alto in una scala da 0 a 20 più forte è la forza di ritenzione della foglia, dunque, lo stato di stress a cui la pianta è sottoposta nel momento della misurazione.

Porometro: Strumento non distruttivo, misura lo scambio di gas tra la foglia e l'atmosfera. È dotato di un sistema a pinza su cui è installata una cuvetta (dal volume noto) contenente dell'aria. All'interno di questa sono inserite dei piccoli substrati ultra-



Fig. 2.12 Porometro in funzione

assorbenti che hanno la funzione di rendere il volume della cuvetta nuovamente asciutto dopo ogni misurazione. Per velocizzare il processo di deumidificazione, la cuvetta va agitata energicamente, ma con cautela. Per ogni tesi si sono compiute otto misurazioni con lo stesso criterio di scelta delle foglie utilizzato per il rilevamento del potenziale idrico. Il sistema è dotato sia di un protocollo manuale che automatico. Quello manuale prevede di lasciare la foglia nella pinza fino a quando il valore espresso in $\text{mmol di acqua/m}^2\text{s}$ si assesta; il secondo protocollo, invece, identifica un valore dopo un intervallo di 30 secondi dal momento in cui la foglia (dal lato illuminato) viene stretta nella pinza. In entrambi i casi il valore espresso è stato raccolto e in seguito confrontato. Generalmente il valore indicato è inversamente proporzionale allo stress idrico cui la pianta sottostà.

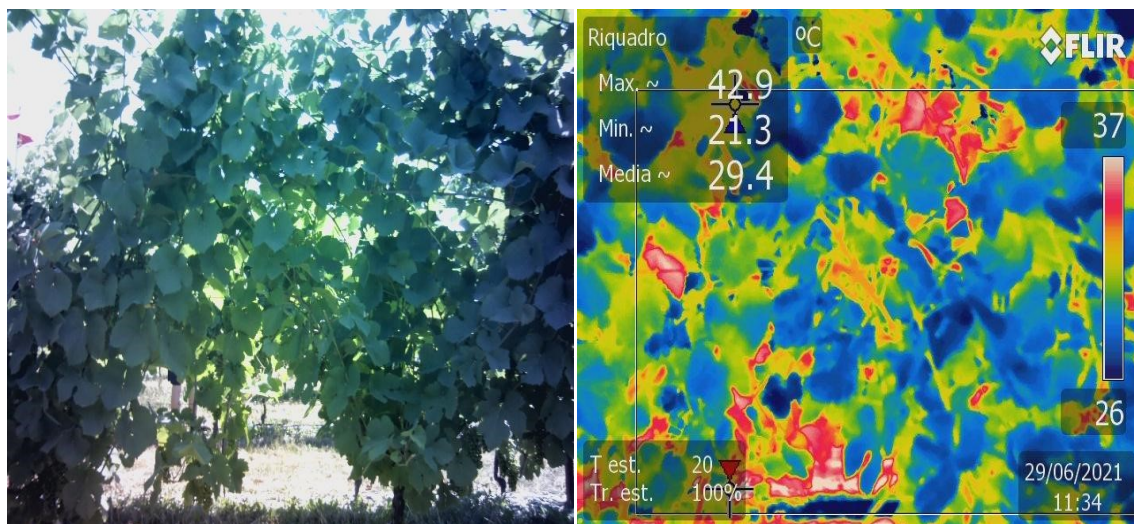
Inclinazione fogliare: Tra le varie operazioni condotte nel sito sperimentale, una delle prime è stata l'individuazione e segnalazione (con bacchetti di legno) di quattro germogli presi casualmente in altrettante piante all'interno della parcella sperimentale di ciascuna tesi. Durante tutto l'arco della stagione per ogni germoglio selezionato sono stati acquisiti i dati relativi all'inclinazione di tre foglie. Lo strumento, un goniometro associato ad un peso, indica l'angolo della lamina fogliare rispetto allo zenit. Le misurazioni erano effettuate ponendo lo strumento in linea con la nervatura centrale della pagina fogliare



Fig. 2.13 Annotazione manuale dell'inclinazione fogliare

superiore, in modo da ottenere una misura media, rispetto a tutti i punti della foglia, della sua inclinazione. Al termine della stagione, i dati dell'inclinazione fogliare, raccolti manualmente, sono stati confrontati con quelli appresi tramite stereo camera.

Termocamera: La misura dei dati di temperatura fogliare è stata effettuata manualmente con una termocamera al fine di validare l'efficienza della termocamera integrata nel sistema multisensore di rilevare correttamente questo parametro. La termocamera utilizzata, una FLIR T-620, è in grado di scattare contemporaneamente fotografie sia nel visibile sia nell'IR. Il rilevamento prevedeva la raccolta di quattro coppie di immagini. Rivolgendo le spalle al filare su cui è installata la stereo camera, si scattavano le prime due coppie di fotografie in sinistra e le ultime due in destra, tenendo conto di non variare l'altezza della termocamera e senza includere nell'obiettivo elementi inerti, come i pali che, surriscaldandosi maggiormente possono creare picchi di temperatura nella fotografia.



*Fig. 2.14 Fotografia originale della chioma (a sinistra) e fotografia IR (a destra).
Fotografie scattate da FLIR T-620*

Vendemmia sperimentale: A fine agosto, alla maturazione del Pinot grigio si è vendemmiato. Nelle due tesi si sono scelte quattro repliche (ciascuna costituita da tre piante). Perciò, si sono raccolti i dati relativi alla produzione di ventiquattro viti (12 per tesi) in tutto. Di ciascuna vite si è contato il numero di grappoli e registrato il loro peso netto utilizzando il dinamometro KERN CH50K50. In seguito alla pesata, di ciascuna replica si sono recise in modo casuale delle parti di grappolo e collezionate per sottoporre

il mosto ad analisi qualitative ($^{\circ}$ BRIX, pH e acidità totale). Per questo scopo sono stati utilizzati un rifrattometro “Atago co., LTD” per misurare il contenuto in zuccheri, il pHmetro “Crison microTT2022” per l’acidità totale ed il pH.



Fig. 2.15 Vendemmia delle tesi sperimentali

Potature: Condotte a fine novembre, le potature sono state effettuate al fine di rilevare il peso del legno prodotto nell’annata, quale indicatore dello sviluppo vegetativo della pianta. Dal rapporto tra produzione e peso del legno di potatura si è inoltre calcolato l’indice di Ravaz. Questa misura è funzionale al monitoraggio dello stato vegeto-produttivo della pianta e, nel caso illustrato, è servito come ulteriore strumento di confronto tra tesi Az irrigata convenzionalmente e Ir sottoposta a stress idrico controllato. Si è condotta una potatura a due capi a frutto lasciando due speroni per l’annata successiva. L’intervento è stato effettuato su quattro repliche (ciascuna costituita da tre piante) per ciascuna tesi. Il legno potato è stato pesato con lo stesso dinamometro utilizzato durante la vendemmia.

2.3 Analisi statistica

I dati raccolti sono stati sottoposti ad analisi statistica, utilizzando il t-test ($p \leq 0.05$). Per le elaborazioni è stato utilizzato il software STATISTICA versione 8.0 (StatSoft Inc., 2007, Tulsa, USA). Per l'analisi delle correlazioni è stato utilizzato il Software GraphPad (GraphPad Software Inc., 1989, San Diego, California USA).

2.4 Approfondimento sulla misura della variazione dell'inclinazione fogliare tra giorno e notte

Nell'ambito delle attività eseguite in questa tesi, si è condotto un approfondimento per lo studio della variazione di inclinazione fogliare tra giorno e notte.

Si è analizzato il movimento che le foglie compiono dall'analisi di immagini acquisite con dispositivo WCam alle ore 11.00-15.00 del giorno e alle 23.00 della notte. L'analisi delle immagini, per la prima volta testata per questa particolare applicazione, ha permesso un'automazione nella raccolta di questo dato potendo confrontare l'andamento dell'inclinazione fogliare sia di giorno che di notte (con sistema di flash). Il dato giornaliero è stato raccolto anche manualmente, ma su un numero limitato di germogli, al fine di verificare la corrispondenza tra i valori rilevati direttamente e quelli rilevati dalla stereo camera. Le prime osservazioni hanno permesso di evidenziare che le foglie di giorno e di notte cambiano la propria inclinazione mentre i valori assoluti di inclinazione fogliare media non rispecchiano sempre fedelmente lo stato idrico della pianta. Perciò, un approfondimento è stato deciso per constatare le differenze nell'inclinazione fogliare giorno/notte tra la tesi stressata e la tesi aziendale durante la stagione. In letteratura sono pochi gli studi che riportano di sperimentazioni in merito alla variazione di inclinazione giorno-notte. Si trovano spesso, invece, studi sull'inclinazione basati su dati unicamente diurni in condizioni eterogenee che non permettono di estrarre correlazioni forti (Ehleringer e Comstock, 1987; Gamon e Pearcy, 1989; Briglia et al., 2020). In risposta agli stress idrici la vite attua strategie diverse, tra le principali troviamo la regolazione osmotica, la cavitazione e l'inattivazione degli enzimi fotosintetici. La variazione di inclinazione fogliare può essere considerata un'ulteriore strategia di

adattamento a stress idrici, termici e radiativi. Secondo ciò che si evince dallo studio condotto da Silvestroni et al. (2005), nella cv Sangiovese le foglie durante il periodo più caldo in condizioni di stress forzato assumono un'angolatura di 90° rispetto al piano orizzontale, nettamente superiore all'angolo delle foglie della cv Montepulciano (70°). Sulle foglie in questione si sono misurate la fluorescenza, la clorofilla a e b, contenuto in carotenoidi, trasmittanza, assorbanza delle foglie e gli scambi gassosi. Dallo studio si apprende come tra le cv, il Sangiovese limita l'eccessivo assorbimento delle radiazioni e la traspirazione soprattutto grazie ad un cambio di inclinazione fogliare. Si è pervenuti a tale conclusione a seguito delle misure effettuate (fluorescenza e *specific leaf weight*): il calo del contenuto di clorofilla ha abbassato l'assorbanza fogliare, mentre la riduzione dello spessore della lamina ha generato maggiore trasmittanza fogliare. Lo studio però, come accennato prima, non si impegna a verificare la variazione di inclinazione tra giorno e notte e di conseguenza non ne spiega i motivi, perciò, tale argomento resta una novità da indagare in campo sperimentale.

Elaborazione delle immagini: Le elaborazioni automatiche delle immagini sono visualizzate nella piattaforma Aurora WEB mettendo in luce diversi aspetti che si possono approfondire sulla chioma. Le elaborazioni sono frutto dell'implementazione di algoritmi di *image analysis* e dello sviluppo di particolari reti neurali da parte dell'azienda costruttrice, per le quali nella tesi si è contribuito tramite l'annotazione manuale delle immagini. Affinché il riconoscimento automatico fosse possibile, è stato necessario individuare manualmente tramite il programma GIMP 2.10.22 (GNU Image Manipulation Program., Kimball e Mattis, 1995, Berkeley, USA) le foglie che potevano distinguersi meglio per ciascuna immagine, di modo che il sistema fosse in grado di apprendere da solo quali fossero le condizioni per identificare le foglie nella fotografia. Perciò, di ogni foglia è stato tracciato il contorno e se ne è colorato l'interno. A titolo di esempio si riporta fig. 2.16 dove si può notare a sinistra la foto originale della chioma di quattro piante, a destra invece, la segmentazione della stessa ossia il riconoscimento dei pixel che costituiscono elementi come la chioma, il palo, il tronco, lo sfondo, e i grappoli visibili.



Fig. 2.16 Fotografia originale (a sinistra) e ricezione della stereocamera dei pixel che identificano le principali parti della fotografia: chioma, fusto, grappoli (a destra). Fonte: software Aurora

Il software ha tra le varie funzioni anche quella di calcolare la distanza pixel per pixel dalla telecamera ad ogni punto visibile della chioma, grazie alla tecnologia di stereo visione. Facendo ciò per l'intera fotografia si determina una mappa tridimensionale della chioma, detta mappa di profondità. Nell'immagine una scala di colori identifica con tonalità più scure (violetto) i pixel più lontani dalla stereo camera, al contrario, con i colori più tenui (giallo) le parti più vicine ad essa. Ad ogni distanza corrisponde anche una misura in cm^2 di ogni pixel che permette di ricostruire la superficie fogliare visibile. Dalla mappa di profondità e dalla precedente segmentazione vengono estratte due misure fondamentali della chioma: il volume della chioma e la proiezione della superficie fogliare, normalizzate per metro di filare.

