



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE AGRARIE

*Potenzialità di tecniche di imaging 3D nella stima della
biomassa fogliare: esempio di applicazione alla crescita di
Lattuga Romana (Lactuca sativa L. var. longifolia)*

Relatore: Prof. Roberto Oberti

Correlatore: Dott. Emanuele Tona

Tesi di laurea di:

Alberto Zani

884073

Anno accademico 2016/2017

INDICE

1. INTRODUZIONE

1.1.	Orticoltura: rilevanza in Italia e in Lombardia.....	6
1.2.	Rilevanza di misure della biomassa per la gestione delle colture e approcci fenomici.....	12
1.3.	Applicazioni di sistemi di analisi delle immagini per la misura della dinamica di crescita.....	15
1.4.	Approcci automatizzati (non invasivi) per la misura di caratteristiche fenologiche quali la biomassa fogliare e la dinamica di crescita	20
1.5.	Tecniche di visione 3D.....	22
	1.5.1. Sistemi a visione stereoscopica	22
	1.5.2. Sistemi a luce strutturata (Kinect V1)	23
	1.5.3. Sistemi a tempo di volo (Kinect V2)	25
1.6.	Obiettivi del lavoro.....	26
	1.6.1. Utilizzo delle tecnologie di imaging classico e 3D per la valutazione della dinamica di crescita della Lattuga Romana (stima della biomassa e dell'area fogliare).....	26

2. SPERIMENTAZIONE CONDOTTA

2.1.	Allevamento di piantine di <i>Lattuga Romana</i>	28
2.2.	Setup di misura e dati acquisiti	29
2.2.1.	<i>Acquisizione top view</i>	31
2.2.2.	<i>Acquisizione con vista laterale</i>	32
2.3.	Raccolta distruttiva delle piante	33
2.3.1.	<i>Misurazione della biomassa</i>	34
2.3.2.	<i>Acquisizione dell'area fogliare</i>	34

3. METODI DI ANALISI DEI DATI

3.1.	Misure di riferimento, mediante raccolta distruttiva delle piante	36
3.1.1.	<i>Misurazione dell'area fogliare</i>	36
3.2.	Analisi non distruttiva con imaging 2D (immagini RGB).....	37
3.2.1.	<i>Analisi di immagini basata sul colore</i>	38
3.2.2.	<i>Analisi di immagini basata sul colore con l'applicazione di una maschera di distanza</i>	46
3.2.3.	<i>Analisi di immagini laterali basata sul colore con l'applicazione di una maschera di distanza</i>	49
3.3.	Analisi non distruttiva con imaging 3D.....	51
3.3.1.	<i>Fusione delle immagini RGB e 3D: point-cloud della pianta</i>	52
3.3.2.	<i>Analisi del volume della canopy mediante la triangolazione di Delaunay</i>	54
3.3.3.	<i>Segmentazione delle foglie per il calcolo dell'area fogliare</i>	56

3.3.4. <i>Stima dell'area della foglia mediante proiezione su piano interpolante</i>	64
3.4. Analisi della relazione fra misure di riferimento e risultati delle analisi di immagini	67
4. RISULTATI	
4.1. Risultati delle misure distruttive di riferimento	70
4.2. Risultati dell'analisi delle immagini 2D.....	71
4.2.1. <i>Risultati dell'analisi top view</i>	71
4.2.2. <i>Risultati dell'analisi laterale</i>	76
4.3. Risultati dell'analisi 3D.....	79
4.3.1. <i>Risultati dell'analisi basata sul calcolo del volume (top view)</i>	85
4.3.2. <i>Risultati dell'analisi basata sul calcolo del volume (laterale)</i>	86
4.3.3. <i>Risultati dell'analisi 3D con segmentazione fogliare</i>	87
4.3.4. <i>Risultati dell'analisi 3D mediante piano interpolante per il calcolo dell'area fogliare</i>	89
4.4. Discussione dei risultati ottenuti con approcci 2D e 3D.....	90
5. CONCLUSIONI	94
6. BIBLIOGRAFIA	98

