



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI
RISORSE NATURALI E AMBIENTE

Laurea Magistrale in Scienze e tecnologie agrarie

Sviluppo di modelli 3D di chiome di vite
utilizzando la *Structure from Motion* per la stima
di parametri biometrici e la ripartizione della
biomassa

Relatore

Dott. Franco Meggio

Correlatore

Dott. Francesco Marinello

Laureando

Stefano Chin

Matricola n.

1155301



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI
RISORSE NATURALI E AMBIENTE

Laurea Magistrale in Scienze e tecnologie agrarie

Sviluppo di modelli 3D di chiome di vite
utilizzando la *Structure from Motion* per la stima
di parametri biometrici e la ripartizione della
biomassa

Relatore

Dott. Franco Meggio

Correlatore

Dott. Francesco Marinello

Laureando

Stefano Chin

Matricola n.

1155301

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

INDICE

1	RIASSUNTO.....	7
2	ABSTRACT	9
3	INTRODUZIONE	11
3.1	La Viticoltura mondiale e nazionale.....	11
3.2	Proximal sensing e possibili applicazioni agricole	12
3.3	<i>Structure from motion</i>	14
3.4	<i>Growth Analysis</i> e dati biometrici di crescita.....	18
4	SCOPO DEL LAVORO.....	23
5	MATERIALI E METODI	25
5.1	Sito di studio.....	25
5.2	Varietà di vite e portainnesto.....	26
5.3	Tecnica di rilievo fotografico, organizzazione e programmazione	28
5.3.1	Tecnica di rilievo fotografico	28
5.3.2	Organizzazione e tempistiche dei rilievi fotografici.....	30
5.3.3	Operazioni colturali	31
5.4	Ricostruzione dei modelli e utilizzo dei software di modellazione 3D.....	33
5.4.1	<i>Workflow</i> e organizzazione.....	33
5.4.2	Protocollo e parametri	36
5.5	Estrazione e quantificazione dei dati dai software	38
5.5.1	<i>Agisoft Photoscan</i> e conteggio numero di punti delle <i>Point Cloud</i>	38
5.5.2	Misure biometriche utilizzando <i>CloudCompare</i>	40
5.6	Misure biometriche di accrescimento, campionamenti e misurazioni della biomassa ...	42
5.7	Elaborazione dei dati estratti dalle ricostruzioni	47
5.7.1	Elaborazione dati del numero di punti e misure di accrescimento	47
5.7.2	Misure biometriche.....	53
5.7.3	<i>Growth analysis</i>	53
6	RISULTATI e DISCUSSIONE.....	57
6.1	Fotografie, qualità immagini e rilievo fotografico	57
6.2	Modelli 3D e tecnica di ricostruzione.....	60
6.3	Misure di crescita e campionamenti	64
6.4	Conta dei punti	65
6.5	Stime Aree fogliari e Lunghezze germogli.....	68

6.6	Relazione fra punti verdi, aree fogliari e lunghezze dei germogli	73
6.7	Misure biometriche	76
6.8	Stima pesi e relazioni con numero di punti.....	79
6.8.1	Stima peso secco chioma e relazione con punti verdi.....	79
6.8.2	Stima peso secco ceppo, tralci lignificati e relazione con punti marroni-bruni.	83
6.8.3	Stima peso secco grappolo e relazione con numero di punti grappolo.	84
6.9	Ripartizione della biomassa	86
6.10	Analisi di crescita ed indici derivati.....	90
7	CONCLUSIONI	97
8	BIBLIOGRAFIA	99

1 RIASSUNTO

La coltivazione della vite, che riveste un ruolo chiave nell'economia agraria italiana, si presenta in continua evoluzione ed espansione nelle aree maggiormente vocate della nostra penisola. In un'ottica di miglioramento delle produzioni, risulta sempre più importante la raccolta di dati riguardanti lo stato vegetativo della coltura. Questo deve avvenire in maniera precisa, economica e possibilmente operando da remoto o attraverso procedure sempre più automatizzate. Una possibilità è rappresentata oggi dalla fotogrammetria digitale ed in particolare dalla *Structure from Motion* (SfM), una tecnica di *proximal sensing* per ottenere ricostruzioni tridimensionali (3D) ad alto dettaglio.

In questo lavoro di tesi la tecnica della SfM è stata utilizzata per creare modelli 3D di chiome di vite in differenti stadi fenologici di sviluppo. Lo scopo della tesi è stato quello di valutare la possibilità di stimare in modo efficace le dimensioni e lo sviluppo delle piante di vite integrando modelli 3D e misure biometriche, indici di accrescimento e dinamiche di ripartizione della biomassa eseguite durante la stagione. A partire dai modelli digitali in 3D ad elevata risoluzione, sono state estrapolate le dimensioni biometriche e quantificati il numero di punti che compongono le ricostruzioni delle piante che sono state, quindi, messe in relazione con le misure di accrescimento e di ripartizione della biomassa tra i diversi compartimenti: foglie, tralci e grappoli rilevate durante la stagione vegetativa.

Sono stati così sviluppati dei modelli per la stima degli accrescimenti della vite a partire dai modelli 3D proponendo un protocollo di analisi utile a quantificare le misure biometriche delle chiome.

In conclusione, si può affermare che integrando la tecnica della SfM con le misure di accrescimento è possibile stimare con buona accuratezza lo sviluppo biometrico della vite e la ripartizione della biomassa.

2 ABSTRACT

Grapevine cultivation plays a key role in the Italian agricultural economy. Moreover, the cultivation is constantly expanding and developing in the most suited areas of our country. In order to improve production, it is important to collect data concerning the vegetative state of the crop. This must be done in an accurate, economic way. Furthermore, it is needful to operate from remote or through an automated process. Now, a possible way is represented by digital photogrammetry and inter alia by Structure from Motion (SfM), a proximal sensing technique designed to obtain high detail 3D reconstructions.

In this thesis the SfM technique was used to create three-dimensional models of grapevine canopy. These 3D models were created at several different stages of plant development. The aim of the thesis is to evaluate the efficiency of grapevine size and development estimations based on 3D models, biometric measurements, growth indexes and biomass partitioning performed during the vegetative year.

The biometric dimension of the model and the number of points were quantified from high-resolution reconstructions. Then, these data were related to the growth measures and the biomass partitioning values of plant organ, such as leaves, shoots and grapes.

In this way it was possible to obtain models that were used to estimate the growth of grapevines starting from 3D reconstructions. Moreover, a method capable to quantify the biometric measures of canopy was defined.

In conclusion, it can be said that by integrating the SfM technique with the growth measures it is possible to estimate the biometric development and the distribution of the biomass of the plant in a good way.

3 INTRODUZIONE

3.1 La Viticoltura mondiale e nazionale

La vite è tra le colture specializzate maggiormente diffuse a livello mondiale con una superficie globale coltivata di 7.516.000 ettari nel 2016 (OIV, 2017) di cui circa 3.300.000 di ettari in Europa. (Corazzina, 2018; OIV, 2017a). I principali paesi produttori a livello mondiale sono Spagna (975.000 ha), Cina (847.000 ha), Francia (785.000 ha) ed Italia (690.000) (OIV, 2017b).

Sempre a livello mondiale, nel 2017, 13 varietà occupano il 33% della superficie totale, mentre le prime 33 varietà sono coltivate sul 50% della area complessiva ad indicare una viticoltura altamente specializzata e sempre più internazionale.

Nell'anno 2017 le prime 3 varietà mondiali sono il Kyoho (varietà da tavola), il Cabernet-Sauvignon (varietà da vino) e la Sultanina, impiegata come uva da tavola, uva passa e anche per produrre vino. Rispettivamente queste 3 varietà sono coltivate su 365.000, 340.000 e 300.000 ettari. Il Cabernet-Sauvignon risulta essere la varietà più internazionale e coltivata sul 5% della superficie viticola mondiale (OIV, 2017c).

Per quanto riguarda la produzione mondiale di uva, per tutti i tipi di utilizzo, nel 2016 è stata pari a 7,8 Mt, dei quali 39% prodotti in Europa, 34% in Asia e il 18% in America. Nel 2015 la produzione era suddivisa per il 35,8% in uva da consumo fresco, l'8% in uva da essiccazione, il 47,3% uva da vino e il 5,5% in uva da succhi e mosti (OIV, 2017c).

L'Italia detiene il primato mondiale per quanto riguarda la produzione di vino, che nel 2016, se sommata alla produzione di mosti, ha raggiunto i 51,615 milioni di ettolitri.

Nel 2017 la produzione mondiale ha subito un flessione, principalmente per il calo della produzione europea a causa di condizioni meteorologiche avverse, basti ricordare i danni subiti alla viticoltura europea in seguito alla gelata tardiva di fine aprile 2017. In Italia la produzione di vino e mosto stimata è di 46,1 milioni di ettolitri (OIV, 2017d).

Considerando il commercio mondiale, nel 2016 si è registrato un volume di vino venduto pari a 104 milioni di ettolitri, per un valore stimato di 29 miliardi di euro (OIV, 2017b).

L'Italia nel 2016 risulta essere il secondo esportatore mondiale in termini di volume, dietro alla Spagna, con un volume pari a 20,6 milioni di ettolitri. Anche valutando il valore dell'export l'Italia si posiziona seconda, fatturando 5,6 miliardi di euro, mentre la Francia è leader mondiale (OIV, 2017b).

Infine, analizzando l'estensione della superficie vitata nel nostro paese, le regioni che si posizionano ai vertici sono: Sicilia, 99.221 ha, Veneto, 86.597, Puglia, 86.541 ha e Toscana, 58.225 ha (Corazzina, 2018).

Considerando i dati appena presentati, si nota come la viticoltura riveste un ruolo principale nell'economia agraria di alcune aree vocate ed è una delle colture specializzate maggiormente diffuse su scala globale, presente in tutti i continenti. A causa di queste enormi estensioni vitate si sta diffondendo l'esigenza di sviluppare sistemi di monitoraggio delle condizioni agronomiche della coltura, in particolare in un'ottica di monitoraggio e pianificazione delle produzioni. Infatti, prevedere in maniera accurata la resa produttiva su larga scala è una delle sfide più difficili per la viticoltura moderna. In risposta a questa necessità si stanno diffondendo nuovi sistemi di *proximal e remote sensing*.

3.2 Proximal sensing e possibili applicazioni agricole

Con l'avvento dell'agricoltura di precisione si è reso necessario implementare e migliorare i sistemi di raccolta dati, in modo da permettere un monitoraggio costante delle dinamiche di sviluppo, delle condizioni ambientali di crescita e delle lavorazioni. Un monitoraggio costante e capillare permette, infatti, di migliorare le condizioni di crescita per le varie colture e di programmare in maniera tempestiva le operazioni colturali, ottimizzando il bilancio tra input e output, e quindi migliorare l'efficienza e la sostenibilità della filiera produttiva.

Proprio in un'ottica di agricoltura di precisione vengono classificate due categorie di metodi e strumenti per il rilevamento di dati. La prima comprende i metodi di telerilevamento o *remote sensing*, mentre la seconda racchiude le tecniche del *proximal sensing* o rilievi prossimali. Entrambe le categorie si avvalgono di sensori cioè di sistemi in grado di percepire e quantificare "un segnale proveniente da un oggetto o dalla superficie da rilevare e di registrarlo." (Casa et al., 2016). Proprio la distanza tra il sensore e l'oggetto

del rilevamento risulta essere il principio discriminante per distinguere il telerilevamento dal rilievo prossimale. I sensori prossimali sono trasportati dalle macchine agricole o stazionano vicino all'oggetto (ad una distanza tipicamente inferiore ai 2 m), mentre si parla di sensori remoti nel caso questi siano montati su sistemi aerotrasportati, quali ad esempio droni, aerei oppure su satelliti (Casa et al., 2016).

Alle due categorie appartiene una vasta gamma di sensori che operano per via passiva, ossia misurando la radiazione elettromagnetica e come questa interagisce con l'oggetto da rilevare. A loro volta questi sensori si possono suddividere in funzione del tipo di onda che sfruttano. Quindi si distinguono quelli che operano nel dominio ottico e quelli che operano nel dominio delle microonde (Casa et al., 2016).

In agricoltura i principali campi di impiego dei due sistemi di rilevamento sono il monitoraggio della *canopy* delle colture e il monitoraggio del suolo e delle sue dinamiche. Nello specifico il monitoraggio della *canopy* vegetale può essere eseguito in più modi e con differenti sensori.

Nel caso del telerilevamento ci sono molteplici esempi, in primo luogo alcune tecniche richiedono l'utilizzo di sensori o camere multispettrali ed iperspettrali. In questi casi i sensori forniscono dati riguardo la radianza spettrale dell'oggetto, cioè il modo in cui la radiazione solare interagisce con il corpo che colpisce. La radiazione incidente può subire, infatti, 3 destini: assorbita, riflessa oppure trasmessa. I sensori restituiscono un valore descrittivo dell'interazione onda-corpo per precise porzioni di lunghezza d'onda chiamate bande. Grazie a sensori in grado di registrare informazioni su più bande dello spettro elettromagnetico (multispettrali) è possibile calcolare diversi indici di vegetazione, quali ad esempio l'indice NDVI, oppure il rapporto $rNIR/rRED$, che non sono altro che formulazioni matematiche tra bande.

Altre tecniche di telerilevamento si basano sull'utilizzo di immagini RGB per la ricostruzione 3D dello scenario ripreso. Un'ulteriore tecnica prevede l'utilizzo di sensori LIDAR (Light detection and ranging), che utilizzano impulsi laser per calcolare la distanza tra il sensore e l'oggetto stesso, in modo tale da ricreare mappe 3D molto accurate. Anche il sistema RADAR ed il derivato SAR possono essere impiegati in maniera molto simile al LIDAR per ottenere mappe 3D delle chiome vegetali da cui si possono ricavare dati di fenologia e parametri biofisici. Infine, un ulteriore sistema in via di diffusione grazie alla

presenza sempre maggiore di droni è l'utilizzo di termocamere per monitorare le temperature delle colture (Casa et al., 2016).

Tra le pratiche di rilievo prossimale possiamo citare le procedure che si avvalgono di sensori utilizzati ad una distanza inferiore ai 2 metri dall'oggetto che si vuole monitorare. Alcuni di questi sensori possono essere sensori ottici portatili multispettrali, che funzionano nella stessa maniera di quelli impiegati nel *remote sensing*. Inoltre, vi sono fluorimetri che misurano la fluorescenza delle piante oppure misuratori del grado di maturazione dei frutti a partire da colorazione e riemissione di fasci di luce specifici (Priori et al., 2016).

Anche per quanto riguarda il rilievo prossimale possono essere impiegati vari metodi di rilevamento delle *canopy* delle piante. Innanzitutto, si può utilizzare la tecnica della *Structure from Motion*, che prevede la creazione di modelli 3D ad alta risoluzione a partire da immagini RGB dell'oggetto, scattate da vari punti di vista. Altre tecniche prevedono l'utilizzo di differenti sensori interconnessi come ad esempio Kinect® di Microsoft, che unisce una telecamera RGB, un emettitore infrarosso e una telecamera IR in grado di percepire il segnale di ritorno dell'infrarosso e ricostruire la profondità delle immagini. Anche in questo caso è possibile ricreare una mappa 3D del corpo monitorato (Marinello et al., 2017). Tra le pratiche di *proximal sensing* per il monitoraggio delle chiome si può citare anche l'utilizzo di *terrestrial laser scanner*, che basandosi su una tecnica molto simile a quella della tecnologia LIDAR, sono in grado di ricreare nuvole di punti 3D. In questo modo è possibile ricostruire lo scenario circostante.

3.3 Structure from motion

La fotogrammetria è una tecnica che consente la determinazione delle misure di un oggetto a partire da due o più fotogrammi dello stesso soggetto. Più recentemente si è giunti alla creazione di modelli 3D di oggetti o strutture a partire da immagini bidimensionali. Dall'analisi fotogrammetrica di questi modelli 3D è possibile ottenere varie informazioni quali la posizione, la dimensione e le proporzioni dell'oggetto fotografato, oppure informazioni topografiche (Cleveland e Wartman, 2006).

Considerando che la fotogrammetria digitale si basa su fotografie digitali, l'accuratezza delle misure nei modelli 3D è funzione della qualità delle fotografie di partenza e della risoluzione della macchina fotografica. In particolare, fotocamere dotate di una maggior risoluzione in termini di Megapixel risultano migliori.

La *Structure from Motion* (SfM) è un processo di ricostruzione di una struttura 3D a partire da una serie di immagini riprese da vari punti di vista (Schonberger e Frahm, 2016).

Inoltre, la SfM è una tecnica di fotogrammetria a basso costo e di facile utilizzo, che permette di ottenere dati ad alta risoluzione. Anche nella SfM, come in altre tecniche di fotogrammetria, la struttura dell'oggetto è ricavata da una serie di fotografie sovrapposte e sfalsate (Westoby et al., 2012). In particolare, questa tecnica richiede un alto livello di sovrapposizione delle fotografie (Micheletti et al., 2015).

La *SfM* può essere considerata sia una tecnica di telerilevamento che di *proximal sensing*. Come precedentemente introdotto è la distanza del sensore dall'oggetto che ne determina l'appartenenza alla prima o alla seconda categoria. Quindi se la macchina fotografica è montata su un sistema aeromobile a pilotaggio remoto si parla di *remote sensing*, mentre se le immagini vengono scattate da una macchina operatrice o da un operatore a terra si può parlare di rilievo prossimale.

Nella *SfM* alcuni parametri vengono ricavati automaticamente a partire dall'insieme delle immagini sovrapposte, in particolare la posizione della fotocamera, il suo orientamento e la struttura geometrica della scena (Micheletti et al., 2015). Le posizioni nello spazio delle 3 dimensioni di ogni immagine vengono stimate attraverso l'identificazione automatica di caratteristiche di corrispondenza tra le varie foto (Westoby et al., 2012; Roncella, 2006). Le caratteristiche di corrispondenza, che spesso sono puntiformi (Roncella, 2006), vengono individuate su tutte le foto. Il numero delle caratteristiche di corrispondenza (*keypoint*) estratto da ogni foto è dipendente dalla qualità e dalla risoluzione della fotografia stessa. Inoltre, il numero di punti estratti dipende dalla distanza dall'oggetto, dall'illuminazione del set fotografico e dalla complessità dell'oggetto stesso (Westoby et al., 2012). Il requisito minimo per un *keypoint* è di essere presente su almeno 3 immagini, per questi motivi è molto difficile predire il numero di immagini necessarie per la ricostruzione di un oggetto. (Westoby et al., 2012).

Dopo aver individuato i *keypoints*, questi vengono associati tra loro utilizzando specifici algoritmi, in questo modo viene assegnata la posizione reciproca delle immagini. Successivamente, utilizzando la triangolazione, viene assegnata la posizione 3D dei punti e ricostruita la geometria della scena in un sistema di coordinate relativo (Westoby et al., 2012). In seguito viene estratta la *Sparse Point Cloud*, che rappresenta la ricostruzione 3D preliminare (Westoby et al., 2012; Roncella, 2006)

Successivamente, a partire dall' intensificazione della *Spare Point Cloud*, si ottiene una *Dense Point Cloud* che risulta essere il modello 3D dell'oggetto costituito da un elevato numero di punti.

In genere la SfM si avvale di un proprio sistema di coordinate relativo per posizionare le immagini nello spazio e per generare la scala della ricostruzione. Le coordinate relative possono essere comunque trasformate in coordinate assolute tramite apposita procedura (Westoby et al., 2012). La trasformazione non risulta sempre necessaria a meno che non si voglia lavorare su modelli orientati nello spazio reale oppure georeferenziati.

Uno dei procedimenti più critici della SfM è l'acquisizione delle fotografie di partenza. I migliori risultati si ottengono utilizzando fotocamere digitali reflex dotate di un obiettivo a fuoco fisso (Micheletti et al.,2015), in quanto la variazione del fuoco delle fotografie può causare problemi nelle ricostruzioni. Inoltre, va ricordato che le immagini non devono essere scattate dalla stessa distanza e non devono neppure rappresentare l'oggetto nella stessa scala (Micheletti et al.,2015). Importante è scattare le fotografie dal maggior numero di posizioni possibili, in modo da rilevare con maggiore accuratezza la geometria dell'oggetto (Micheletti et al.,2015).

L'aumento del numero di immagini genera modelli più accurati e densi di punti e aiuta ad eliminare dati errati (Micheletti et al.,2015).

Nel set fotografico possono essere introdotti dei target artificiali fissi, in modo da migliorare e facilitare il posizionamento delle immagini e la ricostruzione del modello 3D (Westoby et al., 2012).

Per la ricostruzione dei modelli ci si può avvalere di un elevato numero di software ed applicazioni. Alcuni esempi possono essere Autodesk 123 D Catch e Microsoft Photosynth, ma in questi casi le immagini devono essere caricate sui relativi server proprietari. In

alternativa si possono utilizzare Agisoft Photoscan, VisualSFM, Apero e Bundler, i quali processano le foto in locale (Micheletti et al., 2015; Remondino et al., 2012)

Attualmente la SfM è una tecnica che sta riscontrando sempre maggiore utilizzo, in un innumerevole numero di ambiti. I motivi del suo successo sono da imputare al basso costo della tecnica, inoltre, il progresso della qualità delle fotocamere (Westoby et al., 2012) e degli smartphone sta creando una maggiore semplicità nel rilievo fotografico. Tra le cause del successo della SfM sono da considerare anche la disponibilità di migliori soluzioni tecnologiche per l'elaborazione delle immagini, la diffusione di droni e veicoli a guida remota che possono facilitare il processo di acquisizione fotografica e la disponibilità di software liberi o relativamente economici per la ricostruzione dei modelli 3D (Micheletti et al., 2015).

I possibili campi di impiego per la SfM sono elevati e molto diversificati fra loro. La SfM viene impiegata con successo nella cartografia, nella topografia (Smith et al., 2016) e in molteplici campi delle geoscienze. Per esempio, viene applicata nel rilievo di eventi franosi o di dissesto idro-geologico (Prosdocimi et al., 2017; Yu et al., 2017), per monitorare i movimenti glaciali (Ryan et al., 2015), per il rilievo di cambiamenti in ambienti fluviali (Woodget et al., 2015) e costieri. In aggiunta questa tecnica viene utilizzata per il rilievo di edifici e monumenti in ambiente urbano-architettonico (Roncella, 2006), oppure in campo archeologico (Green et al., 2014; Sicuranza, 2013).

Per quanto riguarda l'impiego in agricoltura, la SfM è impiegata in vari campi. Innanzitutto, è stata utilizzata nel monitoraggio dei terreni agricoli, per stimarne l'erosione oppure il compattamento (Prosdocimi et al., 2017; Torresani, 2017; Kenarsari et al., 2017). In altri casi è stata utilizzata per la stima della biomassa e dei parametri di crescita di alcune colture (Cooper et al., 2017). La SfM è stata impiegata anche per fenotipizzare delle file di colture annuali direttamente in campo, stimandone anche parametri strutturali come altezza e area fogliare (Jay et al., 2015). Per quanto riguarda la viticoltura questa tecnica è stata impiegata per localizzare nello spazio 3D le gemme di alcune piante oppure per quantificare la struttura e il *LAI* della *canopy* di un vigneto (Diaz et al., 2018; Weiss e Baret, 2017).

Un aspetto da prendere in considerazione è che nella maggior parte dei casi le fotografie necessarie alla SfM sono state scattate da un drone o un veicolo aereo a guida remota. In questo modo la SfM si inserisce a pieno titolo nella grande famiglia del *remote sensing*.

In conclusione, risulta interessante notare che uno dei possibili campi di utilizzo della SfM è l'impiego dei modelli 3D nelle stime di ripartizione della biomassa e nella determinazione degli stadi di sviluppo o degli accrescimenti di varie colture. La ripartizione della biomassa nei vari comparti della pianta è un procedimento che va a stimare l'accrescimento in termini di peso secco dei vari organi vegetali durante l'annata vegetativa. In questa maniera è possibile stabilire, nei differenti periodi dell'anno, in quale apparato vegetale vengano allocati le maggiori quantità di fotosintati. Quindi, partendo da questo processo è possibile analizzare le varie componenti del ciclo vegeto-produttivo del vigneto. Il processo di *biomass partitioning* può risultare utile per comprendere la dinamica di accrescimento dei vari organi vegetali durante l'anno, in più fornisce i dati di partenza necessari ad eseguire l'analisi dell'accrescimento.

3.4 Growth Analysis e dati biometrici di crescita

La crescita si riferisce all'irreversibile processo di cambiamento della misura di una cellula, un organo o dell'intera pianta. Coinvolge sia la divisione cellulare che l'accrescimento della cellula (Hunt et al, 2002; Chiariello et al., 1989).

Nelle scienze vegetali ed agrarie l'analisi di crescita è definita come “uno strumento analitico ampiamente utilizzato per caratterizzare la crescita della pianta” (Hoffmann e Poorter, 2002).

Attraverso le analisi delle crescite è possibile definire la variazione, in peso o in superficie, dei vari comparti della pianta, esprimendoli su varie basi. Queste basi possono essere di tipo temporale, ad esempio giorni, oppure su basi rappresentate da grandezze fisiche diverse, come ad esempio i *Growing Degree Days* (GDD) (Bonhomme, 2000).

In generale l'analisi di crescita di colture perenni può essere espressa su base giornaliera in modo da semplificare la procedura di analisi stessa.

Utilizzando l'analisi di crescita è possibile analizzare in maniera analitica la dinamica con cui la biomassa viene fissata dalle piante e come va poi a ripartirsi nei vari comparti vegetali.

La *Growth analysis*, per essere effettuata, richiede solamente due tipologie di misura. La prima è la misura del peso della pianta o delle sue componenti, generalmente in termini di

peso secco. Viene espressa in Kg oppure in grammi. La seconda è la superficie del sistema assimilatorio, quindi la superficie sintetizzante espressa come *Leaf Area*. L'unità di misura è il m^2 oppure il cm^2 . A partire da questi dati è possibile calcolare tutte le componenti dell'analisi. Inoltre, i dati possono essere ottenuti a partire da individui singoli e da più piante ma, in ogni caso, derivano da misure distruttive delle piante (Beadle, 1993).

L'analisi di crescita classica può essere suddivisa in varie componenti.

Le due prime componenti sono l'*Absolute Growth Rate* (AGR) ed il *Relative Growth Rate* (RGR). L'AGR non fa parte delle componenti classiche dell'analisi di accrescimento, ma è un indice veloce e semplice per indicare l'incremento in termini assoluti di biomassa in un organo. Può essere definito come l'incremento in peso di un comparto vegetale o dell'intera pianta entro un definito intervallo di tempo:

$$AGR = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \quad Eq. 1$$

dove W_2 e W_1 rappresentano il peso al tempo rispettivamente t_2 e t_1 ed espresso in kg *giorno*⁻¹.

L'AGR seguendo la dinamica di accrescimento sigmoide delle piante risulta crescere in maniera esponenziale nella fase centrale, per poi rallentare fino a divenire pari a zero nella parte piatta della curva sigmoide (Chiariello et al., 1989).