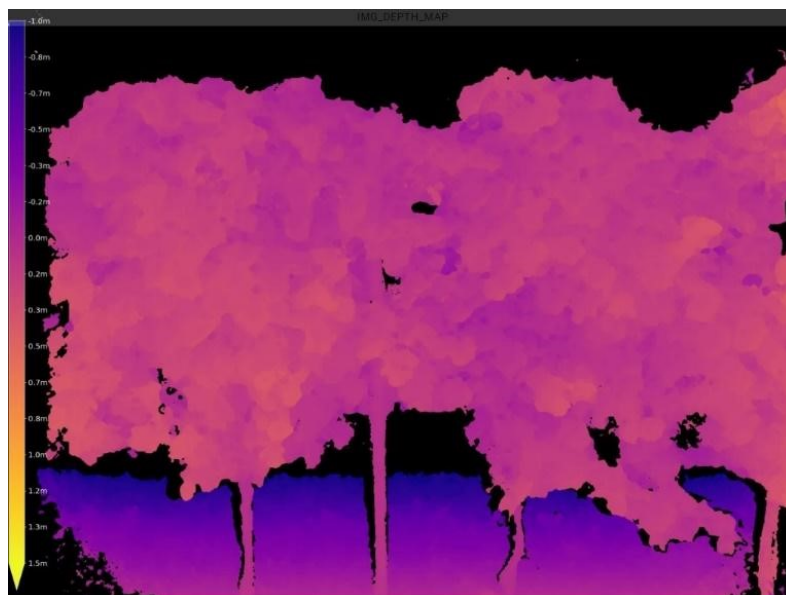


Fig. 2.17 Mappa di profondità: in violetto i pixel più lontani, in giallo quelli più vicini. Fonte software Aurora

L'inclinazione fogliare è calcolata dal sistema in due modi: *Leaf detection* e *Depth profile segment*. Entrambi si basano sul profilo tridimensionale della chioma, potendo cioè individuare un orientamento delle foglie nello spazio 3D.

Il primo metodo si basa sull'individuazione di un campione casuale di singole foglie tramite riconoscimento automatico da rete neurale. Per l'addestramento del programma è stato fondamentale il lavoro svolto con il programma GIMP, spiegato in precedenza. Le foglie selezionate che superano determinati criteri di qualità vengono utilizzate per il calcolo dell'inclinazione, interpolando ciascuna foglia con un piano di cui si misura l'angolo rispetto allo zenit. Ogni foglia ha inclinazione diversa, perciò, i valori espressi si disperdono in una distribuzione. Questi valori traslati in grafico compongono un istogramma. Nell'istogramma di *image leaf inclination* si indica la distribuzione delle inclinazioni non per numero di foglie con un dato angolo, ma in base alla superficie fogliare. Perciò, nella distribuzione pesa maggiormente la foglia più grande. Nella distribuzione si identifica un valore medio (barra rossa), che rappresenta appunto la media pesata rispetto alla dimensione fogliare, e questo viene calcolato per ogni fotografia scattata durante la stagione.



Fig. 2.18 Esempio di fotografia processata dal programma *leaf detection* e istogramma relativo alla distribuzione della media delle inclinazioni fogliari

A seguito di ciò, ogni dato medio viene inserito in un grafico generale che raffigura l'andamento dell'inclinazione di ogni giorno sia di giorno che di notte. Nel grafico (fig. 2.19) possiamo osservare l'andamento dei dati medi rilevati in un preciso momento della stagione. Il grafico è composto da due andamenti ben distinguibili dal tono dei colori utilizzati. L'andamento relativo ai dati appresi con *leaf detection* è quello espresso dai colori caldi (rosso e giallo). In rosso viene individuata la retta composta dai punti che rappresentano le medie di inclinazione di notte, mentre in giallo le medie relative a tutti i punti giorno-notte, con evidenza delle oscillazioni.

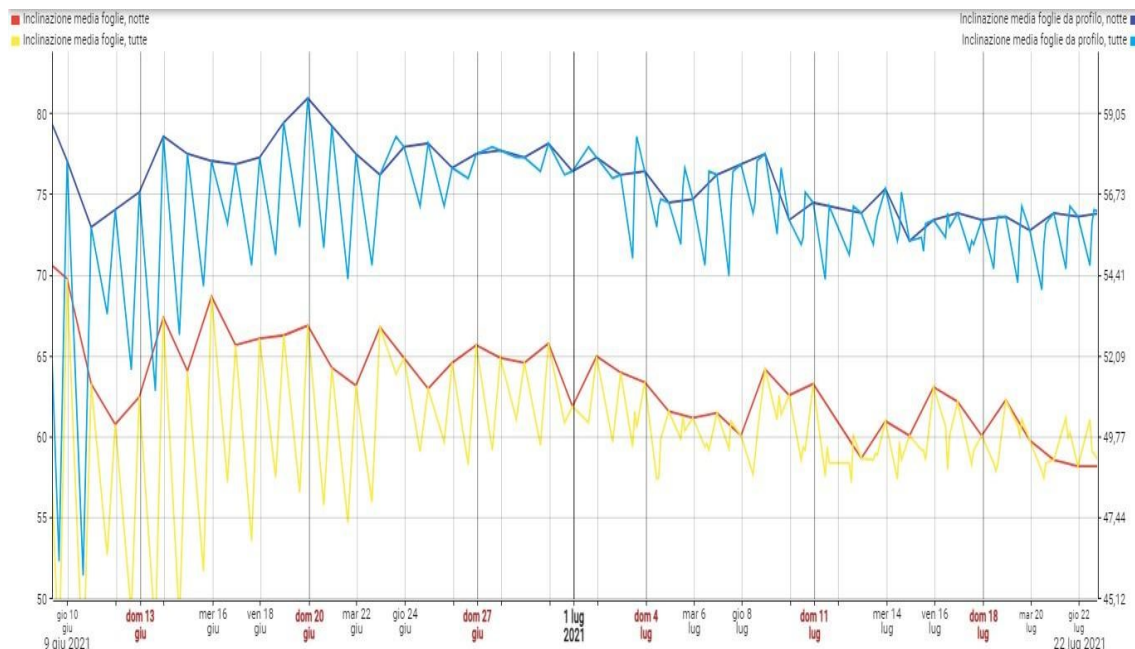


Fig. 2.19 Grafico esemplificativo della rielaborazione del software delle misure medie giornaliere dell'inclinazione fogliare nel periodo 9 giugno – 22 luglio nella sezione AZ. Con i colori freddi si indica: l'andamento giorno /notte (in azzurro) e solo della notte (in blu) dell'inclinazione fogliare appreso tramite metodo Depth profile. Con i colori caldi si indica: l'andamento giorno / notte (in giallo) e solo della notte (in rosso) dell'inclinazione fogliare rilevato con il metodo Leaf detection.

Il secondo metodo con cui poter calcolare l'inclinazione fogliare è il *depth profile* (fig. 2.20). Invece di riconoscere le singole foglie, il processore divide (riconoscendo la chioma) l'immagine in sezioni verticali e da ciascuna ne ricava una serie di segmenti orientati nello spazio 3D che rappresentano tante sezioni verticali di ciascuna foglia di cui si calcola l'inclinazione rispetto allo zenit. Le sezioni saranno continue quando si intercetta una foglia, discontinue quando si passa da una foglia all'altra. Sull'immagine vengono poi individuati i segmenti con buona continuità (che rappresentano verosimilmente la foglia nel dato punto) e differenziati con colori diversi a seconda dell'inclinazione. Rispetto al primo metodo vengono raccolti più dati, ma allo stesso tempo questi sono maggiormente influenzati da un rumore di fondo causato da dati spuri che possono influenzare il calcolo della media. Anche con questo metodo si individuano valori per singola fotografia che formano un istogramma di cui si può calcolare la media

da poter inserire nel grafico generale. In questo caso l'andamento è rappresentato dalle rette di colore scuro (blu e azzurre) nel grafico (fig. 2.19).



Fig. 2.20 Fotografia processata dal programma depth profile e istogramma relativo della distribuzione della media dell'inclinazione dei singoli segmenti individuati nella fotografia

RISULTATI E DISCUSSIONI

3.1 Caratteristiche climatiche del sito nel periodo di sperimentazione

Temperatura: I dati climatici riportati sono stati acquisiti tramite piattaforma “Aurora WEB”. Questa accorpa tutte le informazioni dei sensori installati sul dispositivo messo a disposizione da CET Electronics. Per quanto riguarda il clima, la stagione 2021 si è presentata relativamente mite con temperature medie mensili minime che non hanno mai raggiunto temperature sotto zero nel periodo di rilevamento. Durante i mesi più caldi della stagione le temperature medie massime hanno sempre superato i 25°C, mentre la minore escursione termica si è rilevata nel mese di settembre dove le temperature minime sono state le più alte. Le temperature misurate sono state confrontate con quelle rilevate a 2 m dal suolo, dalla capannina Arpav di Nervesa della Battaglia a pochi km dal sito sperimentale.

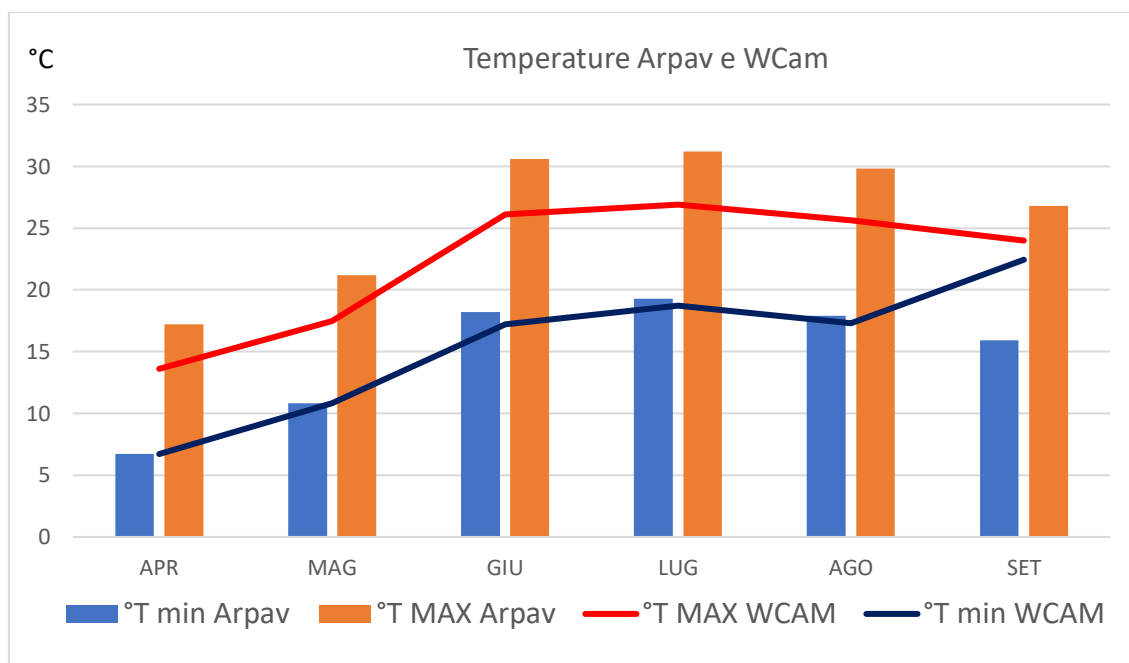


Fig. 3.1 Confronto delle temperature dell'aria rilevate da Arpav e dal multi sensore WCam - 2021.

Si può notare facilmente che l'andamento delle temperature rilevate dai due strumenti è molto simile; ciò nonostante, le temperature medie mensili massime rilevate dalla capannina meteorologica di CET installata nel sito sperimentale risultano sempre inferiori

rispetto a quelle rilevate da Arpav, mentre si riscontra che le minime differiscono tra le due fonti a fine estate (settembre). La differenza dei dati è imputabile al diverso mesoclima dei siti in cui gli strumenti di rilevamento sono posizionati e che distano 7 Km l'uno dall'altro.

Precipitazioni: La stagione 2021 è stata caratterizzata da precipitazioni molto disomogenee. Dai dati registrati dalla capannina di rilevamento di cui è servito il multi-sensore, è possibile verificare l'andamento delle precipitazioni nel periodo di rilevamenti (aprile-settembre). Maggio è stato il mese più piovoso con 171 mm, aprile il secondo (100 mm), luglio il terzo (60 mm) e agosto il quarto (59 mm). Giugno, invece, è stato il mese più siccitoso dove si sono rilevati solamente 21 mm di pioggia. Dalla stazione Arpav di Nervesa della Battaglia si rileva che nel 2021 gli eventi meteorici si sono verificati in 87 giornate, con in totale circa 1138 mm di pioggia. Dal grafico 3.2 è possibile verificare che tra i due strumenti usati per il rilevamento viene registrato per quasi tutta la stagione lo stesso andamento delle precipitazioni. Maggio viene confermato, da Arpav, come il mese più piovoso tra i mesi considerati con 228 mm di pioggia. Aprile è il secondo mese più piovoso nella stagione studiata con 138 mm misurati. Luglio è stato il terzo mese per precipitazioni rilevate (114 mm di cui la metà rilevati solo in data 26/07/2021). Nonostante l'annata non sia stata siccitosa, considerati i mm di pioggia totali e gli eventi così concentrati e poco uniformi nel periodo, è stato indispensabile attivare il sistema irriguo per più periodi nell'anno.

