



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie

**Valutazione dell'effetto stagionale nell'applicazione di
tecniche di rilevamento prossimale e remoto su un
vigneto della Valpolicella**

Relatore

Dott. Franco Meggio

Correlatori

Prof. Giovanni Battista Tornielli

Dott.ssa Ron Shmuleviz

Laureanda

Salandini Serena
matricola n° 2014626

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Sommario

RIASSUNTO	4
ABSTRACT	6
1.INTRODUZIONE	8
1.1 Cambiamento climatico	8
1.1.1Definizione	8
1.1.2 Gli impatti diretti sull'agricoltura.....	10
1.1.3 Gli impatti diretti sulla viticoltura	12
1.1.4 Previsioni future.....	13
1.2 Andamento climatico	14
1.2.1 Annata 2022.....	15
1.2.2 Annata 2021.....	18
1.3 La viticoltura di precisione	19
1.3.1 Definizione.....	19
1.3.2 Applicazioni.....	20
1.3.3 Vantaggi dell'agricoltura di precisione	22
1.4 Sistemi informativi geografici GIS e sistemi di posizionamento globale GPS	23
1.5 Sensoristica	24
1.5.1 Monitoraggio da remoto	24
1.5.2 Monitoraggio prossimale.....	27
1.6 Indici di vegetazione	27
1.6.1 NDVI.....	27
1.6.2 SAVI.....	28
1.7 Costruzione di mappe tematiche georeferenziate	28
2.SCOPO DEL LAVORO	29
3.MATERIALI E METODI	30
3.1 Zonazione e descrizione dei siti di studio	30
3.2 Analisi dirette sull'apparato vegetativo	31
3.2.1 Determinazione della fertilità delle gemme.....	31
3.2.2 Determinazione della cinetica di crescita del germoglio	31
3.2.3 Rilievi della superficie fogliare.....	31
3.3 Analisi dirette sull'apparato produttivo a maturazione	32
3.3.1 Determinazione del peso medio dell'acino.....	32
3.3.2 Determinazione della produttività per pianta e del peso medio del grappolo.....	32
3.3.3 Determinazione del grado zuccherino (Brix°)	33

3.3.4 Determinazione del pH	33
3.3.5 Determinazione dell'acidità totale	33
3.3.6 Determinazione dello spessore della buccia	34
3.3.7 Quantificazione di polifenoli e antociani	35
3.4 Analisi con sensori prossimali	36
3.4.1 Rilievi dell'indice di vigoria	36
3.4.2 Rilievi dell'umidità del terreno	36
3.4.3 Rilievi della temperatura della chioma	37
3.5 Analisi con sensori da remoto	38
3.5.1 Utilizzo di Sentinel-2	38
3.5.2 Utilizzo del drone	38
3.6 Costruzione di mappe tematiche	39
4. RISULTATI	40
4.1 Mappe tematiche dello stato fisiologico del vigneto	40
4.2 Mappe tematiche dello stato di maturazione	47
4.3 Matrici di correlazione	51
4.4 Analisi di regressione	55
4.5 Analisi delle Componenti Principali (PCA)	60
5. CONCLUSIONI	62
7. SITOGRAFIA	66

RIASSUNTO

Il cambiamento climatico in corso sta rendendo sempre più urgente il bisogno di trovare delle soluzioni per la gestione del vigneto il quale ha esigenze diverse e quindi necessita di una gestione adeguata, diversificata e sostenibile. Per questo motivo è sempre più frequente l'utilizzo di sistemi di rilevamento che permettono di analizzare la variabilità all'interno degli appezzamenti e di conseguenza permette la loro gestione in modo differenziato anche a seconda dell'andamento climatico della stagione.

Questo studio ha l'obiettivo di valutare l'effetto stagionale, tra annata 2021 e 2022, nell'applicazione di tecniche di rilevamento da remoto e prossimale tramite un confronto tra l'informazione ricavata da sensori, con quella ottenuta da analisi dirette sull'apparato vegetativo della pianta. L'estate 2022 è stata oltremodo calda e secca con scarsissime precipitazioni e temperature elevate. Un clima che risulta molto diverso dall'annata precedente. Lo studio è stato condotto in un vigneto che ricopre una superficie di circa dieci ettari situato nella Valpolicella classica in località Pule di San Pietro in Cariano (VR). L'appezzamento è stato suddiviso in undici zone in corrispondenza di variabilità intra-parcellare che era stata individuata da immagini satellitari nel 2020. La varietà che è stata presa in considerazione è la Corvina, una varietà tipica e molto diffusa in Valpolicella.

Nella fase vegetativa della pianta è stato determinato un indice vegetazionale tramite immagini satellitari e immagini ottenute da una camera multispettrale montata sul drone. Parallelamente, l'indice vegetazionale, il contenuto idrico del suolo e lo stress idrico della pianta sono stati determinati applicando sensori di prossimità. Inoltre sono stati effettuati rilievi diretti sull'apparato vegetativo della pianta come la determinazione della fertilità delle gemme, la cinetica di crescita dei germogli e la superficie fogliare, insieme a rilievi diretti sull'uva a maturazione come la determinazione di parametri tecnologici, la produttività della pianta e lo spessore della buccia della bacca. L'analisi delle correlazioni tra i dati ottenuto da rilevamento remoto e le analisi dirette sulla pianta ottenute nelle due diverse annate ha permesso di valutare l'incidenza che ha avuto la siccità di questa particolare annata sulla qualità del dato ricavato tramite le tecniche della viticoltura di precisione. Dallo studio è emerso che risulta esserci una certa stabilità nel tempo della diversità intra parcellare che caratterizza il vigneto. Invece l'effetto stagione è possibile osservarlo rispetto ai parametri di maturazione dell'uva.

ABSTRACT

The ongoing climate change is making more and more urgent the necessity to find solutions for the management of the vineyard, which has different needs and therefore requires adequate, diversified and sustainable handling. For this reason, it's becoming increasingly common the use of sensing systems that allow to analyse the variability within the plots, and, consequently, that enable to manage them in a differential way depending on the weather conditions of the season.

This study aims to evaluate the seasonal effect between 2021 and 2022 through the application of remote and proximal sensing techniques, comparing the information collect by the sensors and the one obtained by a direct analysis of the plant's vegetative system.

Summer 2022 was extremely hot and dry, with very limited precipitation and high temperatures. This kind of weather has been considerably different comparing the previous year.

The research was conducted in a vineyard which covers an area of about ten hectares located in the classic Valpolicella area in Pule di San Pietro in Cariano (VR). The plot of land has been divided in eleven zones according to the intra-parcel variability, which was detected by satellite images dating back to 2020. The Corvina, a typical and widespread grapevine in Valpolicella, is the variety analysed in this study.

At the vegetative stage of the plant, a vegetation index was determined using satellite images and images obtained thanks to a multispectral camera installed on a drone. Additionally, vegetation index, soil water content and plant water stress have been determined by applying proximity sensors. Furthermore, direct measurements were made on the plant's vegetative system such as bud fertility, shoot growth kinetics, and leaf area, along with direct surveys on the ripening grape like assessing technological parameters, plant productivity, and berry skin thickness.

Comparing the correlations between the sensor data and the direct on-plant analyses obtained in the two different vintages allowed an assessment of the impact that the drought of this particular year had on the quality of the data extracted through precision viticulture techniques. This study showed that there is stability over time regarding the intraparcellar diversity of the vineyard. On the other hand the seasonal effect can be observed with regard yo the ripening parameters of the grape.

1.INTRODUZIONE

1.1 Cambiamento climatico

1.1.1 Definizione

Il cambiamento climatico è un argomento molto attuale e che copre molti settori tra cui quello agricolo. Da anni stiamo assistendo ad un aumento sostanzioso delle anomalie stagionali, a temperature sempre più elevate e a stagioni sempre più secche con eventi di precipitazioni estremi. Prima di tutto è doveroso dare delle definizioni ai concetti di clima e di cambiamento climatico. Il clima è definito dal WMO (*World Meteorological Organization*) come “la sintesi delle condizioni del tempo atmosferico in una determinata area, caratterizzate dalle statistiche di un lungo periodo delle variabili di stato dell’atmosfera in quell’area”. Il clima, quindi, cambia in ogni parte del pianeta terra e può essere modificato da altri fattori, tra cui: altitudine, vicinanza dal mare, vegetazione, presenza di catene montuose e correnti marine.

Il cambiamento climatico, invece, è definito come: “variazioni significative dei valori medi degli elementi meteorologici, come precipitazioni e temperatura, per i quali le medie sono state calcolate su un lungo periodo” (Malhi et al., 2021).

Un’altra definizione viene data dall’ONU che li definisce come “i cambiamenti a lungo termine delle temperature e dei modelli meteorologici. Questi cambiamenti possono avvenire in maniera naturale, ad esempio tramite variazioni del ciclo solare. Tuttavia, a partire dal 19° secolo, le attività umane sono state il fattore principale all’origine dei cambiamenti climatici, imputabili essenzialmente alla combustione di combustibili fossili come il carbone, il petrolio e il gas” (unric.org).

Le cause del cambiamento climatico sono soprattutto attribuibili a fenomeni naturali e all’attività umana, che esercita un’influenza crescente sul clima e sulla temperatura terrestre attraverso l’uso di combustibili fossili, la deforestazione e l’allevamento di bestiame

L’estate è probabilmente la stagione in cui il cambiamento climatico avrà il suo maggiore impatto sull’umanità. Il riscaldamento globale fa sì che il calore primaverile arrivi prima e che le temperature più basse di inizio autunno siano ritardate. Questa situazione minaccia la sicurezza alimentare e nutrizionale in tutto il mondo. Tempeste, inondazioni e incendi, inoltre, si stanno intensificando, provocando un maggiore inquinamento dell’aria, che provoca danni alla salute delle persone, case, mezzi di sussistenza e soprattutto all’agricoltura. La sicurezza alimentare è definita come una situazione in cui tutte le persone hanno accesso fisico, sociale ed economico a cibo sufficiente, sicuro e nutriente. Nel corso

della storia, la crescita della popolazione è stata accompagnata da molti cambiamenti nella vita quotidiana, nella cultura, nella tecnologia, nella scienza, nell'economia e nella produzione agricola (Skendžić et al., 2021)

Il riscaldamento globale indotto dall'uomo è attualmente in aumento a un ritmo di 0,2°C per decennio. Le temperature globali nel decennio 2006-2015 sono state di 1,0°C (1,8°F) più calde della media del ventesimo secolo (Myers et al., 2017).

Uno dei settori maggiormente sensibili al cambiamento climatico è l'agricoltura, in cui i parametri meteorologici in continua variazione, come la temperatura e le precipitazioni, influenzano in modo significativo i sistemi produttivi. La produzione agricola ha anche subito molti grandi cambiamenti – rivoluzioni agricole – che hanno influenzato lo sviluppo della civiltà, della tecnologia e del progresso umano generale (Skendžić et al., 2021). L'incremento della popolazione mondiale negli ultimi cento anni, in particolare, è responsabile di molti effetti negativi che influiscono sulla sicurezza dell'approvvigionamento alimentare. Ciò comporta la mancata garanzia di disponibilità di cibo per la popolazione mondiale negli anni a venire (Malhi et al., 2021).

I cambiamenti nelle precipitazioni potrebbero essere più importanti rispetto ai cambiamenti di temperatura, perché la siccità rappresenta un fattore limitante per i sistemi agricoli. Si stima che l'80% della produzione agricola globale sia in stretta connessione con gli apporti idrici forniti dalle precipitazioni atmosferiche. Ipotesi di scenario prevedono, entro la metà del secolo, una tendenza significativa alla desertificazione per le parti meridionali del Nord America, in alcune parti dell'America Latina, in Australia e nell'Europa meridionale. La forte riduzione delle risorse idriche a livello del suolo può compromettere le funzioni biologiche delle piante facendo sì che esse diventino più suscettibili agli attacchi di patogeni e insetti dannosi (Skendžić et al., 2021).

1.1.2 Gli impatti diretti sull'agricoltura

Uno dei principali settori su cui si ripercuote negativamente il cambiamento climatico è l'agricoltura, poiché essa risulta essere molto influenzata sia dal clima che dal tempo molto influenzata dal tempo e dal clima. Infatti solitamente esiste un forte grado di adattamento degli agricoltori al clima locale attraverso l'ottimizzazione delle pratiche agricole. Come conseguenza, il cambiamento climatico sta avendo ed avrà un forte impatto sull'agricoltura che porterà gli agricoltori a ricercare strategie di adattamento ai cambiamenti. Ad esempio, se le emissioni di gas serra iniziassero a essere ridotte, ci sarebbe certamente ancora un certo livello di riscaldamento in corso per decenni dato che il sistema climatico è lento a rispondere ai cambiamenti imposti (Gornall et al., 2010).

Più nello specifico si può andare a vedere quali sono gli impatti diretti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura.

1. Cambiamenti del clima medio

Determinate colture si sono adattate a determinati climi e ambienti poiché sono fortemente influenzate dal clima e dall'ambiente stessi. I cambiamenti nel clima medio possono richiedere adeguamenti alle pratiche colturali attuali e anche alle varietà coltivate al fine di mantenerne la produttività.

Temperature elevate rispetto alla media nella stagione di crescita della coltura possono avere un impatto significativo sulla produttività agricola, sui redditi agricoli e sulla sicurezza alimentare (Battisti & Naylor, 2009). Nelle medie ma anche nelle alte latitudini si prevede che l'idoneità di determinate colture e la loro produttività aumenteranno, ma soprattutto si prevede che si estenderanno verso nord.

Non guardando solo ai cambiamenti estremi, anche cambiamenti climatici moderati quali il lieve aumento delle temperature medie, potrebbero causare problemi all'agricoltura in quanto si anticiperebbero l'epoca di raccolta delle varietà attuali di molte colture per avere poi, come risultato finale, una diminuzione delle rese. Detto ciò, è quindi essenziale lo sviluppo di strategie di adattamento che possano essere adottate da parte degli agricoltori.

2. Disponibilità di acqua

L'acqua è vita, oltre l'80% dell'agricoltura totale è alimentata dalle precipitazioni. Le proiezioni dei futuri cambiamenti riguardanti le precipitazioni spesso influenzano l'entità e la direzione degli impatti climatici sulla produzione agricola (Olesen & Bindu 2002). Ma le

precipitazioni non sono l'unico fattore che influenza la disponibilità di acqua in quanto con l'aumento delle temperature aumenta anche la domanda evapotraspirativa. Questo potrebbe portare ad aumentare il fabbisogno idrico delle colture a livello globale tra il 5% e il 20%, o forse di più, entro gli anni 2070 o 2080 (Doll, 2002).

3. Variabilità climatica ed eventi meteorologici estremi

L'aumento della variabilità climatica inter- e intra-stagionale sta causando un aumento della frequenza e intensità di eventi meteorologici estremi che sono definiti come eventi estremi che assumono valori estremi di alcune importanti variabili meteorologiche i danni infatti sono spesso causati da valori estremi delle principali variabili meteorologiche come ad esempio grandi quantità di precipitazioni, vento forte e temperature elevate. L'estremo è definito come l'assunzione di valori massimi oppure come il superamento di valori preesistenti. Inoltre tali eventi sono generalmente rari (Stephenson 2008). Questi fenomeni estremi potrebbero portare a maggiori rischi per la sicurezza alimentare rispetto al cambiamento del clima medio a lungo termine il quale potrebbe richiedere un adattamento continuo. Un esempio che può essere preso in considerazione è l'evento meteorologico estremo accaduto nell'estate del 2003, con temperature medie di 6°C sopra il normale e deficit di precipitazioni fino a 300 mm. Uno studio ha stimato che temperature eccessive in estate in Europa abbiano ora il 50% in più di probabilità di verificarsi a causa appunto del cambiamento climatico in corso (Stott et al. 2004). Inoltre eventi che per noi oggi sono considerati estremi, in un futuro non troppo lontano, saranno considerati meno insoliti.

Un concetto importante legato agli eventi di temperature alte/estreme, è il concetto della siccità. I due eventi sono difficili da considerare separatamente. Tuttavia, esistono soglie di temperatura oltre le quali la fisiologia delle colture viene alterata, portando a grossi problemi per quanto riguarda la resa finale (Gornell et al. 2010).

4. Siccità

Ci sono diverse definizioni della parola siccità. Holton et al. (2003) sottolineano che *"L'importanza della siccità risiede nei suoi impatti. Pertanto, le definizioni dovrebbero essere specifiche per regione e specifiche per l'impatto o l'applicazione al fine di poter essere utilizzate in modalità operativa dai responsabili delle decisioni."*

Secondo il CNR IBE Climate Services, deve essere fatta una distinzione tra:

- siccità meteorologica: riduzione delle precipitazioni al di sotto della media climatologica, per un certo periodo e in una determinata area.

-siccità agricola: riduzione della disponibilità idrica dovuta alle scarse precipitazioni e all'aumento dell'evapotraspirazione nella zona dove sono situate le radici e che quindi risultano avere un impatto sulla crescita e sullo sviluppo della pianta, causando infine una riduzione delle rese.

-siccità idrologica: implica una riduzione delle risorse idriche di laghi, corsi d'acqua etc a causa di una persistente riduzione delle piogge.

- siccità socio-economica: corrisponde all'equilibrio tra offerta e domanda di acqua nella società. Infatti durante periodi di siccità intensi l'allocazione della risorsa idrica per le attività umane può essere compromessa.

1.1.3 Gli impatti diretti sulla viticoltura

Il cambiamento climatico ha un impatto sulla distribuzione geografica dei vitigni. Dall'inizio della sua coltivazione fino ad oggi, i vitigni si distribuiscono in fasce climatiche in cui quel determinato genotipo meglio si adatta. Ma con il cambiamento climatico le cose stanno cambiando, in quanto il riscaldamento globale sta portando queste fasce già consolidate a spostarsi verso zone più a nord per rimanere nella fascia climatica più adatta. Infatti un riscaldamento pari a 1 °C farà in modo che una determinata regione vitivinicola aumenti la propria vocazionalità per alcuni vitigni e la diminuisca invece per altri. Se l'entità del riscaldamento supera i 2 °C, allora una regione viticola può anche direttamente passare nella fascia climatica sovrastante (Jones, 2008).

Gli effetti di uno slittamento da una determinata fascia verso una fascia termica più alta si possono manifestare, ad esempio, attraverso una crescita vegetativa più rapida ma anche la tendenza a sviluppare profili aromatici sbilanciati. Si può fare un esempio: una determinata area raggiunge un accumulo di zuccheri ideale per un determinato obiettivo

enologico e mantiene un tenore acidico tipico del genotipo nel periodo compreso tra invaiatura e maturazione, ma se il clima risulta più caldo rispetto a quello atteso, le fasi fenologiche risulteranno anticipate, con un accumulo di zuccheri più rapido e con un declino dell'acidità (Jones, 2008).