L'RGR è l'unica componente classica della *Growth analysis* per il cui calcolo non è necessario conoscere la dimensione del sistema di assimilazione della pianta. L'RGR è definito come il tasso di incremento in sostanza secca per unità di sostanza secca nel tempo. In altre parole, rappresenta la crescita proporzionale di sostanza secca della pianta dipendente dalla sua dimensione. Pertanto, l'RGR istantaneo viene calcolato come:

$$RGR = \frac{1}{W} \frac{dW}{dt} \quad Eq. 2$$

L'RGR istantaneo risulta essere la derivata prima della curva del $\ln W$ rispetto al tempo. La formula del calcolo dell'RGR può essere semplificata nel caso si calcoli L'RGR medio di un intervallo di tempo stabilito, non inferiore ad un giorno e diventa:

$$RGR = \frac{(\ln W_2) - (\ln W_1)}{(t_2 - t_1)} \quad Eq. 3$$

A causa della sua stessa natura, che comprende il peso iniziale degli organi nelle prime misure, l'RGR medio tende a decrescere durante l'anno, a mano a mano che la biomassa va ad accumularsi negli organi della pianta. L'RGR presenta un'unità di misura pari a $Kg Kg^{-1} day^{-1}$ (Beadle, 1993; Hoffmann e Poorter, 2002).

Un altro indice di crescita è il *Net Assimilation Rate* (NAR) che indica la capacità assimilatoria della pianta ed è definito come il tasso di incremento di sostanza secca per unità di area fogliare per giorno. La sua unità di misura è $g cm^2 day^{-1}$ oppure $Kg m^2 day^{-1}$. Per calcolare il NAR assoluto la formula risulta essere:

$$NAR = \frac{1}{L} \frac{dw}{dt} \quad Eq. 4$$

Mentre il NAR nell'intervallo di tempo t_1-t_2 è pari a:

$$NAR = \frac{(W_2 - W_1)}{(LA_2 - LA_1)} * \left(\frac{LN(W_2) - LN(W_1)}{t_2 - t_1} \right) \quad Eq. 5$$

Il NAR durante la stagione vegetativa tende a decrescere (Hunt et al, 2002; Chiariello et al., 1989; Beadle, 1993).

Altri due indici di accrescimento sono il *Leaf Area* (LA) e il *Leaf Area Index* (LAI). La Leaf Area rappresenta la superficie assimilativa totale della pianta in un dato momento. L'LA è espressa come superficie assoluta.

Un indice derivato direttamente dalla LA è il *Leaf Area Index* (LAI), questo parametro è definibile come il rapporto fra l'area fogliare totale della pianta e la superficie di terreno. In dettaglio il LAI è dato dalla superficie di area fogliare della pianta che va ad insistere su un metro di area di terreno. Questo indice, essendo frutto del rapporto di due misure aventi la stessa unità di misura, è adimensionale. Il LAI è pari a:

$$LAI = \frac{LA}{GA} \quad Eq. 6$$

Nel caso pratico il LAI è calcolato come la superficie fogliare totale divisa per il sesto d'impianto della coltura, quindi la quantità di area di terreno occupata dalla pianta stessa (Chiariello et al., 1989).

Nell'analisi classica della crescita sono presenti ulteriori tre parametri strettamente collegati fra loro. Questi indici sono il *Leaf Area Ratio* (LAR), lo *Specific Leaf Area* (SLA)

e il *Leaf Weight Ratio* (LWR). I tre parametri sono legati reciprocamente dalla seguente equazione:

$$LAR = SLA \times LWR \quad Eq. 7$$

Il LAR rappresenta la fogliosità di una pianta, quindi la quantità di area fogliare rispetto alla biomassa. Infatti, è definita come il rapporto fra l'area fogliare della pianta ed il peso secco della pianta. Il LAR tende ad aumentare durante la stagione vegetativa, questo a causa del fatto che in proporzione l'area fogliare della vite tende a crescere maggiormente rispetto al peso secco della biomassa. Il LAR può essere calcolato attraverso varie formule.

$$LAR = \frac{LA}{W} \quad Eq. 8$$

$$LAR_{medio} = \frac{(LA_2 - LA_1)(\ln W_2 - \ln W_1)}{(W_2 - W_1)(\ln LA_2 - \ln LA_1)} \quad Eq. 9$$

Successivamente *Leaf Area Ratio* viene poi scomposto nei suoi due indici elementari. Il primo di questi due parametri è lo *Specific Leaf Area*, che è il risultato del rapporto fra l'area fogliare della pianta e il peso secco delle foglie stesse. Questo indice è utile per valutare la struttura della chioma, esso indica la fogliosità della pianta rispetto alla biomassa investito in produzione di foglie. Il valore presenta un'unità di misura pari a $cm^2 g^{-1}$.

$$SLA = \frac{LA}{LW} \quad Eq. 10$$

Lo SLA tende a decrescere durante la stagione, come conseguenza dell'invecchiamento fogliare, mentre tende ad aumentare rispetto al crescere della profondità della foglia nella chioma, come conseguenza della diminuzione di luce disponibile (Beadle, 1993; Hunt et al, 2002; Chiariello et al., 1989).

Anche l'ultimo indice, il *Leaf Weight Ratio*, deriva dallo LAR. Il LWR indica la proporzione di peso secco che è coinvolto nei processi di assimilazione. Viene ricavato attraverso il rapporto del peso secco delle foglie rispetto al peso secco totale della pianta, l'unità di misura è pari a $g g^{-1}$. Il LWR è elevato durante la fase di formazione della chioma, mentre va a decrescere in seguito, come conseguenza dell'accumulo di biomassa nei tessuti di riserva. Per calcolare il LWR ci si può basare sulla seguente formula:

$$LWR = \frac{LW}{W} \quad Eq. 11$$

Infine, va definita l'equazione che lega le principali componenti dell'analisi di crescita.

$$RGR = NAR \times LAR \quad Eq. 12$$

$$RGR = NAR \times SLA \times LWR \quad Eq. 13$$

(Beadle, 1993; Hunt et al, 2002; Chiariello et al., 1989).

4 SCOPO DEL LAVORO

Il presente lavoro di tesi, si prefigge come scopo quello di studiare l'applicabilità di modelli tridimensionali di piante, derivanti dall'applicazione in pieno campo della tecnica di rilievo detta *Structure from Motion*, per la stima delle dinamiche di accrescimento e di ripartizione della biomassa in vite.

Nel presente lavoro, dal punto di vista procedurale, viene analizzata la possibilità di integrare l'utilizzo della SfM, basata su immagini RGB, con le misure di accrescimento rilevate durante la stagione, in modo da ottenere un metodo pratico, valido e speditivo per la stima delle dinamiche di crescita in vite.

5 MATERIALI E METODI

5.1 Sito di studio

La sperimentazione è stata effettuata nel comune di Mezzocorona, in provincia di Trento, in località “Pradacci”. Il campo, numero di particella catastale 551/3, è stato messo a disposizione da Sandro Pancher, agricoltore della zona. Le coordinate del sito sono, 46°12'42.1"N 11°08'23.3"E.



Figura 1: Sito della sperimentazione, frecce indicano le posizioni della pianta B, sinistra, e della pianta A

Il comune di Mezzocorona è situato nel mezzo della Piana Rotaliana, una pianura alluvionale che si colloca nel centro della Valle dell'Adige. Dal punto di vista geologico la Piana Rotaliana presenta una duplice origine, la prima dovuta all'opera di esarazione dell'ultimo massimo glaciale alpino e successivamente quella alluvionale (Bassetti e Borsato, 2005). La pedogenesi alluvionale, che vede come attori principali il fiume Adige e il torrente Noce, ha originato un terreno sedimentario profondo, leggero, generalmente franco-sabbioso o franco-sabbioso, talvolta ricco di scheletro, in particolare ghiaia. Nel complesso il terreno della Piana risulta fertile. Nella zona le colture principali sono la viticoltura e la frutticoltura. Ne sono testimoni la presenza di numerose cantine, tra le quali

anche di importanza nazionale come Mezzacorona ca. Numerosi sono anche i consorzi frutticoli presenti sul territorio.

5.2 Varietà di vite e portainnesto

Nella tesi sono state prese in esame delle piante di vite europea. *Vitis vinifera* è una pianta appartenente al genere *Rhamnales*, famiglia *Vitaceae*, sottofamiglia *Ampelideae*, genere *Vitis*, sottogenere *Vitis*,

Nel vigneto viene coltivata la varietà Pinot Grigio, innestato su portainnesto di Kober 5BB. La forma d'allevamento risulta essere il cordone speronato basso, una forma a spalliera o cortina semplice in cui la vegetazione si dispone in maniera verticale in modo da formare una sorta di parete relativamente poco profonda. Il cordone permanente è posto a circa 80 cm dal suolo. Il sesto d'impianto è di 0,8 m x 2,0 m, perciò la densità di impianto corrisponde a 6.250 piante/ha. In tutto il vigneto, durante la tesi, sono state seguite due piante, denominate pianta A e pianta B.



Figura 2: Pianta A in T(0) a sinistra e pianta B in T(0) a destra

Per la sperimentazione è stata scelta la cultivar Pinot Grigio per la sua diffusione locale ma soprattutto internazionale. Nel 2015 la diffusione mondiale di Pinot Grigio ammontava a 54441 ha (OIV, 2015). In Italia questa varietà rappresenta il 3,7% del totale nazionale, occupando circa 25000 ettari. Negli ultimi 5 anni in Italia la superficie di Pinot Grigio è

incrementata del 34 %. A livello nazionale questa cultivar, assieme alla Glera è l'unica varietà che presenta un incremento di area coltivata anziché una perdita di superficie di produzione (OIV, 2017c; OIV, 2017e) Per quanto riguarda gli altri Paesi produttori di Pinot Grigio si possono citare gli Stati Uniti, in cui si coltivano circa 8.000 ha, circa 1,8% della superficie nazionale; la Germania con 6.000 ha, che ammontano al 5,8% di vigneti nazionali e l'Australia con 4.000 ha, cioè il 2,7% delle coltivazioni viticole nazionali. (OIV, 2017e)

Pinot Grigio è una varietà a bacca grigio-violetta, con infiorescenza lunga 8-10 cm. Il grappolo maturo risulta essere “piccolo, corto (13 cm circa), tozzo, cilindrico, spesso alato, un po' compatto; peduncolo corto, grosso, legnoso fino alla 1a ramificazione; pedicelli corti, sottili, verdi; cercine evidente, verde; pennello medio, giallognolo. L'acino è piccolo, leggermente ellittico, regolare; buccia pruinosa, color grigio-violetto, poco regolare, spessore medio, consistente, con ombelico persistente; polpa succosa, molle; sapore neutro, dolce.” (Mipaaf, 2018a). Per quanto riguarda la foglia è “piccola, cordiforme, trilobata, con seno peziolare a V aperto; seni laterali superiori a V, seni laterali inferiori a V appena accennato; angolo alla sommità del lobo terminale ottuso; lembo piegato a coppa, con bordi revoluti, superficie bollosa; pagina superiore di color verde-cupo, lucida; pagina inferiore appena pubescente, verde chiaro; nervature sporgenti, verdi e un po' rosa alla base sulla pagina superiore, verdi su quella inferiore; quelle di 1° e 2° ordine sporgenti; denti poco pronunciati, a margini convessi, a base larga.” I tralci erbacei presentano una sezione ellittica, sono lisci e muniti di internodi rosa vinoso. Una volta completata la lignificazione il tralcio risulta “corto, sottile, non ramificato, con sezione trasversale ellittica, glabro, superficie leggermente striata; nodi evidenti e violacei; meristalli lunghi circa 7-10 cm, di colore grigio con sfumature violacee; gemme sporgenti, piccole”. La vigoria della cultivar risulta media, buona produttrice, primo germoglio fruttifero 2°-3°, mediamente due grappoli per germoglio (Mipaaf, 2018a).

Il portainnesto impiegato è il Kober 5BB. Esso è un portainnesto di vite americana, di origine Berlandieri x Riparia Teleki 5° selezione Kober 5BB. Il suo comportamento in genere risulta: “portamento rampicante, sviluppo rapido, vigoria e maturazione del legno ottime; resiste alla fillossera ed alle malattie crittogamiche; radica facilmente ed imprime notevole vigore alla marza. Nel complesso ha dimostrato una buona compatibilità

all'innesto con i vitigni ad uva da vino. Preferisce i terreni profondi, di buona fertilità, piuttosto freschi, non importa se mediamente clorosanti.” varietà di vite. 2016) Di Kober attualmente sono registrati ben 14 cloni. (Mipaaf, 2018b)

5.3 Tecnica di rilievo fotografico, organizzazione e programmazione

5.3.1 Tecnica di rilievo fotografico

La tecnica della *Structure from Motion* consiste nell'esecuzione di un elevato numero di fotografie RGB attorno ad un'oggetto, in modo tale da coprirne l'intera superficie esterna. Le foto, inoltre, devono essere scattate da tutte le angolazioni possibili, sempre allo scopo di coprire interamente l'oggetto. In più gli scatti devono avere una parziale sovrapposizione tra loro, questo è un elemento necessario per poter posizionare all'esatto posto le foto tra loro e poter ricostruire i modelli tridimensionali in maniera che siano più completi ed esatti possibile. Il software impiegato per la ricostruzione è maggiormente facilitato se le foto presentano più overlap tra foto che sono fisicamente affiancate.

Nel caso specifico di questa tesi le foto sono state organizzate in modo da rilevare al meglio le due piante di vite prese in esame. Le due piante distano circa 150 metri l'una dall'altra, e sono inserite all'interno di un filare di cordone speronato. Questo ha costituito un problema per l'esecuzione delle foto, in quanto non è stato possibile applicare la tecnica standard di fotografia. Infatti, non si è potuto riprendere gli oggetti da Sud e Nord, perché si trovavano in corrispondenza del filare del vigneto, quindi non è stato possibile posizionare cavalletto e macchina fotografica.

La tecnica di rilievo è stata quindi modificata per adattarla allo specifico caso in esame.

Le fotografie sono state eseguite in maniera distinta tra il lato Est e quello Ovest del filare. Per ogni lato sono state realizzate 40 fotografie, organizzate in linee a differenti altezze e in colonne. In totale sono state eseguite 8 file di fotografie distinte in 5 colonne ognuna. Per scattare le foto è stato utilizzato un cavalletto fotografico, in modo da garantire la massima stabilità e ottenere foto più nitide. Le due linee di fotografie più alte sono state eseguite dall'alto verso il basso senza l'utilizzo del cavalletto fotografico.

linea6	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	1,95 m
linea 5	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	1,7 m
Linea 4	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	1,5 m
Linea 3	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	1,25 m
Linea 2	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	0,95 m
Linea 1	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	0,7 m
	Col 1 0,6 m	Col 2 0,3 m	Col 3 Centro	Col 4 0,3 m	Col 5 0,6 m	

Figura 3 Schema fotografico del lato

Linea 8	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	2,5-3 m
Linea 7	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	FOTO	2,5-3 m
	Col 1 0,6 m	Col 2 0,3 m	Col 3 Centro	Col 4 0,3 m	Col 5 0,6 m	

Figura 4: Schema fotografica dall'alto

Le linee fotografiche sono state posizionate alle seguenti altezze dal suolo: 0,7 m; 0,95 m; 1,25; 1,5 m; 1,7 m; 1,95 m; le 2 linee dall'alto sono state posizionate fra i 2,5 e i 3 m dal suolo, in funzione dell'altezza della vegetazione durante il rilievo fotografico. Per quanto riguarda le 5 colonne di ripresa delle fotografie sono state eseguite a 0,6 m; 0,3 m e 0,0 m a sinistra ed a destra dal centro della vite.

Le fotografie sono state sempre eseguite cercando di posizionare la pianta al centro dell'inquadratura, quindi la macchina fotografica è stata orientata verso l'alto per le linee di foto più basse, verso il basso per le linee fotografiche più alte, verso destra per le colonne fotografiche di sinistra e verso sinistra nel caso contrario. In questa maniera si crea una sorta di semi-cupola ideale a Est ed a Ovest della pianta, dalla quale sono state eseguite le fotografie. Per quanto riguarda la distanza di scatto dall'obbiettivo fotografico è stata variata ad ogni scatto, questo per facilitare il programma nella ricostruzione della

profondità durante la creazione del modello tridimensionale. La distanza massima di posizionamento della macchina fotografica al momento dello scatto è stata di 1,5 m verso il centro del filare.

Nel filare, in occasione dei rilievi fotografici sono stati posizionati dei target sferici di polistirene dalla forma sferica. I target sono stati suddivisi in ottavi in maniera da creare dei triangoli separati tra loro, che sono stati colorati in nero in modo che due riquadri colorati si tocchino solo sui vertici.



Figura 5: Immagine Target

Lo scopo delle sfere in polistirolo è stato quella di facilitare il lavoro del software di elaborazione nel posizionamento delle fotografie nell'ordine e nella posizione giusta allo scopo di ricostruire il modello tridimensionale. Infatti, le sfere forniscono dei punti noti e facilmente riconoscibili al software e all'operatore che gestisce poi la produzione del 3D. La presenza dei target in polistirene, grazie

alla loro dimensione nota pari a 12 cm di diametro, ha permesso inoltre il dimensionamento del modello tridimensionale e quindi la successiva stima dei parametri di errore del modello e la stima delle misure biometriche di accrescimento.

La macchina fotografica impiegata per le fotografie è stata una Canon IXUS 125 HS con risoluzione 16.1 megapixel con uno zoom ottico 5x. Per lo studio è stata impostata in modo che la lunghezza focale restasse sempre fissa. Per quanto riguarda l'apertura del diaframma è stato impostato a $f/2.7$ mentre il tempo di scatto è rimasto variabile, sebbene nella maggior parte delle fotografie è risultato pari a $1/30s$. Inoltre, le fotografie sono state scattate con una risoluzione di 4608×2592 pixel in formato JPEG.

5.3.2 Organizzazione e tempistiche dei rilievi fotografici.

I rilievi fotografici sono stati eseguiti durante tutto il periodo vegetativo della vite, a partire da aprile fino ad agosto 2017. Un'ultima data di rilievo è stata effettuata a riposo vegetativo, prima delle operazioni di potatura. Tra ogni rilievo in campo sono stati lasciati passare circa 14 giorni, in modo tale da riuscire a rilevare degli apprezzabili cambiamenti

nello stato di crescita della *canopy* tra un intervento e l'altro. I giorni da far trascorrere tra due date non sono stati rigidamente codificati in quanto si tratta di una serie di rilievi in pieno campo, in un'ambiente non controllato, quindi anche l'andamento meteorologico ha influenzato i rilievi. Le date di rilievo sono state:

Tabella 1: Tabella riassuntiva delle date di rilievo

T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
15/4	30/4	14/5	27/5	9/6	26/6	16/7	1/8	16/12

In tutto sono state effettuate 9 date di rilievo, codificate di seguito da T(0) fino a T(8). I rilievi hanno avuto luogo al mattino presto, in prossimità dell'alba. Questo per minimizzare l'effetto della luce diretta sulla *canopy*, che sarebbe andato ad aumentare gli effetti di auto ombreggiamento all'interno della chioma e quindi rendere più difficili le ricostruzioni dei modelli 3D digitali. Durante la fase dell'alba, invece, risulta predominante una luce più soffusa e maggiormente irradiata, che causa meno ombre all'interno della zona vegetativa. Per ottenere questo effetto il rilievo fotografico ha avuto luogo in un range orario abbastanza stretto, circa 1 ora e 30. L'inizio dei rilievi, durante l'anno, si è andato ad adeguare con il sorgere del sole ed è iniziato alle 5:00 di mattina nel mese di aprile ed alle 4:00 di mattina nei mesi di giugno, luglio ed agosto. Ad ogni data sono state fotografate due distinte piante, la pinta A bis e la pianta B. La pianta A iniziale è stata distrutta da una gelata tardiva due giorni dopo il primo rilievo fotografico e prontamente sostituita con la pianta A bis.

5.3.3 Operazioni colturali

Per perseguire lo scopo di monitorare gli accrescimenti biometrici e il reale accumulo e ripartizione della biomassa in un vigneto della Piana Rotaliana, le piante seguite durante la tesi sono state scelte appositamente all'interno di un sito produttivo. Per questo l'agricoltore ha effettuato tutte le normali operazioni colturali eseguite nell'intero vigneto, comprese sulle piante oggetto di studio.

Le operazioni colturali in questione sono numerose. Innanzitutto, il vigneto è stato interamente trattato contro le normali avversità che interessano la coltivazione della vite. In tal modo è stato possibile mantenere una vegetazione sana e rigogliosa sino a fine della prova, inoltre i grappoli non sono stati soggetti a infezioni.

Sono state eseguite varie operazioni di gestione a verde della chioma. Inizialmente i tralci in eccesso della vite sono stati diradati attraverso la pratica di scacchiatura e selezione dei germogli. Questa operazione ha avuto luogo nella giornata del 30/04 ed ha avuto come effetto la riduzione del numero di tralci presenti sul cordone speronato. L'allevamento a cordone speronato della vite prevede la presenza di un cordone permanente da cui si innalzano i tralci della vite, che vengono disposti in maniera assurgente in modo da formare una parete vegetativa verticale. La potatura prevede che i tralci produttivi dell'anno vengano spuntati a due o tre gemme visibili, da queste stesse gemme l'anno successivo si svilupperanno i nuovi germogli. Operando in questa maniera, l'anno successivo si rende necessario selezionare i tralci per non causare un eccessivo infittimento della cortina produttiva, che causerebbe un peggioramento della qualità dei grappoli, un eccesso di produzione ed uno sbilanciamento dell'equilibrio vegeto-produttivo della vite.

Tabella 2 :Tabella riassuntiva operazioni estive di gestione a verde della chioma

26/6		15/7	1/8	
Cimatura	Sfogliatura	Cimatura	Cimatura	Sfogliatura

Durante la stagione, la vite ha subito una prima defogliazione meccanica in data 26/06 con lo scopo di esporre i grappoli, aumentare l'arieggiamento che previene l'insorgenza di marciumi e permette ai trattamenti fitosanitari di raggiungere l'uva. La seconda defogliazione è stata eseguita alla fine di luglio.

Ulteriori operazioni di gestione a verde sono state le cimature, che hanno interessato il vigneto in data 26/06 e 15/07 e 1/08. La cimatura consiste nel taglio dell'apice dei germogli cresciuti oltre il sistema di sostegno. Questi tralci tendono a piegarsi e possono causare ombreggiamento sulla parte bassa della chioma. Inoltre, se crescono eccessivamente, impediscono il passaggio nei filari e causano un eccesso di vegetazione rispetto alla carica

produttiva. Un effetto dato dalla cimatura è quello di favorire la crescita delle femminelle, che sono rami anticipati che si sviluppano dai tralci stessi. Le femminelle causano un aumento della superficie fogliare della pianta e possono sostituire, con foglie giovani ed efficienti, la parte del tralcio recisa dalla cimatura e le foglie eliminate della sfogliatura. Tutte queste operazioni hanno causato una sottrazione di biomassa dalle piante durante la stagione vegetativa.

5.4 Ricostruzione dei modelli e utilizzo dei software di modellazione 3D

Le fotografie ottenute dai rilievi sono state impiegate per la creazione dei modelli 3D. Prima di procedere con le ricostruzioni le foto sono state modificate utilizzando il software *Adobe Photoshop Professional*, in particolare è stato utilizzato il tool *camera Raw*, per effettuare il bilanciamento del bianco e delle ombreggiature. In questo modo le fotografie sono risultate più nitide e sono stati eliminati gli effetti di disturbo delle ombre e della diversa luce presente tra le varie fotografie. Il differente grado di luminosità tra le foto era dovuto alla differente messa a fuoco di ogni scatto, alcuni presentavano nello sfondo il cielo chiaro, quindi l'obbiettivo della foto risultava scuro, ed altri il terreno scuro quindi la pianta risultava più chiara e luminosa.

Successivamente le fotografie sono state elaborate con il software *Agisoft Photoscan Professional* versione 1.2.4.

5.4.1 Workflow e organizzazione

Le foto di ogni pianta A e B, distinte per data, sono state caricate nel software utilizzando l'azione "Add Photos". Per ogni data le fotografie sono state organizzate in 6 *Chunk*, 3 per le fotografie della parete del lato Ovest e 3 per quelle del lato Est. Nei *Chunks* 1 e 4 sono state inserite le foto delle 3 linee più basse. In quelli 2 e 5 le foto delle 3 linee fotografiche centrali e nel *Chunks* 3 e 6 le fotografie delle 2 linee più alte.

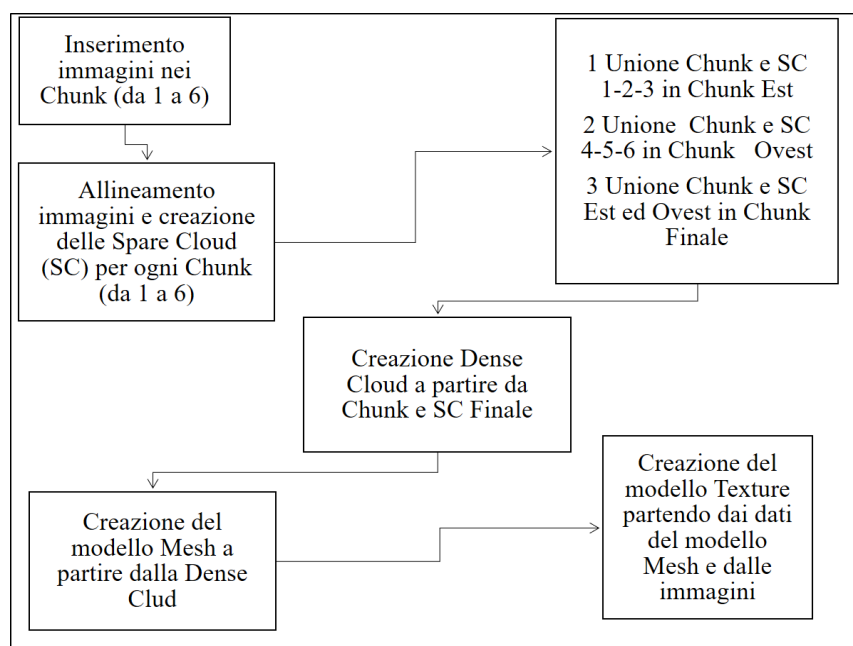
Tabella 3: Tabella organizzativa dei Chunk di ogni ricostruzione

Lato Est	<i>Chunk 1</i>	15 immagini	Linea fotografie 1, 2, 3-Est
	<i>Chunk 2</i>	15 immagini	Linea fotografie 4, 5, 6-Est
	<i>Chunk 3</i>	10 immagini	Linea fotografie 7, 8-Est
Lato Ovest	<i>Chunk 4</i>	15 immagini	Linea fotografie 1, 2, 3-Ovest
	<i>Chunk 5</i>	15 immagini	Linea fotografie 4, 5, 6-Ovest
	<i>Chunk 6</i>	10 immagini	Linea fotografie 7, 8-Ovest

Questo accorgimento è stato messo in atto per permettere al programma di allineare tra loro le foto in maniera efficace. L'allineamento, nel programma, è quella fase in cui, a partire dai *keypoint*, viene stimata la posizione e l'orientamento della fotocamera al momento dei differenti scatti. In questo modo viene determinata una posizione spaziale dello scatto, è quindi lo step preliminare per la creazione del modello 3D.

L'allineamento viene ottenuto attraverso l'azione "*Align Photos*". L'utilizzo dei *Chunk* differenti si è reso necessario dato che, nelle prime prove di ricostruzione, le foto elaborate tutte assieme davano uno scadente allineamento tra loro. Questo è probabilmente da imputare alla difficoltà dell'ambiente di ricostruzione 3D, composto da due facciate opposte della stessa parete vitata, da foto molto simili tra loro e pochi elementi univoci di riferimento.