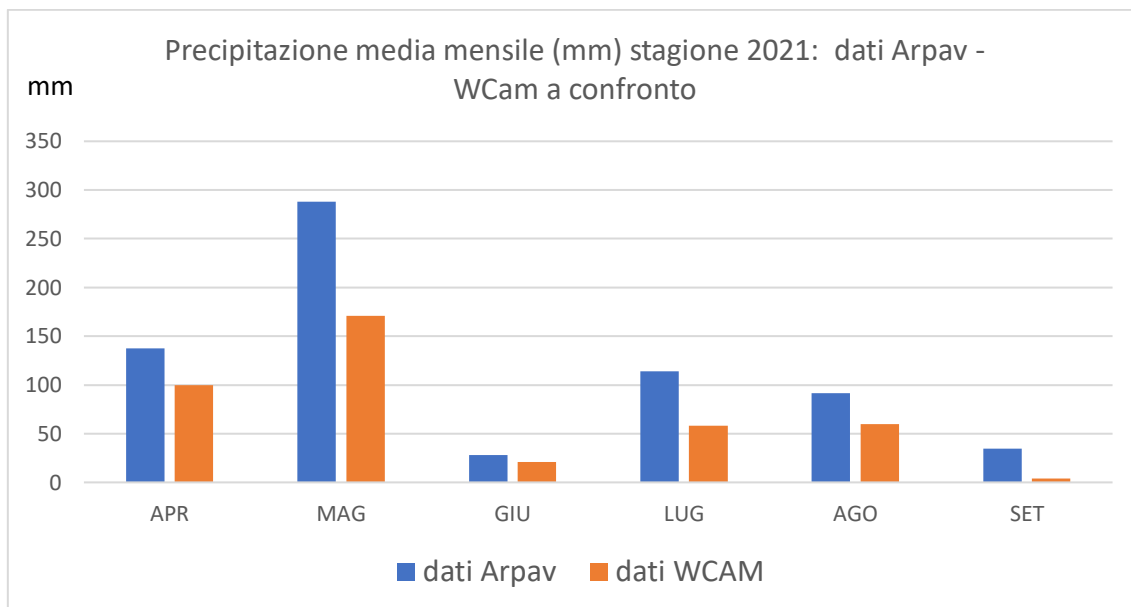


Fig. 3.2 Precipitazione media mensile (mm) stagione 2021: dati Arpav e WCam a confronto

3.2 Analisi degli interventi irrigui in relazione dei fenomeni precipitativi 2021.

Come si può notare dal grafico (fig. 3.3), estrapolato dal software “Aurora WEB”, si è analizzato l’andamento degli interventi irrigui in relazione a quello delle precipitazioni nella tesi aziendale. La messa in funzione dell’impianto è stata programmata in concomitanza del periodo più siccitoso della stagione, dunque da metà giugno fino alla fine di agosto per la tesi aziendale, mentre ha interessato la tesi Ir solamente da inizio luglio ad inizio agosto. Conoscendo l’apporto idrico meteorologico, nota la pluviometria rilevata dai sensori di cui è dotato WCam (fig. 3.2) dal mese di giugno fino a quello di settembre, si può sostenere che la tesi aziendale abbia potuto usufruire di 142 mm di acqua derivata da eventi precipitativi naturali. In più, sulla base dei calcoli effettuati dei mm erogati ad intervento (si veda cap. 2.1.4) si è calcolato che la distribuzione di acqua nel periodo giugno-agosto è stata pari a 141 mm nella stessa tesi. In totale, perciò, la tesi Az ha ricevuto 283 mm di acqua nell’arco di tempo preso in considerazione. La tesi Ir, invece, irrigata 18 volte in trenta giorni (tra luglio e agosto) ha ricevuto 44 mm di acqua dall’irrigazione per un totale di 185 mm nel periodo giugno-agosto.

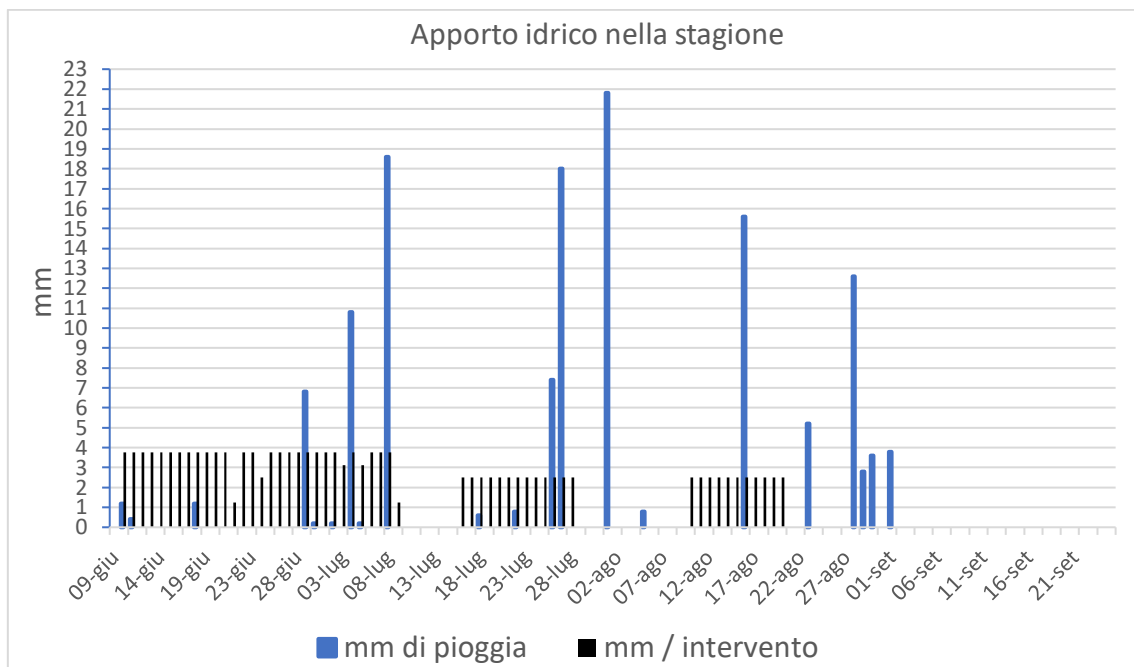


Fig. 3.3 Confronto interventi irrigui (mm / intervento), precipitazioni (mm) nella stagione di rilevamento 2021 nella tesi Az. Fonte: software Aurora

3.3 Risultati della sperimentazione

Potenziale idrico: Analizzando l'andamento del potenziale idrico del germoglio nelle due tesi, misurato tramite camera di Scholander durante la stagione, si evince dalla fig. 3.4 che tra le due quella con irrigazione ridotta (Ir) ha fatto registrare sempre valori minori (più negativi) rispetto a quella aziendale. Durante la stagione l'andamento ha messo in evidenza diverse fasi. Tra la fine di giugno e l'inizio di luglio, i valori assoluti della tesi aziendale tendono a rimanere costanti, quelli della Ir invece, a decrescere a riprova dello stress idrico a cui la tesi è sottoposta. A seguito delle irrigazioni e delle piogge di fine luglio, si nota un incremento del potenziale idrico in entrambe le tesi nella data del 29 luglio. Nel mese di agosto, il potenziale si riduce nuovamente in entrambe le tesi, con valori significativamente più negativi per la tesi Ir. Al termine dei rilevamenti, a fine agosto, si registrano i valori minimi del potenziale per entrambe le tesi: -0,92 MPa per quella aziendale, -1,26 MPa per quella Ir.

La vite reagisce in modi diversi alla siccità, infatti, è una pianta che regola il proprio potenziale idrico in risposta alle crescenti richieste atmosferiche, legate soprattutto all'evapotraspirazione, e alle ridotte disponibilità idriche nel terreno, dovute alla capacità

di ritenzione idrica del suolo. Di conseguenza, misurando il potenziale idrico del germoglio si ottiene un quadro dettagliato del livello di stress idrico della pianta. A seconda delle pressioni rilevate lo stress può essere assente ($> -0,6$ MPa), debole (da $-0,6$ a $-0,9$ MPa), lieve (da $-0,9$ a $-1,1$ MPa), moderato (da $-1,1$ a $-1,4$ MPa) fino a severo ($< -1,4$ MPa) (Mirás-Avalos e Araujo, 2021). Stando a questi parametri si può affermare che, nel sito sperimentale, i due diversi metodi di irrigazione abbiano causato uno stress al massimo di debole entità (agosto) nella tesi aziendale, irrigata convenzionalmente. Al contrario, nella tesi Ir (irrigazione ridotta) si sono riscontrati stress di lieve-moderata entità all'inizio del campionamento e a metà agosto dopo che le piogge rilevate a fine luglio e l'accensione dell'impianto idrico hanno ristabilito il contenuto di acqua nel suolo e hanno fatto misurare un livello di stress debole (29/07/2021). Da sottolineare invece, come i dati registrati il 12 luglio e il 24 agosto rispecchiano un severo grado di stress idrico in questa tesi.

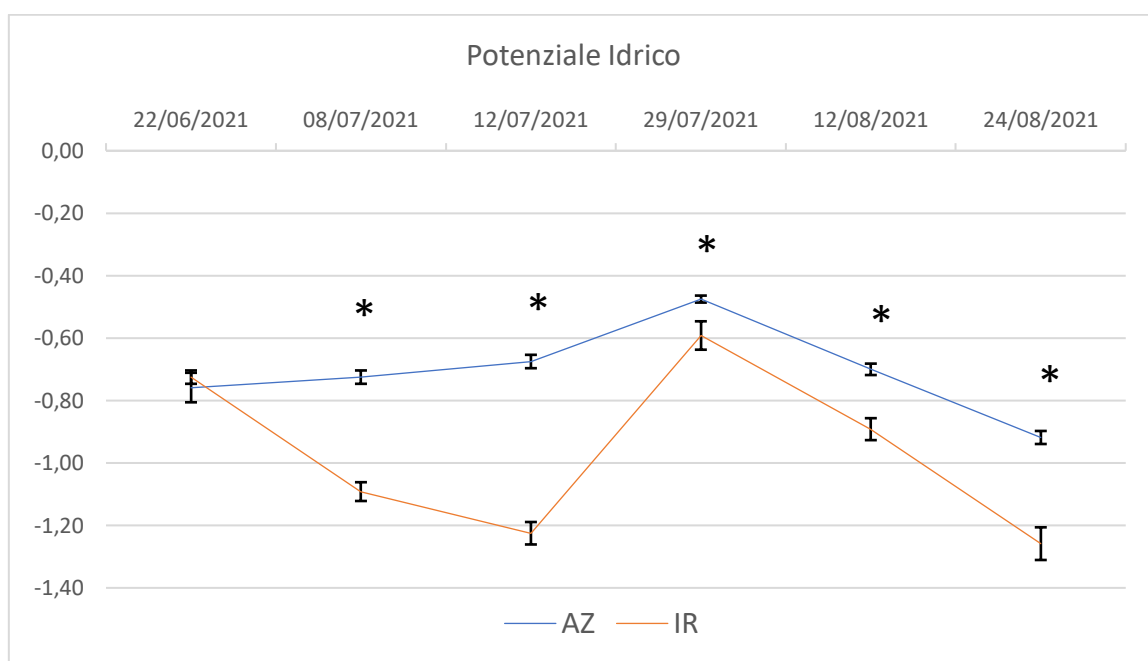


Fig. 3.4 Confronto del potenziale idrico (misurato tramite camera di Scholander) tra tesi Az e Ir nell'anno 2021. Le barre di errore rappresentano l'errore standard di sei campioni per replica. Con “” si evidenziano i valori significativamente diversi $\alpha = 0,05$ (t-test)*

Conduttanza stomatica: Tramite porometro si è potuto misurare la capacità di scambio dei gas tra la foglia e l'ambiente esterno in relazione al diverso metodo irriguo utilizzato nelle due tesi. Si è visto che all'aumentare dello stress idrico i valori della conduttanza diminuiscono. Questo fenomeno si spiega in quanto, per limitare la perdita eccessiva di acqua, gli stomi si chiudono per alcune ore al giorno al fine di limitare la traspirazione. Con valori di conduttanza minori di $50 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ si indica uno stress severo, mentre valori superiori a $250 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ indicano uno stress di lieve entità (Medrano et al., 2002). Nella stagione 2021, la tesi Az, ha fatto registrare quasi sempre i valori più alti, tranne nel periodo tra la fine di luglio e inizio agosto dove invece si riscontrano valori più alti nella tesi Ir. Questo andamento potrebbe essere associato alle piogge intercorse alla fine di luglio, che hanno riavvicinato temporaneamente i potenziali delle tesi Az e Ir. Bisogna inoltre considerare come variabili condizionanti anche la taratura dello strumento e la scelta dei punti rilevati sulla foglia. La calibratura è un'operazione difficile e va effettuata scrupolosamente, così lo è pure la metodica di rilevamento. Molto spesso, infatti, lo strumento impiegato sullo stesso punto restituisce misure diverse, e lo stesso vale se si cambia la posizione sulla foglia. La stessa problematica risulta confermata dal recente studio condotto da Toro et al., (2019) in cui si confronta l'attendibilità della misura della conduttanza stomatica per mezzo di un porometro con quella ottenuta tramite IRGA in quattro specie vegetali (girasole, mais, fagiolo, vite) e in condizioni irrigue differenti. I dati ottenuti tramite porometro, in condizioni di forte stress idrico, di umidità relativa alta e di basse temperature dell'aria sono sempre più alti rispetto a quelli misurati da IRGA. Ciò viene ulteriormente confermato dalle analisi statistiche condotte da Lavoie-Lamoureux su ben 759 casi pubblicati con il focus di trovare una relazione tra le misure del potenziale idrico e della conduttanza stomatica con una vasta gamma di genotipi di marze e portinnesti (2017). Nell'ultimo rilevamento, tuttavia, la misura acquisita tramite porometro conferma nuovamente l'andamento del potenziale idrico e di conseguenza dello stato di stress idrico a cui la tesi Ir è sottoposta.