In Europa le fasi fenologiche della vite hanno mostrato una forte correlazione con il clima in quanto ci sono stati anticipi di fasi fenologiche variabili tra 6-25 giorni per una serie di località e di vitigni soprattutto per le fasi di invaiatura e maturazione. Più in generale per gli ultimi 30-50 anni si è notata un anticipo delle fasi fenologiche di circa 3-6 giorni per ogni grado di incremento termico (Jones, 2008)

Lo studio di Jones afferma che variazioni rispetto al 1999 mostrano un cambiamento dell'ampiezza delle aree vocate alla coltivazione della vite ma anche uno slittamento delle stesse verso i poli. Certamente la coltura della vite diventerà più rischiosa e sicuramente anche più dispendiosa quindi le tecniche colturali e le nuove tecnologie stanno assumendo e assumeranno sempre più importanza soprattutto per quanto riguarda la gestione della risorsa idrica, l'adattamento colturale sia per gli anticipi delle fasi fenologiche ma anche per gli slittamenti delle fasce viticole. Per quanto riguarda la vite le fasce climatiche sono relativamente strette rispetto a quelle di altre colture. Il cambiamento climatico è favorevole per quanto riguarda la diffusione di aree vocate alla sua coltivazione infatti aree che prima risultavano troppo fredde per la coltivazione della vite, ora risultano adeguate perché caratterizzate da stagioni vegetative più lunghe e calde con minori rischi di gelate primaverili (Jones, 2008).

1.1.4 Previsioni future

Alcuni studi prevedono che le ondate di calore saranno più frequenti e dureranno più a lungo, mentre le anomalie delle precipitazioni, che cambieranno e non saranno più uniformi, avranno un effetto negativo nei confronti dell'agricoltura dei Paesi in via di sviluppo (Malhi et al., 2021).

Un concetto importante è la disponibilità idrica per l'agricoltura. Questa è e sarà sempre più influenzata da diversi fattori tra cui la scomparsa dei ghiacciai, il precoce scioglimento delle

nevi, l'intrusione di acqua salate nelle acque sotterranee ma soprattutto il cambiamento dei modelli di precipitazione

Le previsioni dei modelli climatici indicano in linea generale che gli eventi piovosi potrebbero diventare più intensi e potrebbero aumentare le inondazioni.

Per quanto riguarda il futuro è previsto che entro il 2100 ci sarà un aumento della siccità dal 15,4 al 44,0% nella maggior parte delle regioni del mondo. Questo potrebbe portare ad una diminuzione delle rese, per quanto riguarda le colture principali, di oltre il 50% entro il 2050 e di quasi il 90% entro il 2100. Questa diminuzione delle rese prevista comporterà il conseguente aumento dei prezzi e quindi ripercussioni negative per il comparto agro-alimentare (Malhi et al., 2021).

Invece per quanto riguarda il breve e medio periodo, le condizioni meteorologiche globali e regionali potrebbero diventare più variabili rispetto a quelle attuali, con aumento di fenomeni meteorologici estremi e una variabilità climatica a breve termine. Certamente sarà fondamentale agire il prima possibile per contrastare questi fenomeni. Alcuni esempi sono investimenti nell'irrigazione ma anche miglioramento delle strutture di stoccaggio (Schmidhuber e Tubiello, 2007).

Da menzionare è anche il miglioramento in termini di "adattabilità", saranno quindi necessari progressi dal punto di vista del miglioramento genetico (Bisson et al. 2002).

1.2 Andamento climatico

Studi condotti dal CNR-ISAC (The Institute of Atmospheric Sciences and Climate) indicano che le temperature medie annuali in Italia sono cresciute negli ultimi due secoli di 1,7°C. Ma il contributo maggiore è dovuto agli ultimi 50 anni. L'aumento della temperatura media registrato in Italia nelle ultime decadi è superiore a quello medio globale. In particolare, nel 2007 e 2008 le anomalie rispetto al trentennio 1961-1990 sono state rispettivamente +1,24 e +1,09°C, contro una media globale di 0,67 e 0,53°C.

Per quanto riguarda le tendenze delle precipitazioni nel lungo periodo, gli studi del CNR indicano che "i *trend* sono generalmente negativi, anche se solo di lieve entità e spesso poco significativi dal punto di vista statistico. L'entità della riduzione delle precipitazioni

risulta dell'ordine del 5% per secolo; essa sembra dovuta principalmente alla primavera, stagione nella quale la riduzione delle precipitazioni risulta vicina al 10% per secolo" (agrireregionieuropa.univpm.it).

Di seguito gli andamenti climatici delle stagioni 2022 e 2021

1.2.1 Annata 2022

Uno studio condotto da GDO Global Drought Observatory ha evidenziato che in Europa l'estate 2022 ha subito la peggiore siccità degli ultimi 500 anni, il rapporto afferma che è dal 1540 che non si osservava una riduzione del livello delle acque come quello di questo anno. Inoltre affermano che il 47% del territorio europeo è in condizioni "allarmanti" con la vegetazione che "mostra segni di stress". Quindi si può affermare che per quanto riguarda il settore agrario la necessità di acqua per far fronte alle esigenze attuali di produzione è aumentata di molto.

Anche il bollettino climatico del Copernicus Climate Change Service conferma che l'estate 2022 è stata la più calda mai registrata in Europa. Inoltre affermano che le condizioni della primavera avevano già predisposto la scena per un inizio dell'estate privo di precipitazioni. Le temperature primaverili sono state generalmente al di sotto della media, ma il mese di maggio è stato particolarmente caldo con temperature massime e minime sopra la media e caratterizzato da pochissime precipitazioni (climate.copernicus.eu). In seguito l'Europa ha continuato a subire una serie di intense ondate di caldo durante i mesi estivi. La calda estate è stata presagita dall'arrivo anticipato del primo giorno tropicale dell'anno, definito come un giorno con una temperatura massima di 30°C e oltre. Il 2022 è notevole per il fatto che questi valori sono stati raggiunti un mese prima del solito. Sempre in Europa l'estate è stata caratterizzata da una siccità intensa a luglio e ad agosto e in termini di precipitazioni, i mesi estivi di quest'anno sono stati molto più secchi rispetto alla media del periodo 1991-2020, con 25 giorni piovosi in meno. (ilmeteo.net)

Nel nord Italia la primavera è stata segnata da una grave siccità zona dove le precipitazioni sono state poche o assenti fin dall'inverno.

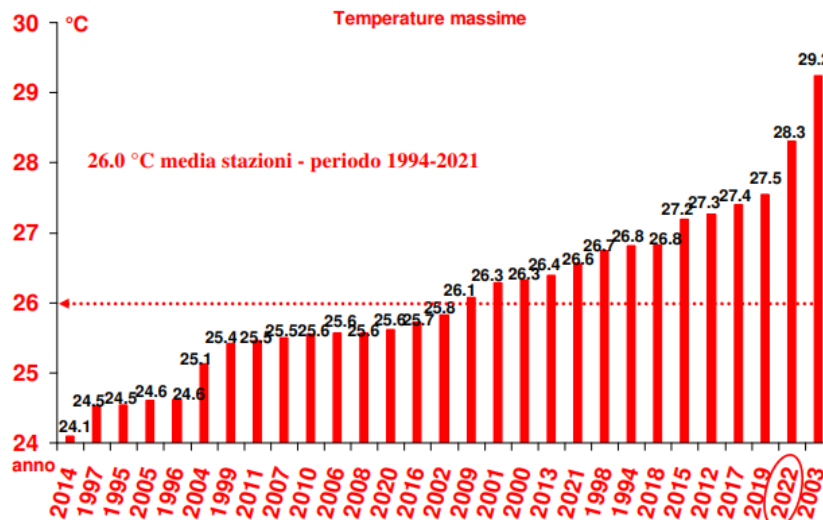
Da uno studio condotto da Coldiretti emerge che l'anno 2022 risulta essere l'anno più caldo di sempre con temperature superiori di 0,76 °C rispetto alla media storica e con precipitazioni dimezzate lungo tutta la penisola con un calo del 45%.

L'anomalia climatica più rappresentativa è quella del mese di giugno dove la temperatura media era di ben 2,88 °C in più rispetto alla media; con valori vicini al massimo registrato nel 2003, anno più caldo della serie storica.

I dati rilasciati da coldiretti mostrano che la siccità che ha colpito il nostro paese nel 2022 ha già causato danni per oltre tre miliardi nelle campagne e che gli anni più caldi si concentrano nell'ultimo decennio. Questo per dire che il cambiamento climatico in corso sta causando gravi danni tra cui il surriscaldamento che porta ad una più elevata frequenza di eventi violenti, sfasamenti stagionali, precipitazioni brevi e intense ma anche il rapido passaggio dal maltempo al sole accompagnati da sbalzi termici significativi. In generale per quanto riguarda la penisola, ciò che sta cambiando è la distribuzione sia temporale che geografica delle precipitazioni. Infatti la siccità sta diventando la calamità più rilevante per l'agricoltura italiana (coldiretti.it)

Più nello specifico l'ARPAV (Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto) ha confrontato le temperature medie minime e massime del periodo estivo 2022 con la norma ed è emerso che l'estate 2022 è stata la seconda più calda, dopo quella del 2003, dal 1994. Sia per quanto riguarda le temperature minime, sia per quelle massime. La differenza dai valori normali è di circa +2.3°C per quanto riguarda i valori massimi di temperatura. L'estate 2022 è stata caratterizzata da tre ondate di calore; la prima dal 16 al 18 luglio, la seconda dal 23 al 28 luglio e la terza dal 5 al 7 agosto. Nella seconda ondata di calore, le massime hanno raggiunto i valori più alti della stagione estiva.

Grafico ARPAV (fig.1) delle temperature estive dal 1994 al 2022 a confronto con la media storica di riferimento



Nei grafici sono riportati le medie delle temperature min e max (in gradi °C) di tutte le stazioni della rete ARPAV misurate nel periodo estivo, dal 1994 al 2022 in ordine crescente. La linea tratteggiata rappresenta la media storica del periodo 1994-2021.

Figura 1: Agrometeo Mese N°7 PRIMAVERA 2022. Servizio meteorologico ARPAV

Per quanto riguarda le precipitazioni l'estate 2022 è stata moderatamente siccitosa in veneto. Con quantitativi in media del -20% circa, quindi al di sotto della norma. Si stima che la media dei quantitativi di tutte le stazioni Arpav sia stata di 262 mm, a fronte dei 326 mm della media del periodo che va dal 1994 al 2021.

I mesi più siccitosi sono stati giugno, ma soprattutto luglio che è stato il terzo più siccitoso della serie storica. Agosto invece rispetto agli altri due è stato in lieve controtendenza in quanto si sono registrati quantitativi medi leggermente superiori alle medie stagionali.

Inoltre sempre da ARPAV è stato determinato il bilancio idroclimatico della regione che si calcola mediante la differenza tra la quantità di precipitazione e l'evapotraspirazione potenziale determinata nello stesso periodo di tempo e viene espresso in mm. Questo bilancio per la maggior parte della regione è stato negativo. Infatti rispetto alla norma, i valori di bilancio stimati sono stati più bassi su gran parte della regione a causa delle precipitazioni al di sotto della norma (arpa.veneto.it)

1.2.2 Annata 2021

Per quanto riguarda l'estate 2021 inizia con il mese di giugno ancora fresco ed instabile, ma in seguito le temperature sono aumentate superando la media soprattutto per quanto riguarda le temperature minime.

Viene definita come una estate instabile da ARPAV in quanto è stata una estate calda ma con frequenti temporali convettivi, spesso forti e dannosi tra la fascia prealpina e pedemontana.

Per quanto riguarda la regione veneto, l'estate risulta esser stata una zona chiamata "di frontiera" poiché il centro-nord europa era colpito da forte maltempo nel mese di luglio, invece l'Italia centro meridionale era bersagliata dalle alte pressioni di matrice calda subtropicale. L'estate del 2021 in Veneto risulta più calda della media, ma lontana dagli scostamenti osservati in centro e sud Italia, dove le ondate di calore sono state lunghe e torride, e meno calda delle precedenti. I periodi che hanno registrato le massime più elevate sono: fine giugno, ultimi giorni di luglio, primi di agosto e metà agosto. Questa situazione termica fa risultare l'estate 2021 un po' più calda del solito mediamente attorno a 1°C in più in pianura e montagna. (arpa.veneto.it)

Il mese di agosto riequilibra in parte l'estate 2021 in quanto le giornate senza pioggia sono più numerose e le temperature si assestano attorno alla media in pianura, anche se il periodo più caldo in assoluto rimane quello di fine giugno e dei primi di luglio, senza però raggiungere i picchi di calore osservati nelle estati precedenti.

Come già riportato, un aspetto caratteristico di questa stagione è l'instabilità. Questa ha interessato sia l'alta pianura, la pedemontana ma anche alcuni settori prealpini poiché sono state frequenti le grandinate e i violenti temporali.

Per quanto riguarda le precipitazioni emerge che siano state prossime o leggermente sotto la media sulla fascia prealpina. In pianura l'estate 2021 è stata scarsa di acqua con deficit di 20/30% rispetto alla media.

In sintesi, le giornate di brutto tempo molto instabili sono state 5, poco più del 5%, ma metà di quelle rilevate l'anno precedente (2020); le giornate di tempo in parte buono, in parte variabile o a tratti leggermente instabile per sporadici fenomeni convettivi (piovaschi, rovesci

o temporali di calore) sono state 53 (58%) ed infine le giornate belle, stabili e spesso calde 34 (37%), poco più di quelle rilevate nell'estate 2020 (27%) (arpa.veneto.it).

1.3 La viticoltura di precisione

1.3.1 Definizione

Come già riportato, negli ultimi tempi stiamo assistendo ad un cambiamento climatico sempre più veloce e questo ha un impatto non trascurabile sull'ambiente a causa dell'aumento delle temperature, della scarsità delle precipitazioni ma anche dell'emissione di CO₂ in atmosfera. La viticoltura di precisione ha lo scopo di rendere la viticoltura più sostenibile ad esempio ottimizzando il consumo di acqua e riducendo il consumo di prodotti chimici inquinanti.

Il concetto di agricoltura di precisione nasce a metà del XIX secolo, ma la moderna agricoltura di precisione nasce nell'ultimo ventennio del 1900 con l'introduzione nell'agricoltura dell'utilizzo di sistemi di monitoraggio in campo negli anni '80 e l'utilizzo di sistemi GPS negli anni '90 (Carnevali et al. 2013).

L'agricoltura di precisione viene descritta come un processo ciclico di osservazione e acquisizione di dati, seguita da un'interpretazione e poi una valutazione dei dati e delle informazioni e infine si prendono decisioni. In sostanza si tratta di un insieme di tecnologie e conoscenze che permettono in primis di osservare la variabilità presente all'interno di un appezzamento e in seguito di monitorare le risposte vegeto-produttive delle piante e infine in base a queste, adeguare la gestione agronomica con lo scopo di raggiungere un preciso livello produttivo sia quantitativo che qualitativo. Nel caso del vigneto uno tra gli scopi è quello di mettere in sintonia le specifiche esigenze di un campo eterogeneo con la gestione dello stesso in modo tale da migliorare la produzione, migliorare la qualità ma anche ridurre gli input esterni ove non necessari e di conseguenza ridurre l'impatto ambientale. Per questo motivo la viticoltura di precisione è un settore in crescita in quanto è sempre alla ricerca di soluzioni sempre più sostenibili ed efficaci, con l'obiettivo di ottenere una produzione mirata.

La gestione informatizzata di un appezzamento può riguardare anche piccolissime porzioni di terreno, fino alla singola vite, che vengono gestite in modo diversificato in base alle esigenze. In quanto all'interno dello stesso appezzamento possiamo riscontrare differente composizione e struttura del terreno, diverso contenuto idrico, ma anche quantità e qualità di distribuzione di nutrienti non omogeneo. Non da meno è anche la presenza di un microclima differente e tutti questi fattori insieme portano la coltura a rispondere in modo diverso. Questo si traduce in espressione fisiologica diversa.

1.3.2 Applicazioni

Come già accennato la viticoltura di precisione può essere utile a diversi scopi e può essere applicata a diverse fasi della gestione di un vigneto tra cui i principali:

- fertilizzazione

- irrigazione;

- trattamenti fitosanitari

- diserbo

Fertilizzazione

Si utilizzano tecniche di viticoltura di precisione per la fertilizzazione con il fine di mantenere o aumentare la resa diminuendo l'impatto negativo sull'ambiente attraverso un uso più efficiente dei fertilizzanti (Radočaj et al., 2022). Prevede la distribuzione sito-specifica del fertilizzante quindi secondo il fabbisogno della pianta. Prima della distribuzione è certamente necessaria una mappatura del vigneto in esame con un campionamento geolocalizzato del terreno e successive analisi in laboratorio. Dopo aver ottenuto i dati necessari, vengono impiegati nel calcolo di indici di vegetazione come l'NDVI che sta per *Normalized Difference Vegetation Index* e infine viene fatta l'associazione di una dose di fertilizzante rispetto alle reali esigenze della pianta, per ciascun livello di vigoria, generando così una mappa di prescrizione che suddivide l'appezzamento in più parcelle in base ai fabbisogni nutrizionali.

Irrigazione

L'irrigazione di precisione è definita da Smith come l'irrigazione combinata con sofisticate tecnologie di rilevamento, modellazione e controllo per ottenere le migliori prestazioni. Un sistema di irrigazione di precisione ideale dovrebbe incorporare: automazione, informatica, controllo in tempo reale e tecnologie in grado di ottenere applicazioni spazialmente e temporalmente variabili. (Smith et al. 2010). L'applicazione di questa tecnica è ancora limitata in quanto per poterla applicare bisogna essere in possesso di impianti irrigui altamente specializzati infatti in un sistema d'irrigazione convenzionale si rifornisce acqua in tutto il campo indistintamente, senza considerare la variabilità del terreno o il fabbisogno della pianta. L'irrigazione convenzionale quindi può portare a spreco d'acqua e all'irrigazione di zone del campo che necessitano di poca acqua e questo può avere come conseguenze stress da parte della pianta (Abioye et al., 2020). Il sistema migliore è quello a micro irrigazione: consente di controllare sia il flusso che gli intervalli di applicazione. Il sistema è progettato per umettare la zona occupata dalle radici mantenendola ad un livello di umidità ottimale; inoltre è facilmente automatizzabile in base alle condizioni meteorologiche, all'umidità o la temperatura del terreno (Castrignanò, 2015).

Trattamenti fitosanitari

Le innovazioni nel campo dell'irrorazione sono molteplici. Infatti sul mercato sono presenti modelli di pompe e atomizzatori a spalla, dispositivi che permettono la distribuzione controllata e mirata di alcuni nuovi fitofarmaci presenti sul mercato e che trovano applicazione sui trattori. Inoltre rivestono particolare importanza tutti quei moduli di irrorazione o nebulizzazione a cannone che si applicano sui minidumper e permettono quindi di coprire una superficie vasta in poco tempo, garantendo allo stesso tempo una copertura completa (Barili et al 2022). Un esempio: Anche per i trattamenti fitosanitari la viticoltura di precisione sta sempre più prendendo piede. Ad esempio l'informazione fornita dal telerilevamento satellitare consente al viticoltore di modulare gli interventi limitando l'applicazione dei trattamenti ai soli segmenti del vigneto che sono effettivamente bisognosi. Inoltre il monitoraggio dei vigneti consente di mettere in atto tempestivamente le attività di difesa fitosanitaria, nonché di isolare e combattere sul nascere eventuali situazioni critiche (Castagnoli, 2001). Oltre all'immagine satellitare che può aiutare molto per la previsione e l'applicazione poi in campo dei trattamenti, molto importanti sono anche le macchine per la

loro distribuzione che sono sempre più innovative con tecniche che limitano sempre più l'effetto deriva e che sono in grado inoltre di sprecare meno prodotto. Come ad esempio l'installazione di sensori montati sulle irroratrici che misurano il flusso del pesticida spruzzato ma anche il volume di pesticida che rimane da utilizzare. Questo collegati ad un computer sul trattore e lo stesso dotato di GPS, in questo modo l'agricoltore è informato in tempo reale su come sta procedendo l'operazione (Precision Viticolture 2009).