Figura 6: Diagramma procedura ricostruzione modelli 3D in Agisoft Photoscan



I risultati dell'allineamento sono, la *Spare Point Cloud* che è un modello primitivo di nuvola di punti e le posizioni della fotocamera ai differenti momenti di scatto delle fotografie.

Una volta ottenuto l'allineamento delle foto all'interno dei *Chunks* si è reso necessario allineare i *Chunks* tra loro, in modo che tutte le foto fossero orientate in maniera coerente nello spazio.

Per allineare i *Chunks*, nelle fotografie sono stati inseriti manualmente un notevole numero di markers numerati. I markers numerati sono stati posti in punti noti e riconoscibili. Dopodiché si è provveduto ad ottenere l'allineamento dei 3 *Chunks* del lato Ovest e dei 3 del lato Est, attraverso l'azione "*Align Chunk*", sulla base dei markers. Successivamente sono stati uniti grazie all'azione "*Merge Chunk*". In questa maniera si sono ottenuti 2 nuovi *Chunks*, uno rappresentante il lato Ovest ed uno il lato Est.

In seguito, l'azione è stata ripetuta, in modo da unire le due facciate della pianta tra loro ed ottenere un unico modello di allineamento, e quindi un'unica *Spare Point Cloud*, per ogni pianta.

Una volta ottenuto il modello di allineamento della pianta e stato possibile proseguire con la ricostruzione del modello 3D. A partire dalle fotografie e dalle posizioni delle fotocamere ottenute con l'allineamento delle foto, è possibile costruire una *Dense Cloud*, cioè un modello rappresentato da una nuvola molto più densa di punti, attraverso l'azione "*Build Dense Cloud*". In questo caso è necessario impostare come fonte di partenza la *Spare Point Cloud*. Questo modello sarà la base del modello 3D finale.

Step successivo per la ricostruzione del modello 3D completo è la realizzazione di un modello detto "*Mesh*".

Durante questo processo i punti della *Dense Cloud* vengono uniti tra loro da un numero variabile di poligoni triangolari. Il numero dei poligoni estratti varia in base alle impostazioni del programma. In questo modo si viene a creare un modello che rappresenta la superficie esterna dell'oggetto. La superficie dell'oggetto sarà continua ma permangono tutti i fori tipici di una *canopy* di una pianta. Questa azione si può ottenere utilizzando l'azione "*Build Mesh*".

Infine, ultimo passaggio eseguito per la creazione del modello 3D è stato la creazione della "*Texture Model*". In questo passaggio le fotografie di partenza già orientate vengono

proiettate sul modello *Mesh* in maniera che lo vadano a ricoprire. In questa maniera vien aggiunto più dettaglio al modello *Mesh* e gli viene attribuito lo stesso colore presente nelle foto originarie. Anche in questo caso il modello della *Texture* viene ottenuto tramite l'azione "*Build Texture Model*"

5.4.2 Protocollo e parametri

Per quanto riguarda i parametri utilizzati per la creazione dei modelli si riporta il protocollo utilizzato per l'elaborazione delle fotografie in modelli 3D.

Tabella 4: Tabella riassuntiva delle impostazioni e dei parametri impiegati nelle ricostruzioni

Steps	Scopo	Azioni	Descrizione
1	Creazione Chunks 1-6	1. Workflow	
		2. Add Photos	Aggiungere le immagini nei Chunk di riferimento
2	Inserimento dei marker	1. Create marker	Inserimento manuale dei marker numerati nei punti riconoscibili delle immagini. I marker sono numerati e si ripetono nelle immagini del Chunk.
3	Align Photos	1. Workflow	
		2. Align Photos	In tutti i Chunks
		3. Parametri	Disabilitare Pair preselection; Accuracy: Highest; Key point limits: 40000; Tie point limit: 4000 (aumentabili 60000+6000, 80000+8000,....)
4	Unione Chunks 1-6 e Spare Cloud	1. Workflow	
		2. Align Cunks	1-2-3 e 4-5-6
		3. Merge Chunks	Unione 1-2-3 e 4-5-6, si ottengono Chunk 7-8
		4. ripetere operazione	allineamento Chunk 7-8, unione 7-8 e creazine Chunk finale
5		1. Workflow	

	Creazione Dense Cloud	2. Build Dense Cloud	Quality: High; Depth Filtering: Mild; Calculate Point Color: Yes; Reuse Depth maps: No.
6	Creazione modello Mesh	1. workflow	
		2. Build Mesh	Surface type: arbitrary; Source Data: Dense Cloud; Face count: Medium; Interpolation: Disable; Point Class: All.
7	Creazione modello Texture	1. Workflow	
		2. Build texture	Mapping Mode: Generic; Blending Mode: Mosaic; Texture size: 4.096; Texture Count: 1; Hole filling: Yes.

- Descrizione dei parametri Step 3. L'Accuracy è il parametro che regola la qualità della posizione stimata della camera al momento di scatto, se settato alto si otterranno posizioni stimate più precise. La *Pair Preselection* è un parametro che può velocizzare il processo di allineamento in quanto le foto vengono raggruppate in subset e precedentemente analizzate tra loro con parametri più bassi, in modo da trovare prima le coppie che si sovrappongono o i cui lineamenti corrispondono. *Key Point limit* indica il numero massimo di punti caratteristici da considerare nell'immagine durante l'elaborazione. *Tie point limit* indica il numero massimo di punti di corrispondenza da considerare per ogni foto.
- Descrizione parametri Step 5. La Quality indica la qualità della geometria e la quantità di dettaglio del modello, se è settata sul massimo sarà maggiore, ma richiederà più tempo. Depth filtering mode, durante la costruzione della *Dense Cloud* il programma genera la mappa della profondità per ogni fotografia. Se ci sono errori o distorsioni il programma ha vari algoritmi di filtraggio per poterli correggere. Nel caso ci siano molti particolari è consigliato di settare il parametro su Mild, che è la modalità di filtraggio e correzione più lieve in modo da ottenere una ricostruzione con meno rumore.
- Descrizione parametri Step 6. Il parametro Surface type Arbitrary è il parametro che può essere impiegato per la ricostruzione di ogni oggetto. Non fa nessuna previsione sul tipo di oggetto. Indicato per gli oggetti vicini. Nel caso della Source data si potrebbe scegliere sia la *Spare Point Cloud*, per una ricostruzione di un modello più rapido oppure la *Dense*

Cloud per avere un modello più preciso. Face Count indica il numero massimo di poligoni nella Mesh finale, in funzione del numero di punti del modello di partenza. Esistono 3 modalità: High, il numero di poligoni sarà 1/5 del numero di punti, Medium 1/15 e Low 1/45. Interpolation, questo parametro permette al programma di riempire in automatico alcune parti vuote.

- Descrizione parametri Step 7. Mapping mode è il parametro che determina come la texture, quindi la trama, venga aggiunta al modello. Una modalità di mappatura adatta determina un migliore risultato del modello 3D. Se viene utilizzata la modalità Generic, il programma non fa nessuna previsione sulla scena da elaborare, cerca di creare una Texture più uniforme possibile. L'atlante della trama viene parametrizzato in base alla geometria arbitraria del modello

5.5 Estrazione e quantificazione dei dati dai software

5.5.1 Agisoft Photoscan e conteggio numero di punti delle *Point Cloud*

Una volta ottenuti i modelli tridimensionali delle piante A e B in ogni data è stato necessario estrarre alcuni dati, in modo da poter poi elaborare le informazioni fornite dalle ricostruzioni.

Per prima cosa sono stati ottenuti i dati dalle *Dense Point Cloud* di ogni ricostruzione. Le varie *Dense Cloud* sono state ritagliate in modo da isolare le piante A e B, il prato sottostante, le piante vicine e le sfere di polistirene sono state eliminate. Questo si è reso possibile selezionando manualmente i punti di non interesse e cancellandoli.

Photoscan, per la selezione e la cancellazione dei punti, dispone di due semplici comandi: “*select point*” e “*delete*”. Nei modelli delle date T0 e T8 il ceppo delle piante è stato lasciato integralmente, mentre in quelli delle altre date a volte è presente per intero ed a volte no.

Dopo la preparazione delle *Dense Cloud* è stato possibile ottenere i vari parametri di interesse. I dati ottenuti da ogni *Point Cloud* sono i seguenti: il numero totale di punti, il numero di punti di colore verde, il numero di punti di colore marrone e i punti appartenenti ai grappoli.

Il numero totale di punti è indicato già nei parametri base della nuvola, quindi una volta ritagliate le parti di non interesse il dato è stato fornito dal software.

Per ottenere il numero di punti di colore verde si è reso necessario utilizzare un approccio a più steps. Innanzitutto, è stato impiegato un apposito comando presente in *Photoscan*, “*select point by color*”. Attraverso questo strumento è possibile stabilire il colore dei punti da selezionare. Il colore scelto è rappresentato da 6 valori, Sat, Hue, Val, Green, Red e Blue in modo da poter indicare in maniera precisa il tipo di verde scelto, inoltre è possibile indicare la tolleranza, in termini percentuali, con cui il programma va a stabilire se il colore del punto è attinente ai parametri di selezione oppure no.

Successivamente, dopo che il programma ha selezionato i punti, è stato necessario togliere dalla selezione i punti corrispondenti ai parametri di scelta in base al colore, ma che risultavano posizionati in punti non idonei. Quest’azione si è resa indispensabile in quanto il ceppo presenta dei punti che sono tipicamente di colore marrone, ma che, in alcuni casi, risultano di colore verde o vicino ai parametri di tolleranza di scelta, quindi venivano selezionati erroneamente. La rimozione dei punti dalla selezione è un processo che viene effettuato a mano, in modo da selezionare solamente i punti esatti.

In seguito alla selezione i punti del determinato colore scelto sono stati eliminati dal modello. In tal modo, procedendo per più passaggi e utilizzando varie tonalità di verde nei parametri dello strumento di selezione, si è potuto eliminare tutti i punti verdi dalla *Point Cloud*. Successivamente ne è stato calcolato il numero, agendo per differenza, sottraendo il numero di punti rimanenti nella *Point Cloud* da quelli totali. Per selezionare e cancellare tutti i punti sono stati necessari 4 passaggi di selezione con 4 differenti tipologie di verde. Un verde chiaro brillante (Hue 120,Sat 255,Val 170, Red 0,Green 170,Blue 0) con una tolleranza del 70%, un verde scuro (Hue 120,Sat 255,Val 85, Red 0,Green 85,Blue 0) con una variazione del 20%, un verde chiarissimo (Hue 86,Sat 76,Val 225, Red 195,Green 225,Blue 158), tolleranza del 10 % e un verde spento (Hue 85,Sat 204,Val 120, Red 79,Green 120,Blue 24) con il 10% di tolleranza. Inoltre, alla fine, si è resa necessaria una selezione manuale per togliere una parte di punti residua.

I punti di colore verde sono quelli appartenenti alla chioma in generale, quindi alle foglie, ai tralci verdi ancora fotosintetizzanti, ai cirri ed ai grappolini verdi.

Un altro parametro ricavato è stato il numero di punti di colore marrone-bruno, appartenenti al ceppo ed ai tralci lignificati. Nel nostro caso sono stati determinati solamente nelle piante in data T(0) e T(8) in quanto erano le uniche ricostruzioni in cui il ceppo è risultato ricostruito interamente fino alla base. Il loro numero è stato stabilito per differenza. Infatti, dopo l'eliminazione dei punti di colore verde, quelli marrone-bruno sono risultati i punti residui.

Ultimo parametro ottenuto è stato il numero dei punti formanti il grappolo 3D. In questo caso la conta dei punti è stata effettuata nelle date T(5) e T(7). Questo perché solamente della data T(5) i grappoli sono risultati visibili nel modello. In aggiunta nella data T(6) non è possibile riconoscere in maniera netta i grappoli in quanto i modelli non sono stati ricostruiti alla perfezione.

La determinazione del numero di punti in esame è avvenuta sempre attraverso il metodo della differenza, ma, contrariamente a prima, la selezione dei punti da eliminare è stata effettuata manualmente attraverso lo strumento di selezione. Questa variazione al metodo si è resa necessaria a causa dell'altissima variabilità della colorazione dei grappoli di Pinot Grigio, che avrebbe richiesto la selezione in più passaggi di molte tipologie di colore. Inoltre, sarebbe stato d'obbligo distinguere i punti di colore verde dei grappoli da quelli della vegetazione, complicando ulteriormente il processo. La selezione manuale si è dimostrata fattibile ed efficace.

5.5.2 Misure biometriche utilizzando *CloudCompare*

Successivamente, a partire dalle *Point Cloud* dei modelli, sono state determinate le misure biometriche di accrescimento dei germogli. Per fare questo si è reso necessario cambiare software per gestire i modelli 3D.

Il software impiegato è stato *CloudCompare* v2.8.1. Questo è un programma open source di elaborazione di nuvole di punti 3D e mesh di triangoli. La scelta è ricaduta su *CloudCompare* in quanto risulta essere un software molto maneggevole, implementato con vari strumenti per gestire ed elaborare in svariati modi le nuvole 3D di punti.

Le misure biometriche di accrescimento sono state performate su 8 modelli totali, 4 della pianta A e altrettante della pianta B. Le date utilizzate sono state: T(0), T(1), T(2), T(7).

Innanzitutto, le *Point Cloud* scelte sono state nuovamente ritagliate, eliminando gli elementi in eccesso, ma lasciando le sfere in polistirolo. Dopodiché i modelli sono stati esportati in un altro formato file, XYZ Point Cloud.txt, in modo da renderli compatibili con il nuovo software.

Lo step successivo è stato quello di aprire le *Point Cloud* nel software e creare la scala di misura per ricavare poi le misure biometriche dei modelli 3D.

Nel nostro caso i modelli non sono georeferenziati e non presentano una scala spaziale propria. I modelli sono organizzati in base ad un sistema di coordinate interno generato da *Photoscan* al momento della creazione della nuvola di punti 3D.

Per questi motivi in *CloudCompare* le misurazioni della distanza tra punti avvengono sulla base dei riferimenti spaziali creati da *Photoscan*.

Per convertire queste distanze adimensionali in cm o m è necessario calcolare a quanto corrispondono nella realtà. Perciò è necessario creare una scala di riferimento nella ricostruzione e trovare dei riferimenti fissi nei modelli, che possano essere validi in tutte le date del rilievo. Nel nostro caso sono state sfruttate le distanze fra i ceppi delle piante ricostruite e le viti adiacenti.

Inoltre, in alcuni modelli, le sfere in polistirene bianche e nere utilizzate come riferimento per la *Structure from Motion* sono state impiegate come misura di confronto per verificare le distanze attribuite.

Innanzitutto, nel vigneto, sono state effettuate le misure tra i fusti delle piante, in modo da avere dei dati di partenza corretti e precisi. Successivamente nelle *Point Cloud* delle piante A e B, ad ogni data, è stata misurata la distanza tra i ceppi delle piante. Le misurazioni sono state effettuate posizionando la visuale sul lato della pianta ed utilizzando lo strumento "*Point picking*". In questo modo è stata misurata la distanza tra due punti noti degli assi delle viti.

La misura ottenuta nelle ricostruzioni 3D è stata divisa per i cm misurati nella realtà, in modo da calcolare dei coefficienti di taratura per scalare i modelli digitali.

Per avere una conferma dei valori, nelle date T0, T1, T2, T7, è stato misurato il diametro delle sfere dei modelli per 10 volte. La media di questi valori è stata confrontata con quella precedentemente calcolata per verificare eventuali incongruenze.

Dopo aver calcolato il valore di 1 cm in ogni nuvola di punti, è stato necessario misurare le lunghezze di ogni germoglio presente nelle ricostruzioni. Per ogni pianta, in ogni data, è stato impiegato lo strumento “*Point picking*” per misurare la lunghezza del germoglio dalla base all’apice di crescita. Successivamente è stata eseguita la sommatoria delle lunghezze misurate dei germogli, che sono state poi convertite in cm lineari grazie all’unità di conversione calcolata precedentemente.

In seguito alla sommatoria della lunghezza totale dei germogli di ogni pianta si è potuto calcolare, per differenza, gli accrescimenti biometrici delle piante tra le diverse date.

5.6 Misure biometriche di accrescimento, campionamenti e misurazioni della biomassa

La stima degli accrescimenti e della ripartizione della biomassa necessita di un monitoraggio della situazione reale di campo. Queste misure serviranno poi per tarare il metodo di stima e rendere possibile la quantificazione dei vari parametri. Gli accrescimenti delle viti sono stati seguiti mediante misure biometriche di allungamento degli internodi e distensione fogliare.

Inizialmente ad ogni germoglio presente sulle due piante è stato attribuito un codice fenologico utilizzando la scala fenologica BBCH (Lorenz et al., 1995). La fenologia è molto efficace per seguire lo sviluppo delle prime fasi del germogliamento, in modo tale da ricostruirne la dinamica. Risulta più semplice nelle prime fasi in quanto queste sono caratterizzate da veloci e profonde trasformazioni del germoglio, ed attribuire lo stadio fenologico risulta più veloce rispetto alle misure biometriche di accrescimento.

Il 14 aprile, giorno precedente al rilievo fotografico e poco dopo l’inizio del germogliamento, sono stati attribuiti i valori fenologici alle gemme che davano segno di attività vegetativa. Per seguire lo sviluppo dei germogli e delle gemme nelle prime fasi il valore è stato aggiornato in data 30/04, in occasione della seconda serie di fotografie. In data 30/04 è stata eseguita la sfemminellatura, conseguentemente il numero dei germogli è diminuito.

La scala fenologica di Eichhor et Lorenz (1995) si propone di assegnare un numero a due cifre descrittivo dello stadio di sviluppo della pianta. Il primo numero indica la fase principale, mentre il secondo la sottofase dello sviluppo. Le classi principali sono: 0 germinazione, 1 sviluppo delle foglie, 5 sviluppo infiorescenze, 6 fioritura, 7 sviluppo delle bacche, 8 maturazione delle bacche, 9 senescenza.

Successivamente, a metà aprile, sono iniziate le misure di crescita dei germogli, necessarie per quantificare gli accrescimenti dei germogli. Le misure di crescita consistevano nel misurare l'allungamento degli internodi del germoglio e la distensione delle foglie.

La dimensione degli internodi è stata misurata dal punto di inserzione della gemma inferiore allo stesso punto della gemma superiore. Le misure sono state effettuate manualmente, con un righello trasparente e con una precisione di +/- 2mm.

Per quanto riguarda le foglie le misure di crescita si sono concentrate su due parametri: la lunghezza della nervatura centrale (o N1) e la larghezza della lamina fogliare, misurata tra N3 ed N3 cioè le due punte del lobo solcato dalla nervature N3. Anche in questo caso le misure sono state eseguite con un righello trasparente, con una precisione +/- 2 mm” (Chin, 2016).

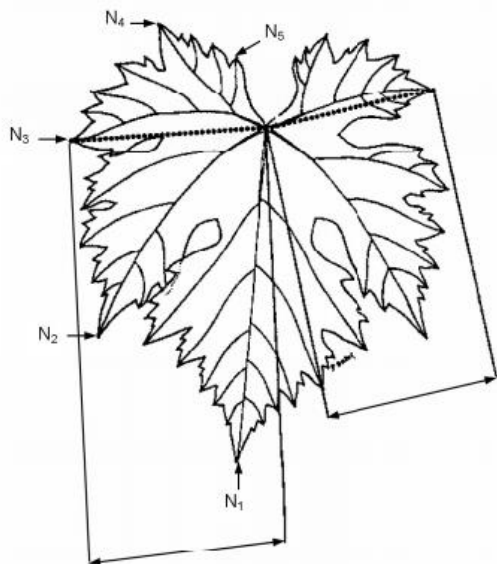


Figura 8: Lunghezza N1

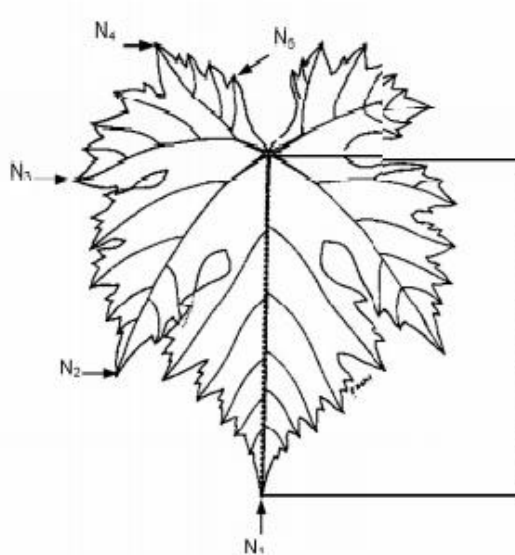


Figura 7: Distanza N3-N3

Le misure di accrescimento sono iniziate il 15/05 e terminate il 15/7. In totale sono state eseguite 5 misurazioni delle distensioni, nelle date di: 15/05, 27/05, 10/06, 26/06 e 15/07.

Durante la quantificazione degli accrescimenti sono stati monitorati 5 germogli per pianta per un totale di 10 germogli. In caso di rotture o mancanza della foglia, per i più vari motivi meccanici/traumatici, è stata segnalata la mancata misura nell'apposita tabella Excel usata per seguire gli accrescimenti.

Una volta ottenute le misure biometriche di accrescimento si è reso necessario stimare la superficie fogliare reale. Per passare dalle misure di distensione fogliare (N1 e N3-N3) alla superficie della foglia è necessario ottimizzare un parametro di moltiplicazione “*a*”.

Questo parametro è varietale ma può essere influenzato dal portainnesto, dal *terroir*, quindi dalla specifica unione di terreno, clima e zona di coltivazione. Per ottimizzare il parametro si è dovuta misurare la superficie fogliare di foglie provenienti dallo stesso vigneto. Questo è stato possibile impiegando uno scanner fogliare (LI-3100, Licor Biosciences, Nebraska, US) messo a disposizione dall'azienda sperimentale “Toniolo” dell'Università di Padova.

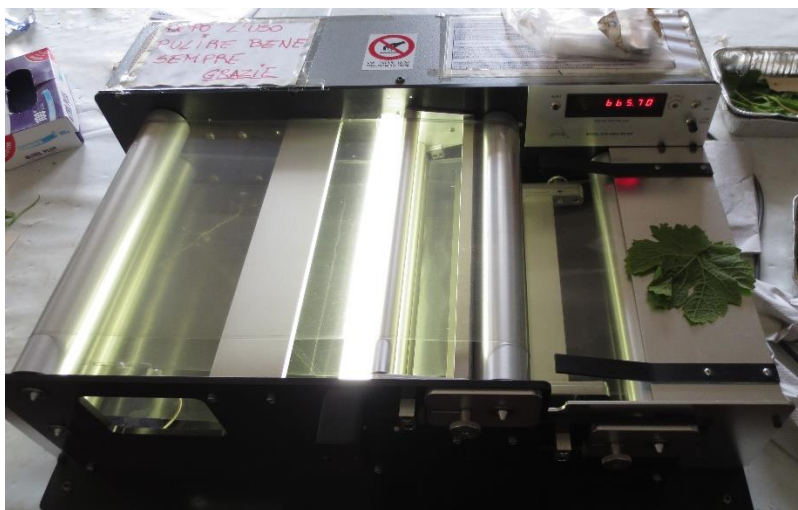


Figura 9: LI-3100, Licor Biosciences, Nebraska, Us

Lo scanner è composto da dei cilindri rotanti che fanno scorrere in maniera opposta dei fogli trasparenti di plastica. Si creano così due nastri controrotanti che mantengono la foglia ben distesa. Alla fine dei nastri è presente un meccanismo che rileva la superficie dell'oggetto di passaggio basandosi sull'interruzione di un fascio luminoso. Di ogni foglia è stata misurata la lunghezza della nervatura N1, la distanza che intercorre tra N3-N3 e l'area fogliare. Per ottenere un parametro preciso sono state scannerizzate 260 foglie.

Dalla relazione area e rapporto tra le due misure fogliari è stata creata una retta di regressione e mediante la minimizzazione della somma del quadrato degli scarti è stato ottimizzata la variabile a della seguente equazione che diventa quindi specifica per la foglia di Pinot Grigio:

$$y = [N_1 * N_3 N_3 * a] \quad \text{Eq. 14}$$

Successivamente a partire dalle misure di crescita della lamina fogliare, effettivamente misurate in campo, è stato possibile determinare l'area fogliare reale delle foglie misurate (Chin, 2016).

Per stimare l'accumulo della biomassa è necessario essere a conoscenza di alcuni parametri preliminari. Perciò è stato fondamentale determinare la quantità di biomassa reale presente nel vigneto a differenti *time points* di prelievo. Quindi, è stato necessario effettuare alcuni campionamenti di materiale vegetale durante la stagione vegetativa. I prelievi sono stati eseguiti nelle date di 15/05, 13/06 e 26/07.

Tabella 5: Tabella tempistiche delle misure di crescita e dei campionamenti estivi

15/4	30/4	14/5	27/5	9/6	26/6	16/7	1/8
Fenologia + lunghezza germoglio	Fenologia + lunghezza germoglio	Misure crescita fogliare + lunghezze internodi	Misure crescita fogliare + lunghezze internodi	Misure crescita fogliare + lunghezze internodi	Misure crescita fogliare + lunghezze internodi	Misure crescita fogliare + lunghezze internodi	
		15/5		13/6			26/7
		Prelievi germogli e frutti		Prelievi germogli e frutti			Prelievi germogli e frutti
							29/8
							Vendemmia piante A e B

Durante i prelievi sono stati raccolti dei germogli interi, prelevandoli da piante in prossimità di quelle seguite in questa tesi. Successivamente dei germogli è stata misurata la lunghezza totale e il peso totale. Il peso totale è stato poi suddiviso in peso fresco delle foglie, dei

tralci e dei grappoli. Utilizzando lo scanner fogliare presente in azienda è stato possibile misurare la superficie fogliare di ogni germoglio.



Figura 10: Materiale vegetale campionato e posizionato in vaschette per l'essiccazione in forno.

Tutto il materiale vegetale è stato poi seccato in stufa a 105°C fino ad ottenere un peso costante. L'essiccazione è avvenuta nei forni dell'azienda sperimentale dell'Università di Padova. Dopo il trattamento in forno sono stati misurati nuovamente i pesi secchi di foglie, tralci e grappoli. Conoscendo queste misure fondamentali, ad ogni data di campionamento, sono stati calcolati vari parametri derivati. Ad esempio, è stato possibile calcolare la quantità di sostanza secca nei differenti organi, oppure la quantità di sostanza secca ad unità di superficie per le foglie, valore molto utile per calcolare la ripartizione della biomassa.

Un ulteriore campionamento è stato eseguito in data 29/08, in questo caso sono stati prelevati i grappoli delle piante oggetto dei rilievi fotografici. I grappoli sono stati identificati con un numero per poter poi risalire al tralcio di appartenenza e alla facciata di esposizione, Est od Ovest. Successivamente i grappoli sono stati disidratati in stufa fino ad ottenere un peso stabile tra due pesate differenti. Anche in questo caso è stata calcolata la quantità, in peso, di acqua allontanata dai grappoli e quindi la sostanza secca presente in essi.