7. APPENDICE..... 104

1. INTRODUZIONE

1.1. Orticoltura: rilevanza in Italia e in Lombardia

Il settore ortofrutticolo italiano è un comparto fondamentale per l'agricoltura nazionale, sia per ciò che attiene i suoi valori strutturali, economici ed occupazionali sia in relazione alla sua diffusione e caratterizzazione territoriale; infatti, la produzione ortofrutticola definisce in maniera significativa alcuni contesti territoriali che, in determinati casi, vengono spesso associati con taluni prodotti ortofrutticoli. Un primo elemento in grado di rappresentare il ruolo di primo piano della produzione di ortofrutta per il sistema agricolo nazionale può essere ricercato nella numerosità e diffusione delle imprese agricole impegnate nella produzione di ortaggi (sia in piena aria che in forma protetta) che nel 2013, secondo i dati Eurostat, risultavano essere di 88.550 realtà (66.840 ortive in piena aria e 21.710 in serra) seppur il 57% situato nelle regioni meridionali dello Stivale, dove sono un importante pilastro occupazionale, la presenza di unità produttive tende a caratterizzare tutte le regioni italiane. Se si analizzano le superfici agricole utilizzate per le orticole nel 2016 a livello nazionale sono state destinati 446.389 *ha* per le colture in piena aria e 39.308 *ha* per le colture in serra con un totale di 485.697 *ha* (Pretolani et al, 2017).

Se analizziamo il rapporto tra la numerosità delle aziende ortofrutticole e la loro estensione delle superfici è possibile valutare le dimensioni medie delle aziende

agricole all'interno delle diverse specializzazioni produttive (figura 1). Questo non solo consente di misurare gli assetti strutturali tra le specializzazioni considerate, ma permette anche di rilevare le differenze fra territori all'interno delle stesse produzioni. La dimensione fisica (media) delle aziende rappresenta una prima informazione in grado di restituire un elemento di competitività nell'ambito delle specializzazioni produttive e di segnalare quali regioni registrano configurazioni strutturali più in linea con le esigenze competitive dei mercati (che richiedono aziende sempre più grandi e/o più organizzate). Per quanto riguarda la coltivazione di ortive in piena aria, questa attività viene svolta da aziende agricole che hanno una SAU media di 3,2 ettari, un dato che trova declinazioni territoriali molto differenti e che raggiunge il suo massimo in Lombardia (5,9 ha) ed Emilia-Romagna (6,6 ha), mentre le realtà meno strutturate sono localizzate nelle due Province Autonome di Trento e Bolzano e in Liguria. La coltivazione di ortive protette è generalmente effettuata da aziende con una SAU media di 1,5 ettari, un dato che tende ad assumere valori più elevati nei bacini specializzati nella produzione di ortaggi in forma protetta (come nel caso della Lombardia, del Lazio e della Campania). Nonostante un valore medio abbastanza ridotto la specializzazione in serra consente agli imprenditori agricoli di ottenere un livello di competitività adeguato.

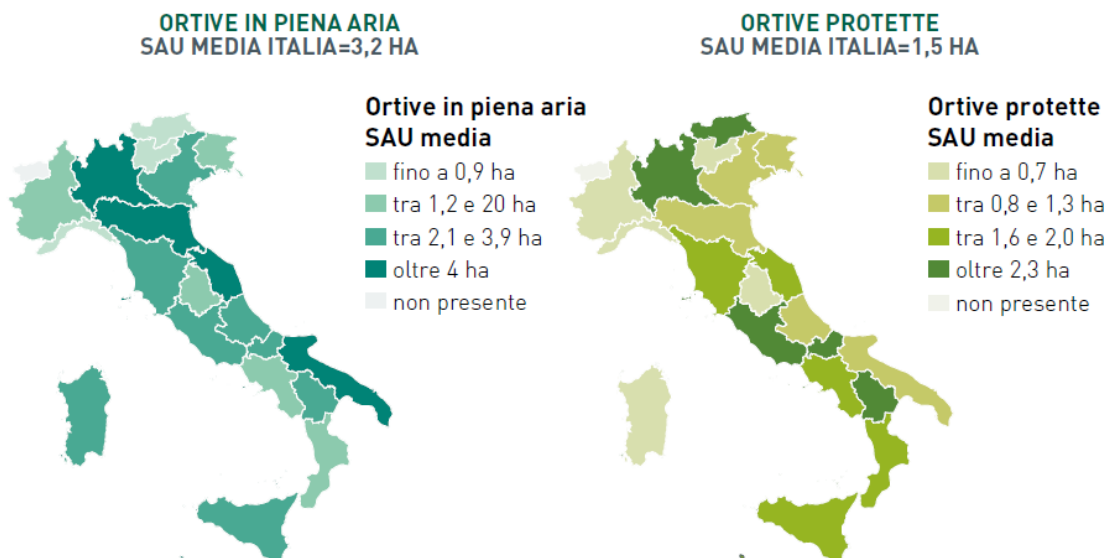


Figura 1: SAU media delle aziende orticole in serra e in pieno campo per regione in Italia (2013)