Diserbo

Anche per il diserbo la viticoltura di precisione sta attuando nuove tecnologie, ad esempio la distribuzione a rateo variabile è in grado di ottimizzare la quantità di prodotto distribuito nelle diverse parcelle dell'appezzamento a seconda dell'esigenza. Vengono infatti precedentemente attuate delle mappe di prescrizione caratterizzate da informazioni puntuali dell'appezzamento in modo tale da ridurre l'utilizzo di erbicidi nelle zone che ne richiedono meno, cioè una distribuzione adeguata all'infestazione delle diverse sotto-zone. Oppure possono essere utilizzati anche dei sensori utilizzati direttamente in campo che sono in grado di captare la presenza delle infestanti in tempo reale e di conseguenza distribuire il diserbante in modo mirato (Castagnoli, 2001).

1.3.3 Vantaggi dell'agricoltura di precisione

Lo scopo della viticoltura di precisione è quello di conoscere e riconoscere lo stato di salute, il vigore, le varie necessità fisiologiche della coltura per adeguare le varie tecniche colturali alle esigenze specifiche della singola pianta o zona omogenea. Più in dettaglio, per quanto riguarda la viticoltura le finalità principali sono: riduzione dell'impatto ambientale ma anche dei costi dei trattamenti; gestione differenziata di potature verdi e sfogliature in base alle esigenze e alla vigoria; gestione della nutrizione delle piante differenziata in base alle esigenze e infine anche una selezione delle uve alla raccolta. Tutto ciò comporta dei vantaggi sia economici ma anche ambientali. Tra cui: riduzione dei volumi di acqua per l'irrigazione in quanto viene distribuita secondo le esigenze e lo stesso vale per le tecniche colturali; impiego di sensori per il monitoraggio dello stato di salute della coltura ma anche controllo delle condizioni ambientali; creazione di mappe di prescrizione che permettono di adattare le tecniche colturali e quindi abbattere i costi ma anche diminuire gli sprechi e

l'inquinamento ambientale; diminuire il lavoro fisico dell'uomo in quanto questi sistemi sono automatizzati e robotizzati e questo diminuisce sia la stanchezza fisica dell'operatore ma anche diminuisce la percentuale di errore; ottimizzazione degli input utilizzati come ad esempio fitofarmaci con conseguente miglioramento di acqua e aria.

1.4 Sistemi informativi geografici GIS e sistemi di posizionamento globale GPS

La viticoltura di precisione comprende una serie di operazioni che vengono svolte durante le varie fasi vegetative della coltura e queste operazioni vengono svolte in modo diversificato grazie ad una precedente caratterizzazione delle zone non omogenee. Quindi di cruciale importanza è la conoscenza della variabilità presente all'interno dell'appezzamento. Uno dei fattori comuni è l'utilizzo di sistemi di posizionamento globale GPS per localizzare i rilievi e in seguito l'utilizzo di GIS (*Geographic information system*) per la visualizzazione ed elaborazione dei dati. Infatti, l'utilizzazione della tecnologia GIS permette di analizzare una quantità elevata di dati in modo rapido. Le immagini satellitari possono essere raggruppate nel database GIS che è in grado di interpretare immagini e dati sul terreno adattandoli a diverse applicazioni come ad esempio la determinazione dell'area occupata da una coltura (Tayari et al., 2015). L'applicazione di queste tecnologie per attuare la viticoltura di precisione rende questo lavoro più semplice per quanto riguarda la visualizzazione dell'azienda, i raccolti e le pratiche di gestione in un modo che prima non era possibile, potendo quindi effettuare una gestione precisa delle loro imprese.

1.5 Sensoristica

1.5.1 Monitoraggio da remoto

Per monitoraggio da remoto si intendono tutti i metodi di rilevamento che utilizzano piattaforme aeree o veicolare e che quindi permettono l'acquisizione di immagini su aree più o meno estese, alcune centinaia di km² per quanto riguarda i satelliti a pochi km² nel caso di aerei o droni. La sua applicazione in viticoltura è attualmente limitata alla determinazione del vigore e delle condizioni della chioma (Precision viticolture. 2009).

La raccolta dei dati viene fatta grazie ad una speciale fotocamera che può essere multispettrale o iper spettrale che viene posizionata su drone, aereo o satellite spaziale. Questa camera permette di rilevare per ogni pixel dell'immagine, l'intensità della riflessione della luce solare da parte della vegetazione. Nel caso dei droni solitamente la risoluzione va da circa 30cm a 1 metro. Invece per i satelliti si parla di risoluzioni di 2,4-4 metri.

L'utilizzo di questi mezzi risulta molto efficace per la determinazione della variabilità in campo. Rende il processo più semplice e più rapido, permettendo quindi una conoscenza più puntuale delle esigenze sito-specifiche dell'appezzamento. Una gestione sito specifica del campo significa che gli input come acqua, fertilizzanti, fitofarmaci etc. vengono distribuite solo dove e quando necessario, in modo tale da massimizzare il risultato e diminuire gli sprechi.

- SATELLITE

- DRONE

Satelliti

Un recente studio afferma che sebbene l'acquisizione di immagini satellitari di grandi aree consenta di risparmiare molto tempo, ha una risoluzione relativamente bassa (Campos et al 2021). Sentinel2 è uno dei satelliti più utilizzati a questo scopo ed è progettato per fornire dati e immagini per il programma Copernicus della commissione europea. Questo programma di monitoraggio ambientale sta avendo sempre più importanza in quanto sta cambiando il modo di gestire l'ambiente e i cambiamenti climatici (sentinels.copernicus.eu).

Lo strumento multi-spettrale Sentinel-2 MSI è uno dei satelliti utilizzati nella missione sentinel-2 ed è dotato di un innovativo imager multispettrale ad alta risoluzione con 13 bande spettrali: quattro bande a 10 metri, sei bande a 20 metri e tre bande a 60 metri di risoluzione spaziale. Inoltre la combinazione di capacità spettrali, alta risoluzione e una ampiezza di ripresa di 290 km, forniscono immagini e informazioni sempre più accurate e che vengono principalmente fruttate per pratiche agricole e forestali. Le immagini satellitari infatti possono essere utilizzate per determinare vari indici vegetali come il contenuto di clorofilla della superficie fogliare ma anche il suo contenuto idrico. Questo è importante per avere anche un'efficace previsione della resa e oltre a monitorare la crescita delle piante, Sentinel 2 può essere utilizzato per mappare i cambiamenti della copertura del suolo (esa.int).

Il comportamento spettrale della vegetazione permette di ricavare relazioni qualitative e quantitative tra dati telerilevati e parametri della vegetazione mediante il calcolo di indici che si basano sul rapporto tra le bande. I Sentinel data Products cioè i dati prodotti dai satelliti sono scaricabili ma sono anche disponibili negli ambienti cloud di Copernicus Data and Information Access Service (DIAS) e l'acquisizione delle immagini satellitari può essere fatta attraverso il "Sentinel Scientific Data Hub". Un portale che è messo a disposizione da ESA e che permette di selezionare l'area d'interesse, il periodo di acquisizione e la copertura nuvolosa in range percentuale.

L'indice NDVI è stato uno dei primi indici di vegetazione utilizzati in agricoltura da quando le immagini da sensori ottici satellitari sono stati resi disponibili. (Taylor et al. 2021).

Drone

I recenti progressi nella ricerca relativi agli UAV Unmanned Aerial Vehicle hanno portato ad un'ampia gamma di applicazioni UAV per il monitoraggio delle prestazioni del vigneto come il tasso di sviluppo della chioma, la variabilità spaziale della struttura della chioma e anche l'incidenza delle malattie (Campos et al 2021). Gli UAV consentono l'acquisizione di immagini ad elevata risoluzione spettrale, spaziale e temporale su appezzamenti medio-piccoli. Tuttavia gli studi effettuati con gli UAV sono sempre stati limitati dai costi, dalla carenza di piloti esperti, dalla mancanza di metodi per una elaborazione rapida dei dati e per le rigide normative vigenti sugli spazi aerei. Oggigiorno però con le nuove normative e metodi di elaborazioni dati più efficienti, tali limitazioni sono meno rilevanti (Maimaitiyiming et al 2020).

I droni sono aeromobili caratterizzati dall'assenza di un equipaggio a bordo, infatti il volo è gestito da remoto dai piloti a terra.

Questi droni vengono infatti associati a sensori che ricevono e analizzano informazioni come ad esempio contenuto idrico, presenza di malerbe, ma anche fertilità del suolo e che quindi sono in grado di ampliare la disponibilità di dati che riguardano l'appezzamento e che rispetto al satellite sono in grado di fornire una maggiore risoluzione spaziale (Comba et al. 2018). Questi sensori montati su drone sono camere multispettrali in grado di registrare la radiazione naturale rilasciata o riflessa dall'oggetto attraverso lo spettro elettromagnetico tra cui banda infrarosso e banda visibile.

I droni di nuova generazione riescono a coprire un vasto terreno in pochissimo tempo e sono in grado di registrare i dati nella banda dell'infrarosso. Utilizzando l'indice vegetativo NDVI (Normalized Difference Vegetative Index) si può facilmente creare una mappa dove è possibile visualizzare la vigoria della pianta. Generano quindi immagini che permettono di capire lo stato di salute della pianta. Questo permetterà infine di capire quali aree dell'appezzamento avranno più bisogno di fertilizzante, quali di acqua, quali invece sono più infestate da malerbe e quali da malattie. Inoltre dalle immagini ad alta risoluzione spaziale acquisite a bassa quota è possibile eliminare i pixel del suolo e dell'ombra in modo tale da ottenere immagini della vegetazione pure, migliorando così la stima dei parametri biochimici, biofisici e fisiologici delle colture. (Maimaitiyiming et al 2020).

1.5.2 Monitoraggio prossimale

Il monitoraggio prossimale è comunemente utilizzato in viticoltura per minimizzare i costi di produzione e per gestire la variabilità fenologica sito specifica della vite, garantendo così alta qualità e redditività. Solitamente sono due i metodi utilizzati con il monitoraggio prossimale: la determinazione dell'NDVI e la conducibilità elettrica del suolo (Yu et al. 2021). Per sistemi di monitoraggio prossimale si intendono infatti tutti quegli strumenti portatili che sono accompagnati da diversi tipi di sensori e in alcuni casi con in più un sistema di geolocalizzazione GPS.

Tali dispositivi sono spesso accompagnati da software che consentono di regolare e controllare in tempo reale e in modo automatico questi sensori. Sensori che possono essere disposti su macchine operatrici o sensori portatili.

Alcuni esempi di strumenti per il monitoraggio prossimale sono rilevatori di temperatura ad infrarossi, ma anche rilevatori dell'umidità del terreno. I limiti che riguardano questi strumenti sono: la risoluzione spaziale delle informazioni in quanto sono fondamentali il grado di precisione del GPS ma anche la velocità di avanzamento; l'alto numero di ore di lavoro per l'acquisizione dei dati; inoltre come accennato non tutti i sensori sono dotati di GPS.

1.6 Indici di vegetazione

Gli indici di vegetazione sono degli indicatori grafici dello stato di salute della copertura vegetale. Sono relazioni algebriche che si basano principalmente sulle lunghezze d'onda del rosso e del vicino infrarosso.

Esistono diversi tipi di indici di vegetazione:

1.6.1 NDVI

Sta per *Normalized Difference Vegetation Index*. Le piante assorbono la radiazione solare di diversi e specifici intervalli e frequenze d'onda e poi li riemettono in diverse percentuali. Le percentuali che vengono rimesse indicano se la pianta sta bene o se è in stress. Questo perché la regione fotosinteticamente attiva assorbe nel rosso e riflette nell'infrarosso e invece la vegetazione secca riflette maggiormente il rosso e assorbe nell'infrarosso. Il vicino

infrarosso (NIR) e il rosso (RED) sono due bande dello spettro elettromagnetico che vanno a comporre l'indice NDVI:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

I valori che otteniamo da questo indice vanno da 0 a 1. Si considera valore basso un valore compreso tra 0,3 e 0,5 che corrisponderà ad una zona a basso vigore mentre si considerano zone ad alto vigore quelle che hanno valore dell'indice NDVI tra 0,7 e 1.

1.6.2 SAVI

L'indice SAVI viene principalmente utilizzato quando si fa un rilevamento da remoto, in quanto in alcuni casi la vegetazione può essere scarsa e l'indice NDVI non riesce ad offrire valori attendibili in quanto i valori di riflettanza nel rosso e nel vicino infrarosso sono influenzati dalla presenza di terreno privo di vegetazione. L'indice SAVI che sta per *Soil-Adjusted Vegetation Index* applica un valore di correzione per ridurre l'effetto della luminosità del terreno nudo.

1.7 Costruzione di mappe tematiche georeferenziate

Una mappa tematica costituisce una delle molte possibilità di visualizzare i dati geografici, dati raccolti ed elaborati dal sistema informatico per produrre informazioni. I dati sono raccolti da sensori, in seguito viene creata la mappa in base ai dati raccolti e come primo passaggio vengono eliminati i dati *outlier* cioè dati eccessivamente alti o eccessivamente bassi rispetto alla media. Successivamente avviene la divisione per classe dei valori di produzione in modo tale da rappresentare i dati secondo una distribuzione di frequenza. Infine vengono assegnati colori diversi per ogni classe in modo tale da facilitare l'interpretazione della stessa.

Queste mappe vengono utilizzate nella viticoltura di precisione perché vengono trasformate in mappe di prescrizione per applicare le varie pratiche agronomiche in modo mirato e quindi sito-specifico. Questo permette quindi di gestire in modo diversificato le diverse parti dell'appezzamento che hanno esigenze diverse.

2.SCOPO DEL LAVORO

Il cambiamento climatico in corso sta rendendo sempre più urgente il bisogno di trovare delle soluzioni per la gestione del vigneto il quale ha esigenze diverse e quindi necessita di una gestione adeguata, diversificata e sostenibile. Infatti, il riscaldamento globale sta portando a cambiamenti nella fisiologia delle piante e nei loro fabbisogni. Questo scenario ha stimolato uno studio sempre più approfondito delle nuove tecnologie, una modifica delle pratiche di gestione dell'agricoltura e un'innovazione per rendere i viticoltori più sostenibili dal punto di vista ambientale. In quest'ottica, la viticoltura di precisione sta avendo sempre più importanza perché rende l'agricoltura più sostenibile con diminuzione di sprechi di risorse naturali ma anche economiche.

In viticoltura di precisione la sensoristica occupa un ruolo fondamentale in quanto permette di monitorare e controllare in modo diversificato e preciso la coltura. Questi sensori sono di vario tipo: ci sono sensori prossimali, remoti montati su mezzi aerei, droni o satelliti e vengono utilizzati al fine di mettere in luce le diversità intra parcellare e di conseguenza poterla gestire in modo diversificato a seconda delle esigenze specifiche.

Considerando la viticoltura di precisione e allo stesso tempo il cambiamento climatico che sta sempre più avendo un impatto forte sulla viticoltura, questo studio ha lo scopo di valutare l'effetto stagionale, tra le annate 2021 e 2022, nell'applicazione di tecniche di rilevamento da remoto e prossimale tramite una analisi multiscale (sensore-drone-satellite) dell'efficacia e delle potenzialità applicative per la stima di variabili biometriche, analitiche, produttive e qualitative del vigneto. L'obiettivo è quello di verificare se si riescano a ricavare delle relazioni solide e stabili tra le diverse annate tra indici vegetazionali ottenuti mediante l'analisi di immagine o sensori prossimali e i parametri quanti-qualitativi in vigneto. L'anomalia climatica della stagione 2022 potrà consentire anche di valutare quanto le temperature medie in aumento renderanno necessario l'adattamento e l'utilizzo di tecnologie di precisione per gli anni futuri.

3.MATERIALI E METODI

3.1 Zonazione e descrizione dei siti di studio

Questo lavoro di tesi fa parte di uno studio più grande in cui sono coinvolti altri 5 vigneti, oltre quello preso in esame in questo lavoro, e che è partito nell'anno 2021 ma che proseguirà anche negli anni successivi. Lo studio quindi è molto complesso e vengono studiate anche altre forme di allevamento, altre varietà diverse dalla corvina e anche altri siti. In questo lavoro verrà studiato il confronto tra due annate in quanto si dispone di rilievi telerilevati e di rilievi a terra sullo stesso vigneto in due annate successive.

Vigneto di Pule

Il vigneto preso in esame è situato nel comune di San Pietro in Cariano in provincia di Verona, il cui territorio si può definire di pianura pedemontana con un'altezza compresa tra i 75 e i 250 metri sopra il livello del mare. Inoltre, gode di un clima mite e una piovosità concentrata principalmente in primavera e in autunno. Il cambiamento climatico sta infatti portando a delle significative alterazioni che potrebbero influenzare in futuro parametri fenologici e tecnologici di maturazione dell'uva. Infatti negli ultimi anni in estate invece sono frequenti fenomeni temporaleschi accompagnati da grandine

È un appezzamento molto grande di 14 ettari sul quale è coltivata la varietà Corvina nella forma di allevamento a controspalliera potato a guyot bilaterale.

Essendo un vigneto molto grande è stato suddiviso in 11 sottozone (*Region of Interest*, ROI), composte da tre piante ciascuna. Questa suddivisione è stata fatta prendendo in considerazione le mappe di vigoria ottenute da immagini satellitari Sentinel-2 dell'anno 2021. All'interno di ogni ROI, la posizione di ogni pianta è stata georiferita tramite rover GPS GNSS (Spektra Srl, Trimble).

3.2 Analisi dirette sull'apparato vegetativo

3.2.1 Determinazione della fertilità delle gemme

In prefioritura è stata determinata la fertilità delle gemme. Sono stati analizzati 18 tralci per blocco e poi è stata determinata la media per avere un'idea della fertilità medie delle singole ROI. L'analisi si basa sulla determinazione della quantità di infiorescenze sviluppate sul tralcio, in seguito è stata fatta la media del numero di infiorescenze per ogni posizione in modo tale da risalire alla fertilità delle gemme di ogni posizione nodale.

Sono state determinate la fertilità potenziale e la fertilità reale:

- La fertilità potenziale si calcola rapportando la somma delle infiorescenze presenti nei germogli principali e la somma dei germogli principali lungo il tralcio
- La fertilità reale è calcolabile rapportando le infiorescenze presenti nei germogli principali e tutti i nodi inclusi quelli dove sono presenti gemme cieche, le quali determinano una diminuzione del valore della fertilità reale rispetto a quella potenziale.

3.2.2 Determinazione della cinetica di crescita del germoglio

Per calcolare la cinetica della crescita del germoglio sono stati presi in esame 5 germogli per blocco, i quali sono stati contrassegnati con un nastro colorato e su cui sono state prese in quattro epoche le misurazioni con metro flessibile delle lunghezze durante i mesi di maggio-giugno 2022. È stato infine calcolato il tasso di accrescimento medio giornaliero dei germogli.