Un altro prelievo di materiale è avvenuto il 16/12. In questo caso sono stati prelevati i tralci lignificati delle viti prese in esame. I tralci prelevati sono stati raccolti in mazzi ed essiccati in un luogo asciutto e ventilato per alcuni mesi. In seguito, sono stati pesati in modo da quantificare la sostanza secca accumulata. L'ultimo prelievo di materiale è stato eseguito nella primavera 2018, in questo caso sono stati prelevati due ceppi di vite che sono poi stati seccati in forno a 105 °C. Lo scopo è stato quello di misurare la quantità di sostanza secca, e quindi biomassa permanente, presente nel ceppo della vite. In questo modo è stato possibile identificare quanta sostanza secca è presente mediamente nei ceppi di vite del vigneto. A partire da questi dati è stato poi possibile calcolare le ripartizioni di biomassa all'interno della pianta.

5.7 Elaborazione dei dati estratti dalle ricostruzioni

I dati ricavati dai modelli provengono principalmente dalle *Dense Point Cloud* e possono essere riassunti in due classi: numero di punti raggruppati per differente colore-origine e dimensioni biometriche della chioma. Una volta ottenuti questi valori è stato necessario elaborarli, in maniera tale da ottenere i risultati ricercati in questo lavoro.

5.7.1 Elaborazione dati del numero di punti e misure di accrescimento

Per prima cosa, le misurazioni del numero dei punti di differente tipologia, delle piante A o B, sono state organizzate per data di rilievo in una tabella Excel. In secondo luogo, per ogni data di rilievo, sono state calcolate le medie del numero di punti di diverso tipo fra la pianta A e quella B.

Successivamente, a partire dai dati di accrescimento misurati in campo durante la stagione vegetativa, si è potuto calcolare alcuni parametri fondamentali per la stima della ripartizione della biomassa.

Tabella 6: Tabella riassuntiva delle azioni per elaborare dati numero punti e valori di accrescimento chioma

Azione	Operazione	Descrizione
1	Stima Area fogliare e lunghezza germogli	In ogni data, partendo dalle misure di accrescimento o dai campionamenti, sono stati stimati i valori di area fogliare totale e lunghezza totale dei germogli delle piante A e B.
2	Calcolo relazione tra N.Punti Verdi e valori di area fogliare e lunghezza germogli	Calcolo delle regressioni lineari tra i valori di numero di Punti verdi, per ogni data, e valori di area fogliare totale e lunghezza dei germogli di ogni pianta.
3	Calcolo peso secco ceppo	Stima del peso secco del ceppo alle date T(0) e T(8). Regressione lineare con il numero di punti marroni alle date T(4) e T(8).
4	Calcolo relazioni tra area fogliare-peso secco fogliare e lunghezza tralci-peso secco tralci	Basandosi sui germogli campionati durante l'anno sono state effettuate le regressioni lineari tra la superficie fogliare e il peso secco delle foglie e tra la lunghezza del tralcio e il peso secco del tralcio. Ottenute due equazioni lineari.
5	Stima pesi secchi foglie e tralci	Partendo dai dati di area fogliare e lunghezza dei tralci, utilizzando le equazioni calcolate al punto 4, sono stati stimati i pesi secchi di fogli e tralci per ogni data.
6	Calcolo relazione tra N.Punti Verdi e valori di peso secco fogliare e peso secco tralci.	Calcolo delle regressioni lineari tra i valori di numero di Punti verdi, per ogni data, e valori di peso secco fogliare e peso secco dei tralci di ogni pianta.
7	Stima pesi secchi aggiuntivi	Altro metodo di stima pesi secchi, per valutare se il primo metodo di stima fosse corretto.
8	Stima pesi secchi grappoli	Partendo dai valori dei due ultimi campionamenti e della vendemmi in data 29/8 sono stati stimati i pesi secchi dei grappoli dalla data T(4) alla data T(7).
9	Calcolo relazione tra N.Punti Chioma e valori di peso secco grappoli.	Calcolo delle regressioni lineari tra i valori di numero di Punti Chioma, per ogni data, e valori di peso secco grappolo di ogni pianta.
10	Calcolo ripartizione biomassa	Partendo dai dati di peso secco di foglie, tralci, ceppo e grappoli è stata calcolata la ripartizione della biomassa nei compartimenti delle due piante ad ogni data di rilievo.

- Azione 1. Nelle date T(0), T(1) e T(2) sono state misurate le lunghezze di tutte i germogli presenti sulle piante A e B. Inoltre, nella data T(2) è stata determinata l'area fogliare di tutti i germogli delle due piante. A partire dalla date T(3) fino alla data T(6) sono state misurate e calcolate la lunghezza e l'area fogliare di 5 germogli per pianta. Sulla base di questi valori sono state effettuate le stime dei dati mancanti in T(0), T(1) e T(7), l'area fogliare totale e la lunghezza totale dei germogli nella date che vanno da T(3) a T(6). La stima dei valori totali tra T(3) e T(6) è stata eseguita calcolando il valore medio dei 5 germogli, sia per quanto riguarda l'area fogliare che la lunghezza del tralcio, e moltiplicandolo poi per il numero totale dei germogli, che risulta essere di 14 nella pianta A e di 11 nella pianta B.

La stima dei valori mancanti di T(7) è avvenuta attraverso l'impiego dei dati raccolti durante l'ultimo dei 3 campionamenti totali, eseguiti per avere dei valori di riferimento per la stima della ripartizione della biomassa. Anche in questo caso sono stati calcolati i valori medi di lunghezza e di area fogliare dei 15 germogli campionati. Il valore è stato poi moltiplicato per il numero di germogli della pianta A e della pianta B.

La stima dei valori mancanti rispettivi all'area fogliare in T(0) e T(1) ha richiesto un differente approccio. Si è creata infatti una retta di regressione lineare tra la lunghezza totale dei germogli e l'area fogliare totale delle piante comprese tra T(2) e T(6). Essendo la lunghezza del germoglio e l'area fogliare strettamente correlate fra loro è stato possibile ricavare l'equazione del tipo " $y=mx$ " che permette di stimare l'area fogliare totale della pianta a partire dalla lunghezza totale dei germogli della pianta stessa.

Al termine di tutte queste operazioni di stima di dati mancanti, è risultata una tabella riportante: sulle righe le date di campionamento e le piante A o B, mentre nelle colonne il numero totale di punti, numero di punti verdi, eventuale numero di punti bruni e numero di punti grappolo. Inoltre, erano presenti i valori di area fogliare totale (cmq), la lunghezza totale dei germogli (cm) e la media, entro data, tra A e B per tutti i valori appena citati.

- Azione 2. Una volta ottenuti i valori dei punti verdi nelle differenti *Point Cloud* dei modelli è stato possibile metterli in relazione con i dati, misurati e stimati, rappresentanti la vegetazione reale delle piante prese in esame durante la stagione vegetativa.

Questo è stato possibile effettuando delle analisi delle regressioni lineari con la retta forzata a passare nelle coordinate 0;0. In questo modo si sono potute ricavare delle equazioni che mettessero in relazione il numero di punti verdi con l'area totale delle piante e con la lunghezza totale dei germogli. Le equazioni e, conseguentemente, i grafici corrispondenti sono stati ottenuti sia per i valori delle piante A e B distinti fra loro, che per i valori medi delle piante entro date, definiti come AB.

Attraverso le equazioni calcolate, appartenenti al tipo “ $y=mx$ ”, è possibile ricavare con una buona attendibilità i valori dei parametri sopracitati a partire dal numero di punti verdi presenti in un modello. Per ognuna delle regressioni lineari è stato calcolato l'RMSE e l'RRMSE, cioè il Root Mean Square Error ed il suo derivato in termini relativi che rappresentano l'errore della stima nella stessa unità di misura (o in %) della variabile stimata.

Terminato il calcolo delle equazioni necessarie a stimare i parametri appena citati è stato possibile iniziare a stimare i primi valori utili alla ripartizione della biomassa.

- Azione 3. Un'elaborazione iniziale è stata quella di calcolare il peso del ceppo all'inizio della stagione vegetativa ed alla fine, periodo in cui va a sommarsi il peso dei tralci lignificati. Per fare ciò ci si è affidati ai pesi misurati nell'inverno 2017-2018 e nella primavera successiva, procedura già descritta precedentemente in questo lavoro. Dopodiché i pesi ottenuti sono stati messi in relazione con il numero di punti marrone-bruno presenti nei modelli rilevati al tempo T(0) e T(8). Anche in questo caso è stato possibile ottenere un'equazione matematica in grado di stimare il peso del ceppo a partire dal numero di punti compresi in una ricostruzione 3D. Alla fine di questo passaggio sono stati stabiliti il peso dei ceppi prima e dopo la stagione vegetativa.
- Azione 4. Successivamente si è reso necessario determinare due equazioni matematiche, la prima che andasse a mettere in relazione la superficie fogliare di un germoglio con il suo peso secco e la seconda che facesse lo stesso processo tra la lunghezza del tralcio ed il suo peso secco. Inoltre, le due relazioni dovevano tenere conto che il rapporto tra le

variabili dipendenti, quindi i pesi, e le variabili indipendenti, quindi lunghezza ed area fogliare dei germogli, andavano a variare durante l'annata vegetativa.

Per calcolare queste relazioni sono stati impiegati i dati raccolti durante i 3 campionamenti della vegetazione eseguiti durante l'anno. In primo luogo, dalle tabelle dei 3 campionamenti sono state estrapolate le misure di lunghezza dei tralci e di area fogliare, entrambi i valori con i rispettivi pesi secchi. Tutti i dati sono poi stati incolonnati e ne è stata calcolata l'equazione necessaria a mettere in relazione le due variabili.

Sia per quanto riguarda l'area fogliare ed il suo peso secco che per la lunghezza dei tralci e peso secco l'equazione descrittiva impiegata è una retta del tipo " $y=mx+q$ ".

- Azione 5. Utilizzando le equazioni appena descritte è stato poi possibile stimare il peso secco dei tralci e delle foglie delle piante A e B nelle date dei vari rilievi fotografici. Per questa stima ci si è basati sulla lunghezza totale dei tralci e sull'area totale stimati precedentemente.
- Azione 6. I pesi secchi sono stati poi messi in relazione con il numero di punti verdi, sia con i dati delle due piante distinti tra loro che mediati, in modo da ottenere delle equazioni utili per stimare il peso della vegetazione direttamente a partire dal numero di punti verdi presenti in una *Point Cloud*. Anche in questo caso sono state ottenute delle regressioni lineari del tipo $y=mx$.
- Azione 7. In aggiunta, i pesi secchi di foglie e tralci, alle date T(2), T(4) e T(7), sono stati stimati attraverso un altro metodo. Anche in questo caso ci si è basati sui dati raccolti nei 3 campionamenti effettuati durante la stagione vegetativa. In particolare, sono stati calcolati due valori in ognuna delle 3 date. Il primo è stato la media del peso secco delle foglie presenti su ogni germoglio oggetto del campionamento. In questo modo è stato possibile quantificare il peso medio delle foglie di un germoglio ad ognuna delle date di interesse.

Nel caso del secondo parametro si è operato nella stessa maniera, ma basandosi sul peso secco dei tralci.

Successivamente, i pesi secchi medi per ogni data sono stati moltiplicati per il numero dei germogli della pianta A e B, è stato così ottenuto il peso delle foglie e dei tralci delle due piante nelle 3 date di campionamento.

Questi valori sono stati aggiunti alle rette di correlazione in modo da raddoppiare i numeri di dati nelle 3 date di interesse. In tal modo è stato possibile osservare se due metodi di stima differenti ottengono valori simili tra loro.

- Azione 8. Ultimo dato ad essere calcolato è stato il peso dei grappoli. La stima del peso dei frutti si è basata sul peso dei grappoli rilevati durante gli ultimi due campionamenti, T(4) e T(7), e durante la vendemmia dei grappoli di A e B, effettuata in data 29/08/2017. Nei tre campionamenti è stato misurato il peso fresco e secco dei grappoli per ogni tralcio, poi grazie al numero di grappoli presenti su ogni germoglio è stato possibile ricavare i pesi medi dei grappoli nelle due date, sia freschi che secchi.

Una volta ottenuti i pesi medi nelle date T(4) e T(7) sono stati moltiplicati per il numero di grappoli presenti sulla pianta A e B in modo da ottenere il peso totale dei grappoli alle date di interesse.

- Azione 9. I valori così definiti sono stati messi in relazione con il numero di punti della chioma, questo valore è stato calcolato sommando i punti verdi con i punti rappresentanti i grappoli. Dalla retta di regressione lineare ottenuta è stata calcolata l'equazione del tipo " $y=mx+q$ " necessaria a stimare il peso secco totale dei grappoli alla data T(4), T(5), T(6) e T(7).

- Azione 10. Determinati i valori del peso secco delle varie componenti della pianta è stato possibile procedere con il calcolo della ripartizione della biomassa delle due piante, in ogni data.

La stima della ripartizione della biomassa è stata effettuata in termini di peso secco e si è basata sulla somma delle varie componenti stimate precedentemente.

Ad ogni data, in modo separato tra la pianta A e B, il peso secco del ceppo è stato addizionato al peso secco stimato delle foglie, dei tralci e, a partire dalla data T(4), dei grappoli. Dopodiché è stato calcolato il peso in termini percentuali delle varie componenti rispetto alla biomassa totale di ogni data. Il procedimento è stato eseguito anche sui valori medi delle piante A e B in ciascuna data.

5.7.2 Misure biometriche

I dati della lunghezza totale dei germogli, determinati attraverso le misure biometriche delle chiome ricostruite nelle *Dense Point Cloud* sono stati paragonati ai dati delle lunghezze ottenuti attraverso le stime basate sul numero di punti della nuvola stessa.

Per ognuna delle due piante, i valori delle lunghezze, sia stimati che misurati, sono stati sottratti dal valore riscontrato alla data successiva, in modo da ottenere l'accrescimento, in termini di cm lineari, della lunghezza totale dei germogli delle due piante.

Successivamente i valori stimati e quelli misurati sono stati confrontati utilizzando una retta di regressione e calcolando i dati relativi all' RMSE ed al' RRMSE.

5.7.3 Growth analysis

A partire dai dati di ripartizione della biomassa precedentemente stimati, è stato possibile creare dei modelli di accrescimento su base giornaliera. Questi modelli sono stati ottimizzati sulla base di: peso secco delle foglie, peso secco dei tralci, peso secco dei grappoli e biomassa totale prodotta nell'anno e indirizzata ad organi annuali, escludendo la biomassa destinata a radici e ceppo.

La funzione è stata ottenuta attraverso il fitting di un modello non lineare a sigmoide, calcolato attraverso il software *SigmaPlot*, che descrive il modello di accrescimento dei diversi organi vegetali, ottenuto a partire dai dati di ripartizione della biomassa stimati in precedenza.

L'equazione del modello a sigmoide a 3 parametri risulta essere:

$$y = \frac{a}{(1 + \exp(-\frac{x - X_0}{b}))} \quad Eq. 15$$

dove a rappresenta il massimo valore di biomassa ottenibile, b rappresenta un parametro di curvatura del modello e X_0 esprime il punto di flesso della curva in cui è massimo il tasso di accrescimento giornaliero, quindi è espresso in giorni e rappresenta la massima pendenza della curva.

Ottenuti tutti i parametri è stato possibile ricostruire in una tabella Excel i modelli di accrescimento per le varie componenti, espressi in base giornaliera. Successivamente sono

stati calcolati, sempre su base giornaliera, alcuni indici che vanno a descrivere la crescita della pianta, quindi utili per effettuare un'analisi dell'accrescimento.

Gli indici scelti sono stati: l'*Absolute Growth Rate* (AGR), il *Relative Growth Rate* (RGR), il *Leaf Area* (LA), il *Leaf Area Index* (LAI), la *Specific Leaf Area* (SLA), il *Leaf Weight Ratio* (LWR), il *Leaf Area Ratio* (LAR) ed il *Net Assimilation Rate* (NAR).

L'*Absolute Growth Rate* è stato calcolato come differenza tra la biomassa (W) presente negli organi annuali al giorno desiderato e quella presente al giorno precedente. Questo indice è stato calcolato per tutti e 4 i componenti della biomassa. La formula impiegata è stata:

$$AGR = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \quad Eq. 1$$

Per quanto riguarda il *Relative Growth Rate* è stato determinato come il rapporto fra la differenza del logaritmo naturale della biomassa degli organi al tempo t1 e t2 e la differenza tra t1 e t2.

Formula:

$$RGR = \frac{(\ln W_2) - (\ln W_1)}{(t_2 - t_1)} \quad Eq. 3$$

Anche nel caso dell'RGR, come in quello dell'AGR, è stato calcolato per tutti e 4 i componenti della biomassa.

Il *Leaf Area Index* è un parametro adimensionale che risulta dal rapporto tra l'area fogliare totale della pianta (LA) ed il sesto di impianto, dato che risulta essere la quantità di chioma, in metri quadrati, che insiste su un metro quadro di terreno.

$$LAI = \frac{LA}{m \text{ Int} * m \text{ su Fila}} \quad Eq. 6$$

Successivamente è stato ottenuto lo *Specific Leaf Area*.

Il procedimento di calcolo è stato dato dal rapporto tra l'area fogliare della pianta e il peso secco delle foglie stesse. La formula risulta semplice:

$$SLA = \frac{LA}{LW} \quad Eq. 10$$

Il *Leaf Weight Ratio* risulta invece dal rapporto tra il peso secco delle foglie e la biomassa totale della pianta.

$$LWR = \frac{LW}{W} \quad Eq. 11$$

L'indice del *Leaf Area Ratio* è ottenibile attraverso due formule distinte, o lo si calcola come il prodotto di LWR x SLA oppure attraverso la seguente formula:

$$LAR = \frac{(LA_2 - LA_1)(\ln W_2 - \ln W_1)}{(W_2 - W_1)(\ln LA_2 - \ln LA_1)} \quad Eq. 9$$

Infine, è stato calcolato il *Net Assimilation Rate*. Questo parametro è stato determinato attraverso la seguente formula:

$$NAR = \frac{(W_2 - W_1)}{(LA_2 - LA_1)} * \left(\frac{LN(W_2) - LN(W_1)}{t_2 - t_1} \right) \quad Eq. 5$$

Con il calcolo dell'indice NAR è terminata la fase di elaborazione dei dati.

6 RISULTATI e DISCUSSIONE

6.1 Fotografie, qualità immagini e rilievo fotografico

Durante la primavera-estate 2017 sono stati eseguiti i rilievi fotografici necessari ad ottenere le immagini per eseguire le ricostruzioni 3D basandosi sulla tecnica della SfM. In totale sono state eseguite 1440 fotografie, organizzate in 9 date. In particolare, nelle 9 date sono stati effettuati 80 scatti a pianta, per un totale di 160 fotografie per ogni giornata di rilevamento.

Durante la fase di creazione delle nuvole di punti e dei modelli 3D sono emersi alcuni possibili miglioramenti riguardanti le fotografie di partenza.



Figura 11: A sinistra immagine pianta A lato Est T(1) e a destra immagine pianta A lato Est T(3)

In primo luogo, non è stata utilizzata una macchina fotografica adatta alla SfM. Come già detto, in questo caso è stata impiegata una Canon Ixus 125 HS, una macchina digitale compatta, mentre una fotocamera Reflex sarebbe risultata più versatile.

Innanzitutto, utilizzando una Reflex, sarebbe stato più semplice impostare una lunghezza focale fissa e costante per standardizzare le fotografie durante l'anno. Inoltre, nel caso di una fotocamera Reflex, sarebbe stato possibile variare le impostazioni ISO a piacere, ottenendo immagini più costanti dal punto di vista della luminosità.

Un problema delle immagini raccolte durante l'anno è stato quello di non risultare omogenee per quanto riguarda la luminosità e il bilanciamento del bianco. Per superare questa differenza le immagini sono state modificate in *Photoshop*.

Se si fosse utilizzato una macchina fotografica Reflex, sarebbe stato possibile scattare le immagini in formato Raw anziché Jpg. In questo modo si sarebbero ottenuti due miglioramenti. Il primo sarebbe stato quello di rendere più semplice ed automatizzabile il bilanciamento del bianco e della luminosità delle foto attraverso *Photoshop*. Inoltre, sarebbe stato possibile eseguire delle modifiche molto più marcate delle immagini, in modo da migliorarne al massimo la qualità. Scattare nel formato Raw avrebbe comunque richiesto un maggiore lavoro di post-produzione. In aggiunta, alla fine del processo di modifica, sarebbe risultata necessaria la conversione di tutte le immagini in un formato visibile, ad esempio Tiff o Jpg.

Un altro semplice ma indispensabile accorgimento per migliorare la qualità degli scatti sarebbe quello di valutare attentamente il momento e le condizioni meteorologiche delle date di rilievo. In alcuni casi, per necessità, le fotografie sono state effettuate in mattinate di vento/brezza, questo fatto peggiora la qualità degli scatti per la SfM dal momento che muove le foglie dalla posizione normale, causando un aumento del rumore dei modelli e delle difficoltà nelle ricostruzioni.

Molto importante risulta anche la condizione di luce del cielo. Le foto devono essere scattate all'alba oppure al crepuscolo, in modo da ridurre la luminosità del cielo ed annullare la luce diretta sulla pianta. Infatti, al variare delle condizioni di illuminazione delle immagini varia anche il modo in cui *Photoscan* allinea le immagini ed estrae i punti per creare le *Point Cloud*. Da questo ne comporta che i rilevamenti vanno eseguiti molto presto al mattino. In alcuni casi la parte finale dei rilievi è stata eseguita al limite di queste condizioni di luce, rendendo necessaria la correzione delle immagini con il software *Photoshop*.

Il cielo nuvoloso risulta essere un buon compromesso per allungare il lasso di tempo utile per l'esecuzione del rilievo fotografico.

Eseguendo il processo di ricostruzione 3D è risultato evidente un'ulteriore possibilità per migliorare la tecnica fotografica e quindi facilitare la creazione dei modelli.

Nel rilievo è necessario utilizzare più target artificiali anziché solo due. Questo perché i target fungono da punti di riferimento univoci e altamente riconoscibili, possono quindi essere sfruttati per l'allineamento delle foto, sia che il programma operi in maniera automatica sia che si lavori in modo manuale.

Una proposta è quella di aumentare i target fino ad otto per pianta, anche di dimensioni minori rispetto a quelle attuali, e di utilizzare 4 coppie di colori differenti.

In questo caso gli obiettivi artificiali andrebbero posizionati non più all'interno della chioma, ma due nella parte bassa della chioma del lato Est, due nella parte alta e gli altri quattro nella stessa posizione ma nel lato Ovest opposto. Inoltre, i target dovrebbero mantenere la stessa distanza fra loro.

I colori dei target andrebbero due per parte, in modo che il programma possa distinguere in modo univoco le immagini appartenenti al lato Ovest oppure a Quello Est.

L'aumento del numero di target può facilitare il riconoscimento ed il posizionamento delle fotografie da parte del programma *Photoscan*, superando anche i problemi dovuti ad immagini troppo ravvicinate che non inquadrano sufficienti punti caratteristici oppure con campo di visione ristretto. Sempre sui target è molto semplice posizionare i markers per l'allineamento manuale dei *Chunk* e la successiva unione, quindi più obiettivi artificiali significa anche più posizioni univoche per l'unione dei vari *Chunk* fotografici.

Inoltre, un'altra proposta per migliorare il rilievo è quella di incollare dei piccoli cerchi di carta colorata sulle foglie più alte della chioma. In questo modo si possono avere più punti di riferimento nel momento dell'unione dei due lati della ricostruzione, che risulta essere uno dei passaggi più delicati.

Un ulteriore aspetto su cui porre l'attenzione è quello riguardante le posizioni di scatto delle immagini. Per migliorare la fase di ricostruzione dei 3D è necessario aumentare la sovrapposizione fra le varie fotografie. Questo fatto è ottenibile aumentando le distanze di scatto dalla pianta oppure utilizzando una macchina fotografica munita di un obiettivo con un campo di visuale più largo. Per un ulteriore miglioramento della tecnica fotografica andrebbero scattate delle immagini anche in corrispondenza del filare, nel suo senso longitudinale, in modo da avere delle immagini che coprano tutta la pianta e possano ridurre eventuali problemi di unione dei due lati della pianta ricostruiti separatamente.

L'ultimo aspetto da valutare attentamente è il procedimento stesso di rilievo fotografico. La SfM come utilizzata in questo lavoro è una tecnica estremamente lenta e laboriosa. Sono necessari cavalletti fotografici molto alti, scale per effettuare gli scatti dall'alto e punti di riferimento per riuscire a scattare circa dalla stessa posizione nelle varie volte. Un processo di questo tipo è applicabile solamente nei casi di studio di piante particolari oppure per monitorare da vicino una determinata dinamica di sviluppo.

Per applicare la tecnica su ampia scala sarebbe dunque necessaria un'opportuna ingegnerizzazione volta a semplificare il procedimento fotografico, utilizzando, ad esempio, più macchine fotografiche montate su una struttura che si muove trasportata da un veicolo. Un'altra possibilità per aumentare la componente dinamica di questa tecnica è l'impiego di droni, che possono implementare notevolmente i campi ed i modi di utilizzo della SfM anche nel monitoraggio di vigneti o frutteti.

6.2 Modelli 3D e tecnica di ricostruzione

I risultati dei processi di ricostruzione sono i modelli 3D delle piante A e B. In particolare, ogni ricostruzione si compone di tre modelli distinti tra loro, ma che derivano l'uno dall'altro. Il primo è la *Dense Point Cloud*, un modello composto da punti, seguito dal modello Mesh, che è formato da poligoni triangolari ed infine la Texture, composta dalla Mesh su cui viene proiettata la trama delle foto originali.

A seguito delle elaborazioni dei modelli 3D sono state ottenute 17 ricostruzioni su 18. In particolare, nonostante i ripetuti tentativi, non è stato possibile creare il modello della pianta A in data T(3).

Le altre ricostruzioni non presentano tutte gli stessi livelli di completezza e di perfezione, ma sono da considerare riuscite.

I modelli 3D delle piante A e B nelle date T(0), T(1), T(2), T(7) e T(8) sono stati creati con dei buoni risultati. Dal punto di vista visivo, in questi modelli sono riconoscibili tutte le parti della pianta, inoltre non sono visibili discrepanze nei punti di unione dei vari Chunk di immagini. A questo gruppo possiamo aggiungere la pianta A nella data T(6).

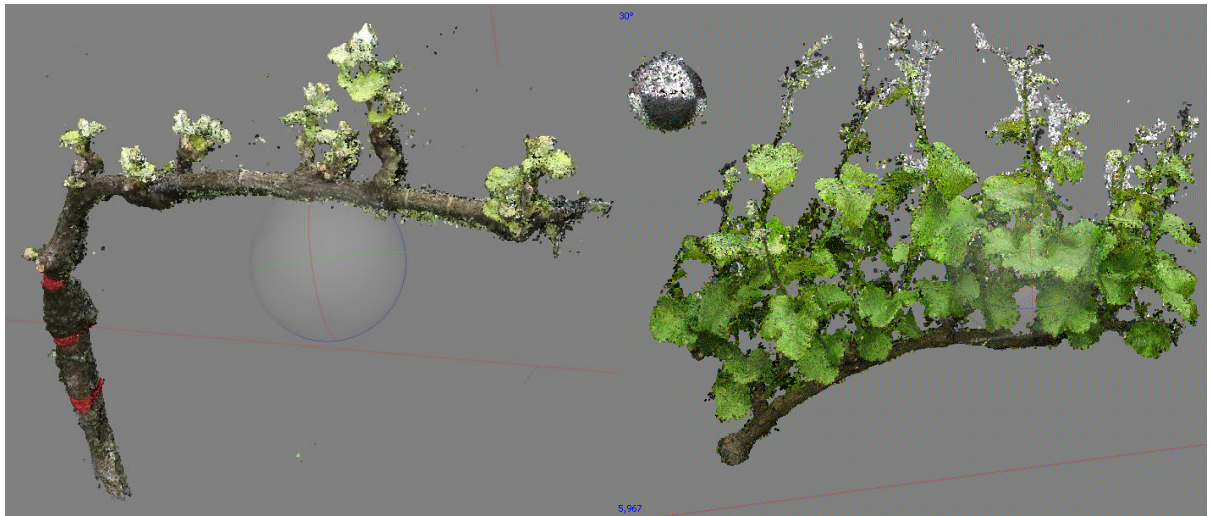


Figura 12: A sinistra immagine Dense Point Cloud pianta B T(0) e a destra immagine Dense Point Cloud pianta A T(2)



Figura 13: Immagine Dense Point Cloud pianta B T(7)

Le ricostruzioni rimanenti possono essere considerate riuscite, ma non presentano un buon risultato visivo. In genere queste ricostruzioni presentano dei problemi nel montaggio dei vari *Chunk* tra loro.