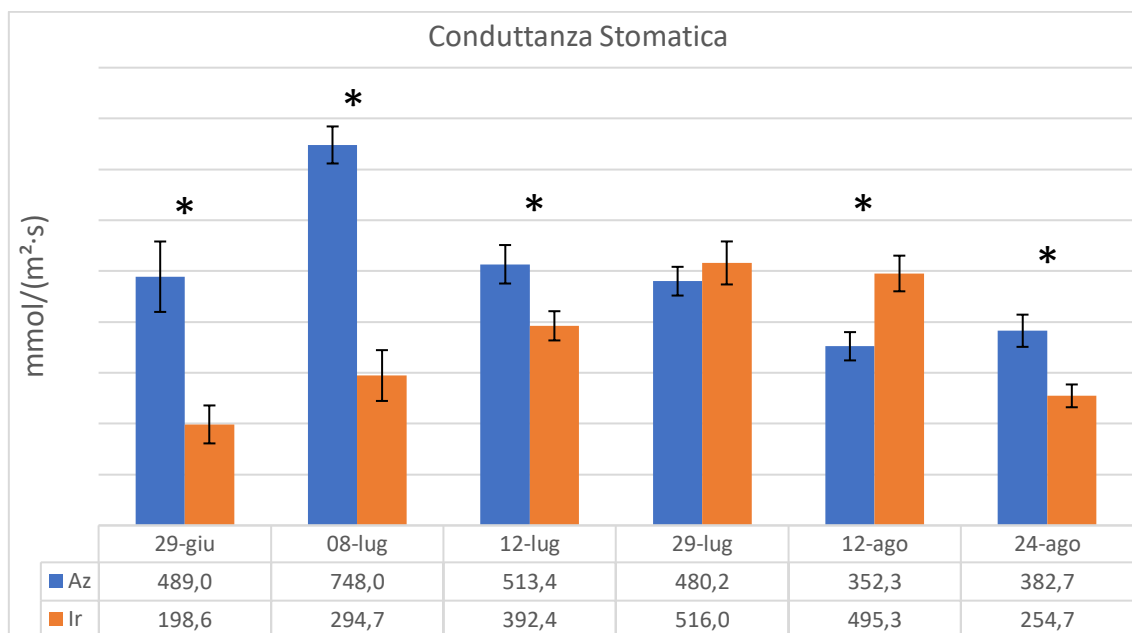


Fig. 3.5 Andamento della conduttanza stomatica (misurata tramite porometro) nella stagione 2021 . Le barre di errore rappresentano l'errore standard di otto campioni per replica. Con “” si evidenziano valori significativamente diversi $\alpha = 0,05$ (t-test)*

Inclinazione fogliare: L'andamento dei valori di inclinazione fogliare raccolti manualmente segue l'andamento del potenziale idrico del germoglio. Per la maggior parte del periodo di rilevamenti la tesi Ir ha sempre evidenziato foglie più inclinate verso il basso rispetto a quelle della tesi Az (fig. 3.6), nonostante le differenze tra le tesi siano risultate non significative nella maggior parte delle date. L'inclinazione nella tesi Ir è aumentata chiaramente nel mese di luglio, parimenti alle crescenti condizioni di stress rilevate misurando il potenziale idrico, mentre la tesi aziendale ha mantenuto valori di inclinazione pressoché costanti. Condotta un'analisi di correlazione con il Software GraphPad (San Diego, California USA) si è potuto appurare statisticamente che esiste una corrispondenza tra il potenziale idrico e l'inclinazione fogliare. Nel grafico (fig. 3.7) la significativa correlazione tra i due parametri dimostra la dipendenza dell'inclinazione fogliare al variare del potenziale idrico ($P = 0.0027$). In generale, il grafico dimostra che le foglie assumono inclinazioni verso il basso maggiori in corrispondenza di un crescente stress idrico rilevato dalla camera a pressione. Infatti, più negativi sono i valori di potenziale, maggiore è l'angolo di inclinazione rilevato manualmente. Ciò spiega perché sia la differenza tra i valori di potenziale sia di quelli dell'inclinazione tra le due tesi è stata massima a luglio. Come afferma lo studio condotto da Palliotti et al., (2008), in

condizioni di forte siccità la vite, per risparmiare sui costi energetici, limita la crescita del germoglio e quella dei vasi xilematici e aumenta l'angolo fogliare, orientando le foglie prossimali in posizione verticale, così da ridurre la fotoassimilazione e garantire l'efficienza fisiologica delle foglie distali. Nello studio del 2008, l'inclinazione fogliare misurata sull'angolo tra la vena principale della lamina rispetto all'orizzonte (0°), tramite goniometro, varia in modo significativo tra la tesi irrigata e quella stressata, mostrando che nei giorni più caldi di luglio le foglie mediali si inclinano verso il basso di 12° in più rispetto a quelle della tesi irrigata. Anche Briglia et al., (2020) riporta una forte differenza tra le inclinazioni fogliari rilevate sia con goniometro sia con processore 3D su campioni ben irrigati rispetto a quelli sottoposti a stress e ne individua la relazione con il potenziale idrico. Infatti, per evitare che eccessive radiazioni possano influenzare il movimento delle foglie e che quindi il variare dell'inclinazione venga attribuito ad altro parametro rispetto al solo stato idrico della pianta, le viti sono fatte crescere in ambiente a luce satura. In linea con i valori individuati nella tesi, i risultati dello studio riportano che l'angolo fogliare misurato con goniometro cresce gradualmente a seconda della tesi presa in considerazione passando da una media di 75° per la tesi ben irrigata a 110° per quella stressata. I valori riportati da questo studio sono inferiori ai risultati visti nella tesi. Tale condizione, molto probabilmente, è causata dal diverso livello di stress imposto alle tesi. Briglia, infatti, indica che le viti meno irrigate hanno raggiunto al massimo un lieve stato di stress (da $-0,9$ a $-1,1$ MPa) mentre nel nostro caso si è raggiunto un livello di stress di moderata entità (da $-1,1$ a $-1,4$ MPa).

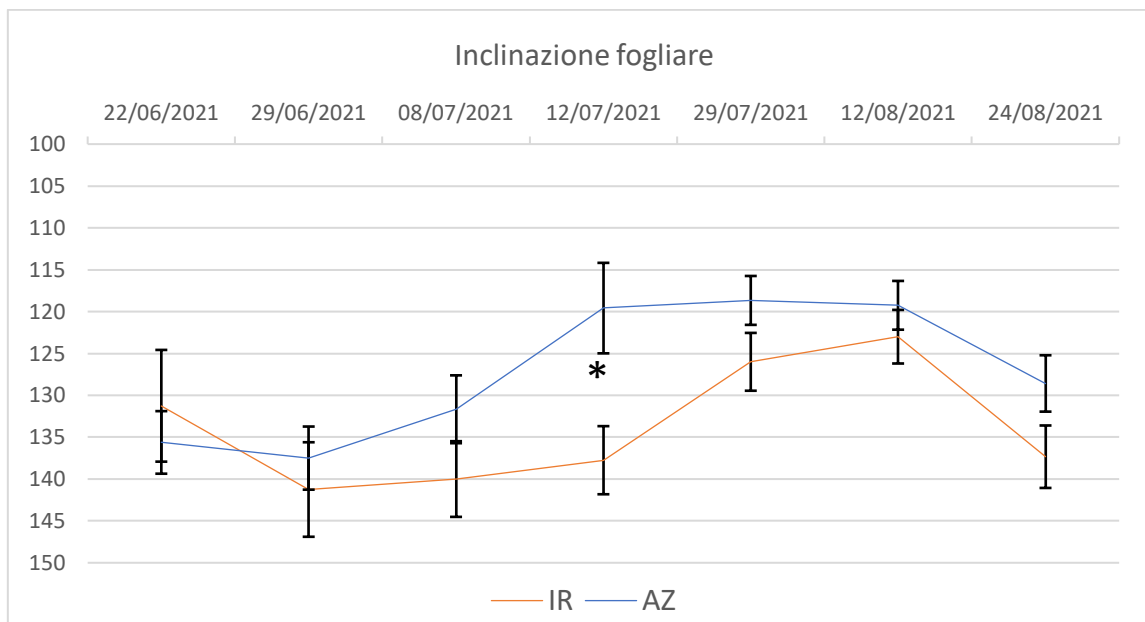


Fig. 3.6 Confronto delle inclinazioni fogliari (misurate manualmente) tra tesi Ir e Az. Le barre di errore rappresentano l'errore standard di dodici campioni per replica. Con “*” si evidenziano i valori significativamente diversi $\alpha = 0,05$ (t-test)

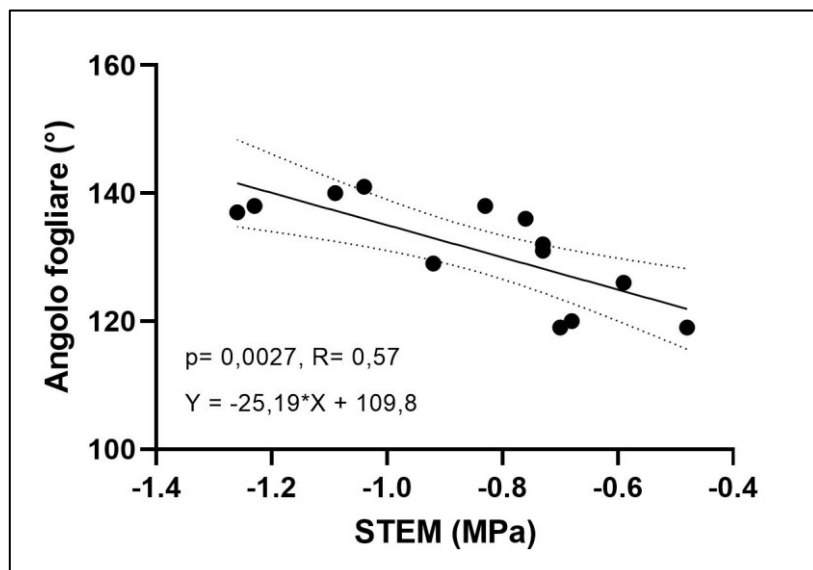


Fig. 3.7 Correlazione tra potenziale idrico (STEM) e angolo fogliare misurato manualmente con inclinometro in diverse date della stagione vegetativa per le tesi Aziendale e Irrigazione ridotta.

3.4 Validazione delle funzionalità della stereo camera e confronto con i dati acquisiti in campo

Confronto tra inclinazioni fogliari: Si è condotta un'ulteriore analisi delle inclinazioni fogliari comparando i dati rilevati manualmente con quelli registrati dalla WCam e rielaborati nel portale "Aurora WEB" dal programma *leaf detection*. Tra i due metodi (*leaf detection* e *depth profile*), infatti, il primo si è rivelato quello più attendibile. La stereo camera interpola un piano rispetto alla superficie fogliare e ne indica l'angolo di inclinazione basandosi su quello che la normale (perpendicolare) al piano assume rispetto allo zenit. Perciò, si sono acquisiti angoli che da 0° arrivano fino ad un massimo di 90°. Le misurazioni manuali con inclinometro, invece, non calcolano l'angolo sulla normale del piano descritto dalla superficie, ma direttamente di quello rispetto lo zenit. Ciò significa che i valori individuati vanno da 90° fino a 180°. Per rendere coerente il confronto si è scelto di equiparare i valori registrati dalla stereo camera con quelli individuati manualmente. Perciò, sapendo che la differenza tra i dati registrati con i due metodi è di 90° si è sommato tale valore a tutti gli angoli misurati dalla stereo camera. Da come si può vedere nel grafico riportato sotto (fig. 3.8) la correlazione tra le due misure è risultata altamente significativa ($p \leq 0.0001$) e indica che la stereo camera è stata in grado di riconoscere la differenza di inclinazione fogliare in rapporto allo stato idrico della pianta, parimenti a quanto fatto con misurazione manuale dell'inclinazione, nonostante la WCam tenda a sovrastimare le misurazioni rispetto a quelle registrate dall'inclinometro. Si conferma che ad una crescente condizione di stress (potenziali più negativi) è corrisposto un incremento dei valori di inclinazione fogliare registrati anche dalla WCam.