Nell'annata 2021 invece questa misurazione era stata fatta determinando la lunghezza del germoglio più sviluppato e di quello distale, con trenta repliche per zona.

3.2.3 Rilievi della superficie fogliare

Nel mese di giugno 2022 è stata determinata la superficie fogliare totale di due germogli per blocco attraverso un misuratore di area fogliare (LI-3000, LI-cor Inc, Nebraska, US). Per ogni campione si è ricavata la superficie fogliare totale del germoglio. In seguito, la superficie

media di un germoglio è stata moltiplicata per il numero medio di germogli per pianta per ottenere il valore della superficie fogliare media di una pianta.

3.3 Analisi dirette sull'apparato produttivo a maturazione

3.3.1 Determinazione del peso medio dell'acino

La determinazione del peso medio dell'acino è stata misurata su 30 acini prelevati da diversi grappoli per ogni zona. Gli acini devono essere integri in modo tale che non ci sia perdita di succo e/o polpa che altererebbe la misura effettiva della massa all'acino. Viene pesato ciascun acino tramite bilancia digitale analitica e in seguito si fa la somma del peso degli acini e si divide per il numero di acini ottenendo quindi una media sul peso acino di una determinata zona dell'apezzamento.

$$Peso\ medio\ acino = \sum peso\ acini / numero\ di\ acini\ analizzati$$

3.3.2 Determinazione della produttività per pianta e del peso medio del grappolo

Attualmente esistono pochi modelli validati statisticamente in grado di prevedere la produttività di un vigneto in quanto la resa di una pianta è influenzata da diversi fattori tra cui la varietà, il clima, il suolo etc. Di conseguenza è difficile sia prevedere la resa di un vigneto ma anche quella di determinate piante, in una determinata zona, in uno stesso periodo in quanto spesso sono presenti cambiamenti significativi nella produzione di un vigneto nel corso degli anni. Nel nostro caso per determinare la produttività media di una pianta sono stati raccolti tutti i grappoli di 3-4 piante, repliche biologiche, per ogni blocco. I grappoli sono stati contati e in seguito pesati all'interno di un secchio con l'utilizzo di un dinamometro. La produttività per pianta è stata determinata dividendo il peso dei grappoli delle piante esaminate per il numero di piante, ottenendo quindi il peso medio per ceppo.

Dividendo poi lo stesso peso per il numero di grappoli si è ottenuto il peso medio di un grappolo.

3.3.3 Determinazione del grado zuccherino (Brix°)

Il grado zuccherino delle uve è uno dei parametri utilizzati per la determinazione del livello di maturazione delle uve e di conseguenza aiuta a capire il periodo migliore la raccolta delle uve. Il monitoraggio del grado zuccherino delle uve viene fatto settimanalmente attraverso un rifrattometro digitale. Oltre fornirci un indicatore del livello di maturazione, il grado zuccherino, espresso come °Brix o °Babo, aiuta anche a determinare l'alcol potenziale del prodotto finito. La sua determinazione è stata eseguita mediante un rifrattometro digitale (modello: HI96811, Hanna Instruments) su un campione di bacche prelevato per ogni blocco. Il rifrattometro digitale converte l'indice di rifrazione di un campione di vino, succo d'uva o mosto in °Brix, riportando i risultati con un'accuratezza di $\pm 0.2\%$. L'indice di rifrazione è la misura della luce che passa attraverso il campione. A seconda della composizione del campione, la luce si rifrange e si riflette in modo diverso quindi l'indice di rifrazione può essere utilizzato per determinare le proprietà fisiche del campione, come la concentrazione e la densità. Il rifrattometro digitale deve essere calibrato con acqua deionizzata prima di procedere alla campionatura.

3.3.4 Determinazione del pH

La misura del pH è stata determinata utilizzando un pH-metro. La misura del pH nell'uva da indicazioni sullo stato nutritivo della pianta ed è un parametro inversamente proporzionale all'acidità. La variabilità del pH dei diversi campioni è data da un diverso accumulo di potassio negli acini, il potassio infatti è l'elemento minerale più assorbito dalla vite e di solito quando viene assorbito in grandi quantità, si accumula nella bacca e fa decrescere i valori dell'acidità totale del mosto, mentre fa aumentare i valori del pH. Il potassio oltre ad essere uno degli elementi minerali più importanti, è utile anche per le sue funzioni di attivazione enzimatica e mantenimento del turgore.

3.3.5 Determinazione dell'acidità totale

L'acidità totale è la misura del contenuto di tutti gli acidi presenti nell'uva e comprende sia le sostanze acide volatili come ad esempio l'acido acetico, ma anche quelle fisse come acido tartarico, malico, lattico, citrico etc. Le sostanze acide all'interno dell'acino si formano naturalmente ed aumentano durante lo sviluppo della bacca per poi diminuire durante la

fase di maturazione. Le uve che maturano in stagioni molto calde hanno un contenuto di acidi minore in quanto temperature elevate influenzano il metabolismo di sviluppo degli acidi. I due principali acidi contenuti nelle uve sono acido malico e acido tartarico, quest'ultimo risulta relativamente stabile agli effetti della temperatura invece l'acido malico viene più o meno degradato a seconda della temperatura. Alle alte temperature bassi livelli di acidità sono spesso associati a valori di pH più elevati ma anche ad una maggiore concentrazione di potassio nelle bacche questo è probabilmente dovuto ad una traslocazione da altri organi della pianta.

L'acidità dell'uva diminuisce durante la maturazione, la causa principale è la respirazione.

La determinazione dell'acidità totale avviene mediante titolazione manuale, con una base forte, NaOH (0.1 N) e blu di bromotimolo che è un indicatore. Il viraggio che avviene è osservabile quando la soluzione assume una colorazione blu che sta ad identificare un ambiente alcalino.

$$ac.tartarico (g L) = (VNaOH \times MNaOH \times MM ac.tartarico) 2 \times V campione$$

Dove:

- V = volume
- M = concentrazione molare;
- MM = massa molare

3.3.6 Determinazione dello spessore della buccia

Lo spessore della buccia è un parametro morfologico. Questo parametro è stato determinato prelevando 30 acini per blocco, dei quali è stata accuratamente separata la polpa dalla buccia, successivamente la buccia è stata asciugata ed è stato utilizzato un micro-calibro ad alta precisione con sensibilità al centesimo di millimetro.

Lo spessore della buccia è un parametro che è influenzato da più fattori, principalmente dalla varietà poiché ogni varietà è caratterizzata da un certo spessore ma anche dalle

condizioni ambientali di coltivazione, per questo motivo all'interno dello stesso appezzamento potremmo trovare della variabilità.

3.3.7 Quantificazione di polifenoli e antociani

Gli antociani sono pigmenti presenti principalmente nelle bucce delle uve, sono costituiti dallo ione flavilio cioè due anelli benzenici uniti da un eterociclo ossigenato insaturo di carica positiva. Gli antociani si condensano per lo più con i tannini per formare composti più complessi e la loro struttura e conseguentemente il loro grado di colorazione sono strettamente connesse alle condizioni di pH all'interno della cellula, ma soprattutto del vacuolo il quale contiene la maggior parte degli antociani.

Per quanto riguarda la determinazione degli antociani, sono state effettuate analisi diverse nei due anni.

La quantità di antociani è stata determinata separando la buccia dalla polpa per un quantitativo di 4 grammi, le bucce sono state poi lasciate per 72 ore (48 ore nel 2021) assieme ad un estraente: 12% Etanolo, 5 g/L ac. Tartarico e 100 ng/L metabisolfito. In seguito dopo l'estrazione segue la diluizione con soluzione idroalcolica ed infine avviene la lettura tramite spettrofotometrica sia per la determinazione del contenuto di antociani totali a cui la lettura viene fatta a 540 nm; sia per i polifenoli totali, la cui lettura viene fatta a 280 nm.

Nel 2021 invece la determinazione della quantità di antociani e polifenoli è stata fatta prendendo tutto l'acino quindi sia polpa che buccia, il procedimento successivo è stato medesimo a quello sopra descritto.

3.4 Analisi con sensori prossimali

3.4.1 Rilievi dell'indice di vigoria

Nel mese di giugno sono stati effettuati rilievi dell'indice di vigoria (NDVI) impiegando un sensore portatile (GreenSeeker® Handheld, Trimble Inc.). Il sensore è utilizzato per eseguire rilievi dello stato di vigore della coltura. I rilievi sono stati fatti per tutti gli undici blocchi, determinando un valore medio dell'indice di NDVI per ogni zona. Lo strumento effettua una scansione istantanea dell'apparato fogliare in esame ed esamina la massa di vegetazione fotosinteticamente attiva perché fa una scansione della radiazione emessa dalla pianta nei raggi infrarossi vicini e rossi visibili. Durante il suo utilizzo, in vigneti allevati a guyot, è necessario utilizzare uno schermo di materiale inerte come cartone o legno in modo tale da fornire un basso valore di NDVI in corrispondenza di parti della chioma senza foglie o rami, in modo tale da non alterare i valori. Il sensore produce valori di lettura NDVI tra 0 e 0.99 che è indicatore della salute della pianta, all'aumentare del valore aumenta la vigoria della stessa

3.4.2 Rilievi dell'umidità del terreno

Sono state determinate due misurazioni dello stato idrico del terreno sia per quanto riguarda il 2021 (inizio e fine giugno) che il 2022 (maggio e agosto). Per ogni zona sono state effettuate diverse misure del contenuto volumetrico di acqua nel suolo. Questo tipo di misurazione è stato fatto con almeno 5 giorni di assenza di precipitazioni, in modo tale che il terreno non sia saturo di acqua e che quindi permetta di rilevare una differenziazione delle diverse aree distinguibili per minore o maggiore capacità di ritenzione idrica. I rilievi sono stati effettuati con il metodo "time-domain reflectometry (TDR)" che consiste in 2 sonde metallica collegate a una componente elettronica. Le sonde inserite nel suolo riflettono un impulso elettromagnetico ad alta frequenza (GHz) propagato dal sensore. Il tempo impiegato dall'impulso per tornare indietro consente la stima dell'umidità del suolo. Lo strumento è dotato di sistema GPS incorporato che ha permesso di scaricare le coordinate dei vari punti dove è stata fatta la misurazione e anche dei valori di umidità percentuale in modo tale da ottenere una mappa georeferenziata.

3.4.3 Rilievi della temperatura della chioma

Per rilevare la temperatura della chioma nelle diverse zone è stata impiegata una termocamera ad infrarossi (FLIR Ex, Teledyne FLIR LLC, Wilsonville, Oregon; USA). Lo strumento è stato utilizzato nelle ore più calde della giornata poiché è il momento in cui potrebbero manifestarsi sintomi di stress idrico. Inizialmente sono state acquisite le immagini sui target di riferimento: foglia “secca” e “bagnata” e ogni pixel dell’immagine rappresentava la temperatura in gradi Celsius. Per ottenere il valore di temperatura della foglia “secca” la foglia è stata cosparsa di vaselina su entrambi i lembi e dopo 20 minuti è stata scattata l’immagine, 20 min è il tempo necessario affinché sia assicurata la chiusura meccanica degli stomi con conseguente blocco dell’evapotraspirazione e finale aumento della temperatura fogliare (T_{dry}).

Al contrario la foglia “bagnata” è stata precedentemente inumidita con acqua in modo tale e la foto è stata scattata dopo dieci minuti (T_{wet})

Le immagini di riferimento: “secca” e “bagnata” sono state scattate sia all’inizio del rilievo sia alla fine per considerare eventuali modifiche nello stato idrico durante il rilievo dato che è un procedimento che richiede tempo. Sono state scattate dieci immagini per zona, in seguito sono state analizzate in laboratorio utilizzando il software FLIR TOOLS versione 6.4. Questo permette di determinare le temperature medie della chioma escludendo materiali di sostegno come pali in legno oppure fili di ferro. Si è calcolata così, su un foglio di calcolo Excel, la media delle temperature delle chiome per ogni zona e, con queste, si sono poi calcolati gli indici termici CWSI (crop water stress index), indice che determinato lo stato idrico.

$$CWSI = (T^{\circ}chioma - T^{\circ}f.bagnata) / (T^{\circ}f.secca - T^{\circ}f.bagnata)$$

dove:

T_{chioma} = temperatura della pianta misurata dal sensore termico;

$T_{bagnata}$ = temperatura della pianta in piena traspirazione (stomi aperti);

T_{secca} = temperatura della pianta non traspirante (stomi chiusi).

Il CWSI assume valori compresi tra 0 e 1. Valori tra 0,8 e 1 indicano un severo stress idrico mentre valori vicino allo 0 indicano piante non in stress. Infatti più alto è il valore di CWSI più la pianta è vicina a condizioni di stress.

3.5 Analisi con sensori da remoto

3.5.1 Utilizzo di Sentinel-2

In questo studio sono state acquisite le immagini satellitari da Sentinel2. Nel 2021 sono state acquisite in due momenti differenti nel mese di giugno: il 15 e il 22. Invece nel 2022 sono state acquisite in tre date distinte distribuite nel tempo: la prima il 16/05; la seconda il 12/06 e l'ultima il 2/07. L'immagine satellitare di Sentinel2 ha una risoluzione spaziale di 10 m pixel ed è stata scaricata dal Copernicus Open Access Hub¹. I confini del vigneto sono stati stabiliti con una zona cuscinetto di 5 m per evitare pixel contenenti elementi che non riguardavano il vigneto. Dalle immagini satellitari è stato determinato l'indice NDVI utilizzando le bande 4 (rossa) e 8 (NIR) del Sentinel2 ed è poi stata calcolata la media all'interno dei blocchi selezionati.

3.5.2 Utilizzo del drone

Il volo del drone è stato effettuato l'11 giugno nel 2021 e il 2 luglio nel 2022. Il volo si è svolto a cura della azienda "Spektra-Agri s.r.l." che collabora con l'università di Verona e che si occupa di viticoltura di precisione.

È stata utilizzata una fotocamera multispettrale MicaSense RedEdge-MX (MicaSense, Inc., Seattle, Washington, USA) montata su DJI Matrice 600 Pro UAV (Z DJI Technology Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong, Cina).

Prima del volo sono state scattate immagini per la calibrazione del mezzo perché devono essere considerate le condizioni metereologiche di quello stesso giorno.

Successivamente al drone viene preimpostato il volo in base alla coltura da analizzare, alla morfologia del terreno, alla luce ma anche alla precisione che si vuole ottenere. Una volta raggiunta la quota preimpostata il drone scatta cinque foto per ogni punto da analizzare. Il drone ha effettuato il volo ad un'altezza di 40 m di altitudine sopra il livello del suolo, su una

superficie di 10 ha ad una velocità di 3 m/s con imposizioni di sovrapposizione anteriore e laterale del 70% e distanza di campionamenti al suolo di 2,8 cm/pixel. Dunque, viaggiava secondo traiettorie rettilinee sopra i filari fino a coprire l'intera superficie vitata selezionata.

Tutte le immagini sono state elaborate in ortomosaici utilizzando il software Pix4D Fields.

3.6 Costruzione di mappe tematiche

I raster di output sono stati elaborati utilizzando il software QGIS, versione 3.16.16 (QGIS Development Team) mediante il quale le immagini raster sono state ripulite dai pixel dei filari non di vite. Sulla base dell'algoritmo di zonazione NDVI, sono stati selezionati diversi ceppi in zone con diversa vigoria, nei diversi vigneti. I blocchi sono stati poi firmati sul campo con nastri colorati e le loro coordinate sono state registrate con un ricevitore GNSS Trimble® R2 (Trimble Inc., Westminster, Colorado, USA). L'acquisizione delle coordinate del blocco ha consentito il calcolo del valore NDVI medio all'interno del blocco.

4. RISULTATI

4.1 Mappe tematiche dello stato fisiologico del vigneto

Nell'anno 2021 è stato costituito l'ortomosaico (fig. 2) che consiste nella ricostruzione appunto di un mosaico di immagini a partire da multiple immagini RGB a scala inferiore acquisite dal drone. In seguito all'individuazione dei confini, è stato diviso l'appezzamento in 11 zone distinte perché caratterizzate da diversi livelli di vigoria osservati.



Figura 2: ortomosaico del vigneto con confine annesso creato mediante le immagini scattate dal drone

In seguito, sono state realizzate mappe tematiche con l'indice NDVI, ricavato dai valori spettrali registrati dal drone nelle lunghezze d'onda RED e NIR. Di seguito vengono riportate alcune mappe prodotte per l'annata 2021. In Figura 3A è riportata la mappa di NDVI prodotta a partire dal sensore multispettrale montato sul drone. In Figura 3B è riportato un grafico a box-plot che permette di osservare la variabilità del vigore del vigneto

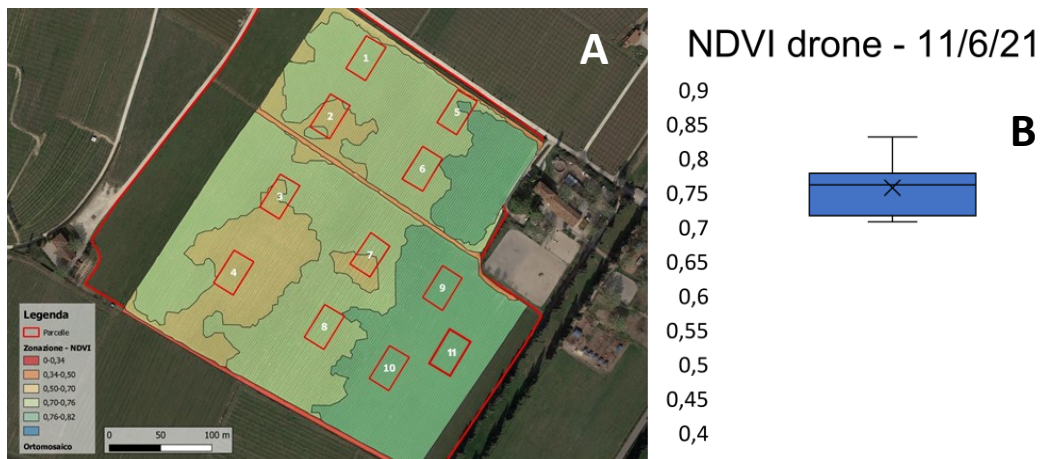


Figura 3: A) Mappa di NDVI del vigneto prodotta da drone nella stagione 2021 e B) box-plot della variabilità intra-parcellare.

In Figura 4A è riportata, invece, la mappa di NDVI prodotta a partire dai dati Sentinel-2 accompagnata dal grafico box-plot (Figura 4B).