Il settore orticolo costituisce uno dei comparti più rilevanti dell'agricoltura italiana dal punto di vista dei valori economici e della ricchezza generata: nel 2016, con un valore della produzione pari a 7,4 miliardi di euro, il settore orticolo ha determinato il 15% del valore della produzione agricola nazionale. Notevole è anche l'importanza dell'orticoltura per l'export del tessuto agroalimentare italiano che, considerando sia il prodotto fresco sia il trasformato, ne rappresenta un'importante voce, con un valore che nel 2015 ha raggiunto i 4,5 miliardi di euro, il 12.5% del valore complessivo legato alle esportazioni agroalimentari (Rapporto Unaproa,2016).

Prendendo in considerazione le produzioni nell'ambito della coltivazione di ortaggi in piena aria, le più significative sono il pomodoro da industria (83.746 ha nel 2015), che mostra un'estensione molto significativa e pari a circa il doppio della seconda coltura per importanza, i carciofi (41.299 ha); seguono poi il pomodoro da mensa (18.765 ha) e la lattuga (14.742 ha). I principali ortaggi in serra (pomodori, zucchine e lattuga) rappresentano un'estensione complessiva di 15.614 ettari (2015); rispetto a questo totale la coltivazione più rilevante è il pomodoro (7.437 ettari nel 2015), cui seguono le zucchine (4.341 ha) e la lattuga (3.836 ha).

All'interno della categoria degli ortaggi in piena aria, il pomodoro da industria rappresenta la coltura più importante, sia per ciò che attiene l'estensione delle superfici che in merito ai quantitativi prodotti che, nel 2015, sono stati pari a 53,1 milioni di quintali. La produzione tende a caratterizzare diversi contesti territoriali, anche se i bacini produttivi più specializzati si trovano in Puglia (34,7% del totale produzione) ed Emilia-Romagna (30,7%), anche grazie alla presenza di strutture di trasformazione nelle vicinanze degli areali di produzione. Al secondo posto per importanza nell'ambito degli ortaggi in piena aria, troviamo il pomodoro da mensa, con una produzione nel 2015 di 5,7 milioni di quintali (circa 1/10 di quella relativa al pomodoro da industria). La produzione di pomodoro da mensa si ottiene prevalentemente in Sicilia (28,2%), Puglia, Abruzzo e Campania, quattro regioni che congiuntamente rappresentano il 65,7% del totale. La lattuga coltivata in piena aria nel 2015 ha registrato una produzione di 3,1 milioni di quintali, per il 29,1% ottenuta in Puglia e per il 14,2% in Emilia-Romagna, i primi due bacini italiani più importanti per questo tipo di produzione. La produzione di carciofi in piena

aria, pari a 4 milioni di quintali nel 2015, registra però dinamiche produttive di segno negativo nell'ultimo quinquennio (-16,4%).

Nel contesto dell'orticoltura nazionale riveste un importante ruolo anche la Lombardia che è leader nella produzione di ortaggi per la IV gamma. Nel 2016 nell'areale lombardo 19 mila ettari sono stati destinati alle colture ortive, dove si concentra un prodotto di 266 milioni di euro pari al 3.6% del valore della produzione orticola del Paese; 2.317 ha sono stati utilizzati per la coltivazione di colture protette (il 5,9% della superficie nazionale).

Le colture in pieno campo più importanti in Lombardia sono nell'ordine: pomodoro da industria (7.971 ha), melone (2.566 ha) zucchine (1.160 ha) e insalate (1.132 ha). Mentre per quanto riguarda le colture orticole in serra la fanno da padrone i meloni (851 ha coltivati principalmente in provincia di Mantova) seguiti dalla lattuga (232 ha) e dalla valeriana (176 ha); queste ultime due colture, insieme a lattuga e radicchio rappresentano un'importante materia prima per l'industria di produzione delle insalate di quarta gamma.

Gli ortaggi sono classificati, in funzione del tipo di lavorazione subita in: prodotti di I gamma (non lavorati), di II gamma (stabilizzati, appertizzati), di III gamma (surgelati), di IV gamma (semilavorati pronti all'uso) e di V gamma (precotti, grigliati, scottati al vapore). Nell'ultimo decennio si è osservato un aumento del consumo degli ortaggi di quarta gamma in seguito al cambiamento dello stile di vita e delle abitudini alimentari dei consumatori.