Valutando i restanti modelli in modo più preciso, si possono classificare in base ai difetti riscontrati.

Nella pianta B data T(3), il modello è ricostruito in maniera soddisfacente, ma durante l'unione delle sub-parti, si è verificato un problema di scala, per questo motivo una parte del modello risulta di dimensioni minori e immersa in uno dei *Chunk* di dimensioni maggiori.

Per quanto riguarda il modello 3D della pianta A in T(4), il problema è dato dall'errata unione dei due lati, Est ed Ovest della spalliera. In questo caso i lati della pianta sono stati ricostruiti in maniera esatta, ma il montaggio è avvenuto capovolto, quindi il modello finale presenta il ceppo di un lato posizionato nella parte bassa della spalliera, mentre il ceppo del lato opposto è posizionato nella parte alta della stessa. I tralci sono orientati verso i ceppi del lato opposto.

Anche nei modelli delle piante B al T(4), A in T(5) e B in T(5) i due lati delle piante sono stati ricostruiti in maniera soddisfacente, ma l'unione delle due metà delle piante ha presentato comunque alcuni disallineamenti che in ogni caso influiscono in modo marginale sul risultato finale. In particolare, le due metà non sono state unite in maniera parallela tra loro, ma in modo distorto. Nel primo caso le due metà sono perpendicolari tra loro, mentre negli altri sono leggermente inclinate.

Per quanto riguarda la ricostruzione della pianta B al tempo T(6), la ricostruzione di uno dei due lati è molto buona, mentre il lato opposto è stato ricostruito in maniera parziale, non tutte le immagini sono allineate correttamente. Inoltre, al momento dell'unione dei due lati della spalliera, il posizionamento delle due metà non è avvenuto in modo congruo, quindi le due parti risultano unite in maniera errata.

Tralasciando l'aspetto visivo delle ricostruzioni, in tutti i 17 modelli che sono stati ottenuti, è stato possibile eseguire la conta dei punti delle *Dense Point Cloud*, in modo da ottenere i dati di partenza per le successive elaborazioni.

Inoltre, a partire dai modelli 3D, è stato osservato che il ceppo delle piante è stato ricostruito in maniera integrale solamente nelle date T(0) e T(8) dei campionamenti. Questo è dovuto probabilmente al fatto che, in queste due date, non era presente la vegetazione della pianta, inoltre l'altezza del cotico erboso era bassa. In questo modo, durante tutte le foto del rilievo,

il ceppo non è stato mai coperto da altri elementi, permettendo la formazione del modello 3D è precisa ed accurata.

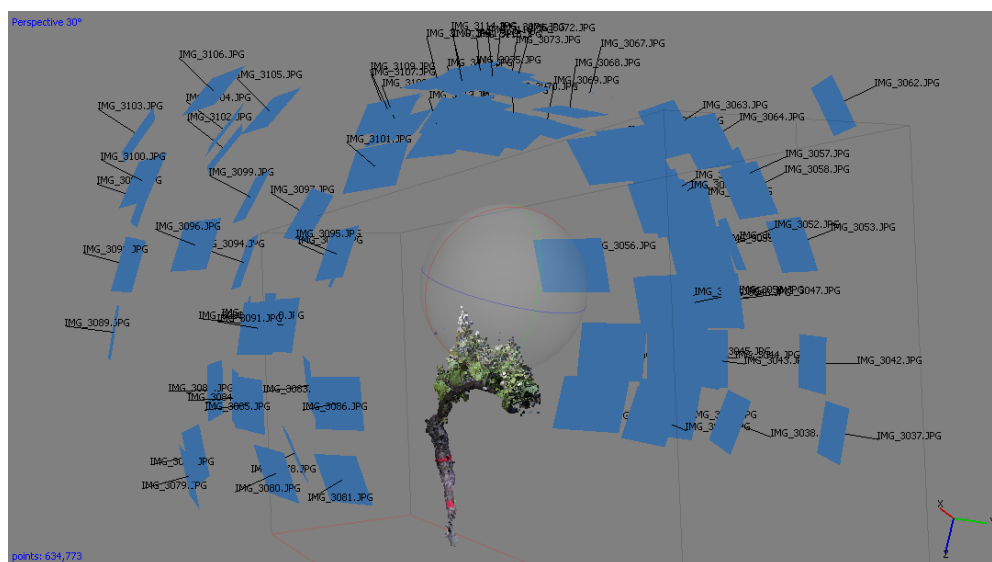


Figura 14: Modelle 3D con evidenziate in blu le posizioni da cui sono state scattate le fotografie di partenza

Per migliorare la procedura di montaggio in fase di ricostruzione è già stato proposto nel capitolo precedente di aumentare il numero di target, in modo da avere maggiori riferimenti univoci per i markers, facilitarne la procedura di posizionamento e renderli visibili da più fotografie.

Per quanto riguarda la procedura di ricostruzione, non vengono proposte modifiche alla *workflow*. Un importante aspetto da valutare è quello di settare al massimo tutti i parametri della ricostruzione solamente se si dispone di una macchina in grado di supportarlo, in caso contrario si potrebbero riscontrare eccessivi tempi di elaborazione delle ricostruzioni oppure perdita parziale di dati e difficoltà nella creazione dei modelli 3D. In aggiunta, un aspetto su cui porre l'attenzione è quello di eliminare, prima della procedura di allineamento, le immagini qualitativamente scadenti oppure non a fuoco. *Photoscan* stima la qualità delle immagini attraverso il processo *Estimate Image Quality*, al termine del quale le fotografie che presentano un valore minore di 0,5 units vanno disabilitate o eliminate. Al termine dei processi di ricostruzione è risultato evidente un aspetto da non trascurare. Il tempo necessario alle elaborazioni dei modelli 3D è stato molto elevato. Inoltre, il processo

è stato caratterizzato da varie difficoltà, spesso superate dopo vari tentativi e molte ricostruzioni tridimensionali fallite. Questo comporta un difficile utilizzo della SfM nei casi in cui sia necessario ottenere i risultati dei rilievi in breve tempo o in tempo reale.

6.3 Misure di crescita e campionamenti

Durante l'intera stagione vegetativa sono state eseguite delle misure degli accrescimenti delle due piante seguite da questo lavoro.

Le misurazioni sono state eseguite in corrispondenza alle date del rilievo fotografico. Durante le prime 3 date sono stati misurati tutti i germogli, poi a partire dalla quarta solamente 5 tralci per pianta.

Per migliorare le misurazioni degli accrescimenti si possono apportare alcune modifiche al processo di monitoraggio.

In primo luogo, si potrebbe mantenere inalterato il fatto di misurare le dimensioni fogliari solamente su 5 tralci totali. Questa operazione è la più lenta e laboriosa, quindi monitorare solo alcuni tralci permette di velocizzare notevolmente il processo. In secondo luogo, si potrebbe invece misurare la lunghezza totale di tutti i tralci, anche senza monitorare le lunghezze degli internodi. Le lunghezze totali dei tralci permettono di ottenere una stima molto precisa dell'area fogliare associata, basandosi sulla forte relazione che scaturisce dal rapporto fra area fogliare totale di un germoglio e sua lunghezza totale. (vedi capitolo 3.5) In questo modo sarebbe possibile ottenere stime dell'area fogliare ancora più precise, senza allungare le tempistiche di monitoraggio.

Una problematica che si è presentata durante questa tesi è stata quella della mancanza delle misure di accrescimento in prossimità di data T(7). I valori mancanti sono stati stimati sfruttando i dati derivanti dai tre campionamenti eseguiti durante la stagione, ma sarebbe stato più preciso aver effettuato le misure di accrescimento.

Durante la stagione di crescita sono stati anche eseguiti 3 campionamenti del materiale vegetale, in modo da poter quantificare il peso delle varie parti della pianta durante la stagione. Nel primo campionamento sono stati prelevati 20 germogli, mentre nei due successivi ne sono stati raccolti 15. Tutti i tralci sono stati pesati e misurati prima e dopo il processo di essiccazione in stufa a 105 gradi.

I campionamenti sarebbero stati migliorabili prelevando un numero maggiore di germogli, in modo da essere più rappresentativi delle condizioni del campo e delle piante.

Inoltre, analizzando i dati dei germogli campionati, è stato osservato un ritardo di sviluppo, sia in termini di dimensioni che di peso, dei germogli campionati rispetto a quelli delle piante seguite dalle misure di accrescimento. Questo fatto potrebbe essere dovuto a due principali fattori. Innanzitutto, le piante seguite durante questa tesi non sono state danneggiate dalla gelata verificatasi in data 21/04. Al contrario la maggior parte delle piante del vigneto sono state colpite dalla gelata, ciò ha causato un rallentamento del germogliamento nelle primissime fasi dello sviluppo che può essere stato trascinato durante l'intera stagione. In secondo luogo, le piante seguite dalla tesi sono state sottoposte ad un dirado dei germogli leggermente maggiore rispetto alle piante del resto del campo. Per queste ragioni la dimensione, lo sviluppo e il peso dei germogli prelevati nelle altre piante potrebbe essere minore rispetto a quelli delle piante A e B.

Un'ultima miglioria al procedimento di campionamento sarebbe stata quella di aumentare la frequenza dei campionamenti dei grappoli, in modo da disporre di maggiori informazioni per stimare il peso dei grappoli medio ad ogni data. Inoltre, ad ogni campionamento sarebbe necessario prelevare un numero di grappoli maggiore, in modo da ottenere dati più simili a quelle della popolazione di partenza. Questa osservazione va di pari passo con quella dell'aumentare il numero di germogli prelevati, infatti al variare di questi ultimi varia in modo proporzionale anche il numero di grappoli campionati.

6.4 Conta dei punti

Al termine delle ricostruzioni 3D delle piante sono stati generati tre modelli tridimensionali per ogni pianta. A partire dai modelli della *Dense Point Cloud*, cioè una nuvola densa di punti, sono stati calcolati il numero di punti in ogni ricostruzione, suddividendoli per classi di colore.

Le tipologie di classificazione dei punti interessate da questo studio sono: Punti Verdi, Punti Bruno-marroni, Punti del grappolo e Punti Totali.

Di seguito vengono riportate nel dettaglio le ricostruzioni delle piante con i rispettivi numeri di punti, distinti per differenti classificazione. Valori da moltiplicare per 1000.

Tabella 7: Tabella numero di punti per tipologia. I valori sono da riferire in migliaia

Data	Rilievo	Pianta	P. tot.	P. Verdi	P.Chioma	P.Bruni	P.Grappoli
15/04/2017	T0	A	501	235	235	266	
15/04/2017	T0	B	391	110	110	256	
30/04/2017	T1	A	635	402	402		
30/04/2017	T1	B	972	641	641		
14/05/2017	T2	A	2033	1783	1783		
14/05/2017	T2	B	2169	1838	1838		
27/05/2017	T3	A					
27/05/2017	T3	B	2731	2403	2403		
10/06/2017	T4	A	3463	3362	3362		
10/06/2017	T4	B	3151	2963	2963		
26/06/2017	T5	A	3391	3228	3228		
26/06/2017	T5	B	5195	5005	5005		
15/07/2017	T6	A	5291	4983	5140		157
15/07/2017	T6	B	4706	4579	4579		
01/08/2017	T7	A	2098	1879	2055		176
01/08/2017	T7	B	5430	4796	5149		353
16/12/2017	T8	A	311			311	
16/12/2017	T8	B	249				

Alla base del procedimento di conta dei punti, vi è l'idea che, partendo dallo stesso numero di immagini e utilizzando sempre le stesse impostazioni del programma durante le ricostruzioni, il numero di punti che vanno a costituire la *Dense Point Cloud* è proporzionale alla dimensione della pianta. In questo modo si potrebbe andare a definire dimensioni e biomassa delle piante proprio partendo dalla numerosità dei punti.

Il procedimento utilizzato per contare i punti, precedentemente descritto nel capitolo 2.5, risente della soggettività dell'operatore durante le azioni di selezione dei punti da eliminare. Considerando però che l'operatore è sempre rimasto lo stesso e che replicando il procedimento si è riscontrata una buona ripetibilità dei risultati, si può affermare che il

metodo è sufficientemente preciso per quantificare il numero dei punti e le varie classi di appartenenza.

I dati di maggior interesse sono quelli riguardanti i punti verdi, che rappresentano la porzione fotosintetizzante della pianta.

Entro data i punti delle due piante differiscono per quantità, in particolare, considerando il numero assoluto, si osservano delle differenze maggiori nelle date T(7) e nella data T(5). Se si considerano le differenze percentuali, riferendole al numero più grande, le due date con la disegualianza maggiore sono data T(7) e T(0). Le differenze di punti, espressi in migliaia, tra la pianta A e B entro data sono pari a:

Tabella 8: Tabella delle differenze percentuali del numero di punti verdi entro data.

Data	Rilievo	Pianta	P. Verdi	Diff.entro	Var % maggiore.
15/4	T0	A	235		
15/4	T0	B	110	125	53,1
30/4	T1	A	402		
30/4	T1	B	641	240	37,4
14/5	T2	A	1783		
14/5	T2	B	1838	56	3,0
27/5	T3	A			
27/5	T3	B	2403		
10/6	T4	A	3362		
10/6	T4	B	2963	959	28,5
26/6	T5	A	3228		
26/6	T5	B	5005	1777	35,5
15/7	T6	A	4983		
15/7	T6	B	4579	405	8,1
1/8	T7	A	1879		
1/8	T7	B	4796	2917	60,8

Per quanto riguarda il numero dei punti di colore bruno possiamo osservare che una delle due piante in data T(8) presenta una conta minore rispetto alle due piante in data T(0).

Nel conteggio dei punti rappresentanti il grappolo non si nota alcuna particolarità.

I dati ottenuti da tutte le ricostruzioni sono stati mediati entro data, in modo da creare un valore medio fra le piante A e B. I valori medi, espressi in migliaia, sono i seguenti:

Tabella 9: Valori medi entro data delle varie tipologie di punti, espressi in base mille.

Data	Rilievo	Media	P.totali	P.verdi	P.chioma	P.bruni	P.grappoli
15/04	T0	AB	457	172	172	285	
30/04	T1	AB	803	521	521		
14/05	T2	AB	2101	1811	1811		
27/05	T3	AB	2731	2403	2403		
10/06	T4	AB	3307	3162	3162		
26/06	T5	AB	4293	4117	4117		
15/07	T6	AB	4999	4781	4938		157
01/08	T7	AB	3764	3338	3602		264
29/08	T8	AB	280			280	

Mediare i dati fra le piante A e B è stato opportuno considerando le possibili applicazioni della SfM. Infatti, se si dovesse impiegare questa tecnica per valutare un gruppo di piante oppure un filare-campo, i valori indicativi sarebbero quelli medi tra tutte le piante facenti parte del campione.

6.5 Stime Aree fogliari e Lunghezze germogli

Dopo aver calcolato il numero dei punti nelle varie ricostruzioni è stato necessario stimare la lunghezza totale e l'area totale dei germogli per ogni pianta, nelle varie date di rilievo. Per conoscere l'area fogliare derivante dalle misure di accrescimento è stata impiegata la seguente equazione $y = [N_1 * N_3 N_3 * a]$. Il parametro a ottimizzato dalla relazione fra le aree scannerizzate e le lunghezze N_1 e N_3-N_3 è stato pari a 1,09778, i parametri della retta di regressione utilizzati per la stima sono r^2 0,94 e $RMSE = 12,5$ e $RRMSE = 9,6\%$.

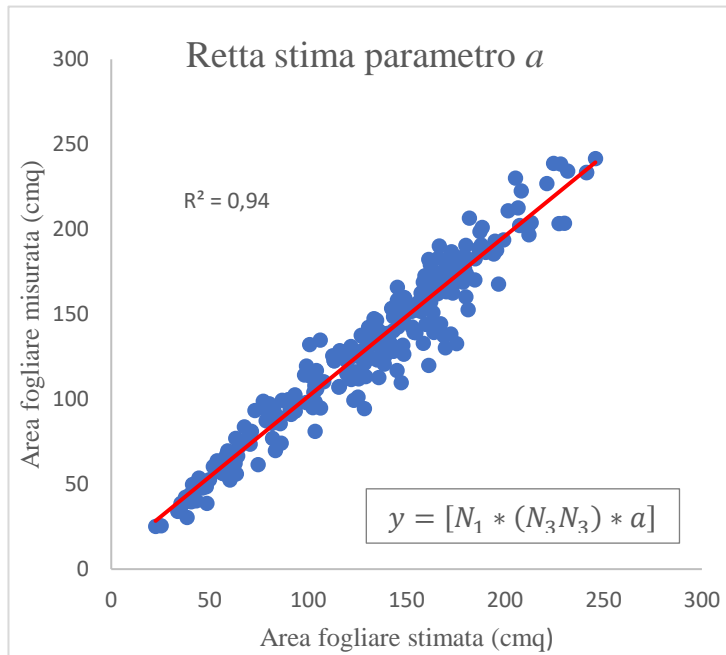


Figura 15: Grafico stima parametro a

Successivamente, partendo dai valori medi di lunghezza e di area fogliare dei germogli, ottenuti dalle misure di accrescimento registrate durante l'anno, è stato possibile calcolare i valori di area fogliare totale e lunghezza totale dei germogli. Per il calcolo i valori medi della pianta A sono stati moltiplicati per 14 germogli, mentre quelli della pianta B per 11. In questo modo sono stati ottenuti i seguenti valori:

Tabella 10: Tabella di area fogliare e lunghezza dei germogli per ogni pianta ad ogni data di rilievo.

Rilievo	Pianta	L.germ tot	L.germ.med	A.f. tot	A.f. media	N.germ.
		cm	cm	cm ²	cm ²	
T0	A	75,0	3,8			
T0	B	87,3	3,4			
T1	A	199,0	11,7			
T1	B	258,0	13,6			
T2	A	568,0	37,9	5080,4	362,9	14
T2	B	593,0	49,4	5659,4	471,6	11
T3	A	1380,4	98,6	15896,1	1135,4	14
T3	B	1207,8	109,8	15090,0	1371,8	11
T4	A	1960,0	140,0	25012,3	1786,6	14

T4	B	1779,8	161,8	24353,4	2213,9	11
T5	A	1990,8	142,2	22065,2	1576,1	14
T5	B	1809,6	144,6	23566,3	2019,7	11
T6	A	1954,4	139,6	19661,1	1404,4	14
T6	B	1760,0	137,0	23330,4	1920,0	11

Il procedimento di stima delle aree dei germogli nelle date T(0) e T(1) si è basato sui parametri della seguente equazione $y = 12,09 x$, che è stata ottenuta mettendo in relazione le lunghezze e l'area dei germogli delle date da T(2) a T(6). Per il calcolo dell'equazione è stata utilizzata una regressione lineare semplice, inoltre la retta è stata forzata a passare nelle coordinate 0;0, questa scelta è stata fatta supponendo che in assenza di germoglio non vi sia neppure area fogliare. Un altro motivo che ha portato a forzare la retta in 0;0 è quello di evitare che la retta andasse a sconfinare in area negativa e che quindi, ad un valore positivo di x ne venisse associato uno negativo di y.

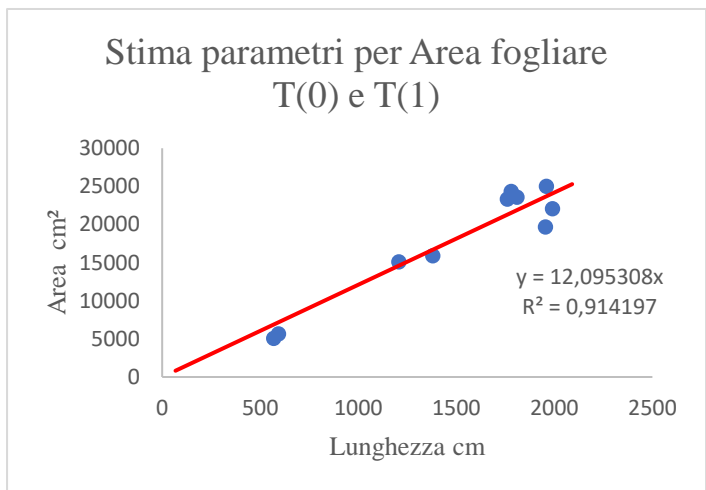


Figura 16: retta di regressione fra area fogliare e lunghezze dei germogli da T(2) a T(6)

L'equazione presenta un' R^2 pari a 0,91, inoltre i valori stimati sono stati paragonati a quelli di partenza ottenendo un RMSE pari a 2071,91 ed un RRMSE di 11,53%.

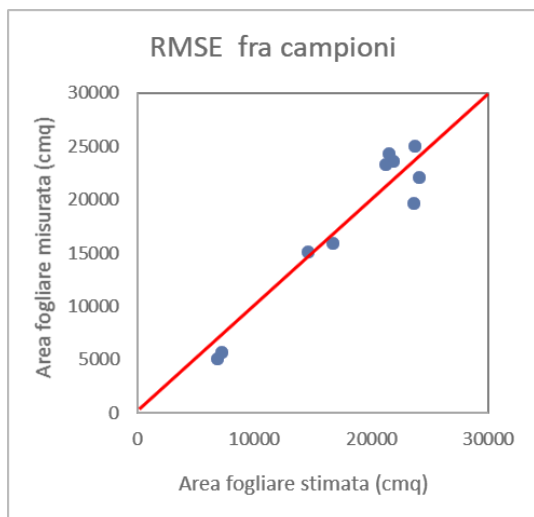


Figura 17: Rappresentazione del RMSE fra area fogliare stimata e misurata da T(2) a T(6)

Successivamente sono stati stimati i valori di lunghezza e di area fogliare dei germogli della data T(7). Questo è stato possibile utilizzando i valori medi derivanti dal campionamento della biomassa eseguito a fine luglio. I valori medi di partenza, rispettivamente 122,3 cm per la lunghezza e 1756,8 per l'area fogliare, sono stati moltiplicati per i 14 germogli della pianta A e gli 11 di B. Questo procedimento, per vari motivi già spiegati precedentemente, causa probabilmente una sottostima dei valori delle due piante. Inoltre, utilizzando gli stessi valori medi per la stima si compie un'ulteriore approssimazione, in quanto le due piante sono provviste di un numero differente di germogli, quindi i valori medi delle due piante saranno differenti. Il processo applicato risulta però il più attendibile in quanto non sono disponibili altri dati su cui basare le stime. Inoltre, in prossimità di T(7) sono stati effettuati degli energici interventi di cimatura e sfogliatura, quindi anche applicare un eventuale parametro ottimizzato a partire dai valori delle date precedenti non si dimostrerebbe corretto.

I valori finali sono pari a:

Tabella 11: Valori di area fogliare e lunghezza dei germogli per ogni pianta da T(0) a T(7)

Data	Pianta	L.germ tot	L.germ.med	A f tot	A f media
		cm	cm	cm ²	cm ²
T0	A	75,0	3,8	907,1	45,4
T0	B	87,3	3,4	1055,9	40,6
T1	A	199,0	11,7	2407,0	133,7
T1	B	258,0	13,6	3120,6	164,2
T2	A	568,0	37,9	5080,4	362,9
T2	B	593,0	49,4	5659,4	471,6
T3	A	1380,4	98,6	15896,1	1135,4
T3	B	1207,8	109,8	15090,0	1371,8
T4	A	1960,0	140,0	25012,3	1786,6
T4	B	1779,8	161,8	24353,4	2213,9
T5	A	1990,8	142,2	22065,2	1576,1
T5	B	1809,6	144,6	23566,3	2019,7
T6	A	1954,4	139,6	19661,1	1404,4
T6	B	1760,0	137,0	23330,4	1920,0
T7	A	1590,3	122,3	24595,2	1756,8
T7	B	1345,7	122,3	19324,8	1756,8
T8	A	0	0	0	0
T8	B	0	0	0	0

I dati derivanti dalle due stime sono anche stati mediati entro data, in modo da ottenere il valore medio AB per ogni rilievo.

Tabella 12: Valori medi entro data di area fogliare e lunghezza dei germogli da T(0) a T(7)

	MEDIA	L.germ tot	L.germ.med	A f tot	A f media
		cm	cm	cm ²	cm ²
T0	AB	81,2	3,6	981,5	43,0
T1	AB	228,5	12,6	2763,8	149,0
T2	AB	580,5	43,6	5369,9	417,2
T3	AB	1294,1	104,2	15493,1	1253,6
T4	AB	1869,9	150,9	24682,9	2000,3
T5	AB	1900,2	143,4	22815,7	1797,9

T6	AB	1857,2	138,3	21495,7	1662,2
T7	AB	1468,0	122,3	21960,0	1756,8

Infine, a partire dai dati ottenuti è stata creata una retta di regressione in modo da mettere in relazione l'area fogliare totale con la lunghezza totale dei germogli. In questo modo si è stabilita un'equazione in grado di stimare uno dei due valori partendo dall'altro.

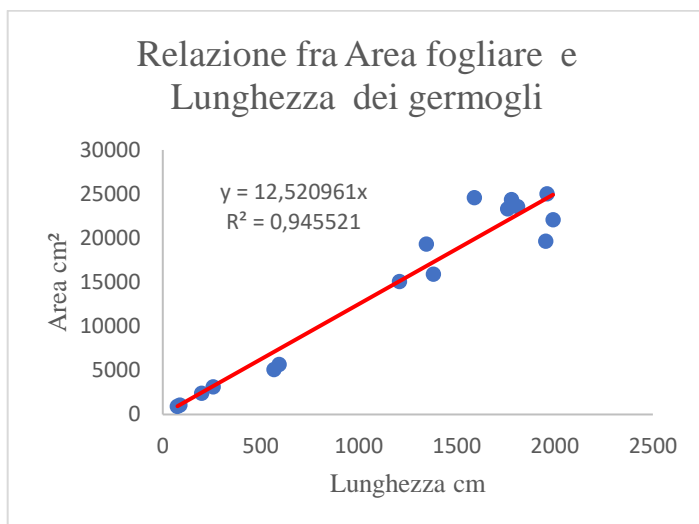


Figura 18: Retta di regressione di area fogliare e lunghezza del germoglio da T(0) a T(7)

L'equazione della retta è $y = 12,5 \cdot x$, mentre l' R^2 è pari a 0,94.

Il valore del RMSE, calcolato rispetto ai valori stimati dalla seguente equazione, è pari a $2173,32\text{cm}^2$, mentre RRMSE è pari al 15,05 %.