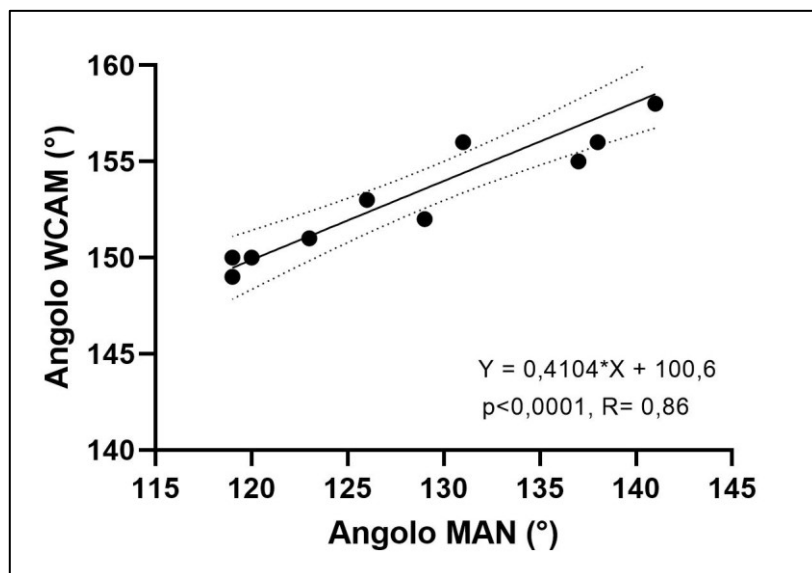


Fig. 3.8 Correlazione tra angolo misurato manualmente e misurato dalla WCam. I dati si riferiscono ai rilievi effettuati nelle tesi Aziendale e Irrigazione ridotta in diversi momenti della stagione vegetativa.

Termografia: Il grafico (fig. 3.9) mostra le temperature medie della parete fogliare delle due tesi rilevate manualmente tramite termocamera. Si evince che, per tutta la stagione la tesi sottoposta a deficit idrico controllato ha manifestato sempre le temperature più alte. La temperatura media nel periodo di sperimentazione della tesi Az è stata di 27,9°C; di un grado in più quella della tesi Ir. La massima differenza tra le tesi si rileva in data 12 luglio quando la tesi Ir ha fatto registrare 2,5°C in più rispetto a quella aziendale. Questa differenza è stata appurata dall'analisi statistica e conferma la corrispondenza tra i risultati ottenuti con quelli registrati dalle misurazioni del potenziale idrico. Infatti in questa data la tesi Ir ha fatto registrare un potenziale pari a -1,23 MPa (fig. 3.4) significativamente inferiore a quello della tesi Az, ed è la data in cui la differenza di potenziale tra le due tesi è stata massima. Lo stesso si può dire del rilevamento effettuato in data 8 luglio dove i due gradi in più circa misurati nella tesi Ir rispecchiano lo stress moderato percepito (-1,09 MPa). Anche Costa (2012) studiando gli effetti del deficit idrico sulla conduttanza stomatica, ha utilizzato immagini termiche per monitorare lo stress idrico in tre tesi differentemente irrigate. I risultati attestano una correlazione diretta tra conduttanza stomatica e la temperatura fogliare, infatti quando si sottopone la pianta ad un periodo di stress idrico si verifica un calo della traspirazione, per cui si può affermare che la ridotta

disponibilità d'acqua abbia portato ad un incremento delle temperature della chioma. Belfiore (2019), invece, ha studiato l'efficacia della termocamera nel rilevare lo stress idrico in relazione sia della conduttanza stomatica sia al potenziale idrico. I risultati dello studio dimostrano che la termocamera è risultata in grado di discriminare efficacemente il diverso trattamento irriguo a cui le tre tesi sono state sottoposte (controllo irrigato, stress moderato, stress severo). In linea con il nostro studio, le temperature medie rilevate nella tesi ben irrigata misuravano anche 3-4 °C in meno rispetto a quelle ottenute nella tesi sottoposta a forte stress idrico.

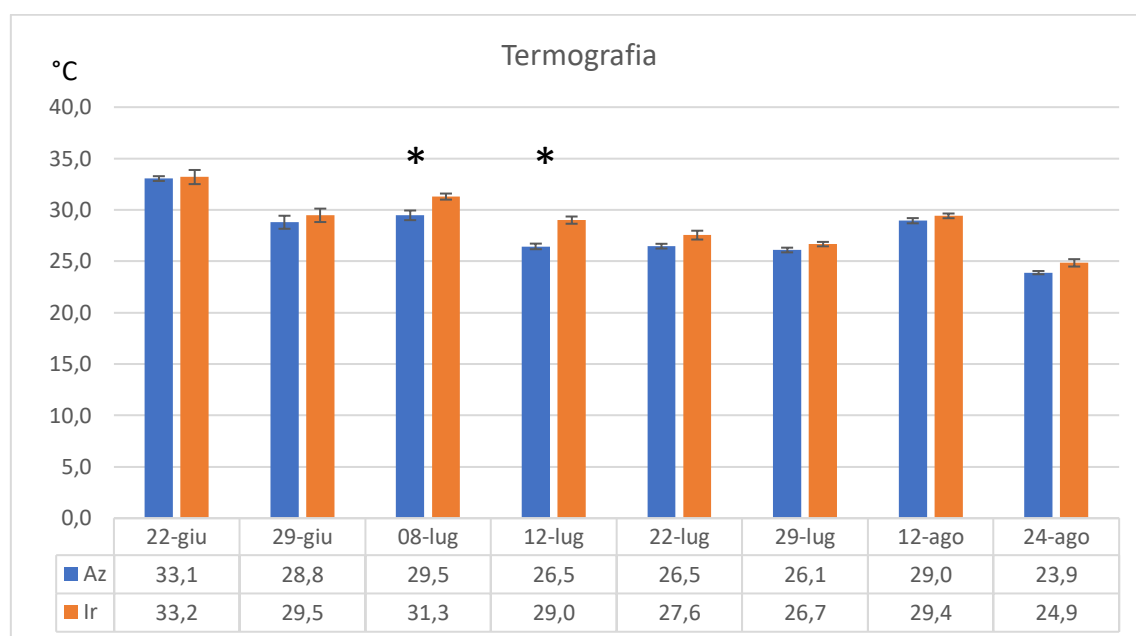


Fig. 3.9 Temperature della chioma rilevate manualmente tramite termocamera FLIR (risoluzione 640 × 480 pixels). durante la stagione 2021. Le barre di errore rappresentano l'errore standard di quattro campioni per replica. Con “” si evidenziano i valori significativamente diversi $\alpha = 0,05$ (t-test)*

Confronto tra Temperature registrate manualmente e dal sistema multisensore: Si è compiuta un'analisi comparata tra i dati raccolti dalla termocamera integrata al sistema multisensore e quelli individuati manualmente con la termocamera. Tale indagine è stata effettuata per verificare se la tecnologia è in grado di individuare differenti temperature in relazione allo stato idrico della pianta. Si è pertanto confrontato l'andamento delle temperature medie diurne della chioma acquisite tramite termocamera con quelle collezionate dalla WCam nella fascia mediana dell'obiettivo fotografato, omettendo

quegli spazi che possono condizionare il dato (cielo e suolo). Nonostante molto spesso le temperature del multi sensore tendano a sovrastimare leggermente il dato rispetto a quello ottenuto manualmente dalla termocamera, la termocamera del sistema multi sensore è risultata capace di individuare differenze di temperatura tra le tesi e durante la stagione la tesi Ir ha sempre fatto rilevare temperature più alte rispetto a quelle della Az (fig. 3.10). A conferma delle capacità di identificazione delle temperature della chioma da parte del sistema multi sensore si riporta il grafico (fig. 3.11) che attesta come vi sia una forte correlazione tra i dati di temperatura della chioma rilevati manualmente e quelli ottenuti tramite WCam ($p = 0,0003$).

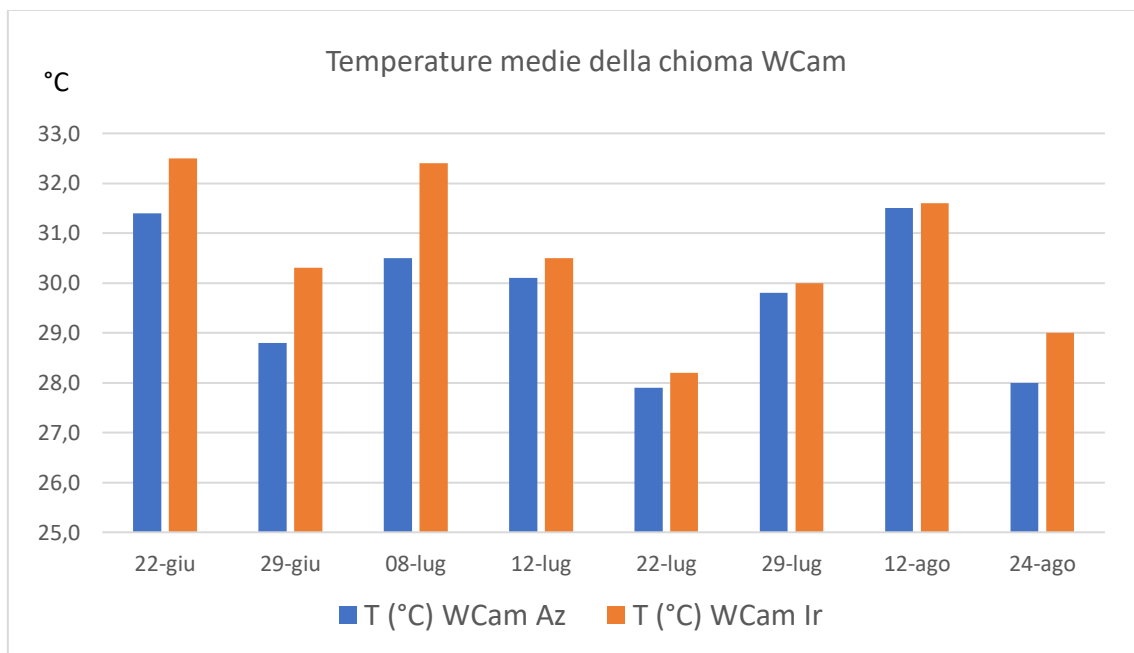


Fig. 3. 10 Confronto tra temperature medie della chioma rilevate dalla stereo camera nella tesi Az e in quella Ir durante la stagione di rilevamento

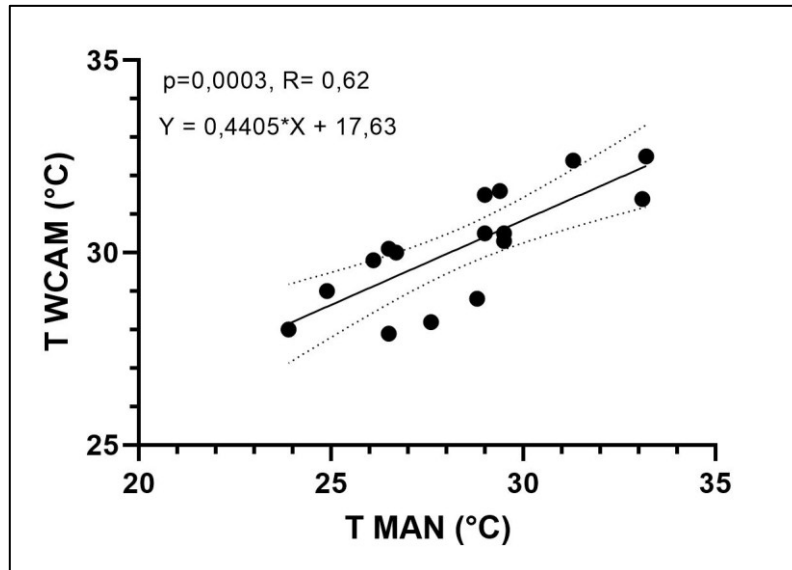


Fig. 3.11 Correlazione tra valori di temperatura registrati manualmente tramite termocamera (FLIR T-620) e registrati automaticamente dalla termocamera integrata nella WCam. I dati si riferiscono ai rilievi effettuati nelle tesi Aziendale e Irrigazione ridotta nelle stesse giornate in cui son stati misurati i potenziali e l'inclinazione fogliare.