Rientrano nella IV gamma quei prodotti preparati e condizionati in maniera tale da fornire tutta una serie di servizi al consumatore tra cui pulizia, mondatura, lavaggio, taglio in unità o sub-unità pronte all'uso, conservando nel contempo le caratteristiche di freschezza e di genuinità del prodotto fresco (Colelli et al, 2009). Questi sono costituiti per due terzi da ortaggi di prima gamma (insalate adulte) e per un terzo da ortaggi da foglia da taglio (*baby leaf*), che sono raccolti in uno stadio di sviluppo molto precoce quando hanno raggiunto i 13-15 cm di altezza e hanno 6-7 foglie (Ferrante, 2013).

Come si è detto il settore della IV gamma (prodotto fresco confezionato pronto al consumo) è molto rilevante nell'areale lombardo, in particolar modo nelle provincie di Bergamo e Brescia che insieme coltivano il 79% della lattuga coltivata

in serra della Lombardia (Pretolani et al., 2017): secondo il rapporto di UNAPROA (Unione Nazionale tra le Organizzazioni dei Produttori Ortofrutticoli, Agrumari e di Frutta in Guscio) sulla competitività del settore ortofrutticolo nazionale del 2016 risulta che le dimensioni del mercato italiano degli ortaggi di IV gamma si aggira attorno ai 755 milioni di euro, il 75% del quale derivante proprio dalla insalata in busta; la regione Lombardia nel 2015 copriva il 31% delle produzioni nazionali (UNAPROA, 2016), valore in continua crescita che secondo Coldiretti ha toccato il 70% nella stagione 2017 (anche a causa delle calamità naturali che hanno colpito le zone vocate del meridione). Nel comparto della IV gamma in Lombardia sono impiegate circa 230 aziende concentrate principalmente tra le provincie di Brescia e Bergamo con superfici in continuo aumento (tra il 2014 e il 2017 le superfici in coltura protetta sono triplicate). Il mercato della IV gamma è quindi in continua espansione grazie alle sempre maggiori esigenze dei consumatori che prediligono prodotti freschi pronti.

La produzione delle colture orticole destinate alla IV gamma, coltivate prevalentemente in coltura protetta sono caratterizzate da particolari esigenze agronomiche e particolari mezzi tecnici indispensabili per ottenere delle buone produzioni. La coltivazione degli ortaggi da foglia e da taglio è generalmente effettuata in serra-tunnel con copertura in plastica della larghezza di 8-10 m e lunghi mediamente 50-100 m con un'altezza di 4 m. All'interno dei tunnel gli ortaggi *baby leaf* sono seminati a file. Le specie comunemente utilizzate sono la lattuga da taglio (*Lactuca sativa* L. var. *acephala*), rucola selvatica (*Diplotaxis tenuifolia* L.), spinacio (*Spinacia oleracea* L.), valerianella (*Valerianella olitoria* L.), cicorino (*Cichorium intybus* L.) e altre specie minori anche orientali. La durata dei cicli colturali può variare da 20 a 90 giorni, in funzione della stagione dell'anno.

Per la complessa filiera della IV gamma è molto importante ottenere un prodotto che mantenga le qualità organolettiche e di freschezza lungo tutti i processi di lavorazione fino alla tavola del consumatore; quindi soltanto prodotti orticoli della migliore qualità in termini di sviluppo, condizione fisiologica, aspetto e integrità, possono reggere allo stress indotto dalla preparazione, in modo da risultare ancora appetibili fino al termine della prevista durata commerciale. Gli attributi qualitativi di un prodotto di quarta gamma riguardano principalmente: l'aspetto esteriore, consistenza e caratteristiche organolettiche, valore nutrizionale e

sicurezza alimentare; tutti questi parametri sono ottenibili principalmente tramite un'attenta scelta varietale e un'oculata gestione della coltura (oltre a buone pratiche in fase di lavorazione e trasporto).

La tecnica di produzione svolge un ruolo strategico nell'ottenimento di un prodotto di qualità idonea per la trasformazione di IV gamma; particolare importanza è attribuita alla nutrizione azotata per le implicazioni igienico-sanitarie legate al contenuto di nitrati negli ortaggi da foglia. Altro fattore rilevante per ottenere prodotti orticoli freschi con una buona *shelf life* è il grado di maturità alla raccolta. Anche l'attenzione all'irrigazione riveste un ruolo di primo piano, in quanto l'eccesso di disponibilità idrica comporta l'ottenimento di tessuti più acquosi, con più basso contenuto di solidi solubili e di sostanza secca, rendendo gli ortaggi meno resistenti alla manipolazione. Essa ha anche un ruolo di primo piano nell'uniformità della coltura; gli impianti di irrigazione utilizzati devono avere una distribuzione omogenea al fine di evitare eccessivamente zone umide e in carenza idrica. Essendo la coltura di insalatine per la IV gamma a breve o brevissimo ciclo colturale le esigenze nutrizionali sono molto limitate ma il piano di fertilizzazione deve essere opportunamente definito considerando le asportazioni delle diverse specie per evitare fenomeni di stress che potrebbero alterare l'omogeneità dei lotti, inoltre una eccessiva fertilizzazione porta ad un aumento della conducibilità elettrica e nei casi gravi a stress osmotico alle colture, ma anche inquinamento ambientale e a fenomeni di accumulo di nitrati nelle foglie con il rischio di superare i limiti di legge, rendendo il prodotto non più commercializzabile.