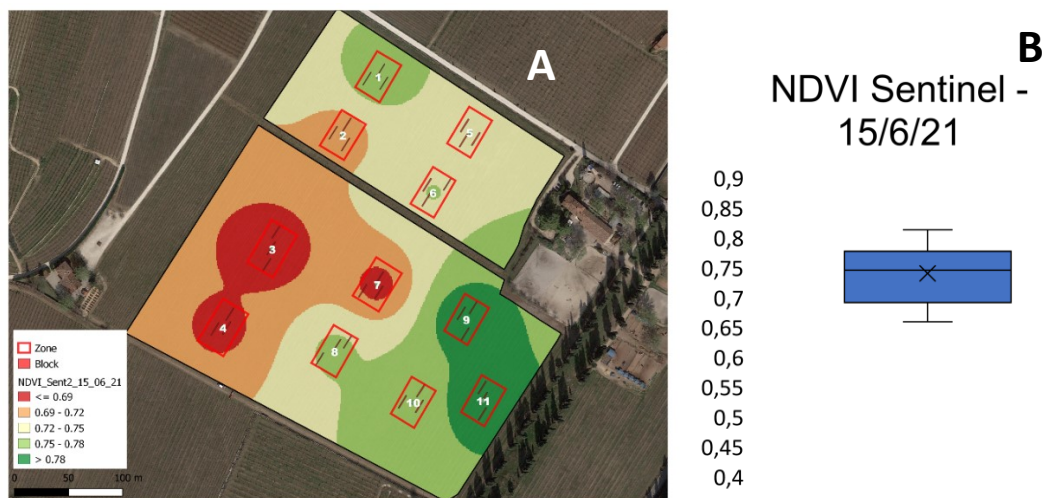


Figura 4: A) Mappa di NDVI del vigneto prodotta da Sentinel2 nella stagione 2021 e B) box-plot della variabilità intra-parcellare.

A seguire un grafico box plot (Figura 5) dove si può apprezzare la variabilità intra-parcellare dell'NDVI da drone, Sentinel-2 e sensore portatile.

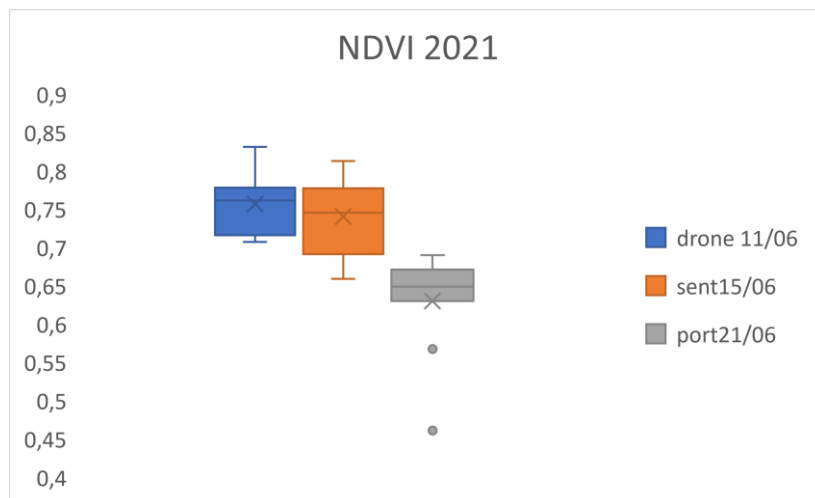


Figura 5: box-plot NDVI drone, Sentinel2, prossimale 2021

La maggiore variabilità dell'indice NDVI si è osservata per quanto riguarda il sensore Sentinel-2. I valori di NDVI risultano essere, invece, più bassi per quanto riguarda il sensore prossimale. Questo comportamento può essere spiegato dal fatto che sia il dato Sentinel-2 che da è stato ottenuto considerando anche il contributo spettrale del suolo ed invece, utilizzando il sensore prossimale, è stata misurata la risposta spettrale della sola chioma e solo in determinati punti dell'appezzamento. Di conseguenza i valori NDVI da sensori remoti risultano maggiori per l'effetto del suolo.

In entrambe le mappe le zone con indice NDVI più alto, quindi con vigore vegetativo maggiore, risultano essere la zona 9, 10 ed 11. Al contrario le zone 2, 3, 4 e 7 risultano essere quelle con sviluppo vegetativo minore.

Le stesse mappe tematiche sono state realizzate anche nella stagione 2022. In figura 6A è riportata la mappa di NDVI prodotta a partire dal sensore multispettrale montato sul drone, accompagnata dal grafico box-plot (figura 6B).

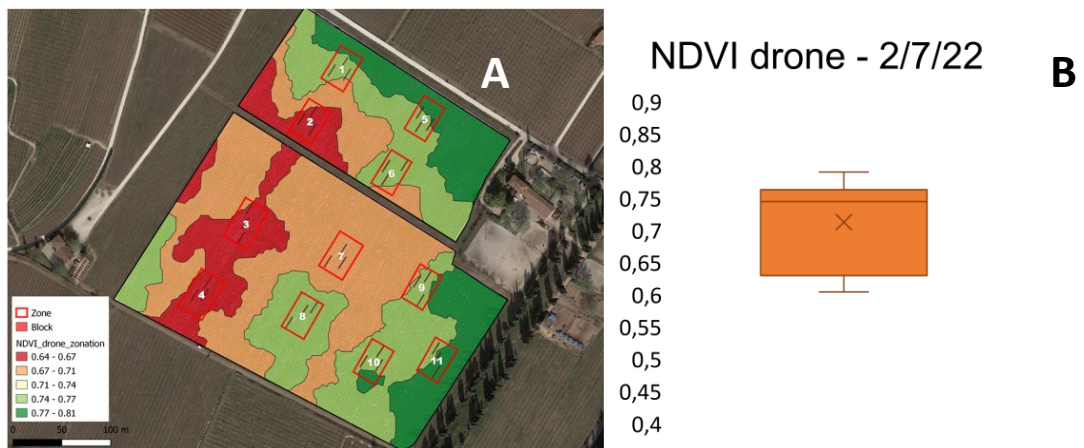


Figura 6: A) Mappa di NDVI del vigneto prodotta da drone nella stagione 2022 e B) box-plot della variabilità intra-parcellare.

In Figura 7A è riportata, invece, la mappa di NDVI prodotta a partire dai dati Sentinel-2 accompagnata dal grafico box-plot (Figura 7B).

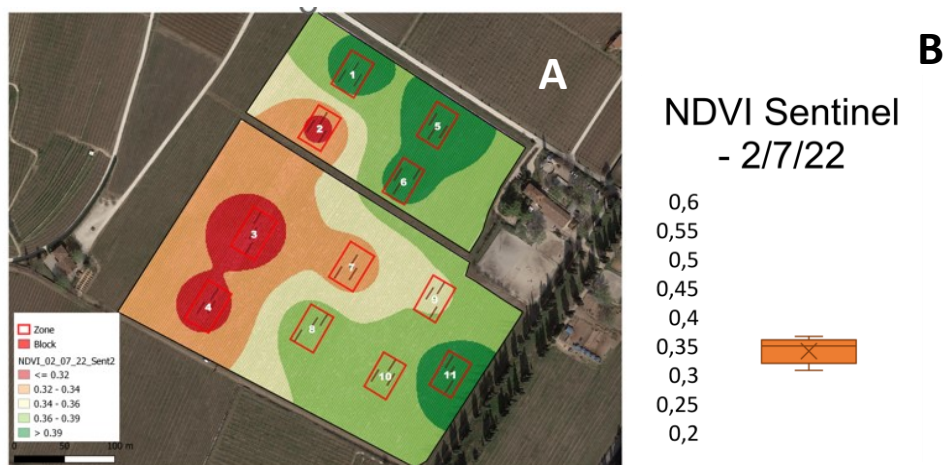


Figura 7: A) Mappa di NDVI del vigneto prodotta da Sentinel2 nella stagione 2022 e B) box-plot della variabilità intra-parcellare.

A seguire anche per il 2022 un grafico box plot (figura 8) dove si può apprezzare la variabilità all'interno del vigneto per quanto riguarda i valori di NDVI da: drone, Sentinel2 e sensore portatile.

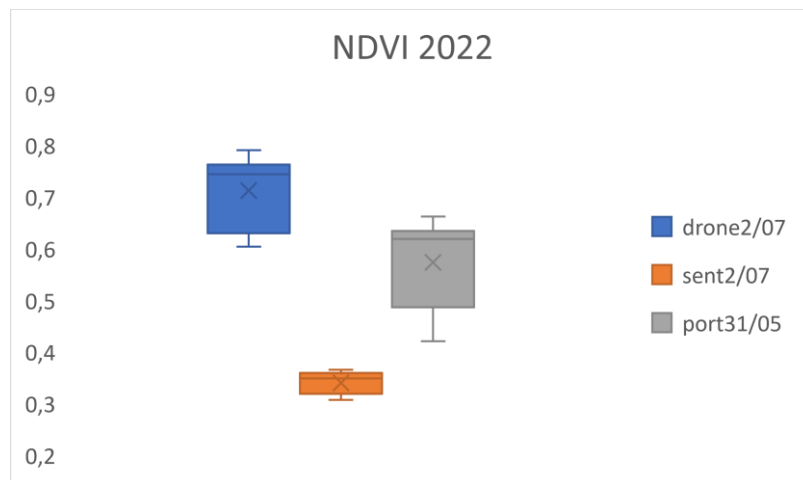


Figura 8: box-plot NDVI drone, Sentinel2, prossimale 2022

Nella stagione 2022, a differenza del 2021, si è osservata una maggiore variabilità dell'NDVI da sensore prossimale rispetto a quelli da satellite e da drone. Questo comportamento può essere spiegato dalla differenza temporale con cui sono stati acquisiti i rilievi. In particolare, il rilievo prossimale è stato eseguito circa un mese prima degli altri due, in piena fase di sviluppo vegetativo e non ancora in condizioni di stress severo, fattore che probabilmente ha aumentato la variabilità della crescita vegetativa. In questo caso i valori di NDVI risultano essere minori per quanto riguarda Sentinel2, questo può essere dovuto all'utilizzo dell'impianto di irrigazione a goccia installata nel vigneto in esame, oppure per il diverso contributo del suolo (maggiormente secco rispetto alla stagione 2021).

In entrambe le mappe, le zone con indice NDVI più alto risultano essere la zona 10, 11 e 5. Al contrario le zone 2, 3, 4 e 7 risultano essere quelle con minor sviluppo vegetativo.

Se confrontiamo le due mappe di NDVI prodotte da dato Sentinel-2 nell'annata 2021 (fig. 6) e 2022 (fig. 7), si può osservare un significativo effetto stagionale. I valori di NDVI nel 2022 risultano, infatti, di molto inferiori rispetto a quelli del 2021, questo sta ad indicare che il vigore vegetativo era inferiore rispetto al 2021 e anche il contributo del suolo a parità di epoca della stagione vegetativa, ha contribuito in maniera diversa. Nonostante la

classificazione della variabilità intra-parcellare risulti essere molto simile, i valori del 2022 sono significativamente inferiori.

Contenuto idrico del suolo

Seguono le mappe tematiche di contenuto idrico del suolo espresso come VWC, che sta per *Volumetric Water Content*, che rappresenta la quantità di acqua presente nel suolo per unità di volume.

Il rilievo del dato è stato effettuato nel 2021 (figura 9A) solo in corrispondenza dei blocchi, invece nel 2022 (figura 9B) i rilievi con il metodo TDR sono stati effettuati su tutta l'appezzamento e nel sotto-fila. Ma in entrambe le annate è evidente come in corrispondenza del blocco 7 ci sia un minore contenuto idrico.

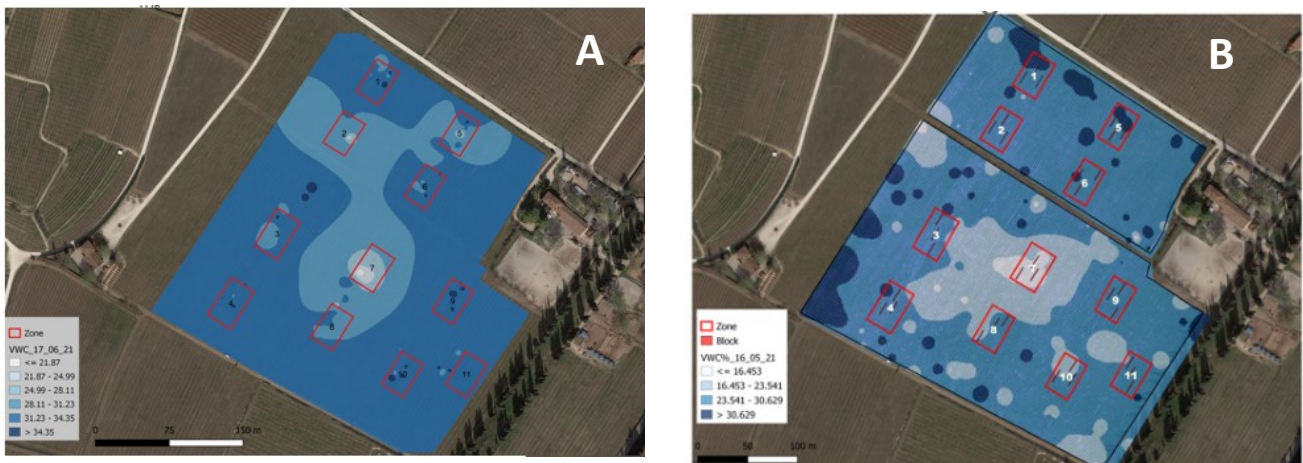


Figura 9: A) Mappa del VWC del 2021 e B) mappa del VWC del 2022

Come si può osservare anche dal grafico a box-plot (Figura 10), i valori del 2021 sono risultati sia come media che come distribuzione, leggermente superiori rispetto al 2022. Possiamo dedurre che ci sia stato un leggero effetto stagionale in quanto a parità di impianto e tecnica di rilevamento, il suolo nel 2022 ha mostrato un minor contenuto di acqua. Va tuttavia ricordato, che non disponiamo di informazioni per quanto riguarda l'irrigazione di soccorso che è stata utilizzata in entrambe le annate.

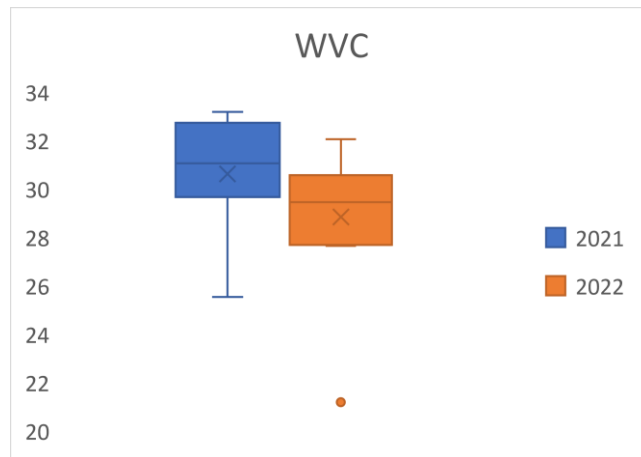


Figura 10: box plot del VWC 2021vs2022

Crop Water Stress Index - CWSI

Di seguito sono riportate le mappe tematiche del 2021 (fig.11A) e 2022 (fig.11B) dell'indice di stress idrico: CWSI (*Crop Water Stress Index*) ottenuto a partire da rilievi a terra con termocamera.

Le mappe dimostrano che in entrambe le annate i blocchi 9, 10 e 11 risultano essere quelli meno stressati e corrispondono anche alle zone che hanno mostrato un indice NDVI maggiore. Viceversa la zona 2 risulta aver subito condizioni di stress idrico.

La zona 1, 7, 8 e in parte la 5 risultano invece essere meno stressate nel 2022 rispetto al 2021

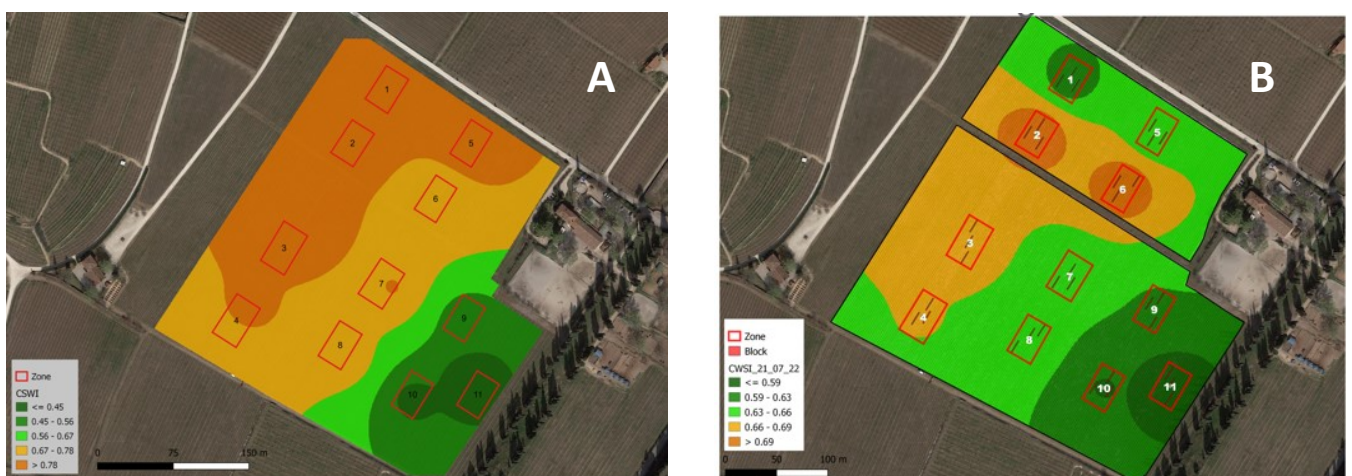


Figura 11: A) mappa CWSI 2021 e B) mappa CWSI 2022

Segue il grafico box-plot (fig.12) che presenta la variabilità dell'indice CWSI tra le due annate. È interessante osservare come si sia osservata una significativa differenza tra le annate con il 2021 che ha mostrato non solo un valore medio superiore ma anche una maggiore variabilità. Nonostante questo dato possa andare leggermente in controtendenza con quanto atteso, in effetti la stagione 2022 si è dimostrata molto più siccitosa, alcuni elementi vanno considerati. Da un lato, la minore variabilità osservata nel 2022 concentrata su valori di circa 0.65, di media, dimostra quanto lo stress idrico e termico vissuto dalle piante in questa stagione abbia uniformato la risposta fisiologica della vite andando oltre la variabilità intra-parcellare, che invece in annate più favorevoli si è espressa nello stesso vigneto (teoria del fattore dominante). Non va dimenticato, inoltre, che in entrambe le stagioni è stata utilizzata la pratica di irrigazione di soccorso che può inevitabilmente aver alterato qualche risposta ma che, in mancanza di questa almeno nel 2022, non si sarebbe riusciti a portare a maturazione l'uva mettendo anche in difficoltà la sopravvivenza di alcune piante.

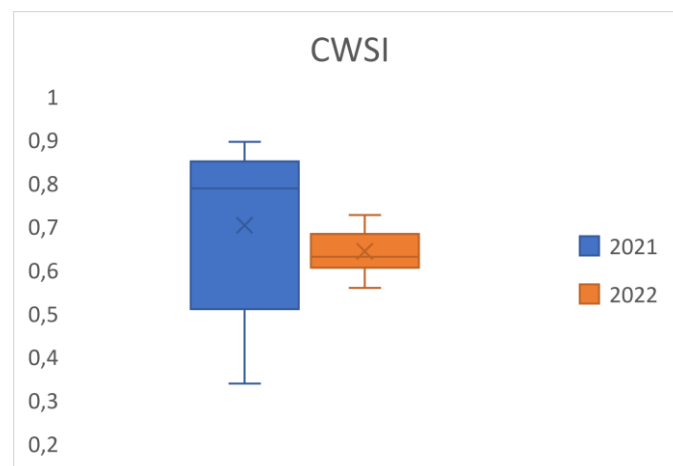


Figura 12: box plot del CWSI 2021vs 2022

4.2 Mappe tematiche dello stato di maturazione

Grado zuccherino °Brix

In figura 13 vengono riportate le mappe tematiche della distribuzione del grado zuccherino nelle diverse zone del vigneto. Il grado Brix risulta essere un indice importante sia per quanto riguarda lo stadio fenologico ma soprattutto per la determinazione del livello di maturazione

dell'uva. In entrambe le annate il blocco 3 si conferma essere quello con un contenuto zuccherino maggiore, seguito dal blocco 4, 1 e 9.