3.5 Valutazione dei risultati ottenuti dal confronto tra programmi Aurora WEB sull'individuazione dell'inclinazione fogliare

Al fine di valutare quale metodo scegliere tra *leaf detection* (LD) e *depth profile* (DP) per costruire un database di valori di inclinazione fogliare da confrontare con quelli individuati manualmente (tramite inclinometro), nelle foto originali, scattate da WCam, si è monitorato il movimento delle foglie dal giorno alla notte per tutta la stagione di rilevamenti. Si è assegnato un valore negativo (-1) quando le foglie da una foto all'altra si orientavano verso l'alto diminuendo la propria inclinazione rispetto allo zenit, con un valore positivo (1) quando le foglie apparivano più inclinate verso il basso, (0) quando invece, tra le foto non si notavano differenze di inclinazione. Conseguite tali informazioni, sulla base dell'analisi comparata, per ogni giorno si è validato se tramite (LD) e (DP) il movimento delle foglie era stato riconosciuto correttamente anche dal software. La validazione ha riguardato l'osservazione di 355 fotografie della tesi Az e 321 della Ir scattate dalla stereo camera nel periodo di sperimentazione. Nella tesi Az il metodo LD ha ottenuto 267 riscontri positivi, mentre 260 il metodo DP. Per 267 volte, infatti, si è appurato che l'inclinazione giorno/notte delle foglie osservata direttamente

dalle foto originali coincideva con l'angolo calcolato digitalmente. Allo stesso tempo per 260 volte il metodo DP ha misurato inclinazioni che coincidono con l'interpretazione diretta dell'inclinazione osservata da una foto all'altra (giorno/notte). Il riscontro positivo determina una corrispondenza tra l'elaborazione digitale dei dati e ciò che si può osservare direttamente dalle foto originali. Di conseguenza, il grado di corrispondenza può essere rappresentato in percentuale a seconda dei riscontri positivi. Perciò, nella tesi aziendale il metodo LD ha dato il 75% di corrispondenza, il metodo DP il 74%. Delle 321 fotografie scattate della tesi Ir il movimento delle foglie, verificato di persona sulle immagini nella piattaforma, ha avuto corrispondenza con il metodo LD 238 volte, solo 191 volte con il DP, per una corrispondenza percentuale pari al 73% con il primo metodo e al 60% con il secondo. Dopo questa attenta analisi si è potuto constatare che il primo metodo (LD) è il migliore da utilizzare come parametro di confronto delle inclinazioni fogliari con quelle misurate tramite inclinometro.

Questa analisi mette in evidenza alcuni aspetti sullo stato di sviluppo di questa tecnologia. I risultati fino ad ora sono incoraggianti, tuttavia, da ciò che è emerso vi sono aspetti che necessitano migliorie. Il programma *depth profile* raccoglie molti più dati sull'immagine (interpretando l'inclinazione di più pixel), fornendo un quadro più dettagliato della chioma, ma tale capacità implica una raccolta indiscriminata di dati e anche di interpretazioni sbagliate di punti nelle e tra le foglie (dati spuri). Questo gap condiziona l'esito dell'analisi che, come si è visto ha ottenuto solo il 60% di corrispondenza nella tesi Ir.

A titolo di esempio si riporta in fig. 3.12 una valutazione di corrispondenza tra i metodi LD e DP e l'interpretazione diretta delle fotografie scattate da WCam il giorno 14 luglio. Nel dettaglio si riscontra la corrispondenza positiva del metodo LD. Infatti, dalla foto scattata alle 23.00 si osserva che le foglie sono meno inclinate verso il basso rispetto a quelle scattate alle 15.00 e il software indica tale condizione misurando un calo dell'inclinazione che passa da $66,3^\circ$ a $60,7^\circ$ dal pomeriggio alla notte. LD riconosce lo stress della pianta che inclina le foglie di giorno per portarle più orizzontali la notte. Non c'è corrispondenza con il metodo DP perché constatata l'inclinazione dalle foto originali, il metodo rileva un aumento degli angoli dal pomeriggio alla notte (da $56,8^\circ$ a $58,1^\circ$). DP contraddice ciò che si nota direttamente dalle foto ossia indica che le foglie dalle 15.00 alle 23.00 si abbassano invece di alzarsi non rilevando così lo stress percepito dalla pianta.

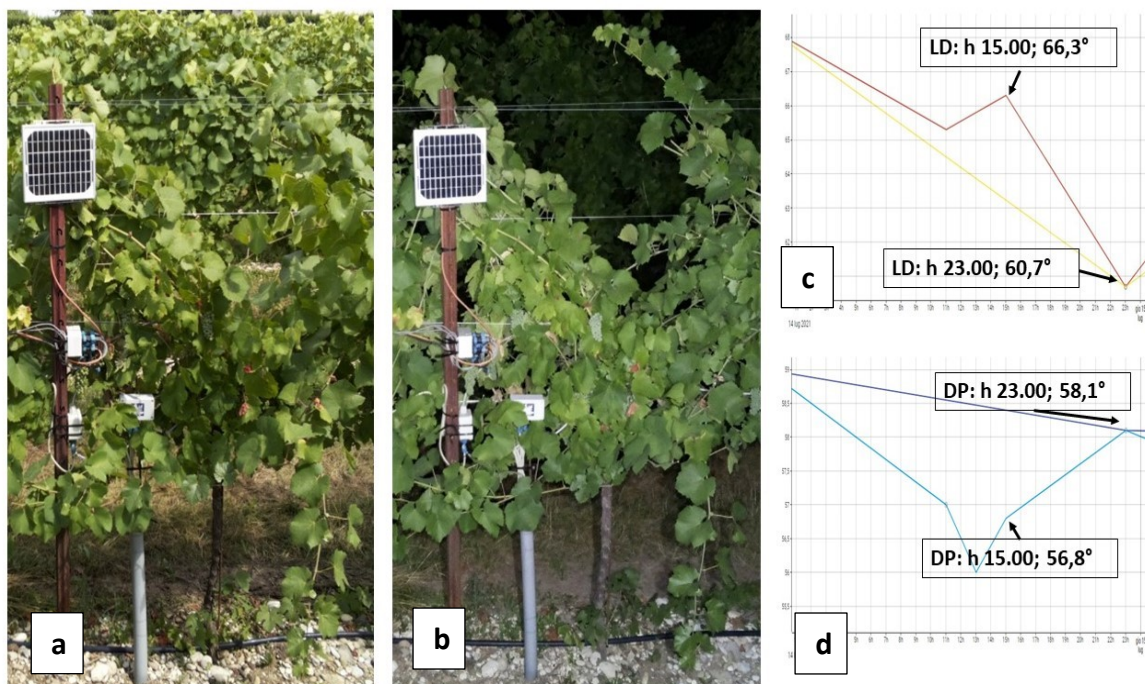


Fig. 3.12 Valutazione della corrispondenza tra i metodi LD e DP e l'interpretazione diretta delle fotografie scattate da WCam. Dettaglio del 14/07/2021. a) fotografia originale della tesi Ir scattata alle ore 15.00; b) fotografia originale della tesi Ir scattata con flash alle ore 23.00; c) calcolo digitale degli angoli fogliari effettuati tramite leaf detection; d) calcolo digitale degli angoli fogliari effettuati tramite depth profile.

3.6 Valutazione dei risultati dell'inclinazione fogliare tra il giorno e la notte in relazione allo stress idrico

Dopo aver appurato che il metodo LD mostra una percentuale di correlazione tra interpretazione visiva e quella virtuale maggiore rispetto a quella del metodo DP, si è scelto LD come metodo per l'analisi della tendenza giorno/notte delle inclinazioni della tesi stressata nel periodo più critico della stagione (dal 1° maggio al 1° settembre). Dall'andamento si può notare come per la maggior parte del tempo (fig. 3.13), nel periodo che va dal 1° maggio al 1° luglio la media delle inclinazioni diurne è sempre inferiore rispetto a quella notturna. Infatti, di giorno le foglie tendono ad orientarsi verso l'alto, descrivendo comunque angoli superiori a 90°; di notte, invece, le foglie appaiono orientarsi verso il basso ossia più parallele alla verticale descrivendo, perciò, angoli maggiori rispetto a quelli misurati di giorno. Questo andamento cambia nella stagione e si può vedere chiaramente come nella parte destra del grafico: dopo l'11 luglio, esso si inverte. Infatti, la retta gialla si sposta sopra a quella rossa indicando che di giorno, le foglie sono più inclinate rispetto alla notte. Perciò, al contrario di quanto visto prima, di giorno le foglie appaiono parallele allo zenit, mentre di notte più perpendicolari ad esso. Questo cambiamento nella stagione non viene rilevato dal metodo nella tesi Az. Infatti, nel grafico (fig. 3.14) le inclinazioni diurne sono sempre inferiori a quelle notturne proprio come nel primo periodo di rilevamenti della tesi Ir quando ancora lo stress idrico non aveva condizionato l'orientamento delle inclinazioni tra il giorno e la notte. Si può affermare, perciò, che l'aggravarsi dello stress idrico abbia condizionato non solo l'angolo di inclinazione, portando a far misurare inclinazioni generalmente maggiori nella tesi stressata (fig. 3.6), ma abbia influito anche sull'andamento delle inclinazioni giorno/notte, portando la pianta a cambiare abitudini e preferire ad un orientamento delle foglie plagiotropo (orizzontale al terreno) uno ortotropo (verticale al terreno) di giorno e viceversa di notte.

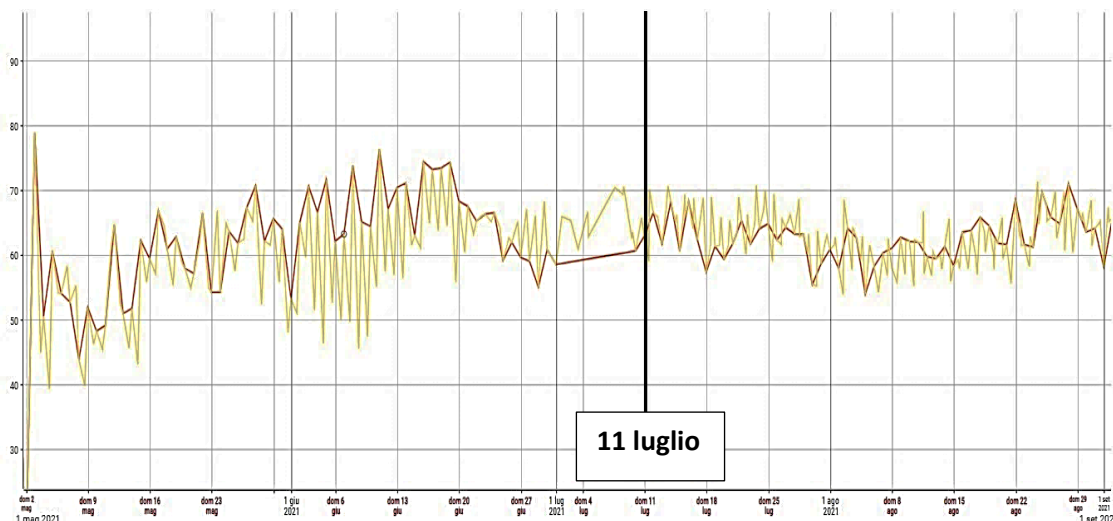


Fig. 3.13 Grafico del calcolo virtuale delle inclinazioni fogliari della tesi Ir dal 1° maggio al 1° settembre con il metodo LD. In giallo: misure diurne; in rosso: misure notturne. Dal grafico si nota che dopo l'11 luglio, con l'aggravarsi dello stress idrico, le foglie variano il loro orientamento giorno/notte rispetto ad inizio stagione. Di giorno e dopo l'11 luglio, le foglie passano da un orientamento plagiotropo a uno ortotropo. Fonte: software Aurora.

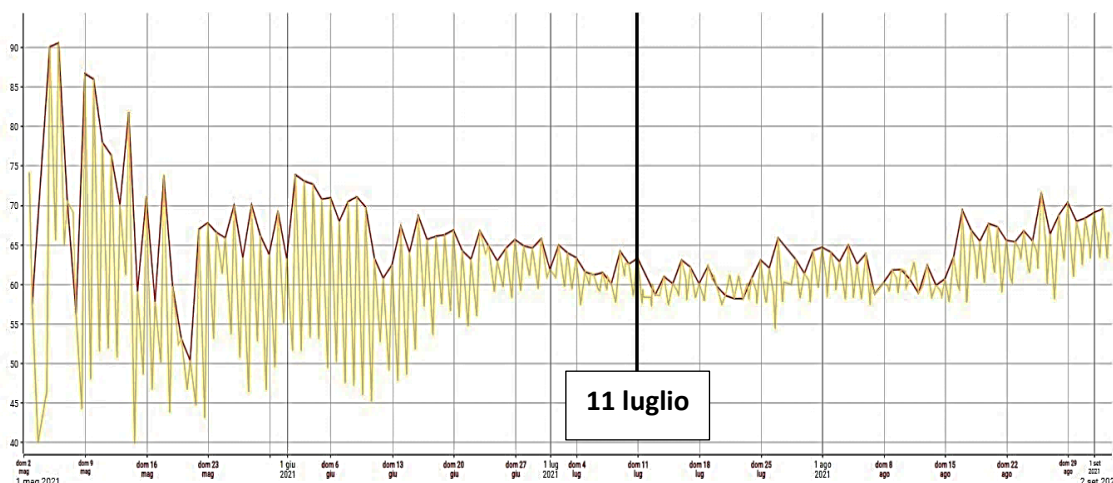


Fig. 3. 14 Grafico del calcolo virtuale delle inclinazioni fogliari della tesi Az dal 1° maggio al 1° settembre con il metodo LD. In giallo: misure diurne; in rosso: misure notturne. Dal grafico si nota che rispetto alla tesi Ir, il metodo LD non rileva alcun cambiamento dell'orientamento giorno/notte, ad indicare la mancanza di stress. Fonte: software Aurora

Tab. 3.1 Studio della corrispondenza tra rielaborazione digitale automatica delle inclinazioni fogliari giorno/notte ottenute tramite leaf detection (LD) e depth profile (DP) con l'interpretazione visiva dell'operatore delle inclinazioni fogliari apprese osservando ciascuna fotografia scattata dalla stereo camera WCam dal mese di maggio a settembre.