Si evince quindi che il settore dell'orticoltura risulta essere di grande importanza per il tessuto agroalimentare italiano; inoltre sono notevoli gli spazi di innovazione tecnologica, specialmente per il settore della IV gamma, il quale è molto in espansione negli ultimi anni, in particolar modo nell'areale lombardo dove operano le più importanti aziende nazionali ed europee del settore. Questa situazione porta ad aumentare la competizione tra i produttori, stimolando le aziende ad innovarsi per poter essere competitive sul mercato; si dovrà quindi, nel medio periodo, continuare ad abbassare i costi di produzione, ottimizzando la scelta dei mezzi tecnici, ed effettuando scelte per l'innovazione di processo o di prodotto.

1.2. Rilevanza di misure della biomassa per la gestione delle colture e approcci fenomici

La misura dei parametri riguardanti la biomassa è un indice molto importante per lo studio delle colture di qualsiasi tipo, dalle erbacee alle arboree, dalle orticole alle frutticole

Uno di questi è l'indice di area fogliare (LAI), un parametro fondamentale per lo studio delle caratteristiche di una pianta, specialmente nel momento in cui si voglia analizzare la vegetazione al fine di valutare le sue interazioni con l'ambiente. Il LAI è una misura della superficie fogliare fotosintetizzante per unità di superficie del suolo; nelle colture orticole è un'importante caratteristica vegetale, legata direttamente alla fotosintesi e alla traspirazione della canopy (Baret et al., 2010). Le principali informazioni che ci può dare il LAI riguardano la quantità di radiazione intercettata dalla canopy (quindi la capacità di fare fotosintesi) e le esigenze idriche della coltura influenzate dai fenomeni di evapotraspirazione che dipendono anch'essi dalla superficie fogliare della coltura. Inoltre è importante per studiare le relazioni tra piante e inquinanti ambientali e per la valutazione del sequestro di CO₂ attraverso l'attività fotosintetica e quindi la produttività primaria netta (Confalonieri et al., 2013).

Il LAI può essere misurato tramite metodi diretti raccogliendo le foglie della pianta da analizzare e misurandone la superficie con scanner dedicati, che misurano l'area fogliare, o tramite l'acquisizione e il processamento di immagini; questi metodi possono essere molto precisi ed accurati, ma hanno anche notevoli svantaggi poiché hanno elevati costi di tempo e denaro, un limite è il problema della conservazione delle foglie che possono andare incontro ad appassimento ed accartocciamento se non vengono utilizzate in tempi brevi ed infine risultano quasi impossibili da applicare con elementi vegetali di grandi dimensioni, quali canopy arboree, con un apparato fogliare molto sviluppato. I metodi diretti per la misurazione del LAI sono inoltre distruttivi e prevedono quindi la perdita della pianta e la sua eliminazione nel momento in cui se ne voglia valutare questo parametro, impedendone possibili misurazioni a stadi di crescita successivi.

Se si vuole prendere in analisi un'area boscata il LAI è uno dei parametri che permettono di ottenere più informazioni poiché è strettamente legato alla distribuzione della luce sotto la copertura arborea e anche per lo studio dei fenomeni idrologici poiché ad a valori di LAI maggiori corrispondono più elevati valori di intercettazione fogliare delle precipitazioni. Il LAI controlla inoltre, in maniera diretta o indiretta, una moltitudine di processi biologici, fisici e biogeochimici nei cicli dell'acqua, del carbonio e di varie sostanze nutritive. In particolare, la densità fogliare delle chiome influenza la produzione primaria (fotosintesi), la traspirazione e lo scambio di energia tra la vegetazione e l'atmosfera.