Quindi, utilizzando quest'

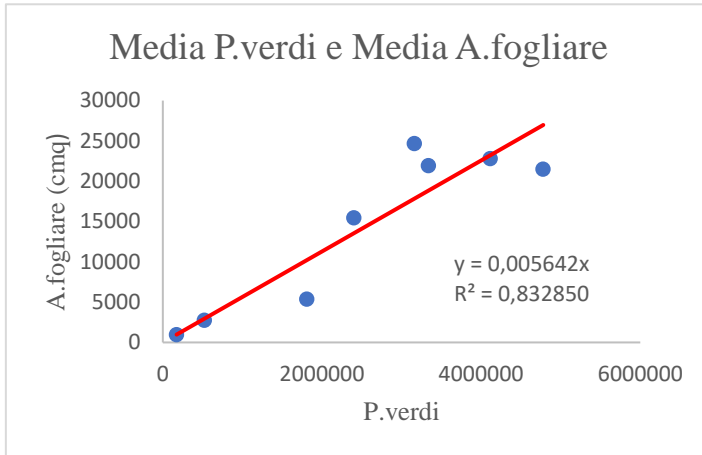
equazione è possibile andare a quantificare l'area fogliare delle piante conoscendo l'altezza della parete, oppure la lunghezza totale dei germogli conoscendo l'area fogliare totale.

6.6 Relazione fra punti verdi, aree fogliari e lunghezze dei germogli

Dopo aver calcolato le superfici fogliari totali e le lunghezze totali dei germogli di ogni ricostruzione, sono state messe in relazione con i punti verdi di ogni modello. Lo scopo è stato quello di ottenere delle equazioni in grado di mettere in relazione diretta il numero di punti verdi con i parametri di accrescimento della chioma.

Le equazioni sono state calcolate sia partendo dai valori singoli di ogni modello che dai valori mediati entro data; in tutti i casi è stata utilizzata una relazione lineare passante in 0;0.

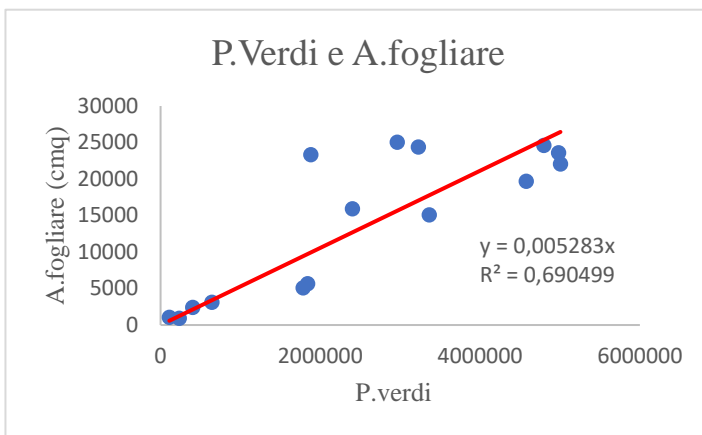
I risultati riguardanti l'area fogliare sono:



L'equazione della retta è pari a $y = 0,00564 \cdot x$, l' $R^2 = 0,83$.

I valori del RMSE E del RRMSR risultano rispettivamente $3775,5 \text{ cm}^2$ e $26,1\%$.

Figura 19: Retta di regressione lineare tra numero punti verdi e media entro data dei valori di area fogliare



L'equazione della retta è pari a $y = 0,00528 \cdot x$, l' $R^2 = 0,69$.

I valori del RMSE E del RRMSR risultano rispettivamente $5300,8 \text{ cm}^2$ e $37,54 \%$.

Figura 20: Retta di regressione lineare tra numero punti verdi e valori di area fogliare

Mentre le relazioni riguardanti le lunghezze dei germogli risultano essere:

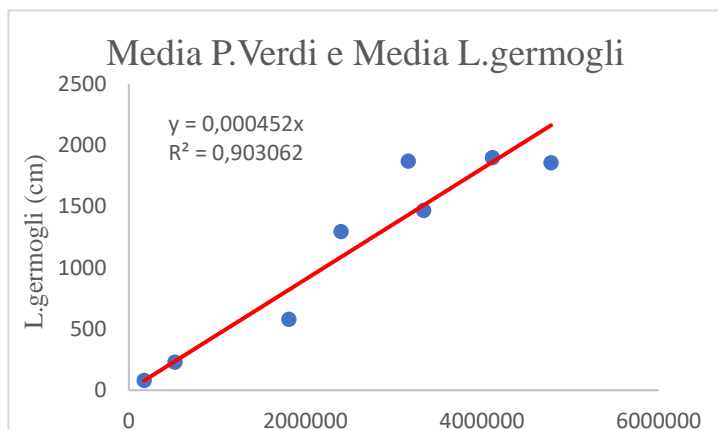


Figura 21: Retta di regressione tra numero punti verdi e media entro data dei valori di lunghezza dei germogli

L'equazione della retta è pari a $y = 0,000452 \cdot x$, l' $R^2 = 0,90$. I valori del RMSE E del RRMSR risultano rispettivamente 220,7 cm e 19,02%.

L'equazione della retta è pari a $y = 0,000425 \cdot x$, l' $R^2 = 0,71$.

I valori del RMSE E del RRMSR risultano rispettivamente 392,83 cm e 34,30%.

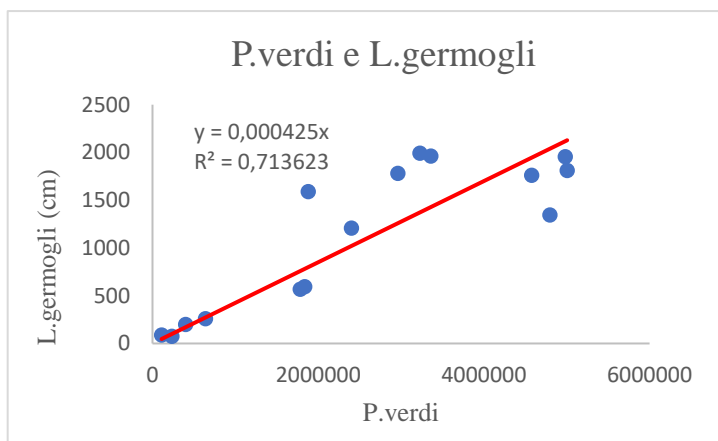


Figura 22: Retta di regressione tra numero punti verdi e valori di lunghezza dei germogli

Al termine del procedimento di calcolo delle varie equazioni risulta evidente come l'utilizzo dei valori mediati entro data minimizzi il RMSE e il suo indice relativo, inoltre va ad aumentare il valore di R^2 . L'aumento di quest'ultimo mette in evidenza che, analizzando i dati mediati,

aumenta la frazione di variazione delle aree totali e delle lunghezze dei germogli spiegate dalla variazione del numero di punti verdi. Questo suggerisce che, utilizzare i valori di più piante mediate fra loro, dà come conseguenza la diminuzione degli errori associati alla stima e aumenta l'attendibilità della stima stessa.

6.7 Misure biometriche

Le misure biometriche di accrescimento sono state effettuate sulle ricostruzioni delle piante A e B delle date T(0), T(1), T(2) e T(7).

Innanzitutto, è stata creata la scala per ogni modello. Nello specifico in ogni modello 1 cm presenta un valore differente. Il valore è pari a: 0,0643 per la pianta A T(0), 0,0410 per la A T(1), 0,0643 per la A T(2) ed infine 0,00669 per la pianta A T(7). Per le piante del gruppo B i valori sono pari a: 0,0306 in T(0), 0,0396 in T(1), 0,0067 in T(2) e 0,0655 in T(7).

Le misure biometriche della lunghezza totale dei germogli e le differenze fra date nelle varie ricostruzioni sono risultate pari a:

Tabella 13: Misure biometriche misurate nel modello e derivanti dal procedimento di stima

Misure biometriche da modello (cm)			
Pta A			
T0	T1	T2	T7
81,2	211,2	516,6	1647,3
Dif.	129,9	305,4	1130,7
Pta B			
T0	T1	T2	T7
73,2	243,3	580,4	1586,1
Dif.	170,0	337,1	1005,7

Misure biometriche da stima (cm)			
Pta A			
T0	T1	T2	T7
75,0	199,0	568,0	1590,3
Dif.	124,0	369,0	1022,3
Pta B			
T0	T1	T2	T7
87,3	258,0	593,0	1345,6
Dif.	170,7	335,0	752,6

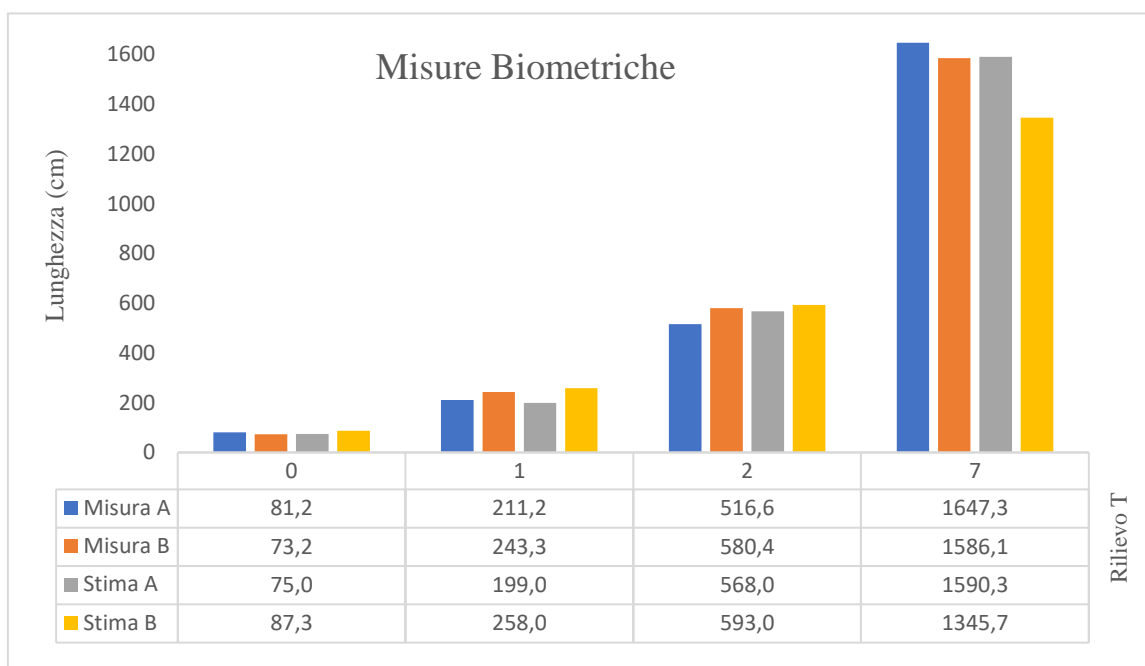


Figura 153: Misure biometriche stimate e misurate delle piante A e B raggruppate per data di rilievo

Si può osservare come i dati biometrici misurati sul modello siano molto simili a quelli stimati attraverso il metodo descritto nel capitolo precedente (3.5).

Nello specifico i due gruppi di misure sono stati paragonati calcolando il RMSE e il RRMSE tra i valori misurati nelle ricostruzioni (y) e i valori stimati (y stimato). Il RMSE è pari a 89,77 cm, mentre il RRMSE è pari al 14,44%. Questi valori indicano che l'errore delle stime rispetto al misurato è pari al 14,5% circa.

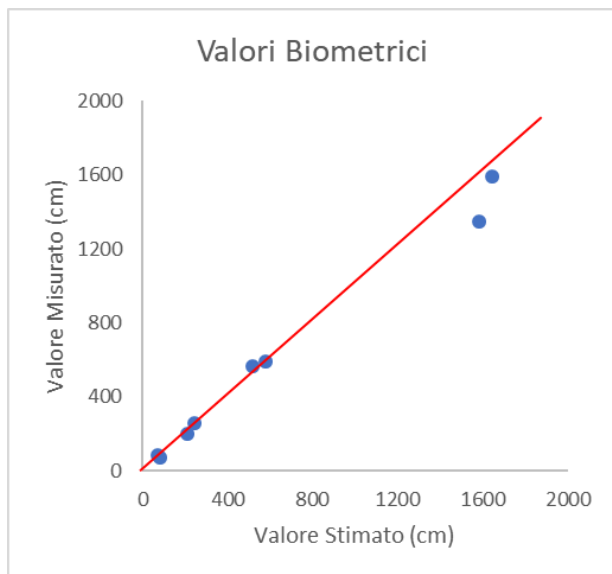


Figura 24: Rappresentazione del RMSE fra misure biometriche stimate e misurate

Inoltre, le due differenti misurazioni sono state testate fra loro utilizzando il *t-test* per valutare se i valori dei due campioni appartenessero alla stessa popolazione di dati.

Innanzitutto, le varianze dei due campioni sono state utilizzate per calcolare il test-F, e dato che il valore di *f* risultante, pari a 1,2320, è minore a quello tabulato di 3,7870 si è potuti procedere con il test vero e proprio.

Il dato derivante dal *t-test* è stato pari a 0,08513, ampiamente minore

rispetto a quello tabulato di 2,7632, con *p* pari a 0,01. Si può perciò accettare l'ipotesi H_0 , quindi i due campioni appartengono alla stessa popolazione con il 99% di probabilità.

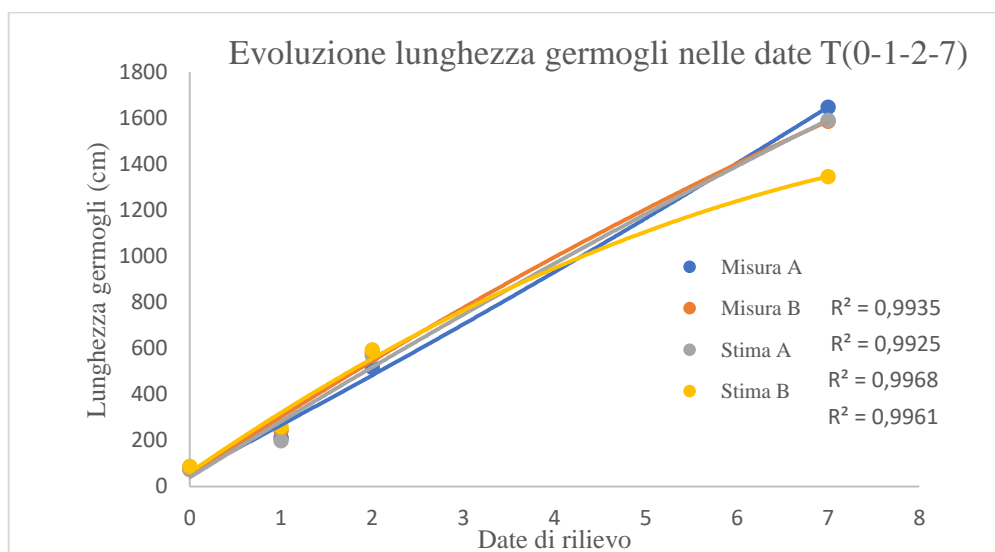


Figura 25: Evoluzione nel tempo delle misure biometriche dei germogli, stimate e misurate.

Considerando che i due campioni appartengono alla stessa popolazione, ma derivano da due metodi di quantificazione radicalmente differenti, si può affermare che entrambe le misure biometriche dell'accrescimento dei germogli sono valide e corrette.

6.8 Stima pesi e relazioni con numero di punti

In seguito alla quantificazione dell'area fogliare e della lunghezza dei germogli si è reso necessario calcolare il peso secco della biomassa nei vari comparti vegetali. Una volta ottenuto il peso è stato messo in relazione con il numero di punti caratteristico dei differenti organi vegetali.

La stima dei pesi secchi e le successive relazioni sono state calcolate in maniera distinta per quanto riguarda la biomassa della chioma, del ceppo e dei grappoli.

6.8.1 Stima peso secco chioma e relazione con punti verdi.

Per poter stimare il peso secco della chioma durante l'anno è necessario calcolare il peso unitario delle varie componenti. Questo è stato possibile impiegando il materiale vegetale raccolto con i campionamenti effettuati durante l'annata ed i pesi secchi di foglie e tralci misurati a fine essiccamento.

A partire dai valori registrati e conoscendo l'area fogliare e la lunghezza dei germogli è stato possibile calcolare le equazioni che mettono in relazione il peso con la dimensione del materiale vegetale.

Nel caso dell'area fogliare il peso secco è stato messo in relazione proprio con la superficie delle foglie. L'equazione ricavata si basa su di una regressione lineare semplice. La relazione è pari a $y = 0,005193x$, il suo R^2 associato è di 0,96 e i valori di RMSE e RRMSE sono pari a 0,9519 gr e 15,36%.

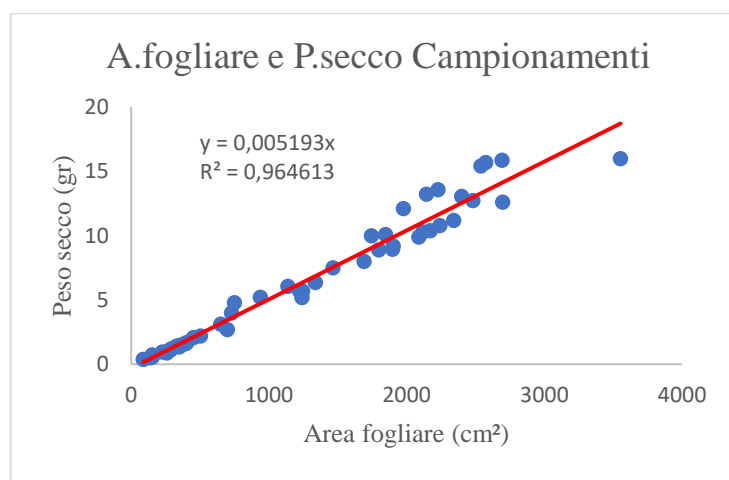


Figura 26: Retta di regressione tra Area fogliare e peso secco delle foglie.

Anche per quanto concerne la relazione della lunghezza dei germogli rispetto al peso secco è stata utilizzata una regressione lineare. La retta in questione presenta i seguenti parametri: $Y = 0,1431x - 4,1658$, $R^2 = 0,8488$, $RMSE = 3,14$ gr e $RRMSE$ di 33,79%.

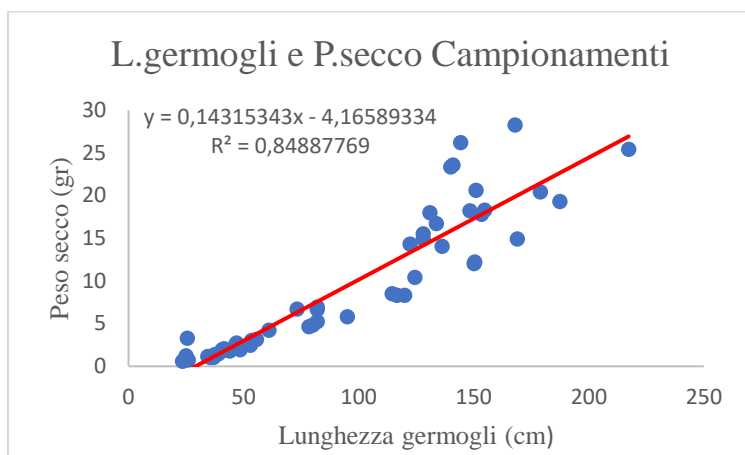


Figura 27: Retta di regressione tra lunghezza dei tralci e peso secco dei tralci.

Le equazioni sono state poi utilizzate per stimare il peso secco dei comparti foglie e tralci, partendo dai dati stimati di area fogliare e lunghezza dei germogli delle varie ricostruzioni. Inoltre, partendo dai dati medi di area fogliare, lunghezza dei germogli e pesi secchi rilevati durante i 3 campionamenti, sono stati stimati dei valori aggiuntivi nelle 3 date. Questi valori definiti attraverso una via differente sono stati paragonati a quelli già stimati in precedenza. I valori del $RRMSE$ per l'area fogliare e la lunghezza dei tralci sono: 17,47% e 34,03%.

Tabella 14: $RMSE$ e $RRMSE$ tra valore di area fogliare e lunghezza dei germogli stimati in due vie differenti.

	Stime Area	Stime Lunghezza
$RMSE$	16,16	62,21
$RRMSE$	17,47%	34,03%

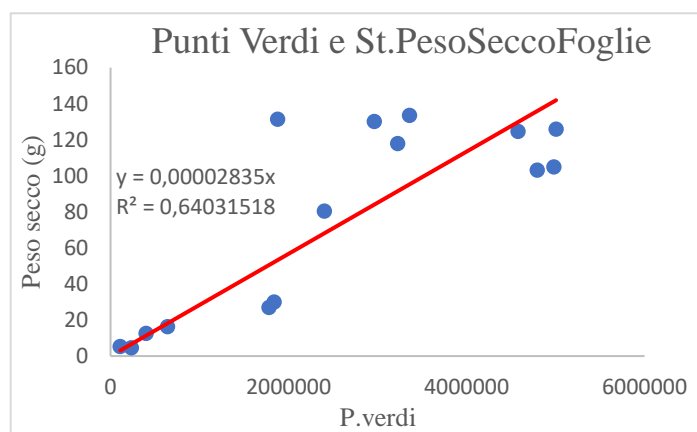
Per entrambi i comparti è stato eseguito il test-t tra i campioni stimati con il primo e il secondo procedimento. In entrambi i casi l'ipotesi H_0 è accettata e quindi i campioni appartengono alla stessa popolazione di partenza con $p=0,01$. Inoltre, utilizzando il secondo

metodo, il risultato è stato quello di ottenere una generale sottostima dei valori. Unica eccezione sono i valori dell'area fogliare in T(7), in questo caso la stima con il secondo procedimento porta a valori molto simili e leggermente maggiori rispetto a quelli derivanti dal primo metodo.

La sottostima è dovuta alle cause già spiegate precedentemente parlando dei valori derivanti dai campionamenti.

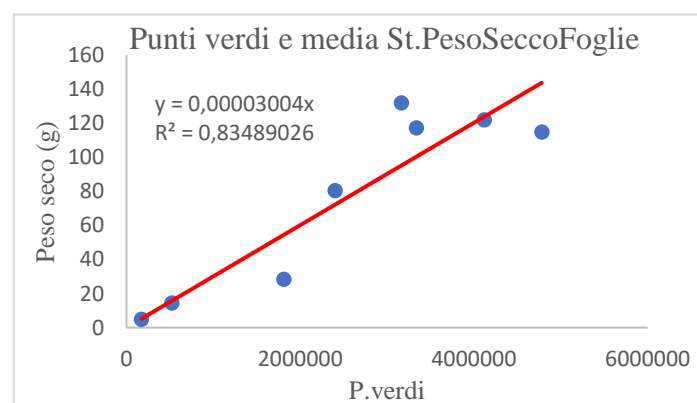
Successivamente questi valori sono stati messi in relazione con il numero di punti verdi. In questo modo, sono state calcolate le equazioni che mettono in relazione diretta i numeri di punti dei modelli con i pesi secchi della biomassa dell'anno. Nelle relazioni sono stati impiegati sia i dati delle piante A e B distinte fra loro, che quelli mediati entro data.

Sono state ottenute le seguenti relazioni:



L'equazione che mette in relazione il numero di punti verdi al peso secco dell'area fogliare è $y = 0,00002835x$. Il valore di R^2 è di 0,64, mentre l'RMSE è pari a $30,85 \text{ cm}^2$ e l'RRMSE a 40,32%.

Figura 28: Retta di regressione tra numero punti verdi e peso secco fogliare



L'equazione che mette in relazione i valori medi entro data di punti verdi al peso secco dell'area fogliare è $y = 0,00003004x$. Il valore di R^2 è di 0,83, mentre l'RMSE è pari a $20,07 \text{ cm}^2$ e l'RRMSE a 26,16 %.

Figura 29: Retta di regressione tra numero punti verdi e media entro data del peso secco fogliare

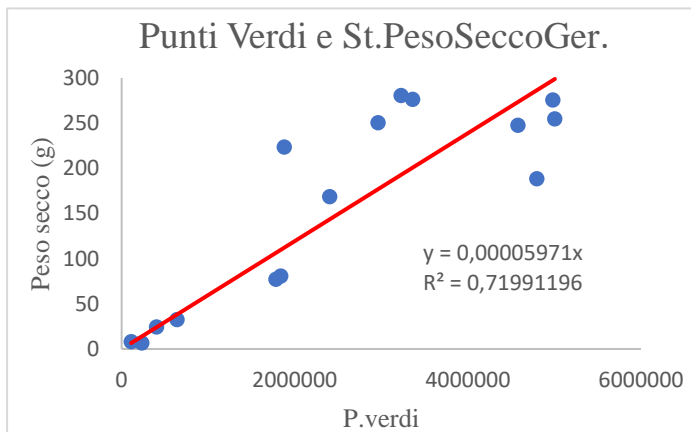


Figura 30: Retta di regressione tra numero punti verdi e peso secco tralci

L'equazione che mette in relazione il numero di punti verdi al peso secco dei germogli è $y = 0,00005971x$. Il valore di R^2 è di 0,72, mentre l'RMSE è pari a 55,62 cm e l'RRMSE a 34,81%.

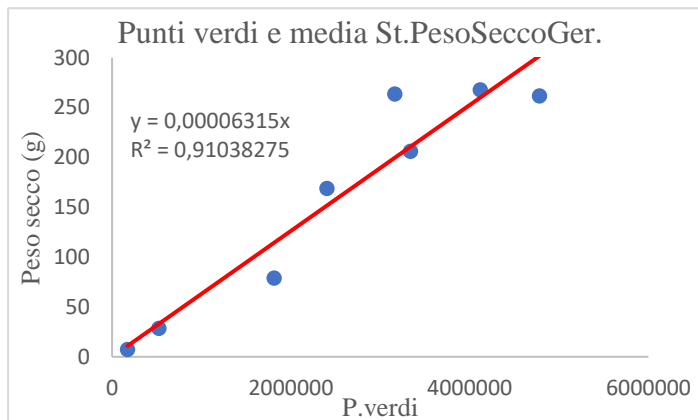


Figura 31: Retta di regressione tra numero punti verdi e media entro data del peso secco tralci

L'equazione che mette in relazione i valori medi entro data di punti verdi al peso secco dei germogli risulta essere $y = 0,00006315x$. Il valore di R^2 è di 0,91, mentre l'RMSE è pari a 30,33 cm e l'RRMSE a 18,92%.

Considerando queste equazioni si può notare che i valori del RMSE sono generalmente elevati e non si riducono mai sotto il 18,9%. Questi parametri sono accompagnati a valori di R^2 non molto elevati, tranne nell'ultimo caso, in cui raggiunge lo 0,9. Da questi dati si può dedurre che le relazioni sono mediamente predittive dei valori reali di peso, possono indurre a degli errori di media entità.

Inoltre, analizzando le relazioni appena descritte si nota che, anche in questo caso, i valori mediati entro data, vanno a ridurre l'errore della stima e ad aumentare il valore di R^2 . Perciò, la tecnica della SfM può essere adatta alle stime dei parametri di più piante oppure di filari interi, infatti mediando i dati derivanti da molteplici ricostruzioni si andrebbero a ridurre le imprecisioni delle stime.

Alla luce di queste considerazioni si può affermare che, le relazioni che uniscono il numero di punti ai valori di biomassa della chioma possono essere impiegate come strumento di stima dei pesi delle varie componenti vegetali della *canopy*.