	AZ	IR
Tot fotografie analizzate	355	321
Tot foglie (-1)	173	152
Tot foglie (1)	171	158
Tot foglie (0)	12	11
Corrispondenza (si) LD	267	238
Corrispondenza (no) LD	88	83
% corrispondenza (si) LD	75	73
Corrispondenza (si) DP	260	191
Corrispondenza (no) DP	95	130
% corrispondenza (si) DP	74	60

3.7 Risultati produttivi e qualitativi

Al termine della stagione, dopo la vendemmia, si sono misurati i parametri quantitativi e qualitativi delle due tesi (tab. 3.2), al fine di valutare quale sia stato l'effetto che il diverso apporto idrico ha avuto su di esse. Il numero dei grappoli in media per singola pianta non è risultato significativamente diverso. Infatti, nella tesi Az si sono contati in media 36,1 grappoli, nella stressata 36,4. Per quanto riguarda il peso, invece, l'andamento è opposto e la differenza significativa: la tesi Ir ha riportato grappoli dal peso medio più basso rispetto a quelli della Az. Ciascuna pianta in media ha prodotto grappoli dal peso di 176 g nella tesi Az e di soli 128 g in quella stressata. Questa tendenza è confermata da innumerevoli studi e si basa sul comportamento naturale della vite nei confronti dello stress idrico. Laddove tale condizione si presenta, la pianta, per gestire al meglio le proprie risorse è forzata a limitare la crescita degli organi riproduttivi. Una condizione di stress idrico reiterato altera i normali processi fisiologici della pianta a partire dalla

circolazione della linfa grezza (xilema). Si è già parlato dell'effetto che può avere sulla traspirazione, perciò, non è fuori luogo affermare che possa esserci un nesso anche con l'alterazione dell'attività fotosintetica e di stoccaggio degli zuccheri. Tale fenomeno viene evidenziato anche da Silvestroni et al. nella cv. Moltepulciano, varietà anisoidrica (come lo è pure il Pinot grigio): la tesi non irrigata rispetto a quella irrigata (nei limiti della ristorazione del 70% della evapotraspirazione dell'impianto), ha mostrato un calo del peso del grappolo del 13%, del 36% e del 16% nei rispettivi tre anni di sperimentazione (Silvestroni et al., 2020). I quantitativi minimi di pioggia rilevati da aprile fino ad inizio agosto, mesi che coincidono con le fasi fenologiche dell'allegagione fino all'invasatura ovvero quelle in cui avviene la divisione delle cellule del pericarpo, hanno influenzato la crescita e di conseguenza il peso dei frutti alla vendemmia. Per ciò che concerne la composizione del grappolo, non si sono rilevate differenze statistiche tra le due tesi nella concentrazione di solidi solubili (°Brix), mentre per il pH la differenza tra le tesi è significativa. Il deficit idrico ha probabilmente influito sul lieve aumento delle sostanze minerali (come il potassio) che hanno fatto misurare pH leggermente maggiori nella tesi stressata. È statisticamente provato che l'acidità titolabile (in acido tartarico), differisca tra le tesi: lo scarto tra le medie è di 1,32 punti. A prescindere dallo stato idrico delle tesi, entrambi hanno raggiunto un buon equilibrio vegetativo che ha supportato bene la maturazione dei grappoli (si veda l'indice di Ravaz), ma i valori diversi dell'acidità indicano che probabilmente l'accumulo di acido tartarico durante la fase di crescita erbacea degli acini nella tesi Ir è stato molto limitato dalla scarsa nutrizione idrica, come evidenziato da Ribereau-Gayon et al. (2017). Anche Esteban et al., (2002) hanno studiato gli effetti dell'assenza di trattamenti irrigui sui diversi componenti dell'uva di Tempranillo, e rilevando che le concentrazioni di potassio crescono all'aumentare degli zuccheri nei frutti. Il potassio è il catione che si trova maggiormente nelle uve, si accumula nell'acino dalla fase erbacea fino all'invasatura, ed è noto soprattutto per la capacità di neutralizzare gli acidi (salificazione). Infatti, nello studio si conferma la forte correlazione tra l'aumento di potassio e il calo di acidi organici e il conseguente incremento del pH. Perciò, si evince che, l'aumento del rapporto zuccheri/acqua nella tesi non irrigata ha implicato un maggior accumulo di potassio nel frutto che, neutralizzando gli acidi liberi, ha fatto innalzare il livello di pH (Esteban et al., 2002). Tra i risultati dello studio e quelli della tesi vi sono molte analogie; tuttavia, la mancanza di analisi specifiche

nella tesi non permette di affermare che i risultati ottenuti possano essere relazionati al fattore potassio.

Si evince ancora dalla tabella (tab. 3.2) che i valori del peso di potatura non sono significativamente diversi tra l'una e l'altra tesi. In media, infatti, il peso della vegetazione della tesi Az è pari a 0,81 Kg, mentre quello della tesi Ir è pari a 0,80 Kg.

Dai dati ottenuti è stato possibile calcolare l'indice di Ravaz per la stima dell'equilibrio vegeto-produttivo dell'impianto che in entrambi le tesi è stato ottimale considerando la vigoria del portinnesto (Kober 5BB). Esito del rapporto del peso medio della resa per pianta e del peso di potatura di dieci viti per tesi, l'indice misura 7,8 per la tesi Az e 6,3 per quella Ir. Secondo Silvestroni (2015) nei vitigni vigorosi questo indice, ai fini dell'equilibrio vegeto-produttivo deve essere compreso tra i valori 6 e 10. Perciò, sulla base di questi riferimenti, le tesi non hanno manifestato una situazione squilibrata. Resta comunque da notare che tra le tesi il valore è diverso: la tesi Ir mostra un valore inferiore rispetto alla Az (1,5 in meno). La causa di ciò è da ricollegare ad una produzione minore (5.0 Kg rispetto ai 6,3 Kg della tesi Az) misurata nella tesi stressata rispetto ad un peso di potatura simile nelle due tesi.

Tab. 3.2 Valori medi delle analisi quantitative e qualitative delle due tesi sperimentali. Con “” si evidenziano i valori significativamente diversi $\alpha = 0,05$ (t-test)*

MEDIA	AZ	IR	P (0,05)
Kg pianta	6,3	5,0	*
N° grappoli	108	109	
P.M.G	176	128	*
Peso potatura (Kg)	0,81	0,80	
°Brix	19,9	20,5	
Acidità (Ac. Tartarico)	7,6	6,3	*
pH	3,25	3,38	*

CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo studio è stato quello di testare in vigneto una nuova tecnologia per il monitoraggio dello stato idrico della vite.

A tal fine sono state impostate due diverse gestioni irrigue in grado di determinare condizioni di stato idrico differenziate nelle tesi in studio, e nello specifico: aziendale (irrigata in modo ottimale) e irrigazione ridotta (in cui si è operato in modo da indurre uno stato di stress).

I risultati relativi ai rilievi fisiologici condotti hanno dimostrato che la gestione irrigua ha effettivamente determinato differenze sia nello stato idrico che nelle risposte fisiologiche delle tesi. La tesi Ir si è differenziata dalla tesi Az manifestando condizioni di stress idrico da lieve a severo come evidenziato dai dati di potenziale (da -0,59 a -1,26 MPa). I dati di conduttanza stomatica hanno confermato uno stress idrico per la tesi Ir che in media ha fatto misurare 136 mmol/(m²·s) in meno rispetto alla tesi Az nell'arco della stagione di rilevamenti.

I risultati relativi ai parametri produttivi e qualitativi hanno permesso di verificare ulteriormente l'effetto delle due gestioni irrigue sulle produzioni. I dati confermano quanto già riportato da altri studi relativamente agli effetti negativi dello stress idrico su produzioni e qualità. Infatti, dai nostri risultati si evince una riduzione di entrambi i parametri nella tesi stressata.

Verificata la presenza di condizioni di stato idrico differenziate si è quindi testata la capacità del sistema sensoristico di monitorare parametri relativi alla chioma (inclinazione fogliare e temperatura fogliare) relazionati allo stato idrico della pianta. Tali dati sono stati misurati sia dal sistema multisensore che misurati manualmente.

Le buone correlazioni individuate tra angolo fogliare vs potenziale idrico e tra temperatura fogliare vs potenziale idrico confermano che questi parametri rispondono alle condizioni idriche della pianta. In condizioni idriche ottimali, sulla base dei nostri dati le temperature fogliari sono oscillate da 24°C a 29°C e le inclinazioni fogliari giornaliere da 119° a 138°. Viceversa, ad uno stato di stress crescente la pianta ha risposto incrementando le temperature della chioma, con valori tra 25°C e 31°C, e incrementando l'inclinazione fogliare, con angoli compresi tra 123° e 141° nelle ore centrali della giornata.

Un primo importante risultato di questa tesi è pertanto la conferma che, perlomeno nella varietà Pinot grigio, la temperatura e l'inclinazione fogliare possono essere utilizzati quali parametri predittori dello stato idrico della pianta.

Un'ulteriore importante obiettivo di questo studio è stata la verifica della capacità del sistema multisensore WCam di rilevare correttamente questi parametri della chioma in campo. Le analisi comparative tra dati raccolti manualmente e registrati dalla WCam hanno dimostrato una buona corrispondenza tra misure strumentali e misure manuali, validando la capacità del sistema di rilevare correttamente questi parametri.

In quanto alle misure digitali, si è valutata l'affidabilità dei metodi di calcolo dell'inclinazione fogliare e dalle analisi svolte si è appurato che il metodo con maggior riscontri positivi tra interpretazione visiva delle inclinazioni e calcolo virtuale degli angoli delle foglie è stato il *leaf detection*.

Grazie alla tecnologia WCam è stato possibile verificare gli effetti dello stress idrico anche sui dati notturni dell'inclinazione fogliare nella stagione. Si è visto che le foglie nei mesi più caldi con l'aggravarsi dello stress idrico, oltre ad inclinarsi di più durante il giorno cambiano modo di orientarsi dal giorno alla notte, assumendo un orientamento verticale di giorno e orizzontale la notte.

I risultati ottenuti in questa tesi offrono l'opportunità di dare il via a nuovi studi che possano spiegare meglio i meccanismi che regolano le variazioni di inclinazione fogliare giorno-notte della vite, e aprono la strada per lo sviluppo di nuovi sistemi di supporto decisionale per la gestione irrigua, più innovativi ed efficienti, in grado di abbinare i classici parametri climatici con parametri rilevati direttamente sulla pianta. Infatti, se il parametro più importante per impostare una gestione dell'irrigazione è il contenuto idrico del suolo, è anche vero che i sensori di umidità restituiscono un dato molto puntuale, spesso non facilmente spazializzabile, soprattutto in terreni con tessitura e orografia non omogenea. L'analisi di immagini sullo stato fisico di più piante rilevate in vari punti di un vigneto permette di aumentare i parametri a disposizione per costruire un DSS sempre più affidabile.

BIBLIOGRAFIA

Améglio T., Archer P., Cohen M., Valancogne C., Daudet F.A., Dayan S., Cruiziat P. (1999) – ‘*Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation*’. In: Plant and Soil, 207, Pp. 155–167.

Baldocchi D. (2008) - ‘*Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems*’. In: Australian Journal of Botany, <https://doi.org/10.1071/BT07151>, 56(1), Pp. 1–26

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 Northern Italy*’. In: Agronomy; <https://doi.org/10.3390/agronomy9120821>, 9, 821 Pp. 1-20.

Briglia N., Williams K., Wu D., Li Y., Tao S., Corke F., Montanaro G., Petrozza A., Amato D., Cellini F., Doonan J. H., Yang W., Nuzzo V. (2020) - ‘*Image-Based Assessment of Drought Response in Grapevines*’. In: Front. Plant Sci. 11:595.