Esistono poi metodi e strumenti indiretti che permettono di stimare il LAI attraverso l'analisi di altri parametri ad esso correlati, ma che hanno la caratteristica di essere più facilmente e rapidamente rilevabili, anche su larga scala. I metodi indiretti più diffusi si basano su misure ottiche, come nel caso della fotografia emisferica o del LIDAR, oppure rilevano tramite apposita strumentazione la radiazione solare e fanno riferimento alla legge di Lambert-Beer che è una relazione empirica che correla la quantità di luce assorbita da un mezzo alla natura chimica, concentrazione e spessore del mezzo attraversato. I metodi che si basano su misure ottiche o sull'attenuazione della luce presentano una discrepanza con i metodi diretti dovuta al fatto che non distinguono la copertura fogliare da quella esercitata da rami e fusti. Inoltre, nel caso della fotografia emisferica, un'altra problematica è rappresentata dal cosiddetto *clumping*, ovvero dalla sovrapposizione delle superfici fogliari, che causa una sottostima dell'effettivo LAI. Esistono anche ulteriori metodi classificati come tecniche allometriche, che si basano sulle relazioni esistenti tra i diversi parametri biometrici della pianta: ad esempio è stata riscontrata una forte correlazione della superficie fogliare con il diametro (Le Dantec et al., 2000). Anche queste ultime tecniche richiedono però più tempo per poter essere applicate.

Un altro strumento per la stima del LAI è il ceptometro ha la forma di una "antenna" costituita da una serie di sensori fotosensibili che captano la quantità di luce che raggiunge la coltura. Si effettua una prima misurazione sulla superficie e poi alla base della massa fogliare, per calcolare la quantità di luce che viene intercettata dalla pianta. La differenza tra le due misure rilevate produce una stima piuttosto

accurata del LAI tramite la legge di Lambert-Beer. Oppure molto diffuso è l'utilizzo di camere emisferiche (fisheye) che hanno un obiettivo fotografico con un angolo di ripresa di almeno 180°, le immagini acquisite vengono in seguito processate con un software dedicato che ne ricava il relativo LAI.

Un altro importante dato, interessante specialmente per le colture da reddito, è la biomassa (misurata in g o kg) tramite la quale si possono stimare rese, *harvest index*, tasso di crescita delle colture (CGR). Anche in questo caso per averne un valore esatto è necessario applicare metodi distruttivi, che impediscono misurazioni a successivi stadi di crescita e risultano inoltre essere laboriose e con lunghe tempistiche; può quindi essere interessante avere strumenti che permettano una stima non distruttiva.

Parametro interessante da conoscere è anche il volume della canopy che può essere utilizzato per la gestione delle irrorazioni di agrofarmaci; la possibilità di conoscerlo in diretta permetterebbe di modulare i volumi irrorati a seconda delle necessità con un notevole vantaggio economico (risparmio di tempo e di prodotto) ed ambientale poiché permetterebbe di ridurre la quantità di principi attivi liberati nell'ambiente.

Conoscere la biomassa fogliare e il volume di una canopy risulta essere un importante dato per la gestione delle colture che può far fronte alle problematiche agronomiche e gestionali del settore orticolo espresse nel paragrafo precedente; infatti tramite questi parametri si può tenere monitorato l'andamento degli stress delle colture che spesso sono correlabili ai livelli nutrizionali e idrici del suolo; inoltre la possibilità di misurare l'altezza delle foglie permette di migliorare le tempistiche di taglio e selezione nel caso di colture destinate alla produzione di baby leaf per la IV gamma.

Ad oggi, tra i settori che richiedono un maggior apporto di nuove tecnologie e metodi indiretti per studiare il maggior numero di campioni in tempi brevi è il phenotyping: questo vuole apportare il proprio contributo alla ricerca di cultivar che sappiano adattarsi nel miglior modo possibile ai cambiamenti climatici, alla comparsa di antagonisti alieni e possano aumentare la qualità e le rese delle produzioni agroalimentare con la finalità di raggiungere il secondo obiettivo dell'*Agenda 2030*: "Fame zero: Porre fine alla fame, raggiungere la sicurezza

alimentare, migliorare la nutrizione e promuovere un'agricoltura sostenibile” (Obiettivi per lo sviluppo sostenibile, UN, 2015).