6.8.2 Stima peso secco ceppo, tralci lignificati e relazione con punti marroni-bruni.

La stima del peso secco del ceppo si basa sulla misurazione della massa di due ceppi coetanei alle piante prese in esame.

Il peso secco misurato è risultato pari a 829,1 gr per il ceppo C e 827,5 gr per il fusto D.

Per quanto riguarda il peso secco dei tralci della pianta A e B a dicembre 2017 è stato registrato il valore medio di 304,5 gr.

Basandosi su questi valori è stato calcolato un peso medio del ceppo ad inizio anno, T(0), di 828,3 gr, mentre il peso del ceppo sommato al valore dei tralci lignificati è stato pari a 304,5 gr.

Partendo da questi valori è stata stabilita una relazione tra il numero di punti bruni-marroni con il peso della biomassa lignificata.

Tabella 15: Peso secco ceppo e relazione con numero punti marroni espressi in migliaia.

Rilievo	Pianta	P.marroni	Peso secco
			g
T0	A	266	828,3
T0	B	256	828,3
T7	AB	278	1132,8

I dati di partenza utilizzati sono stati i valori distinti in T(0) e i valori medi in T(7). Questa scelta è stata fatta dato che il peso secco dei tralci in T(7) è stato mediato tra le due piante.

L'equazione finale deriva da una regressione lineare ed è $y = 0,0142x - 2861,4$, l' R^2 associato risulta essere 0.77, mentre RMSE e RRMSE sono pari a 68,79gr e 7,4%.

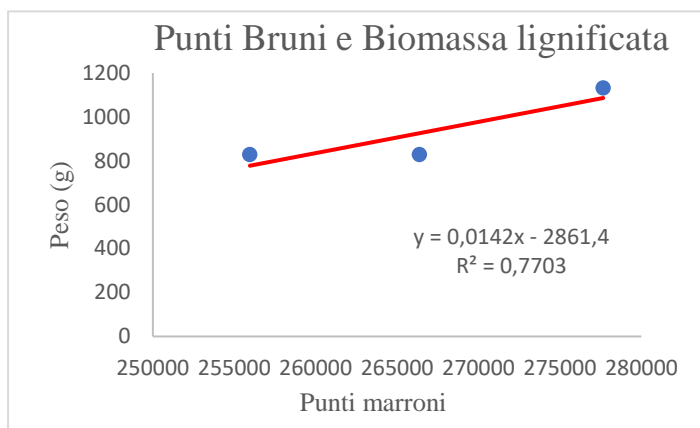


Figura 32 : Retta di regressione tra numero punti bruni e peso secco ceppo

6.8.3 Stima peso secco grappolo e relazione con numero di punti grappolo.

La stima del peso dei grappoli, nelle varie date, si è basata sui valori di peso secco di grappoli prelevati negli ultimi 2 campionamenti e sui dati dei grappoli maturi delle due piante A e B.

I grappoli presenti sui tralci prelevati sono stati essiccati in stufa a 105 gradi. Dopodiché ne è stata misurata la massa, in modo da ottenere il peso secco di ogni grappolo.

Partendo da questi valori è stato calcolato il valore di peso secco medio dei grappoli in data T(4) e in data T(7). Questi valori sono stati messi in relazione con il numero di punti chioma, che derivano dalla somma dei punti verdi e dei punti grappolo.

I dati base della stima sono:

Tabella 16: Tabella riassuntiva dei valori di peso dei grappoli

pta	data	PuntiTotali	PuntiGrap	PesoFrMed	PesoSeMed	PesoFrTot	P.SecTot
				g	g	g	g
A	T4	3361579		46,18	3,94	600,37	51,16
B	T4	2962862		46,18	3,94	600,37	51,16
B	T7	5149046	352727	56,94	7,28	740,28	94,66

La relazione ottenuta è pari a:

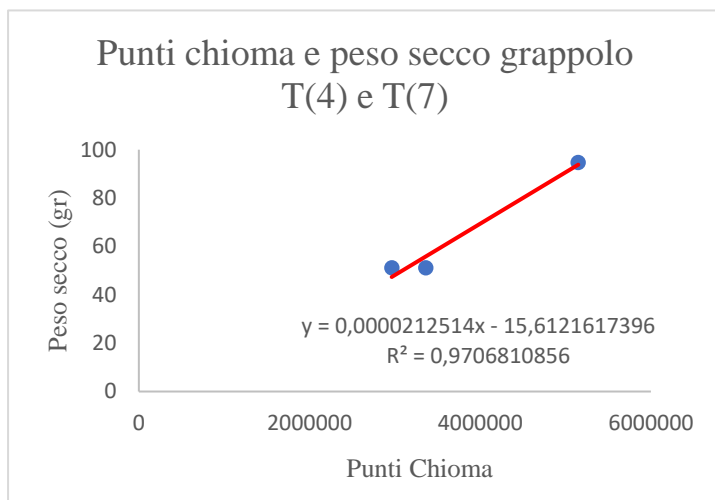


Figura 33: Retta di regressione tra punti chioma e peso secco grappoli

L'equazione è pari a $Y = 0,00002125x - 15,612161$. il valore di r^2 è 0,97. L'RMSE risulta essere 3,51 gr ed il parametro relativo 5,35%.

Utilizzando questa equazione sono stati poi stimati i valori del peso dei grappoli in T(5) e T(6), basandosi sul numero medio, entro data dei punti chioma.

I valori stimati di T(5) e T(6) sono risultati pari a:

Tabella 17: Valori peso grappolo stimati in T(5) e (6)

pta	data	P.SeccoTotale
		g
A	T5	71,88
B	T5	71,88
A	T6	87,65
B	T6	87,65

I valori finali di peso secco dei grappoli sono pari a:

Tabella 18: Tabella complessiva dati peso grappolo stimati

pta	data	PseccoTotale
		g
A	T4	51,16
B	T4	51,16
A	T5	71,88
B	T5	71,88
A	T6	87,65

B	T6	87,65
A	T7	94,66
B	T7	94,66

L'equazione che mette in relazione il numero di punti grappolo con i pesi secchi dei grappoli risulta essere molto solida, è quindi un ottimo strumento per stimare la biomassa dei frutti nel vigneto. Si deve però ricordare, che il conteggio del numero di punti grappolo è il più laborioso e difficile. Inoltre, è stato effettuato manualmente senza la selezione automatica dei punti per colore, perciò è caratterizzato da una maggiore incidenza della manualità dell'operatore che effettua la selezione dei punti da conteggiare.

6.9 Ripartizione della biomassa

Terminata la fase di stima dei pesi secchi dei vari comparti vegetali, si è potuto procedere con il calcolo della ripartizione della biomassa. Il processo di calcolo è stato effettuato per le piante A, B e AB, data dalla media di A e B, in ognuna delle date del rilevamento fotografico.

Il procedimento è stato eseguito attraverso la somma dei pesi delle varie componenti, in modo da calcolare la biomassa totale delle piante e successivamente andare a quantificare il peso percentuale delle varie componenti rispetto al totale della massa vegetale.

I dati risultanti ottenuti sono:

Tabella 19: Valori complessivi di ripartizione della biomassa

Data	Pta	Ceppo (gr)	Foglie (gr)	Tralci (gr)	Grap. (gr)	Biom. Totale (gr)	Ceppo (%)	Foglie (%)	Tralci (%)	Grap. (%)	BiomTot(%)
T0	A	828,3	4,5	6,6		839,4	98,68	0,54	0,78		100,00
	B	828,3	5,3	8,3		842,0	98,38	0,63	0,99		100,00
	AB	828,3	4,9	7,5		840,7	98,53	0,59	0,89		100,00
T1	A	828,3	12,6	24,3		865,2	95,74	1,45	2,81		100,00
	B	828,3	16,4	32,8		877,5	94,40	1,87	3,73		100,00
	AB	828,3	14,5	28,5		871,3	95,06	1,66	3,28		100,00
T2	A	828,3	26,9	77,1		932,3	88,84	2,88	8,27		100,00

	B	828,3	30,0	80,7		939,0	88,21	3,19	8,60		100,00
	AB	828,3	28,4	78,9		935,7	88,52	3,04	8,44		100,00
T3	A	828,3	84,8	193,4		1106,5	74,86	7,66	17,48		100,00
	B	828,3	80,5	168,7		1077,5	76,87	7,47	15,66		100,00
	AB	828,3	82,6	181,1		1092,0	75,85	7,57	16,58		100,00
T4	A	828,3	133,6	276,4	51,2	1289,5	64,24	10,36	21,44	3,97	100,00
	B	828,3	130,1	250,6	51,2	1260,1	65,73	10,32	19,89	4,06	100,00
	AB	828,3	131,8	263,5	51,2	1274,8	64,97	10,34	20,67	4,01	100,00
T5	A	828,3	117,8	280,8	71,9	1298,8	63,77	9,07	21,62	5,53	100,00
	B	828,3	125,8	254,9	71,9	1280,9	64,66	9,82	19,90	5,61	100,00
	AB	828,3	121,8	267,9	71,9	1289,9	64,22	9,45	20,77	5,57	100,00
T6	A	828,3	104,9	275,6	87,7	1296,5	63,89	8,09	21,26	6,76	100,00
	B	828,3	124,6	247,8	87,7	1288,3	64,29	9,67	19,23	6,80	100,00
	AB	828,3	114,8	261,7	87,7	1292,4	64,09	8,88	20,25	6,78	100,00
T7	A	828,3	131,4	223,5	94,7	1277,8	64,82	10,28	17,49	7,41	100,00
	B	828,3	103,1	188,5	94,7	1214,6	68,20	8,49	15,52	7,79	100,00
	AB	828,3	117,3	206,0	94,7	1246,2	66,47	9,41	16,53	7,60	100,00
T8	A	828,3		304,5		1132,8	73,12	0,00	26,88	0,00	100,00
	B	828,3		304,5		1132,8	73,12	0,00	26,88	0,00	100,00
	AB	828,3		304,5		1132,8	73,12	0,00	26,88	0,00	100,00

Osservando i dati ottenuti, si può notare che la biomassa del comparto foglie tende ad aumentare, sia in termini assoluti che relativi, a partire da T(0) fino a T(4). In T(4) è stato raggiunto il picco del peso secco fogliare totale. In T(5) si osserva un calo della massa fogliare dovuto ad una prima sfogliatura, che è stata ripetuta in T(7). L'ulteriore perdita di area fogliare, e quindi peso, che si osserva in data T(6) e stata causata da una cimatura.

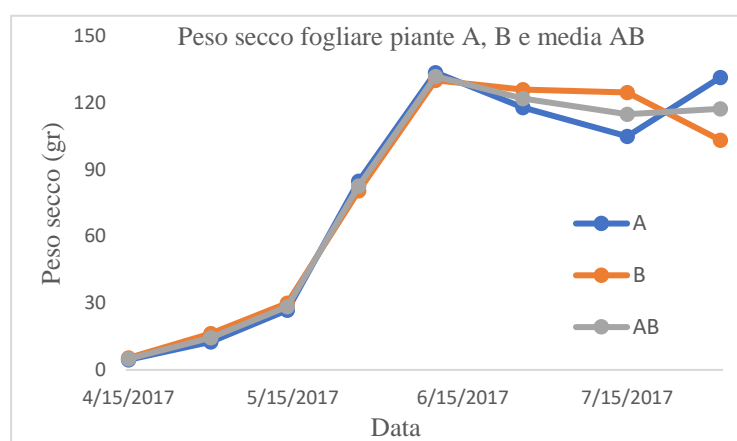


Figura 34: Dinamica durante la stagione del peso secco fogliare per A, B, AB

Inoltre, i pesi secchi fogliari totali alla data T(7) risultano sfalsati rispetto alla data precedente, questo è dovuto al cambiamento del metodo di stima dell'area fogliare, che ne ha causato una leggera sottostima. Lo sfalsamento è

dovuto al valore dell'area fogliare media per germoglio, utilizzato per la stima sia nella pianta A, che in quella B. Perciò, a causa del maggior numero di germogli della pianta A rispetto alla B si osserva un sorpasso in termini di biomassa assoluta. Va comunque notato che, durante l'annata vegetativa, le masse fogliari delle piante A e B tendono a fluttuare e superarsi reciprocamente.

Sempre parlando di biomassa fogliare, il picco di accumulo in termini relativi si verifica alla data T(4) e, per AB, è pari al 10,34% della biomassa totale.

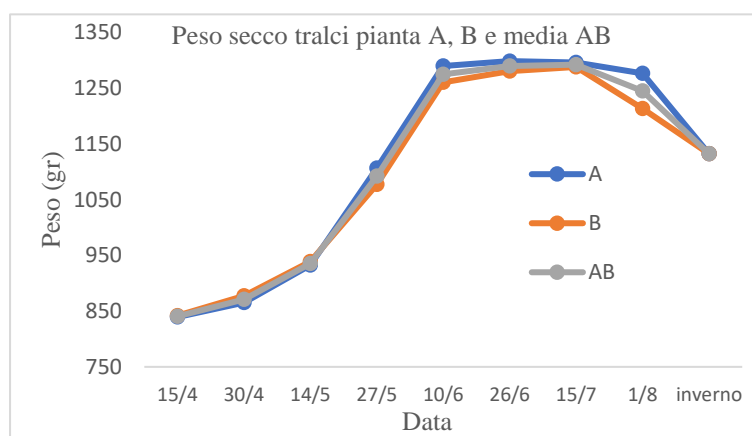


Figura 35: Dinamica durante la stagione del peso secco dei germogli per A, B, AB

La biomassa dei tralci, durante tutto l'anno, è sempre maggiore di quella del comparto fogliare, sia nella pianta A che in quella B. Il peso dei germogli privi di foglie, tende a crescere durante la primavera-estate, raggiungendo il picco alla data T(5), nonostante una prima cimatura effettuata in , per poi decrescere. Il calo è stato causato dagli interventi di cimatura registrati in T(6) ed in T(7). Lo stesso comportamento osservato per la biomassa espressa in termini assoluti, lo si osserva se la si esprime in termini percentuale sulla biomassa totale. Il picco è stato raggiunto in T(5) ed è risultato pari a 20,77% del peso complessivo della pianta.

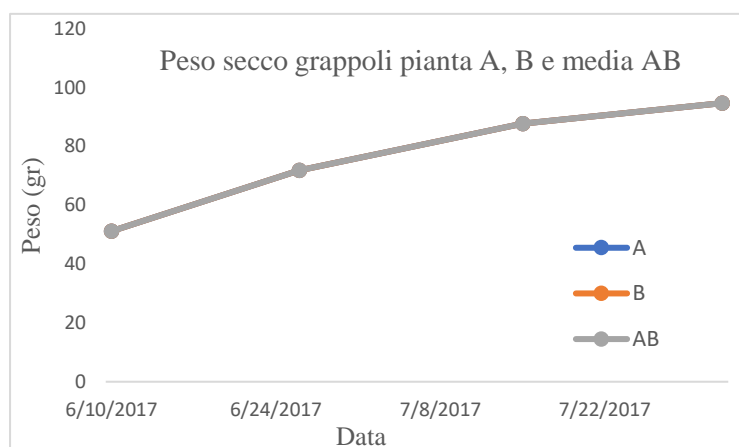


Figura 36: Dinamica durante la stagione del peso secco dei grappoli per A, B, AB

La biomassa dei grappoli, a partire da quando è stata registrata per la prima volta in T(4) è andata sempre ad aumentando, fino a T(7) data dell'ultimo rilievo fotografico. Successivamente, la massa dei frutti è andata ad aumentare

fino al momento della vendemmia. In percentuale, considerando AB, il massimo registrato è stato pari al 7,6% del peso totale.

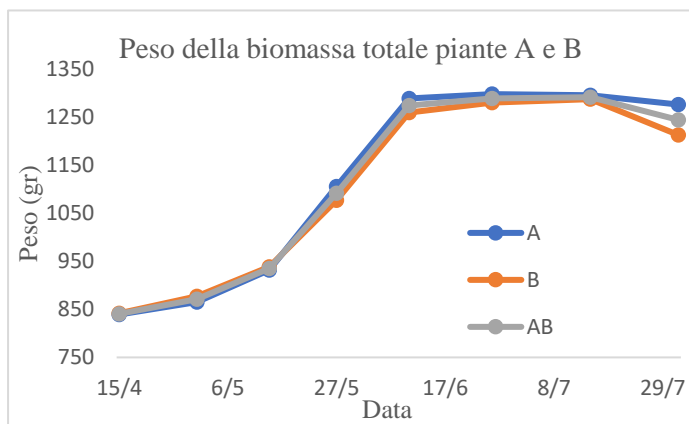


Figura 37: Dinamica durante la stagione della biomassa totale per A, B, AB

La biomassa totale deriva dalla somma delle 3 componenti appena citate e dalla massa del ceppo che è stata assunta costante durante l'annata. Il picco di peso secco viene raggiunto, per quanto riguarda AB, in T(6), con 1292,4 grammi. Successivamente rimane tendenzialmente costante, principalmente per l'effetto di

compensazione dato dall'accrescimento del peso dei grappoli, che vanno a bilanciare la perdita di massa fogliare e dei tralci. In seguito, si osserva una perdita di biomassa che è dovuta alla vendemmia ed alla perdita delle foglie, mentre i tralci lignificano, permettendo alla biomassa di stabilizzarsi a 1132,8 gr.

Si può osservare che, durante la fase primaverile-estiva, la maggior parte dei fotosintati delle piante sono stati accumulati nei tralci, in modo da permettere l'innalzamento e la formazione della chioma. Questo perché una chioma espansa e ben formata permette una migliore disposizione delle foglie e quindi una migliore intercettazione della luce. Inoltre, viene a crearsi maggior spazio per la disposizione dei grappoli, che sono il comparto che ha richiamato la maggior parte dei fotosintati nella parte finale dell'estate, causando il rallentamento della dinamica di accrescimento sia dei germogli, che delle foglie.

In questo caso di studio, la ripartizione della biomassa è stata basata sulle stime degli accrescimenti e sul numero di punti che caratterizzano le ricostruzioni 3D ottenute. Partendo da questi valori ed associandoli ai dati di peso secco misurati durante l'anno è stato possibile calcolare il valore in peso dei vari comparti vegetali, riuscendo in questo modo ad attribuire i dati di biomassa ad ogni data di rilievo fotografico.

Partendo da questi valori, si sono potute osservare le dinamiche di accrescimento che hanno caratterizzato le piante nell'annata vegetativa 2017, individuando i picchi di accumulo di biomassa e gli eventuali rallentamenti.

6.10 Analisi di crescita ed indici derivati

Ultimata la stima della ripartizione della biomassa nei vari comparti vegetali, è stato possibile procedere con l'analisi di crescita, in modo da poter indagare con più accuratezza la dinamica di accrescimento delle piante e verificare in maniera indiretta la bontà e l'accuratezza delle stime dei pesi secchi vegetali.

Partendo dai dati stimati sono stati ottimizzati dei modelli a sigmoide, che esprimono la ripartizione della biomassa su base giornaliera, in questo modo sono stati ottenuti i dati di peso di ogni comparto vegetale ad ogni giorno della stagione vegetativa.

Sulla base di questi valori sono stati poi calcolati i vari indici.

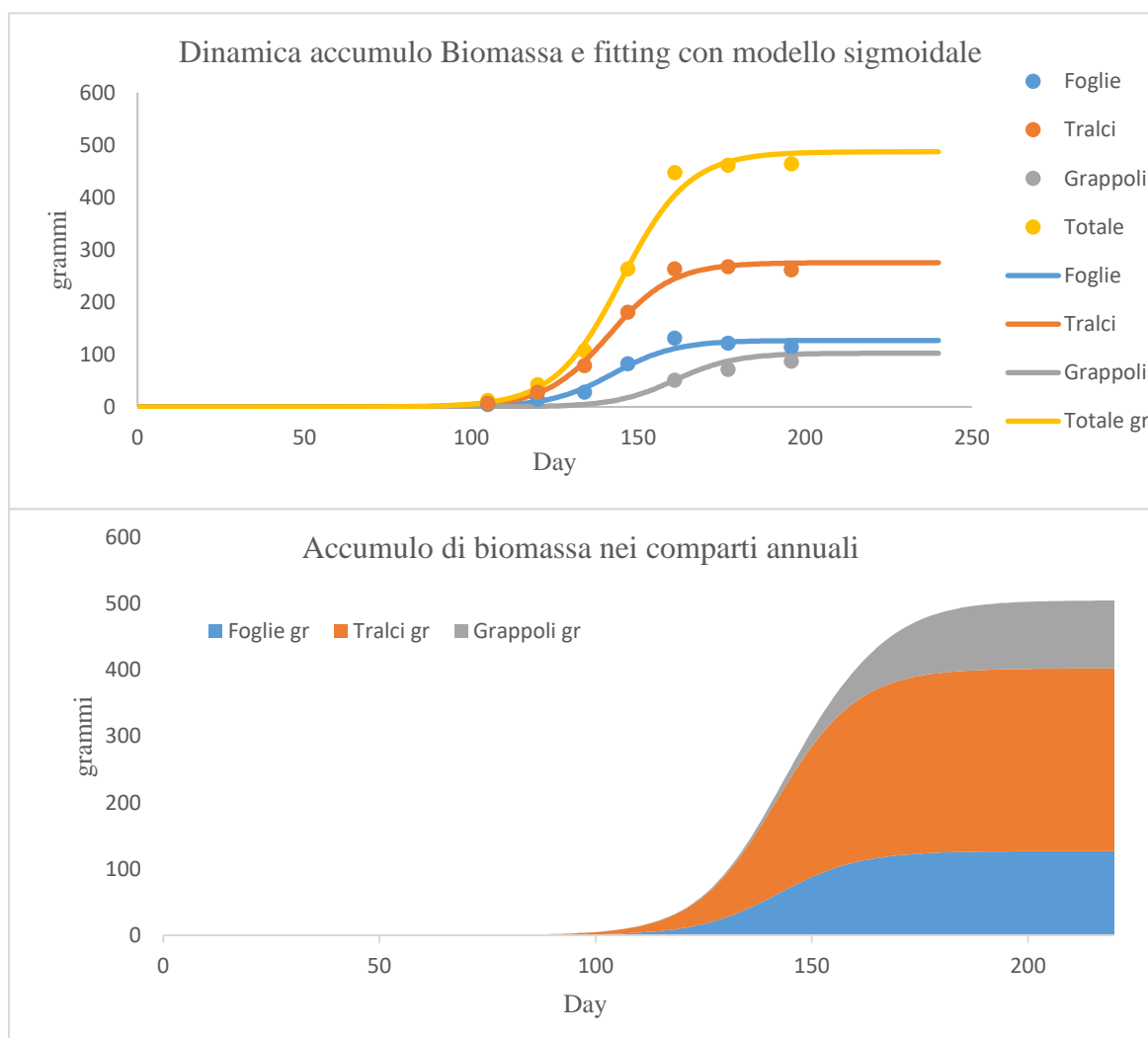


Figura 38: Grafici riportanti la dinamica di accumulo della biomassa nei vari comparti vegetali.

Per prima cosa, i dati di peso utilizzati in partenza sono stati confrontati con i fitting ottenuti.

Nei due grafici sovrastanti, si può osservare la distribuzione dei dati di partenza, serie puntiformi, confrontate con i modelli a sigmoide ottenuti.

Per ognuno dei fitting dei dati sono stati calcolati anche alcuni parametri descrittivi:

Modello della biomassa totale, a , il valore massimo ottenibile, risulta 487,11 grammi; b , che descrive la curvatura del modello, è pari a 10,03; mentre X_0 , corrispondente a dove si posiziona il punto di flesso, è 145 ed in questo caso corrisponde al valore di riferimento espresso in giorni

Modello Foglie, a 126,93 grammi, b 9,37, X_0 142 giorni.

Modello Tralci, a 275,45 grammi, b 9,47, X_0 141 giorni.

Modello Grappoli, a 102,52 grammi, b 9,03, X_0 161 giorni.

In primo luogo, nei modelli sovrastanti, le zone che presentano un andamento orizzontale sono caratterizzate da una stasi del processo di accrescimento, quindi l'accumulo di biomassa è assente oppure molto rallentato. Da ciò si può evincere che l'accrescimento stimato dai modelli, è avvenuto a partire dal 90esimo giorno dell'anno, attorno al germogliamento, ed è terminato verso il 210imo giorno dell'anno, inizio agosto. L'accumulo di biomassa stimata dai modelli è quindi influenzata dalle operazioni di gestione della chioma, cimatura e sfogliatura, che causano la stasi dell'accumulo della biomassa attraverso la sottrazione di parte del materiale vegetale. Inoltre, l'accrescimento del grappolo è l'ultimo a rallentare ed arrestarsi, in quanto la maturazione e l'aumento in peso degli acini prosegue dopo la stasi vegetativa.

In secondo luogo, si può considerare che il punto di flesso della curva a sigmoide rappresenta il punto in cui la curva presenta la massima pendenza, questo coincide con il momento in cui la dinamica di accumulo della biomassa è massima, quindi in questo punto si posizionerà anche il massimo valore di AGR. Da questo si deduce che il massimo tasso di accrescimento in biomassa coincide con il giorno indicato dal parametro X_0 , e che l'*Absolute Growth Rate* indica proprio il tasso di accrescimento in peso.

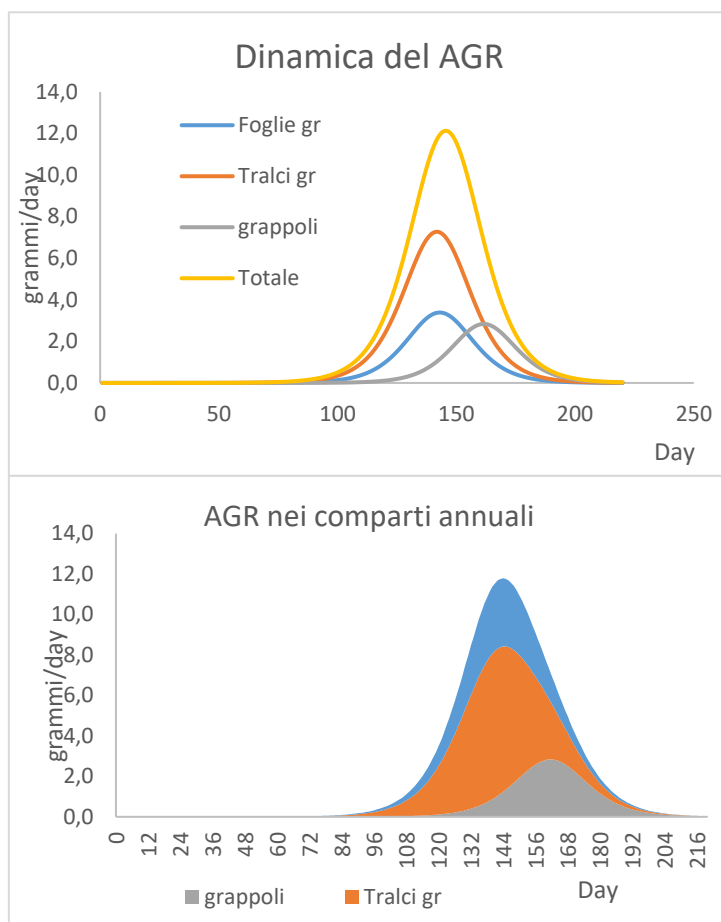


Figura 39: Dinamica dell'AGR nei differenti comparti vegetali.