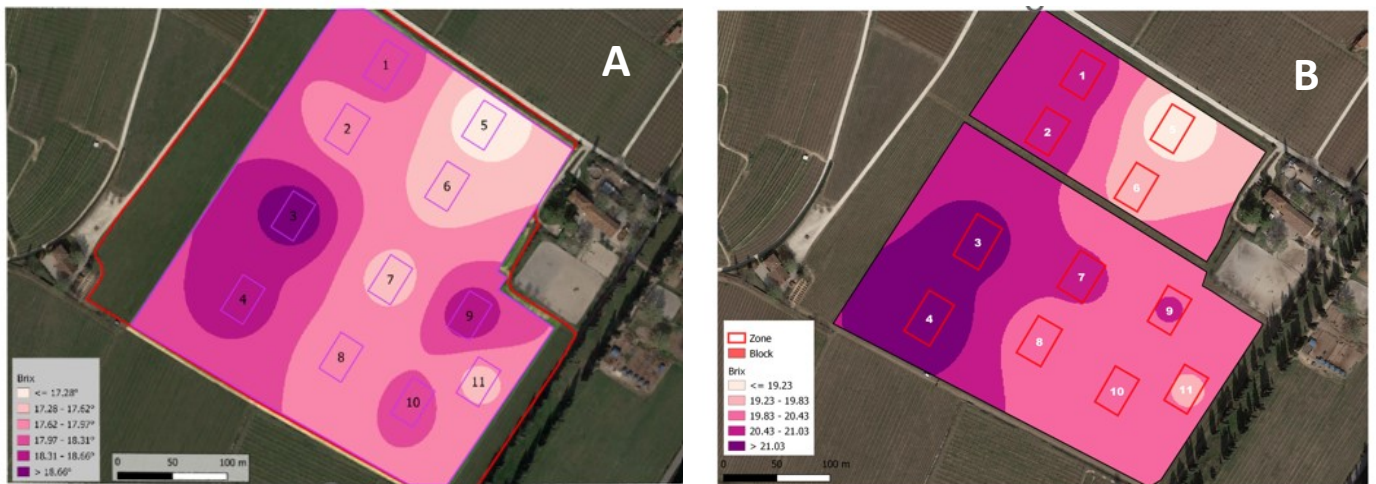


Figura 13: A) mappa del °Brix del 2021 e B) mappa del °Brix del 2022 mappa

A seguire il grafico box-plot (fig. 14) che indica un valore maggiore del °Brix nel 2022 rispetto al 2021. Nonostante il grado brix del 2022 sia stato determinato anticipatamente rispetto al 2021, è stato osservato un quantitativo maggiore di zuccheri. Certamente le elevate temperature registrate durante la stagione ed in particolare nell'estate 2022 hanno portato ad una concentrazione degli zuccheri delle bacche che, probabilmente (non è stato misurato), hanno raggiunto una dimensione inferiore.

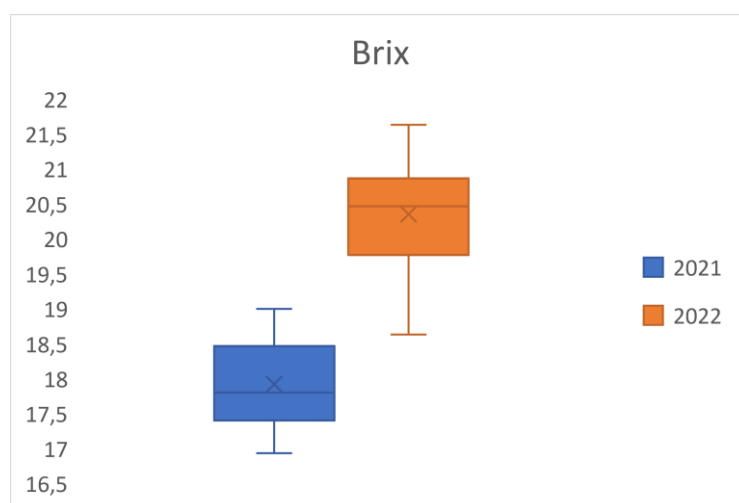


Figura 14: box plot °Brix 2021vs 2022

Acidità totale

Seguono le mappe tematiche del contenuto di acidità totale delle uve misurati all'interno di ogni blocco per le stagioni 2021 (fig.15A) e 2022 (fig.15B). Anche in questo caso è la zona 3 a risultare la medesima in entrambe le annate con il valore inferiore di acidità totale. Al contrario, in accordo anche con il contenuto zuccherino, la zona 10 risulta essere quella caratterizzata da uve con acidità superiore. Nel 2022 le zone 4, 7 e 9 risultano avere acidità di molto inferiore rispetto al 2021.

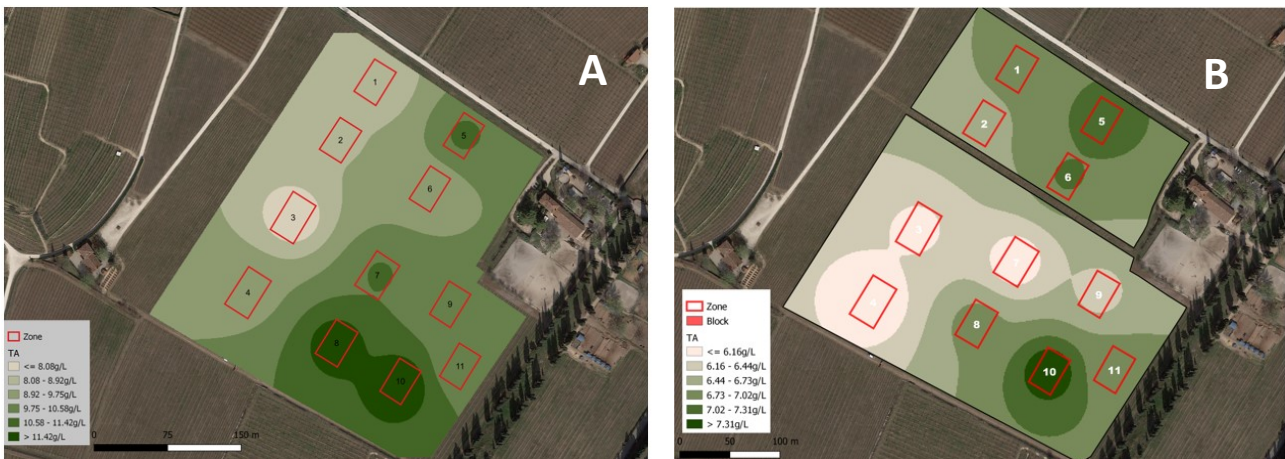


Figura 15: A) mappa dell'acidità totale del 2021 e B) mappa dell'acidità totale del 2022

Segue il grafico box-plot (fig.16) che indica un valore maggiore dell'acidità totale nel 2021 rispetto al 2022, anche se il dato risulta avere una variabilità intra-parcellare superiore. Questo dato risulta coerente con quello del °Brix.

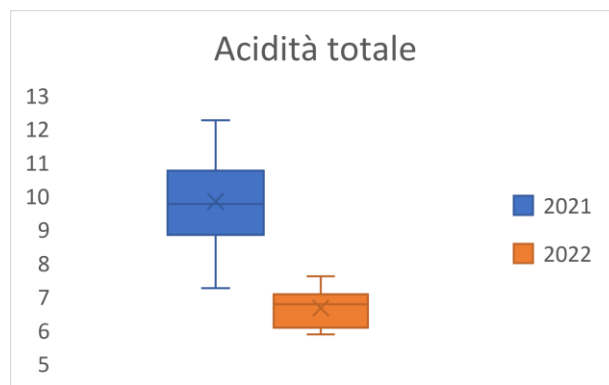


Figura 16: box plot acidità totale 2021vs 2022

Antociani

Seguono le mappe tematiche del contenuto medio di antociani delle uve misurati all'interno di ogni blocco per le stagioni 2021 (fig.17A) e 2022 (fig.17B). Anche in questo caso è la zona 3 ad aver raggiunto il maggior contenuto di antociani, probabilmente perché è proprio la zone con che ha vissuto il maggiore stress idrico con conseguente superiore sintesi di metaboliti secondari come mezzo di difesa.

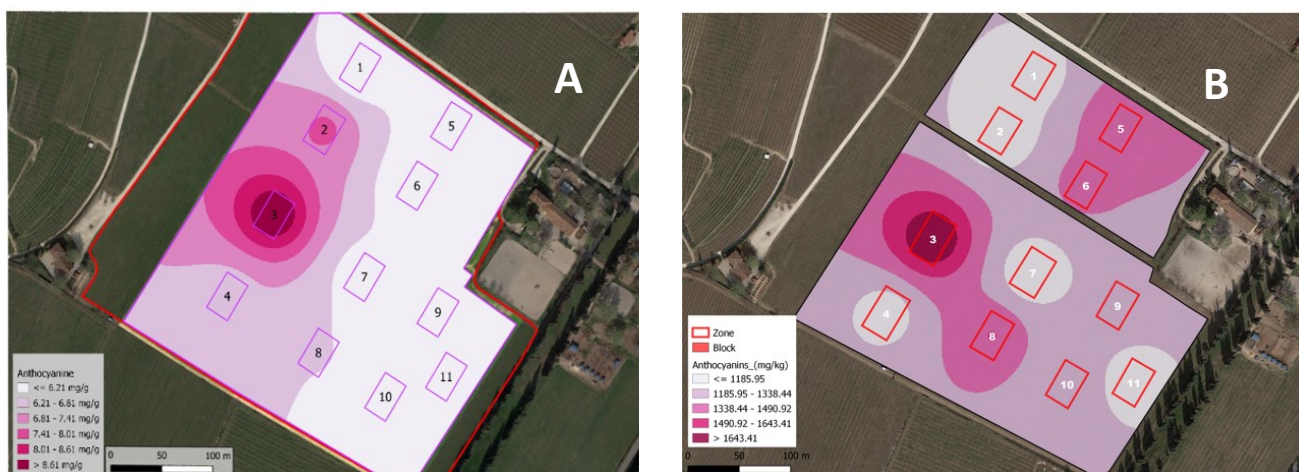


Figura 17: A) mappa del contenuto di antociani del 2021 e B) mappa del contenuto di antociani del 2022
mappa tematica del quantitativo di antociani 2022

La variabilità intra-parcellare dei parametri di maturazione tra le due annate viene riportata di seguito con dei grafici a box-plot. Questo permette di fare delle considerazioni per quanto riguarda l'effetto stagionale di parametri come: °Brix (fig.18A); acidità totale (fig.18B) e pH (fig.18C). Nel 2022 c'è stato un maggiore accumulo di zuccheri a cui, per effetto delle maggiori temperature, si è osservato un decadimento più rapido dell'acidità totale e valori significativamente superiori di pH delle uve anch'essi dovuti all'effetto delle maggiori temperature estive. I dati di acidità totale e pH risultano avere una variabilità intra parcellare maggiore nel 2021 rispetto al 2022

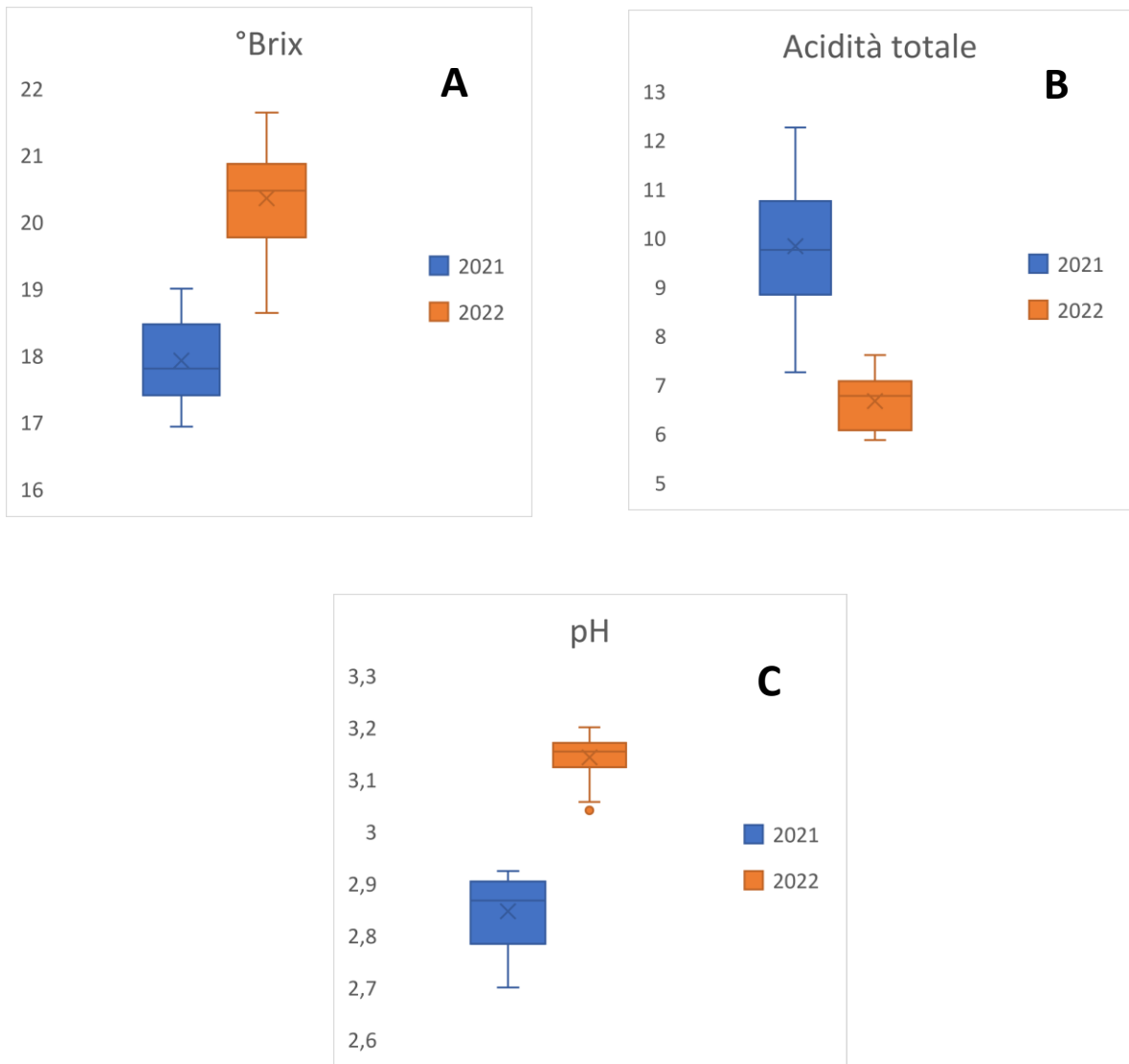


Figura 18: A) box plot del °Brix 2021 vs 2022; B) box plot dell'acidità totale 2021 vs 2022 e C) box plot del pH 2021 vs 2022

4.3 Matrici di correlazione

Per valutare possibili correlazioni esistenti tra parametri rilevati da sensori prossimali o remoti e parametri fisiologici delle viti o parametro di maturazione delle uve, sono state costruite delle matrici di correlazione. Per ogni relazione esistente tra tutti i parametri analizzati, è stata calcolato il coefficiente di correlazione (R), il livello di significatività (*p-value*) e il segno della relazione (positivo o negativo).

La figura 19 riporta una matrice che rappresenta tutti gli indici misurati nel 2021 evidenziando in rosso o blu le correlazioni positive o negative, rispettivamente.

Una correlazione positiva importante si ottiene tra l'NDVI ottenuto da tutti e tre i sensori (prossimale, drone e satellite) confermando la riproducibilità e confrontabilità delle applicazioni nonostante le diverse risoluzioni spaziali. L'indice di stress idrico CWSI è risultato negativamente con l'indice di vegetazione NDVI, evidenziando come piante a minor vigoria sono risultate essere quelle più stressate. L'indice NDVI è risultato positivamente correlato con la fertilità reale della pianta e anche con la produttività, indicando che la vigoria sia uno dei parametri più importanti che determina il grado di fertilità e anche la dimensione delle infiorescenze durante il ciclo ontogenetico di differenziazione.

m	lungMedio	DR MEDIO	Fertilita real	CWSI	Brix	AT	pH	Peso acino	peso grappo	Antociani	Polifenoli	Produttivi	Spessore	/I drone 1	NDVIsent22	NDVIsent15	NDVIport21
lungMedio	1																
TDR MEDIO	0,13	1															
Fertilita real	-0,01	-0,04	1														
CWSI	-0,23	-0,62	-0,24	1													
Brix	0,48	0,19	-0,43	0,03	1												
AT	-0,23	0,09	0,33	-0,46	-0,48	1											
pH	-0,37	-0,29	-0,24	0,68	-0,22	-0,57	1										
Peso acino	-0,09	-0,27	0,17	0,10	-0,19	0,58	-0,17	1									
peso grappo	0,41	0,59	-0,30	-0,76	0,47	0,32	-0,74	-0,08	1								
Antociani	0,15	-0,31	-0,29	0,70	0,52	-0,40	0,29	-0,07	-0,29	1							
Polifenoli	0,33	-0,24	-0,38	0,67	0,33	-0,64	0,65	0,01	-0,41	0,64	1						
Produttivi	0,10	0,54	0,38	-0,47	-0,40	0,60	-0,44	-0,04	0,35	-0,38	-0,52	1					
Spessore	0,18	0,33	0,46	-0,52	0,12	0,52	-0,72	0,33	0,53	-0,28	-0,58	0,46	1				
NDVI dron	0,37	0,55	0,51	-0,78	-0,05	0,49	-0,79	0,04	0,54	-0,59	-0,63	0,80	0,79	1			
NDVIsent2	0,04	0,68	0,12	-0,40	-0,16	0,18	-0,36	-0,25	0,40	-0,47	-0,50	0,82	0,27	0,69	1		
NDVIsent1	0,35	0,60	0,26	-0,73	-0,16	0,38	-0,66	-0,07	0,61	-0,72	-0,63	0,76	0,52	0,92	0,83	1	
NDVIport	-0,07	0,21	0,68	-0,23	-0,55	0,25	-0,20	-0,22	-0,15	-0,37	-0,51	0,72	0,15	0,57	0,68	0,57	1

Figura 19: matrice di correlazione 2021

A supporto di questo è stato determinato anche il livello di significatività dei valori di correlazione con la figura 20:

- Tre asterischi “***” indicano una forte correlazione
- Due asterischi “**” indicano una media correlazione
- Un asterisco “*” indica una bassa correlazione
- “ns” indica una correlazione che non è statisticamente significativa

Le scale di colori indicano come per la matrice di correlazione:

- Scale di arancione per indicare correlazioni positive. Arancione più intenso ha valore di R^2 alto, arancione meno intenso ha R^2 basso.
- Scale di blu per indicare correlazioni negativa. Dal blu più intenso R^2 alto, al blu meno intenso con R^2 basso.