1.3. Applicazioni di sistemi di analisi delle immagini per la misura della dinamica di crescita

I metodi di valutazione non distruttivi che si basano su stime effettuate senza distruggere o rimuovere tessuti, rappresentano un'alternativa valida ai metodi distruttivi, per scienziati e agricoltori. Ne è un esempio il telerilevamento comprende la fotografia, la visione artificiale, l'imaging termico, la scansione laser e l'imaging multispettrale. Indipendentemente dalla forma, l'uso del telerilevamento per la valutazione non distruttiva di singole piante e di canopy è sempre più comune in agricoltura, ecologia e ricerca. A partire dagli anni 2000 si sono potenziati i sistemi di fenotipizzazione grazie alla sempre crescente disponibilità di strumenti ottici relativamente economici e ad alte prestazioni come le moderne fotocamere digitali e i software di analisi. La fotografia, utilizzando formati digitali, è uno dei metodi più comuni, versatili e convenienti per raccogliere informazioni non distruttive su diverse varietà di colture. Vale quindi la pena soffermarsi sul concetto di immagine.

Un'immagine digitale può essere considerata una rappresentazione discreta di dati che possiede sia di informazioni spaziali (layout) sia di intensità (colore); un'immagine digitale bidimensionale $I(m,n)$ è la rappresentazione in coordinate cartesiane 2D ($m=1,2,\dots,M$; $n=1,2,\dots,N$) di una serie di punti fissi acquisiti da un sensore ed è derivata dal segnale spaziale continuo 2D $I(x,y)$ attraverso un processo di campionamento chiamato discretizzazione. La discretizzazione avviene in automatico per alcuni tipi di sensori (come per le fotocamere CCD) ed è una media locale del segnale continuo su una regione piccola (tipicamente quadrata) nel dominio di ricezione.

Gli indici m e n rappresentano rispettivamente le righe e le colonne dell'immagine. I singoli elementi base dell'immagine, chiamati pixel (*picture element*), sono

individuati sul piano cartesiano dagli indici m e n ; ciascun pixel contiene un valore numerico che è l'unità base delle informazioni all'interno dell'immagine.

Un'immagine contiene uno o più canali dei colori che definiscono l'intensità o il colore di un pixel collocato nel punto $I(m,n)$. Nel caso più semplice, ogni pixel contiene un solo valore numerico il quale rappresenta l'intensità del segnale in quel punto dell'immagine. La conversione da questo insieme di numeri a un'immagine reale (visualizzata) viene ottenuta tramite una mappa dei colori. Una mappa dei colori assegna una specifica sfumatura di colore a ciascun livello numerico nell'immagine per fornire una rappresentazione visiva dei dati. La mappa dei colori più comune è la scala di grigio, che assegna tutte le sfumature di grigio dal nero (zero) al bianco (valore massimo) a seconda del valore del segnale.

Oltre alle immagini in scala di grigi in cui abbiamo un singolo valore numerico in ogni punto, abbiamo anche immagini a colori reali in cui l'intero spettro di colori può essere rappresentato come un vettore triplo, in genere formato dalle componenti (R, G, B) (red, green, blue). Qui, il colore è rappresentato come una combinazione lineare dei colori o dei valori di base e l'immagine può essere considerata composta da tre piani 2-D. Sono possibili e ampiamente utilizzate anche altre rappresentazioni dei colori come ad esempio (H, S, V) (tonalità, saturazione e valore (o intensità)), dove l'intensità V del colore è disaccoppiata dall'informazione cromatica, che è contenuta all'interno dei componenti H e S.

La dimensione della griglia di pixel 2D insieme alla dimensione dei dati memorizzati per ogni singolo pixel dell'immagine determina la risoluzione spaziale e la quantizzazione del colore dell'immagine. La qualità di rappresentazione di un'immagine è definita dalla sua risoluzione che può essere specificata in termini di tre quantità:

- *Risoluzione spaziale*: le dimensioni della colonna (C) per riga (R) dell'immagine definiscono il numero di pixel utilizzati per coprire lo spazio visivo catturato dall'immagine. È comunemente citato come C x R (ad esempio 640 x 480, 800 x 600, 1024 x 768, ecc.)
- *Risoluzione temporale*: per una cattura continua come un video, questo è il numero di immagini catturate in un determinato periodo di tempo. Viene

comunemente quotato in fotogrammi al secondo (fps), in cui ogni singola immagine viene definita fotogramma video.

- *Risoluzione bit*: definisce il numero dei valori di intensità/colore che un pixel può avere e si riferisce alla quantizzazione delle informazioni dell'immagine. Ad esempio un'immagine binaria ha solo due colori (nero o bianco), un'immagine in scala di grigi ha comunemente 256 diversi livelli di grigio che vanno dal nero al bianco mentre per un'immagine a colori dipende dalla gamma di colori in uso. La risoluzione di bit viene comunemente indicata come il numero di bit binari richiesti per la memorizzazione ad un dato livello di quantizzazione, ad es. il binario è 2 bit, il grigio è 8 bit e il colore (più comunemente) è 24 bit.