Buesa, I., Mirás-Avalos, J.M., De Paz, J.M., Visconti, F., Sanz, F., Yeves, A., Guerra, D., Intrigliolo, D.S. (2021) - ‘*Soil management in semi-arid vineyards: Combined effects of organic mulching and no-tillage under different water regimes*’. In: European Journal of Agronomy. 123, 126198.

Buesa I., Mirás-Avalos J.M., Intrigliolo D.S. (2020) – ‘*Row orientation effects on potted-vines performance and water-use efficiency*’. In: Agricultural and Forest Meteorology, 294, 108148.

Charrier G., Delzon S., Domec, J.-C., Zhang L., Delmas C. E. L., Merlin I., Corso D., King A., Ojeda H., Ollat N., Prieto J. A., Scholach T., Skinner P., van Leeuwen C., Gambetta G. A. (2018) – ‘*Drought will not leave your glass empty: Low risk of hydraulic failure revealed by long-term drought observations in world’s top wine regions*’. In: Science Advances, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao6969>. 4(1), eaao6969.

Cogato A., Marinello F., Meggio F. (2021) – ‘*Rilevare il deficit idrico della vite per irrigare al meglio*’. In: L’Informatore Agrario 12/2021, Pp. 53-57.

- Costa J.M., Ortuño M. F., Lopes C. M., Chaves M. M. (2012) – ‘*Grapevine varieties exhibiting differences in stomatal response to water deficit*’. In: Functional Plant Biology, <http://dx.doi.org/10.1071/FP11156>.
- D.M. 10.06.2014 - “*Disciplinare di produzione dei vini indicazione geografica tipica <marca trevigiana>*”. In: sito ufficiale del Mipaaf sez. Qualità e Sicurezza - Vini DOP e IGP. Art. 8: Legame con l’ambiente geografico.
- Ehleringer J.R. e Comstock J. (1987) – “*Leaf absorptance and leaf angle: mechanisms for stress avoidance*”. In: NATO ASI Series. Vol: G 15.
- Esteban M. A., Villanueva M. J., Lissarrague J. R. (2002) – “*Relationships between different berry components in Tempranillo (V. Vinifera L) grapes from irrigated and non-irrigated vines during ripening*”. In: Journal of the Science of Food and Agriculture. 82: 1136-1146. DOI: 10.1002/jsfa.1149.
- Farquhar G. D., von Caemmerer S., Berry J. A. (1980) – ‘*A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species*’. In: Planta, 149(1), Pp. 78–90. <https://doi:10.1007/bf00386231>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2016). In: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/index3.stm>.
- Gaiotti F., Belfiore N., Amedei P. (2018) – ‘*I risultati dell’attività del CREA VE di Conegliano in collaborazione con il Consorzio Agrario di Ravenna. Focus su nutrizione idrica, minerale e gestione della chioma*’. In: Il Corriere Vinicolo n. 28. Pp 17-19.
- Gamon J.A., Pearcy R.W. (1989) – ‘*Leaf movement, stress avoidance and photosynthesis in Vitis californica*’. In: Oecologia, 79, Pp. 475-481.
- Gaudillère J-P., Van Leeuwen C., Ollat N. (2002) – ‘*Carbon isotope composition of sugar in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status*’. In: Journal of Experimental Botany, 53, 369, Pp. 757-763.
- Hunter J.J., Volschenk C.G., Zorer R. (2016) – ‘*Vineyard row orientation of Vitis vinifera L. cv. Shiraz/101-14 Mgt: Climatic profiles and vine physiological status*’. In: Agricultural and Forest Meteorology, 228-229. Pp. 104–119.

International Organisation of Vine and Wine Intergovernmental Organisation (2019) – “2019 Statistical Report on World Vitiviniculture”. Pp. 13-22.

Istituto nazionale di statistica “ISTAT”. (2019) – ‘*Utilizzo e qualità della risorsa idrica in Italia*’. Pp. 61-66.

Kyaw Tha Paw U., Qiu J., Su H.-B., Watanabe T., Brunet Y. (1995) – “*Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes*”. In: *Agricultural and Forest Meteorology*, 74(1), 119-137. doi:[https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02182-J](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02182-J)

Lavoie-Lamoureux A., Sacco D., Rissé P., Lovisolo C. (2017) – “Factors influencing stomatal conductance in response to water availability in grapevine: a meta-analysis”. In: *Physiologia Plantarum*. 159, 468-482.

Lebon E., Pellegrino A., Louarn G., Jeremie L., (2006) – ‘*Branch Development Controls Leaf Area Dynamics in Grapevine (Vitis vinifera) Growing in Drying Soil*’. In: *Annals of Botany*, 98, Pp. 175-185.

Liang S., Li X., Wang, J. (2012) – ‘*Advanced remote sensing: terrestrial information extraction and applications*’. Academic Press.

López-Urrea, R., Sánchez, J.M., Montoro, A., Mañas, F., Intrigliolo, D.S. (2020) - ‘*Effect of using pruning waste as an organic mulching on a drip-irrigated vineyard evapotranspiration under a semi-arid climate*’. In: *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108064.

Luise N. (2019) – ‘*Ottimizzazione dell’uso di parametri visivi della chioma per la stima dello stato idrico della vite*’. Relatore Prof. Andrea Pitacco, Correlatore Dott.ssa Federica Gaiotti. Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente, Corso di laurea in Scienze e Tecnologie Viticole ed Enologiche. A. A. 2018/2019..

Marín D., Armengol J., Carbonell-Bejerano P., Escalona J.M., Gramaje D., Hernández-Montes E., Intrigliolo D.S., Martínez-Zapater J.M., Medrano H., Mirás-Avalos J.M., Palomares-Rius J.E., Romero-Azorín P., Savé R., Santesteban L.G., De Herralde F. (2021) – ‘*Challenges of viticulture adaptation to global change: tackling the issue from the roots*’. In: *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 27, Pp. 8–25.

Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield. IPCC (2018) - *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. IPCC: Ginevra.

Medrano H., Escalona J.M., Bota J., Gulías J., Flexas J. (2002) – “*Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter*”. In: Ann. Bot., 89, Pp. 895–905.

Medrano H., Tomás M., Martorell S., Escalona, J.M., Pou A., Fuentes S., Flexas J., Bota J. (2015) - ‘*Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions*’. In: Agronomy for Sustainable Development, 35, Pp. 499–517.

Milella A., Duce P., Fiori M., Spanu D. (1996) – ‘*La razionale gestione dell’intervento irriguo in Sardegna*’ – Nota Tecnica N° 1.

Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, (2022) - *Catalogo nazionale delle varietà di vite*. Registro delle varietà.
<http://catalogoviti.politicheagricole.it/scheda.php?codice=194>.

Mirás-Avalos, J.M.; Araujo, E.S. (2021) - ‘*Optimization of Vineyard Water Management: Challenges, Strategies, and Perspectives*’. In: Water 2021, 13, 746, <https://doi.org/10.3390/w13060746>.

Miravalle R. (2013) – ‘*Il punto sull’irrigazione del vigneto Italia*’. In: L’Informatore Agrario, 18/2013. Pp. 38-40.

Munitz S., Schwartz A., Netzer Y. (2020) – ‘*Effect of timing of irrigation initiation on vegetative growth, physiology and yield parameters in Cabernet Sauvignon grapevines*’. In: Australian Journal of Grape and Wine Research, 26, Pp. 220–232.

Palese C. (2013) – ‘*Irrigare la vite? Quando? Quanto?*’. In: L’Informatore Agrario, 18/2013. P. 41.

Palliotti A., Silvestroni O., Petoumenou D., Vignaroli S., Berrios J.G. (2008) – ‘*Evaluation of low-energy demand adaptive mechanisms in Sangiovese grapevine during drought*’. In: Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 42, n°1, Pp. 41-47.

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*’. In: Australian Journal of Grape and Wine Research, <https://doi:10.1111/j.17550238.2005.tb00030.x>. 11(3), Pp. 306-315.

Peretti C., (2019) – ‘*Gestione dell’equilibrio vegeto-produttivo in giovani impianti di vite*’. Relatore Prof. Andrea Pitacco, Correlatore Dott.ssa Federica Gaiotti. Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente, Corso di laurea in Scienze e Tecnologie Viticole ed Enologiche. A. A. 2018/2019.

Phogat V., Cox J.W., Mallants D., Petrie P.R., Oliver D.P., Pitt T.R. (2020) – ‘*Historical and future trends in evapotranspiration components and irrigation requirement of winegrapes*’. In: Australian Journal of Grape and Wine Research 26, Pp. 312–324.

Ribereau-Gayon P., Dubourdieu D., Donèche B., Lonvaud A. (2017)- ‘*Trattato di enologia I-Microbiologia del vino e vinificazioni*’. Edagricole, quarta ed. Cap: 10.3.3, P. 273.

Rienth M., Scholasch T. (2019) – ‘*State-of-the-art of tools and methods to assess vine water status*’. In: OENO One, 4, Pp.619-637.

Rodriguez Lovelle B., Trambouze W., Jacquet O. (2009) – ‘*Évaluation de l’état de croissance végétative de la vigne par la méthode des apex*’. In: Progrès Agric. Vitic., 126, Pp. 77 – 88.

Scholasch, T. (2019) – ‘*Tools to Assess Vine Water Status*’. Saggio presentato al “Honoring Larry Williams: A Program Focused on Vineyard Water Management”, UC Davis, California.

- Schultz, H. R. and Stoll, M. (2010) – ‘*Some critical issues in environmental physiology of grapevines: future challenges and current limitations*’. In: Australian Journal of Grape and Wine Research, <https://doi:10.1111/j.1755-0238.2009.00074.x>. Pp. 4–24.
- Silvestroni, O., Mattioli, S., Neri, D., Palliotti, A. e Cartechini, A. (2005) – “Down-regulation of photosynthetic activity for field-grown grapevines”. In: Acta Hort. 689, Pp. 285-292. DOI:10.17660/ActaHortic.2005.689.33.
- Silvestroni O., Palliotti A., di Lena B., Nuzzo V., Sabbatini P., Lattanzi T., Lanari V. (2020) – “*Effects of limited irrigation water volumes on near-isohydric ‘Montepulciano’ vines trained to overhead trellis system*”. In: Acta Physiologie Plantarum 42:147).
- Silvestroni O., Poni S., Palliotti A. (2015) – “*La nuova viticoltura. Innovazioni tecniche per modelli produttivi efficienti e sostenibili*”. Edagricole, 13. Pp 319 - 336.
- Simonneau T., Lebon E., Coupel-Ledru A., Marguerit E., Rossdeutsc L., Ollat N. (2017) – ‘*Adapting plant material to face water stress in vineyards: which physiological targets for an optimal control of plant water status?*’. In: OENO One, 51(2), Pp. 167–179.
- Toro G., Flexas J., Escalona J. M. (2019) – “*Contrasting leaf porometer and infra-red gas analyser methodologies: an old paradigm about the stomatal conductance measurement*”. In: Theoretical and Experimental Plant Physiology. 31, 483-492.
- Townend J., Reeve MJ., Carter A. (2001) – ‘*Water release characteristics*’. In: Smith, K. A. & Mullins, C. Soil and environmental analysis: physical methods, 2a ed. New York: Marcel Dekker.
- van Leeuwen C., Destrac-Irvine A. (2017) - ‘*Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard*’. In: OENO One, 51, Pp. 147–154.
- van Leeuwen C., Pieri P., Gowdy M., Ollat N., Roby J.P. (2019) – ‘*Reduced density is an environmental friendly and cost effective solution to increase resilience to drought in vineyards in a context of climate change*’. In: OENO One, 53, Pp. 129–146.
- 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?*’. In: Journal

International des Sciences de la Vigne et du Vin, <https://doi:10.20870/oenone.2009.43.3.798>, 43, Pp. 121 - 134.

Williams L. E., Araujo F. J. (2002) – '*Correlations among Predawn Leaf, Midday Leaf, and Midday Stem Water Potential and their Correlations with other Measures of Soil and Plant Water Status in Vitis vinifera*'. In: Journal of the American Society for Horticultural Science, 127(3), Pp. 448–454.

Williams, L.E. (2014) - '*Determination of Evapotranspiration and Crop Coefficients for a Chardonnay Vineyard Located in a Cool Climate*'. In: American Journal of Enology and Viticulture, <https://doi:10.5344/ajev.2014.12104>, 65, Pp. 159–169.

Yuste J., Gutiérrez I., Rubio J., Albuquerque M. d. V. (2004) - '*Leaf and stem water potential as vine water status indicators, in Tempranillo grapevine, under different water regimes in the Duero valley*'. In: Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 38(1), Pp. 21–26.

Zurro R., Piras F., Mulas M. L'irrigazione AGRIS Sardegna, Agenzia per la ricerca in agricoltura. (2008) - '*L'irrigazione*'. In : La coltivazione dell'uva da tavola in ambiente mediterraneo. 9, Pp.139-156.