Infatti rimane importante la correlazione negativa tra indice di stress idrico e vigoria della pianta, inoltre anche la produttività risulta ben correlata con maggior vigore vegetativo. La correlazione più significativa la troviamo nel rapporto tra NDVI del drone e NDVI Sentinel2.

	lungMedi	TDR MEDI	Fertilita re	CWSI	Brix	AT	pH	Peso acin	peso grap	Antociani	Polifenoli	Produttivi	Spessore	NDVI dron	NDVIsent2	NDVIsent1	NDVIport2
lungMedi	1																
TDR MEDI	ns	1															
Fertilita re	ns	ns	1														
CWSI	ns	ns	ns	1													
Brix	ns	ns	ns	ns	1												
AT	ns	ns	ns	ns	ns	1											
pH	ns	ns	ns	*	ns	ns	1										
Peso acin	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1									
peso grap	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	1								
Antociani	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	1							
Polifenoli	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	ns	*	1						
Produttivi	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1					
Spessore	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	1				
NDVI dron	ns	ns	ns	**	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	**	*	1			
NDVIsent2	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	*	1		
NDVIsent1	ns	ns	ns	**	ns	ns	*	ns	ns	*	*	*	ns	***	**	1	
NDVIport2	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	1

Figura 20: tabella di significatività 2021

Anche per la stagione 2022 si è seguita la stessa procedura e la matrice di correlazione è riportata in Figura 21. Nel 2022 sono stati determinati più parametri rispetto al 2021 specialmente per quanto riguarda la velocità di crescita del germoglio e il suo sviluppo. Sono quindi riportati tutti i parametri valutati ma ne verranno presi in considerazione solo una parte.

Anche in questo caso l'indice NDVI calcolato da sensori remoti e prossimali risulta fortemente correlato positivamente tra loro. Lo stress idrico CWSI risulta essere correlato negativamente con il peso del grappolo e il peso dell'acino, perché all'aumentare dello stress idrico aumenta la perdita di acqua da parte dell'acino e di conseguenza diminuisce il peso. Questo risultato è coerente con quanto osservato in precedenza analizzando le mappe di grado zuccherino e contenuto di antociani (Figure 12 e 13). Risulta esserci una correlazione molto significativa tra NDVI e °Brix di segno negativo, e tra NDVI e acidità totale, di segno positivo. Anche il peso medio acino risulta essere correlato positivamente con tutti gli indici di NDVI, all'aumentare della vigoria aumenta anche la dimensione e il peso dell'acino.

c	SLAtol	SLAxnS	n*Sxplant	Sla/prod	growth ki	TDR medi	fert reale	CWSI	Brix	AT	pH	PESOACIN	esograppo	Antociani	Polifenoli	produttivi	spessore	Vldrone2	DVIsent2	IVIsent12	IVIsent16	IVIport 31	
SLAtol	1																						
SLAxnS	-0,19992	1																					
n*Sxplant	-0,61533	0,656206	1																				
Sla/prod	0,436417	0,012606	-0,3612	1																			
Shoot gro	-0,55481	0,293272	0,27979	-0,52167	1																		
TDR medi	0,040759	-0,58483	-0,48891	-0,09183	0,321588	1																	
fert reale	-0,72628	0,085707	0,54611	-0,65407	0,491133	0,035398	1																
CWSI	0,415816	-0,60002	-0,36433	0,582845	-0,77127	0,196094	-0,35209	1															
Brix	0,451255	-0,2769	-0,24279	0,095795	-0,40026	-0,29996	-0,54679	0,22171	1														
AT	-0,55221	-0,14001	0,063419	-0,35764	0,550097	0,479807	0,757976	-0,20575	-0,71271	1													
pH	0,178953	0,067109	-0,01112	-0,17367	-0,17712	-0,46024	-0,44441	-0,23039	0,810135	-0,69776	1												
PESOACIN	-0,62591	0,622921	0,608014	-0,54481	0,660417	-0,18938	0,696337	-0,78562	-0,66296	0,48296	-0,25175	1											
esograppo	-0,05623	0,207962	0,166756	-0,67946	0,376854	0,059923	0,312396	-0,57083	-0,33239	0,168037	0,004025	0,634989	1										
Antociani	0,117019	-0,20921	0,092408	-0,39152	-0,29223	0,184553	0,157576	0,238901	-0,1625	0,115019	-0,08151	-0,00299	0,459961	1									
Polifenoli	-0,06898	-0,0241	0,126348	-0,47742	-0,04922	0,176912	0,478068	-0,04519	-0,55856	0,454633	-0,37535	0,390353	0,600877	0,826507	1								
produttivi	-0,58509	0,620743	0,701594	-0,74752	0,663088	-0,32401	0,620906	-0,879	-0,29003	0,268931	0,141889	0,876772	0,622297	0,045467	0,271753	1							
spessore	-0,30742	-0,28223	-0,40918	0,19755	0,324909	0,359066	-0,01214	-0,10043	-0,24402	0,293408	-0,21577	0,084644	-0,09446	-0,55054	-0,35782	-0,17572	1						
NDVldron	-0,64569	0,444039	0,435641	-0,37701	0,786683	0,277136	0,651848	-0,59724	-0,80831	0,715841	-0,5183	0,805897	0,343333	-0,04007	0,335089	0,616223	0,20356	1					
NDVIsent2	-0,56742	0,168047	0,19716	-0,30731	0,685791	0,479297	0,643772	-0,39919	-0,8468	0,814176	-0,65868	0,677258	0,308506	0,006215	0,39576	0,393574	0,370469	0,938022	1				
NDVIsent12	-0,77377	0,381626	0,487946	-0,38409	0,756988	0,240752	0,724567	-0,54161	-0,83194	0,772855	-0,54982	0,810582	0,303881	-0,02304	0,333032	0,612789	0,262102	0,971827	0,91469	1			
NDVIsent16	-0,60789	0,218409	0,418174	-0,44461	0,832392	0,428879	0,449609	-0,48279	-0,42768	0,500039	-0,23172	0,534637	0,29638	-0,00474	0,046297	0,516866	0,207509	0,779587	0,71769	0,765504	1		
NDVIport	-0,7228	0,672394	0,79001	-0,34809	0,545689	-0,13	0,633291	-0,54069	-0,71321	0,418654	-0,34887	0,830759	0,296645	0,040641	0,327161	0,720428	-0,07012	0,840096	0,66619	0,859375	0,595761	1	

Figura 21: matrice di correlazione 2022

Segue la tabella con il livello di significatività del 2022 (fig.22). Per la lettura di questa tabella vedi descrizione della figura 20.

Nel 2022 la significatività risulta molto importante per i valori di vigoria misurati da tutti i sensori, con valori di correlazione superiori al 2021. Il peso acino ha una forte correlazione positiva con la produttività questo indica che all'aumentare della resa aumenta anche il peso dell'acino. La produttività al contrario è fortemente correlata negativamente con l'indice di stress idrico, ad indicare che all'aumentare dello stress della pianta, diminuisce la produttività della stessa. La cinetica di crescita del germoglio risulta essere ben correlato positivamente con l'indice NDVI, a maggior vegetazione corrisponde anche una più rapida crescita del germoglio.

c	lea to lengt	31_05_2	shoots for p	Sla/prod	growth ki	TDR medi	fert reale	CWSI	Brix	AT	pH	peso acino	esograppo	Antociani	Polifenoli	produttivi	spessore	Vldrone2	DVIsent2	IVIsent12	IVIsent16	IVIport 31	
Shoot leaf	1																						
Shoot leaf ns																							
n shoots f ns	*																						
Sla/prod ns	ns	ns																					
Shoot gro ns	ns	ns	ns																				
TDR medi ns	ns	ns	ns	ns																			
fert reale *	ns	ns	ns	*	ns	ns																	
CWSI ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns																
Brix ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns																
AT ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	*														
pH ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	*													
PESOACIN *	ns	*	ns	*	ns	*	**	*	*	ns	ns												
esograppo ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*												
Antociani ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns											
Polifenoli ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**										
produttivi *	ns	*	*	*	*	ns	***	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns								
spessore ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns							
NDVldron *	ns	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	**	*	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns						
NDVIsent2 *	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	***	**	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	***					
NDVIsent12 **	ns	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	**	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	***	***				
NDVIsent16 *	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	*	***			
NDVIport *	*	*	**	ns	*	ns	ns	*	*	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns	***	*	***	*		

Figura 22: tabella di significatività 2022

4.4 Analisi di regressione

Di seguito per le correlazioni più significative vengono riportate alcuni grafici di regressione lineare per valutare più nel dettaglio se la relazione è dipendente o indipendente dall'effetto stagionale. Dall'analisi dei dati, è inoltre possibile considerare il livello di stabilità della relazione tra le diverse annate di studio per valutare se sia possibile utilizzare la stessa relazione indipendentemente dalla stagione.

Produttività – peso acino

Una delle relazioni più interessanti risulta essere quella tra la produttività e il peso dell'acino (fig.23). sia la correlazione del 2021 che quella del 2022 risultano essere positive anche se quella del 2021 risulta essere più debole, all'aumentare della produttività aumenta leggermente il peso dell'acino questa relazione risulta essere stabile in entrambe le annate e quindi la regressione risulta indipendente dall'effetto stagionale.

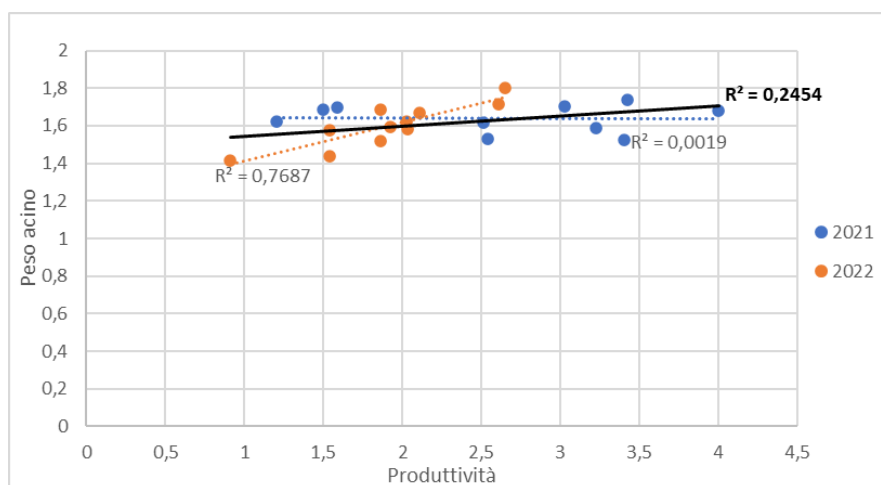


Figura 23: grafico a dispersione (produttività vs peso acino)

CWSI – produttività

Un altro esempio è rappresentato nella figura 24. Questo grafico mette in relazione l'indice di stress idrico della pianta CWSI con la produttività della stessa. In questo caso entrambi le relazioni sono correlate negativamente tra loro quindi all'aumentare dello stress diminuisce la resa. La regressione del 2021 risulta più debole rispetto a quella del 2022 e vi

è una separazione tra la correlazione del 2021 e quella del 2022. Questo sta ad indicare che è presente un effetto stagionale: a parità di CWSI nel 2022 ho avuto una produttività inferiore.

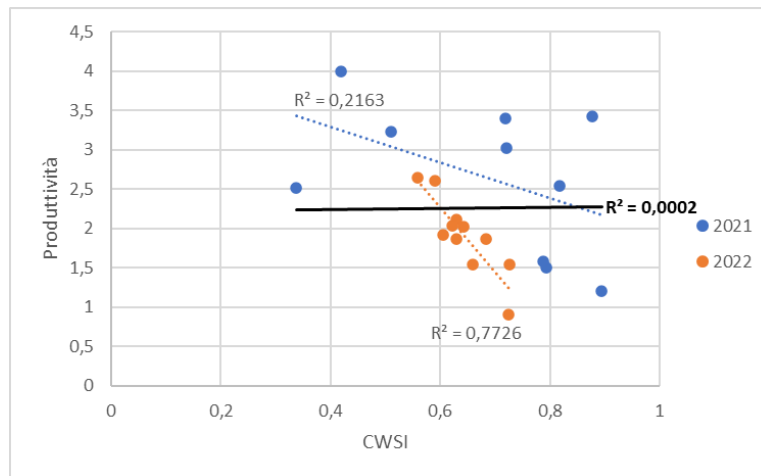


Figura 24: grafico a dispersione (CWSI vs produttività)

NDVI prossimale – peso acino

La figura 25 dimostra la correlazione presente tra indice NDVI rilevato da sensore prossimale e il peso dell'acino. La correlazione risulta essere più forte nel 2022 rispetto al 2021, ma l'NDVI risulta correlato in modo stabile nel tempo con il peso dell'acino, all'aumentare del vigore, aumenta il peso della bacca.

Lo stesso vale per l'indice di NDVI rilevato dal drone in relazione con il peso dell'acino, vedi figura 26.

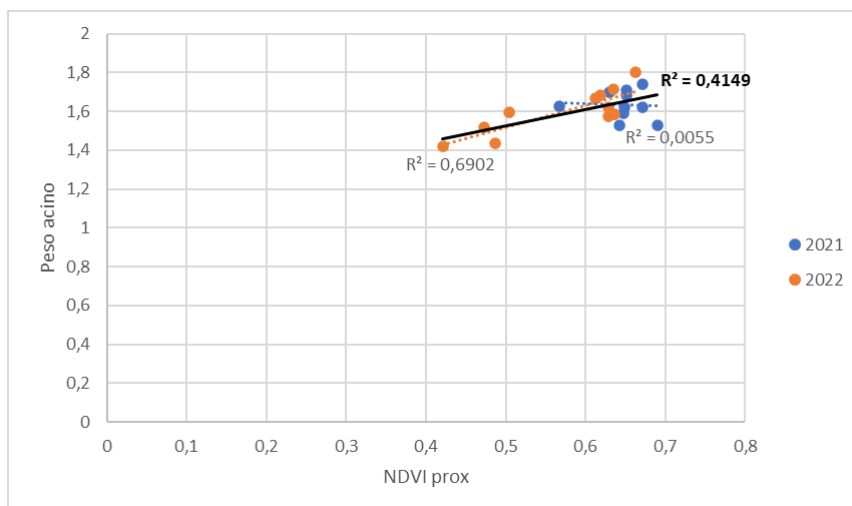


Figura 25: grafico a dispersione (NDVI da sensore prossimale vs peso dell'acino)

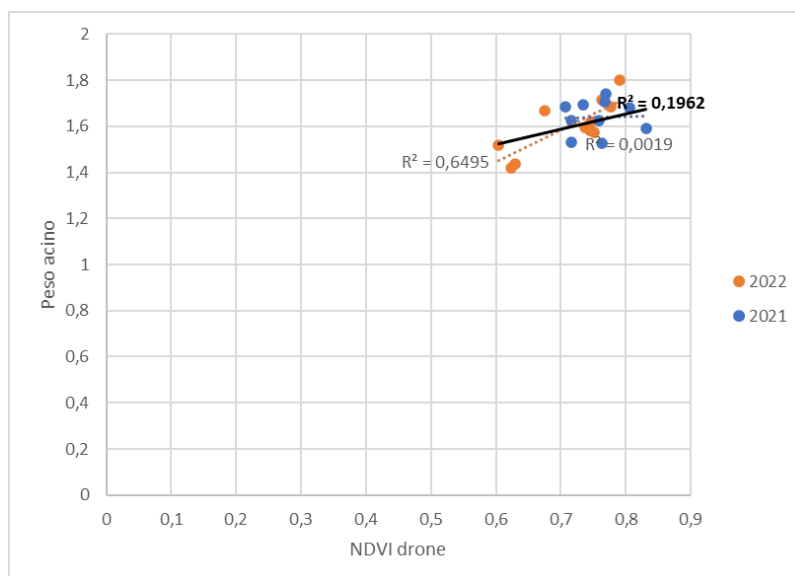


Figura 26: grafico a dispersione (NDVI da sensore sul drone vs peso dell'acino)

NDVI prossimale e del drone - °Brix

Le correlazioni tra grado zuccherino e NDVI prossimale risultano essere negative in entrambe le annate, all'aumentare del vigore vegetativo diminuisce il grado zuccherino (fig.27) A parità di indice NDVI il quantitativo di zuccheri risulta essere maggiore nel 2022 rispetto al 2021, questo dovuto ad un effetto stagionale cioè dalle alte temperature che hanno caratterizzato l'annata 2022. Questo parametro non risulta quindi stabile nel tempo.

Lo stesso vale per l'NDVI determinato dal sensore del drone. Anche questa relazione risulta essere molto simile (fig.28).

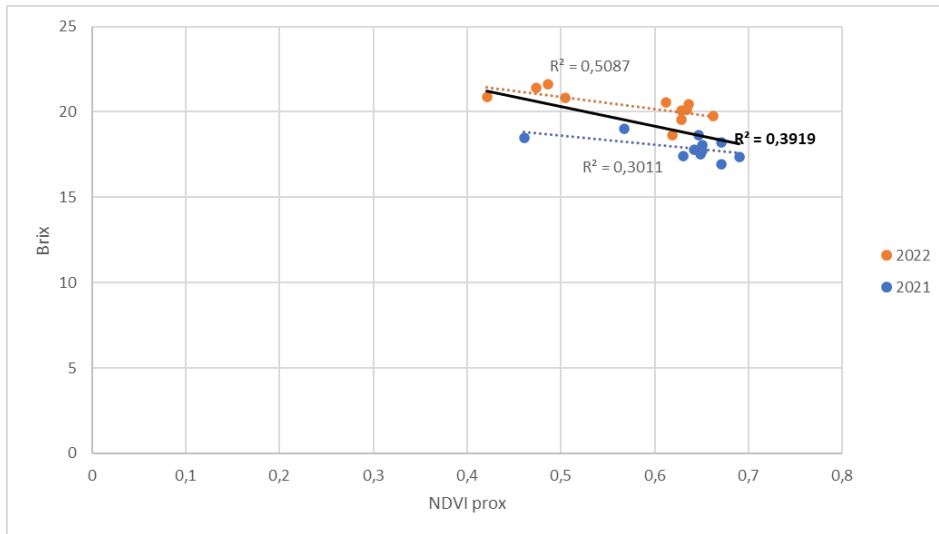


Figura 27: grafico a dispersione (NDVI da sensore prossimale vs °Brix)

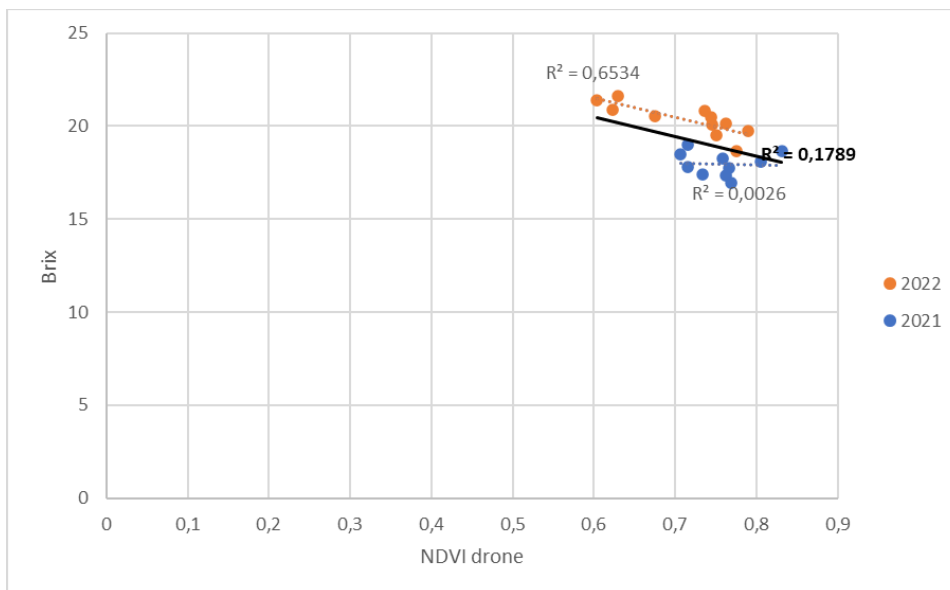


Figura 28: grafico a dispersione (NDVI da drone vs °Brix)

NDVI Sentinel2

Per quanto riguarda le correlazioni dei vari parametri con l'NDVI rilevato dal satellite, per tutti i parametri risulta esserci una netta separazione tra le due annate. Alcuni esempi in figure: 29, 30, 31 e 32. Dove ad un maggior vigore corrisponde una maggiore acidità totale ma un minor contenuto zuccherino. Inoltre all'aumentare di vigore aumentano anche lo spessore della buccia e il peso dell'acino.