Il comparto che per primo raggiunge il picco di accumulo di biomassa è quello dei tralci, seguito dalle foglie, mentre l'ultimo è quello dei grappoli. Questo fatto corrisponde ai modelli standard di accrescimento, infatti nel momento di maggiore accrescimento e distensione degli acini si osserva un rallentamento nella dinamica di accrescimento delle altre componenti della chioma. Il massimo tasso di accrescimento della biomassa totale si osserva alcuni giorni dopo quello delle foglie, questo perché il picco viene traslato in

avanti nel tempo per effetto dell'accrescimento dei grappoli.

In seguito al picco massimo, i valori di AGR iniziano a decrescere con velocità differenti per le varie parti della chioma. I tassi delle foglie e dei tralci decrescono anche per azione delle cimature e delle sfogliature, mentre quello dei grappoli decresce in maniera più lenta. L'ultima fase dell'accrescimento totale di biomassa è quindi portata avanti, principalmente, per azione dell'incremento del peso dei grappoli.

Osservando l'AGR, è possibile ricavare il valore dei picchi massimi di accrescimento dei vari comparti vegetali. Nel caso della biomassa totale, il tasso di accrescimento massimo è pari a 12,1 g/giorno, mentre gli AGR massimi di foglie, tralci e grappoli sono rispettivamente: 3,4, 7,3 e 2,8 g/giorno.

In questo lavoro, l'accumulo della biomassa totale è stato calcolato in due modi distinti. Il primo indice è stato ottimizzato sulla base del peso ed espresso utilizzando una base

giornaliera, mentre il secondo è stato modellizzato sulla base del numero di punti verdi ed espresso sempre sulla base dei giorni dell'anno.

Il fitting del modello basato sul numero di punti è stato ottenuto seguendo la stessa procedura dei modelli stimati sulla base della ripartizione della biomassa. Il grafico ottenuto è il seguente:

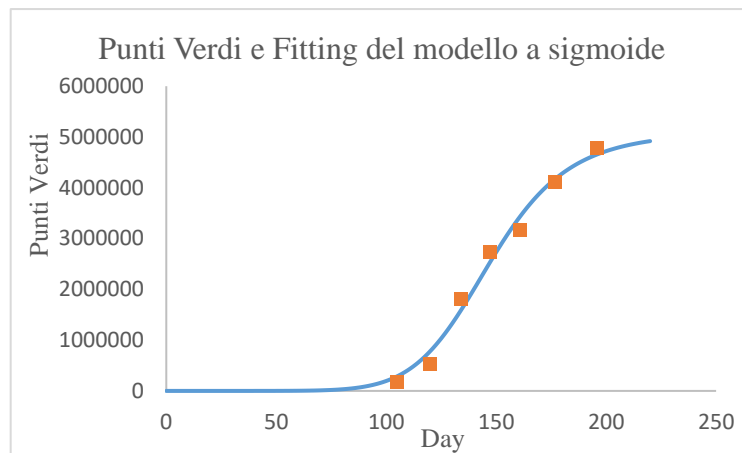


Figura 40: Modello a sigmoide e fitting con numero di punti verdi

I parametri della curva sigmoide ottimizzata in questo frangente sono: a 5095500,8 punti, b 8,30 e X_0 147 giorni. Osservando questa curva si nota che la media dei punti verdi entro data presenta una distribuzione tipicamente sigmoide, tipica dell'accumulo della biomassa,

questo fa supporre che il conteggio dei punti verdi sia un buon procedimento per la quantificazione della ripartizione della biomassa negli organi vegetali.

Anche l'AGR è stato calcolato sia sulla base dei punti verdi che sulla base del peso secco. I due indici ottenuti sono stati paragonati inserendoli nel grafico sottostante.

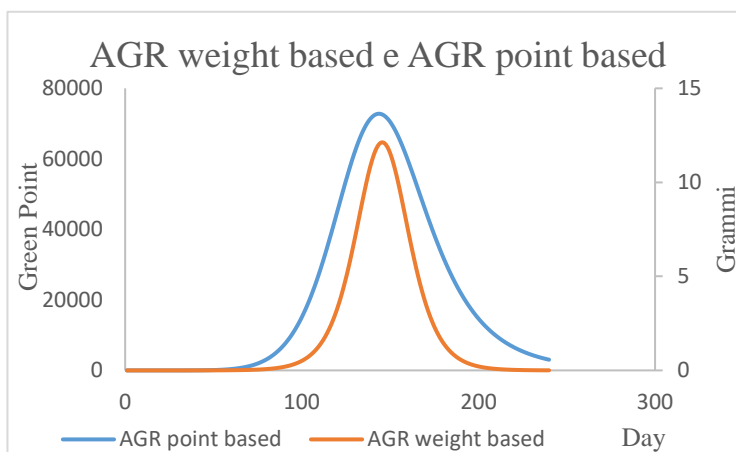


Figura 41 : Accostamento delle due dinamiche del AGR

Risulta interessante notare che, nonostante la scala differente, le due distribuzioni del tasso di accrescimento della biomassa siano molto simili. Inoltre, i picchi rappresentanti il massimo tasso di accumulo di biomassa, sono quasi sovrapposti l'uno all'altro e la differenza tra i due modelli è

pari a 2 giorni, da 145 per il peso e 147 per il numero di punti.

Inoltre il valore di AGR basato sui punti, al picco massimo è pari a 72786 punti, che corrisponde al incremento di 12,2 grammi/day del AGR calcolato sulla base del peso secco. Successivamente agli indici dell'AGR sono stati calcolati quelli relativi al RGR. Come detto precedentemente, l'RGR indica il tasso di crescita della pianta in relazione alla sua dimensione. Per questo motivo l'RGR tende a decrescere durante la stagione, in virtù dell'accrescimento della pianta stessa.

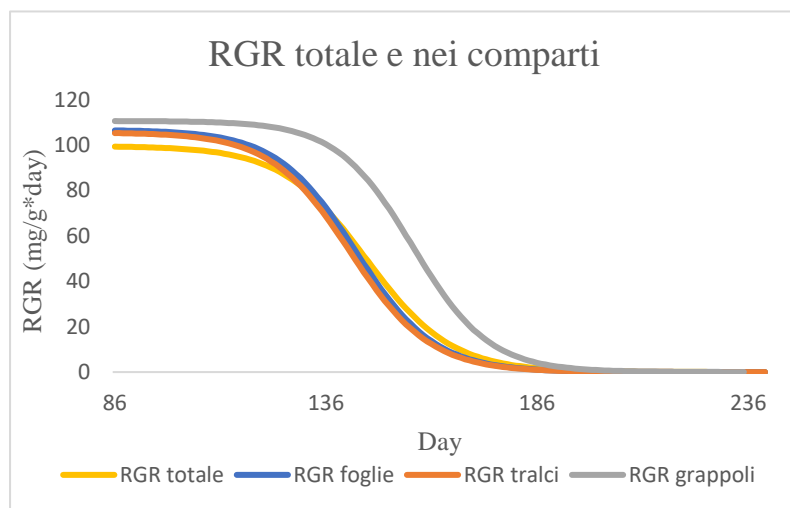


Figura 42: Dinamica del RGR nei differenti comparti vegetali

RGR Grappoli 110,6 mg/g*day.

Dal grafico si osserva che, anche nel caso dell'RGR, la curva relativa ai grappoli inizia a decrescere in ritardo rispetto a quella degli altri comparti della pianta, questo a causa del

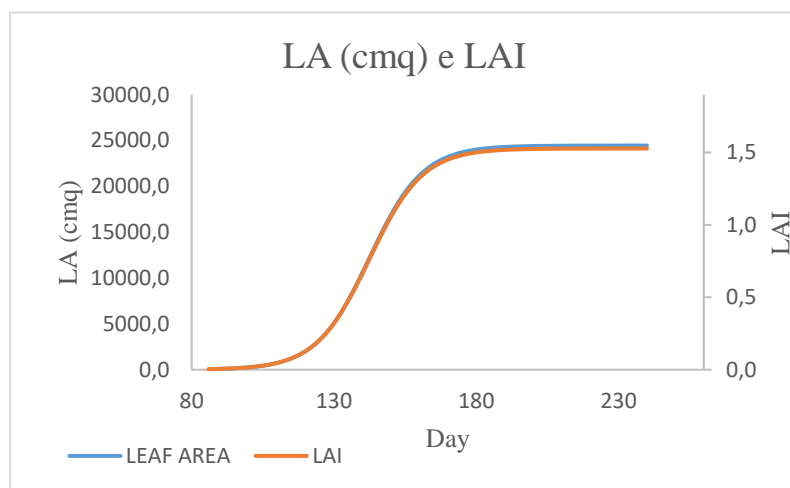


Figura 43: Andamento degli indici LA e LAI durante l'annata

In questo studio sono stati calcolati i RGR per la biomassa totale e per i vari comparti della pianta. I tassi massimi di accrescimento ottenuti presentano valori pari a:

RGR totale, 99,3 mg/g*day, RGR Foglie, 106,3 mg/g*day, RGR tralci 105,1 mg/g*day, RGR Grappoli 110,6 mg/g*day.

suo più posticipato aumento di dimensione. Altri due parametri calcolati sono stati il LA e il LAI. Il calcolo del valore giornaliero del LA si è basato sul peso fogliare, è stata infatti utilizzata la formula inversa a quella impiegata per stima del peso fogliare

conoscendo l'area dell'apparato fotosintetizzante. La formula rovesciata è pari a: $x = \frac{y}{m}$, quindi m è pari a 0,005193.

Il valore massimo di LA raggiunto nei modelli è pari a 24440 cm^2 , pari a 2,4 m^2 , mentre il massimo LAI presenta un valore di 1,5. Ovviamente, la dinamica del LA e del LAI durante l'anno rispecchia quella del peso secco fogliare dalla quale derivano.

In seguito al calcolo della LA è stato possibile calcolare gli indici di SLA e LWR.

In questo caso specifico lo SLA risulta costante durante l'intera annate vegetativa, al contrario dovrebbe decrescere lentamente, a causa dell'aumento dello spessore fogliare durante l'anno. Lo SLA rimane costante a causa del procedimento utilizzato per il calcolo del LA. Dal momento che il LA è stato derivato dal peso secco fogliare e ovvio che il rapporto fra il LA e il peso secco fogliare rimane costante.

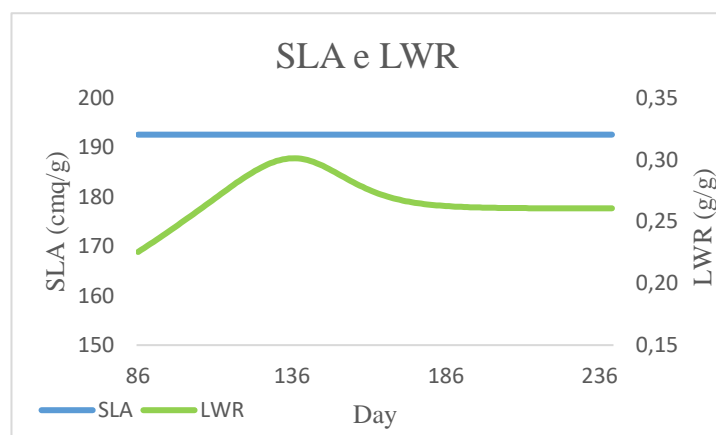


Figura 44: Andamento degli indici SLA e LWR durante la stagione

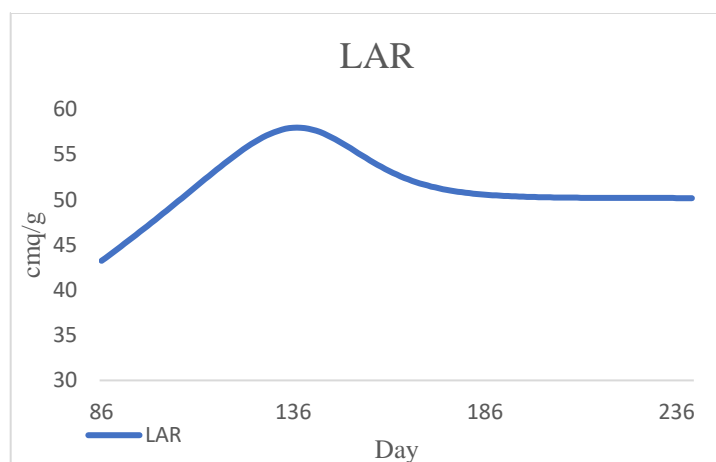


Figura 45: Dinamica dell'indice LAR durante la stagione vegetativa

Al contrario il LWR cresce durante la stagione, fino a raggiungere il picco in prossimità del 138esimo giorno, quindi verso metà-fine aprile.

Dopodiché decresce, come conseguenza dell'accumulo di biomassa negli organi di riserva. Il valore massimo raggiunto è pari a 0,301 g/g.

Una volta determinati i valori dello SLA e del LWR è stato possibile calcolare i valori del LAR. Il LAR indica la fogliosità della pianta rispetto al peso della biomassa totale e presenta un andamento crescente durante l'annata.

In questo caso in particolare il valore del LAR cresce durante la parte iniziale della stagione, per poi decrescere leggermente ma rimanere comunque ad un livello più elevato rispetto all'inizio della stagione di crescita. Il valore massimo raggiunto è pari a $57,97 \text{ cm}^2/\text{g}$.

L'ultimo indice dell'analisi di crescita ad essere calcolato è stato il NAR. Il NAR indica la capacità assimilatoria della pianta. Nello specifico è pari al tasso di incremento di sostanza secca per superficie di area fogliare e per giorno. Il NAR risulta molto alto ad inizio stagione vegetativa, a causa delle foglie giovani molto efficienti dal punto di vista fotosintetico, per poi decrescere gradualmente.

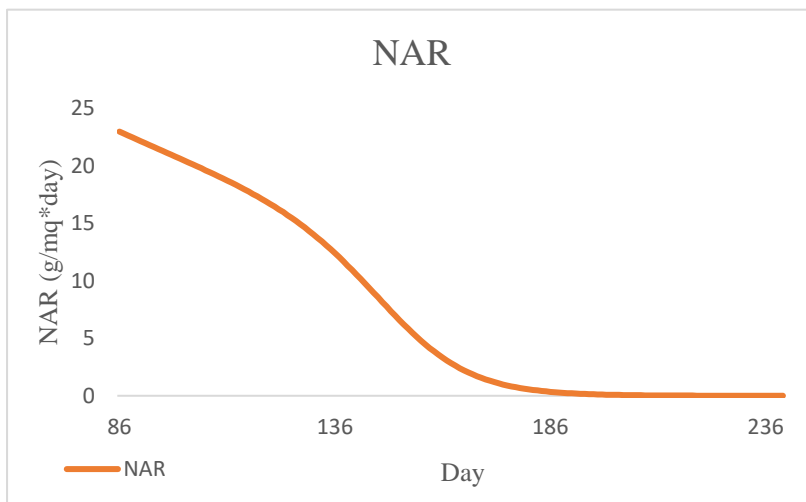


Figura 46: Andamento dell'indice del NAR durante l'anno

Il NAR, durante questo lavoro, è stato pari a $23 \text{ g/m}^2\text{day}$ nel momento di massimo incremento, per poi andare ad abbassarsi gradualmente con il passare dei giorni, fino a divenire prossimo al valore di 0 dal 185esimo giorno in poi.

Da quest'analisi della

crescita si evince che è possibile approfondire in dettaglio le dinamiche di sviluppo delle piante basandosi su dei modelli a sigmoide adattati a partire dai dati di ripartizione della biomassa. Infatti, sono stati calcolati nel dettaglio i valori degli indici di accrescimento ed è stato possibile effettuare vari paragoni tra differenti indici e tassi di variazione della biomassa.

Inoltre, al termine dell'analisi, si sottolinea che, il fitting del modello ottimizzato sul numero medio di punti verdi e la sovrapposizione dei due AGR sono due indizi che attestano l'attendibilità del metodo di stima della biomassa basato sul numero di punti. Si suppone quindi, che mediare i dati ottenuti dalle ricostruzioni di più piante entro data, sia sufficiente a correggere eventuali discordanze nella densità dei punti delle ricostruzioni, rendendo non necessario l'utilizzo di un metodo di correzione del numero di punti basato sulla densità dei punti nelle ricostruzioni.

7 CONCLUSIONI

I risultati ottenuti dalla integrazione dei rilievi biometrici di accrescimento e ripartizione della biomassa nei vari stadi di sviluppo delle piante con i modelli tridimensionali ottenuti dalla *Structure from Motion* sono molto soddisfacenti.

Il metodo di stima impiegato per quantificare la superficie fogliare totale e la lunghezza totale dei germogli è risultato solido e la bontà dei risultati è stata confermata attraverso un dataset indipendente ottenuto dal rilievo ottico prossimale dei modelli 3D. Integrando questi valori è stato possibile calcolare, in maniera semplice ed efficace, gli indici dell'analisi di crescita, da cui sono derivate le dinamiche di sviluppo delle piante, risultate concordi con i dati e le misurazioni raccolte durante l'anno.

Il dimensionamento dei modelli 3D è stato effettuato sulla base dell'estrazione del numero di punti costituenti i modelli stessi ed è risultato significativo, seppur influenzato della qualità delle immagini di partenza e del procedimento di ricostruzione dei modelli.

Dalla relazione tra il numero di punti e le stime di accrescimento sono stati ottenuti dei modelli lineari utili alla stima delle dinamiche di accrescimento e di ripartizione della biomassa in vite.

Questi modelli rappresentano un punto di partenza per applicazioni automatiche di quantificazione di parametri biofisici della vegetazione, anche in un'ottica di agricoltura di precisione.

In questo lavoro si osserva come l'utilizzo di valori mediati tra più piante causa un decremento dell'errore dei processi di stima e delle quantificazioni dei vari parametri presi in esame. Conseguentemente, elaborare i valori di più piante contemporaneamente può essere una via per migliorare l'efficienza del procedimento di stima stesso.

Inoltre, per migliorare l'impiego della *SfM* nei processi di stima è necessario perfezionare l'acquisizione fotografica, punto di partenza della tecnica, aumentando se possibile il numero di target fissi sulla vegetazione e prestando maggiore attenzione al mantenimento di condizioni ambientali di ripresa il più omogenee possibili. Anche le ricostruzioni tridimensionali possono essere migliorate utilizzando calcolatori più potenti per poter sfruttare le massime prestazioni degli algoritmi di ricostruzione.

L'ultima osservazione riguarda il metodo di rilievo fotografico, che è risultato eccessivamente statico e laborioso, poco utilizzabile nell'ottica dell'agricoltura di precisione e di monitoraggi *on-the-go*. Inoltre, il tempo necessario all'elaborazione delle immagini è molto lungo, in più il processo non risulta semplice e necessita di competenze, mezzi adeguati e soprattutto della presenza di un operatore.

In conclusione, utilizzare i modelli 3D derivanti dalla *SfM* per la ripartizione della biomassa e la stima delle misure biometriche del vigneto è possibile e può dare ottimi risultati. Si deve però considerare che l'utilizzo pratico in campo, ad esempio per un monitoraggio di una coltura, necessita di uno studio più approfondito, di nuove soluzioni tecniche per i rilievi e di modifiche al processo di ricostruzione che siano in grado di velocizzare l'elaborazione dei modelli 3D.

8 BIBLIOGRAFIA

- Bassetti, M., & Borsato, A. (2005). Evoluzione geomorfologica della Bassa Valle dell'Adige dall'Ultimo Massimo Glaciale: sintesi delle conoscenze e riferimenti ad aree limitrofe. *Studi Trentini di Scienze Naturali Acta Geol.*, 82, 31-42.
- Beadle C.L. 1993. Growth analysis. In *Photosynthesis and production in a changing environment, a field and laboratory manual*, ed D.O. Hall, J.M.O. Scurlock, H.R. Bolhar-Nordenkampf R.C., Leegood e S.P Long, 36-46. Springer Science- Business Media Dordrecht.
- Bonhomme, R. (2000). Bases and limits to using 'degree. day' units. *European journal of agronomy*, 13(1), 1-10.
- Casa R, Pignatti S, Pascucci S, Castaldi F e Vincini M. 2016. Il telerilevamento in agricoltura di precisione. In *Agricoltura di precisione*, ed. R. Casa, 69-108. Milano: Edagricole – Edizioni Agricole di New Business Media s.r.l.
- Chiariello N.R., Mooney H.A. e Williams K. 1989. Growth, carbon allocation and cost of plant tissues, in *Plant Physiological Ecology, field methods and instrumentation*, ed. R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney e P.W. Rundel, 327-345. Londra: Chapman and Hall Ltd.
- Chin S. 2016. Effetto della combinazione di eventi meteorologici estremi sulle dinamiche di crescita e sviluppo in vite. Relatore Bonghi C. Correlatore Meggio F. Dipartimento Agronomia Animali Alimenti Risorse naturali e Ambiente. Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- Cleveland, L. J., & Wartman, J. (2006). Principles and applications of digital photogrammetry for geotechnical engineering. In *Site and Geomaterial Characterization* (pp. 128-135).
- Cooper, S. D., Roy, D. P., Schaaf, C. B., & Paynter, I. (2017). Examination of the potential of terrestrial laser scanning and structure-from-motion photogrammetry for rapid nondestructive field measurement of grass biomass. *Remote Sensing*, 9(6), 531.

- Corazzina E. 2018. Sezione 1. La Vite: Storia, Botanica, fisiologia. In *Coltivare la vite. Tradizione, innovazione, sostenibilità*, ed. E. Corazzina, 21-27. Verona. Edizioni L'Informatore Agrario Srl
- Díaz, C. A., Pérez, D. S., Miatello, H., & Bromberg, F. (2018). Grapevine buds detection and localization in 3D space based on Structure from Motion and 2D image classification. *Computers in Industry*, 99, 303-312
- Green, S., Bevan, A., & Shapland, M. (2014). A comparative assessment of structure from motion methods for archaeological research. *Journal of Archaeological Science*, 46, 173-181.
- Hoffmann, W. A., & Poorter, H. (2002). Avoiding bias in calculations of relative growth rate. *Annals of botany*, 90(1), 37-42.
- Hunt, R., Causton, D. R., Shipley, B., & Askew, A. P. (2002). A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of botany*, 90(4), 485-488.
- Jay, S., Rabatel, G., Hadoux, X., Moura, D., & Gorretta, N. (2015). In-field crop row phenotyping from 3D modeling performed using Structure from Motion. *Computers and Electronics in Agriculture*, 110, 70-77.
- Kenarsari, A. E., Vitton, S. J., & Beard, J. E. (2017). Creating 3D models of tractor tire footprints using close-range digital photogrammetry. *Journal of Terramechanics*, 74, 1-11.
- Lorenz, D. H., Eichhorn, K. W., Bleiholder, H., Close, R., Meier, U., & Weber, E. (1995). Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*). Encoding and description of the phenological stages of the grapevine according to the extended BBCH scheme. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 1(2), 100-103.
- Marinello, F., Pezzuolo, A., Meggio, F., Martínez-Casasnovas, J. A., Yezekyan, T., & Sartori, L. (2017). Application of the Kinect sensor for three dimensional characterization of vine canopy. *Advances in Animal Biosciences*, 8(2), 525-529.

- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from motion (SFM) photogrammetry.
- Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali. Registro Nazionale delle varietà di vite. 2018. Pinot Grigio. Cosmo I. e Polsinelli M. Pinot Grigio, in *Principali vitigni da vino coltivati in Italia - Volume I. 1960.* <http://catalogoviti.politicheagricole.it/scheda.php?codice=194>
- Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali. Registro Nazionale delle varietà di vite. 2018. Berlandieri x Riparia Teleki 5A Sel. Kober 5BB (Teleki-Kober). Cosmo I., Comuzzi A. e Polsinelli M., in *Portainnesti della vite*, Edizioni Agricole. Bologna. 1958. <http://catalogoviti.politicheagricole.it/scheda.php?codice=194>
- Organization Internationale de la Vigne et du Vin. 2018. State of Vitiviniculture World Market April 2017. <http://www.oiv.int/public/medias/5287/oiv-noteconjmars2017-en.pdf>
- Organization Internationale de la Vigne et du Vin. 2018. 2017 World Vitiviniculture Situation. OIV Statistical Report on World vitiviniculture. <http://www.oiv.int/public/medias/5479/oiv-en-bilan-2017.pdf>
- Organization Internationale de la Vigne et du Vin. 2018. OIV Focus 2017. Vine Varieties Distribution In The World. <http://www.oiv.int/public/medias/5336/infographie-focus-oiv-2017-new.pdf>
- Organization Internationale de la Vigne et du Vin. 2018. Press Release. Global Economic Vitiviniculture Data, Paris, 24 October 2017. <http://www.oiv.int/public/medias/5681/en-communiqu-depresse-octobre-2017.pdf>
- Organization Internationale de la Vigne et du Vin. 2018. OIV Focus 2017. Distribution of the world's grapevine varieties. <http://www.oiv.int/public/medias/5888/en-distribution-of-the-worlds-grapevine-varieties.pdf>

- Organization Internationale de la Vigne et du Vin. 2018. Grapevine Varieties' Area By Country 2015. <http://www.oiv.int/public/medias/5882/grapevine-varieties-area-by-country-2015.pdf>
- Priori S, De benedetto D, Stellacci A.M, Losciale P, Manfrini L. 2016. Sensori e metodi per rilievi prossimali delle proprietà del suolo e della coltura. In *Agricoltura di precisione*, ed. R. Casa, 129-155. Milano: Edagricole – Edizioni Agricole di New Business Media s.r.l
- Prosdocimi, M., Burguet, M., Di Prima, S., Sofia, G., Terol, E., Comino, J. R., ... & Tarolli, P. (2017). Rainfall simulation and Structure-from-Motion photogrammetry for the analysis of soil water erosion in Mediterranean vineyards. *Science of the Total Environment*, 574, 204-215.
- Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T. P., & Troisi, S. (2012, October). Low-cost and open-source solutions for automated image orientation—A critical overview. In *Euro-Mediterranean Conference* (pp. 40-54). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Roncella, R. (2006). Sviluppo e applicazioni di tecniche di automazione in fotogrammetria dei vicini. Dottorato di ricerca, Università degli Studi di Parma, 7-63.
- Ryan, J. C., Hubbard, A. L., Box, J. E., Todd, J., Christoffersen, P., Carr, J. R., ... & Snooke, N. A. (2015). UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store Glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet.
- Schonberger, J. L., & Frahm, J. M. (2016). Structure-from-motion revisited. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4104-4113).
- Sicuranza, F. (2013). Sperimentazione di sistemi di structure from motion per la restituzione di apparati decorativi. Dottorato di ricerca, Università degli studi di Roma “La Sapienza”.
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40(2), 247-275.

- Torresani L. 2017. Stima dell'erosione dovuta a pascolamento nella Provincia Autonoma di Trento. Relatore Tarolli P. Correlatori Prosdocimi M. e Penasa M. Dipartimento Territorio e Sistemi agro-forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- Weiss, M., & Baret, F. (2017). Using 3D point clouds derived from UAV RGB imagery to describe vineyard 3D macro-structure. *Remote Sensing*, 9(2), 111.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Woodget, A. S., Carbonneau, P. E., Visser, F., & Maddock, I. P. (2015). Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 47-64.
- Yu, M., Huang, Y., Zhou, J., & Mao, L. (2017). Modeling of landslide topography based on micro-unmanned aerial vehicle photography and structure-from-motion. *Environmental Earth Sciences*, 76(15), 520.