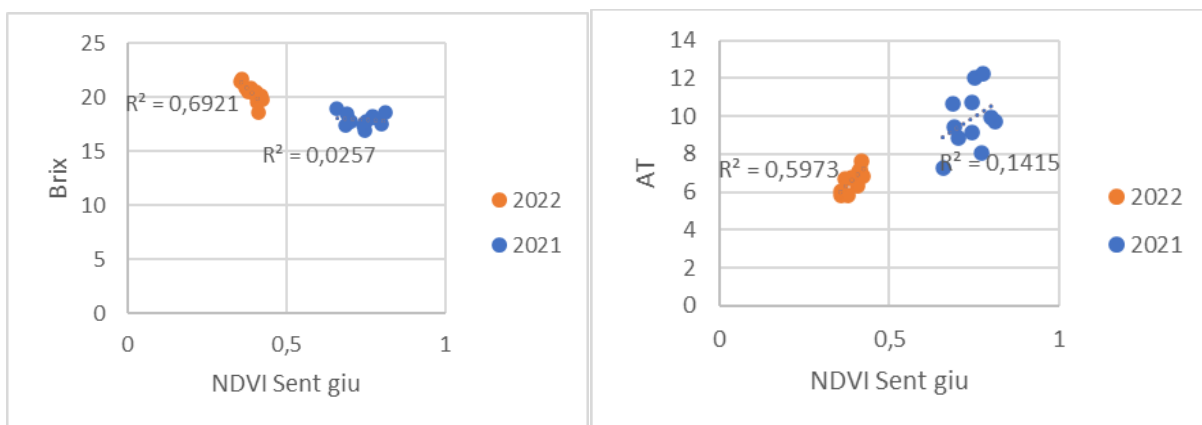


Figura 29 e 30: rispettivamente grafico a dispersione NDVI da Sentinel2 con Brix a sinistra e con acidità totale a destra

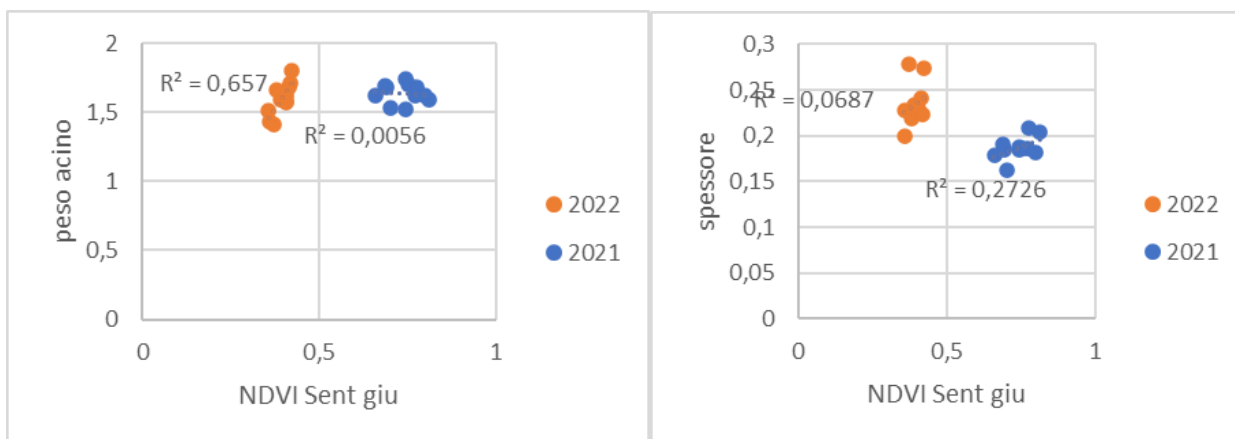


Figura 31 e 32: rispettivamente grafico a dispersione NDVI da Sentinel2 con peso dell'acino a sinistra e con spessore della buccia a destra

4.5 Analisi delle Componenti Principali (PCA)

È stata elaborata una analisi multivariata delle componenti principali (PCA) con tutti i parametri analizzati e tutte le zone del vigneto in esame (fig.33) per valutare nell'insieme quali siano state le variabili che hanno maggiormente determinato le differenze osservate e come le zone ad alto o basso vigore abbiano influenzato tali comportamenti.

La prima componente principale (asse orizzontale) spiega il 45,9% della variabilità ed invece la seconda componente principale (asse verticale) spiega il 16,3 % della varianza osservata. Quindi più del 60% della variabilità misurata è possibile spiegarlo da queste due componenti principali. Di conseguenza, si può osservare come i campioni raccolti all'interno delle zone a bassa vigoria (2, 3 e 4) si trovano più a sinistra in opposizione alle zone 9, 10 e 11 che come abbiamo visto anche dalle mappe tematiche, risultano essere le zone con vigoria maggiore, che invece popolano la zona più a destra dei quadranti. Analizzando la direzione e la lunghezza dei vettori (freccie) in relazione alle componenti principali, si può osservare come i parametri relativi allo stress idrico (CWSI), al grado zuccherino (°brix) e al contenuto di antociani puntino verso questi campioni a bassa vigoria lungo la PC1. Al contrario i vettori rappresentanti gli indici di NDVI puntano verso le zone a maggior vigore.

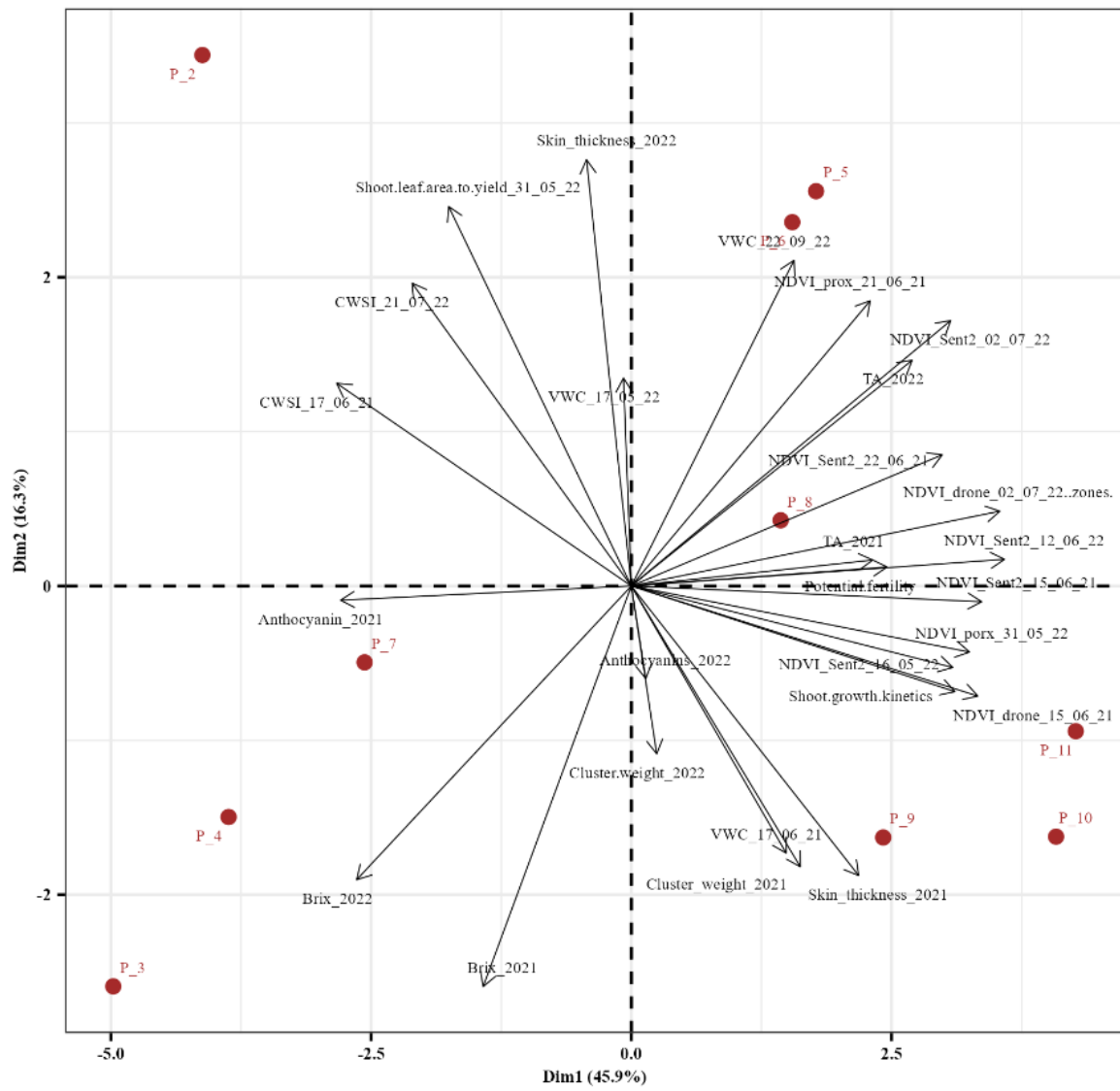


Figura 33: analisi multivariata delle componenti principali

5. CONCLUSIONI

Il cambiamento climatico che stiamo vivendo sta rendendo sempre più complicata l'adozione di tecniche colturali standardizzate. L'agricoltura infatti necessita di un continuo cambiamento ed adattamento alle condizioni climatiche esistenti. Questo richiede uno sforzo da parte dell'agricoltore sia per quanto riguarda le conoscenze rispetto alle nuove tecnologie e sia per quanto riguarda la loro applicazione.

La viticoltura di precisione ha lo scopo di rendere l'agricoltura più sostenibile perché agisce in modo mirato a seconda delle esigenze del vigneto ma anche di rendere l'agricoltura adatta al tipo di coltura e al luogo in cui essa viene coltivata.

Il presente lavoro di ricerca ha indagato sull'esistenza di un eventuale effetto stagionale su molti parametri misurati tramite sensori prossimali e sensori remoti in due annate differenti: 2021 e 2022. La stagione 2022 è infatti stata caratterizzata da temperature molto alte e la quasi totale assenza di precipitazioni, lo scopo è stato quindi quello di valutare se le correlazioni tra diversi parametri fossero attribuite all'effetto annata calda oppure se fossero delle correlazioni stabili nel tempo e dalle quali fosse possibile ricavare delle mappe di prescrizione. Le quali potrebbero aiutare l'agricoltore a gestire in modo diversificato, mirato e maggiormente sostenibile il vigneto.

Dalle mappe tematiche costituite a partire da diversi parametri sia prossimali che remoti è emerso che non sembra esserci un effetto stagionale considerevole in quanto le zone che nel 2021 presentavano una bassa vigoria, un più alto valore di stress idrico e un grado zuccherino maggiore, risultano essere le medesime nell'anno 2022. Un effetto stagionale è stato osservato analizzando i valori di grado zuccherino e pH delle uve alla raccolta risultati superiori nel 2022 rispetto al 2021 e il contrario per l'acidità totale.

Da questo studio inoltre è emerso che il parametro gli indici di vigoria NDVI misurati da drone, da sensore prossimale e da Sentinel2 risultano molto correlati tra loro, questo sta ad indicare che i diversi sensori sono paragonabili e coerenti in entrambe le annate.

L'effetto stagionale lo vediamo principalmente con le correlazioni tra i sensori di indice NDVI e il grado zuccherino, l'acidità totale ed il peso dell'acino. In quanto i valori dell'anno 2022 risultano essere influenzati dalle alte temperature che hanno caratterizzato l'estate.

Dallo studio si evince che alcune relazioni rimangono stabili nel tempo anche in annate più calde e siccitose, ma altre invece sono influenzate dall'andamento climatico. Questo porta

alla consapevolezza che servirebbero più annate di studio per valutare se l'annata 2022 è stata veramente particolare e alla consapevolezza che le temperature medie in aumento rendono necessario l'adattamento e l'utilizzo di tecnologie di precisione per fare in modo che la resa futura non sia minore. L'adozione di nuove tecnologie sappiamo essere ancora troppo poco diffusa e ancora molto onerosa. Per questo motivo per molte aziende medio-piccole risulta essere una spesa ingente e non sostenibile. L'augurio è che in un futuro breve queste nuove tecnologie siano accessibili alla maggior parte degli agricoltori.

6. BIBLIOGRAFIA

- Abioye, E. A., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., Buyamin, S., Ishak, M. H. I., Abd Rahman, M. K. I., ... & Ramli, M. S. A. (2020). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105441.
- Barili B., Lisci R., Rimediotti M., Sarri D., Tirrò G., Vieri M., Bo A. (2022). La meccanizzazione dell'olivo e della vite in Regione Liguria.
- Battisti, D. S. & Naylor, R. L. 2009 Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science* 323, 240 –244.
- Bisson L.F., Waterhouse L.A., Ebeler E.S., Walker M.A. & Lapsley J.T. (2002). The present and future of the international wine industry. *Nature* 418, 696-699
- Campos J., Garcia-Ruiz F., Gil E. (2021). Assessment of Vineyard Canopy Characteristics from Vigour Maps Obtained Using UAV and Satellite Imagery.
- Carnevali P., Cricco J., Toninato L., Brancadoro L., 2013 - Viticoltura di Precisione: Obiettivi e Applicazioni Sito-Specifiche, *VigneVini* n.1/2 gennaio/febbraio 2013
- Castagnoli, A., & Dosso, P., (2001). Viticoltura assistita da satellite. *Informatore Agrario*, 57(18), 77-82.
- Castrignanò, A. (2015). 11 Irrigazione di precisione: principi e applicazione
- Comba, L., Biglia, A., Ricauda Aimonino, D., & Gay, P. (2018). Droni: Efficace Contributo alla Moderna Agricoltura di Precisione. In *LA MECCANICA AGRARIA OGGI* (pp. 231-238). Cleup.
- Do"ll, P. 2002 Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Clim. Change* 54, 269 –293.
- Gornall J., Betts R., Burke E., Clark R., Camp J., Willett K., Wiltshire A. (2010). Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Review Malhi, G. S., Kaur, M., Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. Sustainability*, 13(3), 1318.
- Holton, J. R., Curry, J. A. & Pyle, J. A. 2003 *Encyclopedia of atmospheric sciences*.

Maimaitiyiming M., Sagan V., Sidike P., Maimaitijiang M., Miller A. and Kwasniewski M. (2020). Leveraging Very-High Spatial Resolution Hyperspectral and Thermal UAV Imageries for Characterizing Diurnal Indicators of Grapevine Physiology.

Myers, S. S., Smith, M. R., Guth, S., Golden, C. D., Vaitla, B., Mueller, N. D., Dangour, A.D., Huybers, P., (2017). Climate Change and Global Food Systems: Potential Impacts on Food Security and Undernutrition. *Annual Review of Public Health*, 38:259-77.

Olesen, J. E. & Bindi, M. 2002 Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *Eur. J. Agron.* 16, 239 –262.

Precision Viticulture (2009). Tools to measure and manage vineyard variability. University of Aberdeen

Radočaj, D., Jurišić, M., & Gašparović, M. (2022). The Role of Remote Sensing Data and Methods in a Modern Approach to Fertilization in Precision Agriculture. *Remote Sensing*, 14(3), 778.

Rijad Sarić, Viet D. Nguyen, Timothy Burge, Oliver Berkowitz, Martin Trtílek, James Whelan, Mathew G. Lewsey, and Edhem Čustović. Applications of hyperspectral imaging in plant phenotyping (*Trends in Plant Science*, March 2022, Vol. 27)

Schmidhuber, J., Tubiello, F. N. (2007). Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19703-19708

Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I. P., Lešić, V., Lemić, D. (2021). The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests.

Smith R.J., Baillie J.N., McCarthy A.C., Raine S.R. & Baillie C.P. (2010). Review of precision irrigation technologies and their application. A report for National <program of Sustainable Irrigation

Stephenson D.B. (2008) Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events. Published by Cambridge University

Stott, P. A., Stone, D. A. & Allen, M. R. (2004) Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* 432, 610 –614.

Tayari, E., Jamshid, A. R., & Goodarzi, H. R. (2015). Role of GPS and GIS in precision agriculture. *Journal of Scientific Research and Development*, 2(3), 157-162.

Taylor j., Bates T. (2021). Comparison of different vegetation indices for calibrating proximal canopy sensors to grapevine pruning weight.

Yu r., Brillante L., Torres N & Jurtural K (2021). Proximal sensing of vineyard soil and canopy vegetation for determining vineyard spatial variability in plant physiology and berry chemistry.

7. SITOGRAFIA

- Global Drought Observatory: https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/news/GDO-EDODroughtNews202208_Europe.pdf
- Nazioni Unite: <https://unric.org/it/che-cosa-sono-i-cambiamenti-climatici/#:~:text=Per%20%E2%80%9Ccambiamenti%20climatici%E2%80%9D%20si%20intendono,tramite%20variazioni%20del%20ciclo%20solar>
- Copernicus Climate Service: <https://climate.copernicus.eu/seasonal-review-europes-record-breaking-summer>
- Copernicus Sentinel2: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Introducing_Sentinel-2
- ARPAV agenzia regionale per la prevenzione e protezione ambientale del veneto: <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/climatologia/dati/estate-2021> ; <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/agrometeo/file-e-allegati/bollettino-mese/2022/sintesi-2022/Estate%202022.pdf>
- Agriregione Europa: <https://agriregionieuropa.univpm.it/it/content/article/31/21/i-cambiamenti-climatici-italia-quadro-attuale-scenari-gap-conoscitivi>
- IlMeteo: <https://www.ilmeteo.net/notizie/attualita/clima-2022-estate-record-europa-mai-cosi-caldo-siccita.html>
- CNR IBE Climate Service: <https://drought.climateservices.it/siccita/>
- Coldiretti: <https://www.coldiretti.it/economia/siccita-il-2022-lanno-piu-caldo-di-sempre-45-pioggia>
<https://www.coldiretti.it/economia/maltempo-e-la-peggior-estate-del-decennio>