Comunemente i pixel contengono il colore o il valore di intensità della luce colorata proveniente da un piccolo punto campione della scena di un'immagine. Tuttavia, non tutte le immagini contengono necessariamente informazioni strettamente visive, infatti un'immagine è semplicemente un segnale 2-D digitalizzato come una griglia di pixel, i cui valori possono riguardare altre proprietà diverse dal colore o dall'intensità della luce. Il contenuto informativo dei pixel può variare notevolmente a seconda del tipo di immagine che stiamo elaborando, possono infatti contenere:

- Infrarosso (IR): ci offre la possibilità di riprendere scene basate sulla riflettanza della luce IR o sulla radiazione infrarossa che emettono la quale viene emessa in proporzione al calore generato/riflesso da un oggetto e, pertanto, l'imaging IR viene anche comunemente indicato come immagine termica.
- In campo medico molte immagini contengono valori proporzionali alle caratteristiche di assorbimento del tessuto rispetto a un segnale proiettato attraverso il corpo.
- Imaging radar/sonar: un'immagine radar o sonar rappresenta una sezione trasversale di un obiettivo in proporzione alla sua distanza dal sensore e dal suo "riflesso" del segnale associato.
- Imaging 3-D: utilizzando specifiche tecniche di rilevamento 3-D come la fotografia stereo o la scansione laser 3-D possiamo acquisire dati da oggetti nel mondo che ci circonda e rappresentarli nei sistemi di computer come

immagini 3D. Le immagini 3-D corrispondono spesso a mappe di profondità in cui ogni posizione di pixel contiene la distanza del punto dell'immagine dal sensore. In questo caso, abbiamo informazioni esplicite in 3-D piuttosto che una semplice proiezione di 3-D come nell'imaging 2D tradizionale. A seconda della tecnologia di acquisizione, potremmo avere solo informazioni tridimensionali o profondità e colore tridimensionali per ogni posizione dei pixel. Quando consideriamo l'imaging 3-D in cui si analizzano i volumi spaziali rappresentati dall'immagine i pixel 3-D sono indicati come voxel (volumetric pixel) e rappresentano la posizione spaziale più piccola nel volume 3D in contrasto con l'immagine 2D tradizionale.

Importante è anche conoscere come una immagine è stata ottenuta poiché l'origine e le sue caratteristiche possono influire su come possiamo elaborarla in modo efficace.

Le immagini sono generate dalla combinazione di una sorgente di energia e dalla riflessione dell'energia emessa dalla sorgente da parte di oggetti di una scena e occorre un sensore sensibile all'energia prodotta dalla sorgente che raccolga l'energia "irradiata" dalla scena.

Nella maggior parte dei casi è coinvolta l'energia elettromagnetica (immagini "visibili", immagini all'infrarosso, radar, raggi X etc.). L'energia coinvolta nella formazione dell'immagine è energia radiante che consiste di due campi di forza, elettrico e magnetico, ortogonali tra loro e rispetto alla direzione. L'energia radiante si propaga nello spazio mediante onde di lunghezza variabile. Le condizioni tipiche necessarie affinché una scena sia rappresentabile da un'immagine sono rappresentate dall'interazione della scena con le radiazioni elettromagnetiche, da un sensore che raccolga la radiazione riflessa dalle superfici degli oggetti e la proietti sul piano immagine.

C'è da tenere presente, inoltre, che punti diversi sulle superfici degli oggetti avranno nell'immagine valori diversi di intensità in funzione della quantità di energia radiante incidente sulla superficie, del modo in cui esse riflettono, del modo in cui l'energia riflessa è raccolta dal sensore, del modo in cui il sensore risponde all'energia con cui è colpito.

Per quanto riguarda le fotocamere digitali l'energia riflessa dai corpi presenti sulla scena viene catturata da sensori con dispositivi ad accoppiamento di carica (CCD - Charge Coupled Device) che consistono in un circuito integrato formato da una griglia di elementi semiconduttori (*photosite*) in grado di accumulare una carica elettrica proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce. Questi elementi sono accoppiati in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica ad un altro elemento adiacente. Inviando al dispositivo (fotocamera) una sequenza temporizzata d'impulsi, si ottiene in uscita un segnale elettrico grazie al quale è possibile ricostruire la matrice dei pixel che compongono l'immagine proiettata sulla superficie del CCD stesso. Questa informazione può essere utilizzata direttamente nella sua forma analogica, per riprodurre l'immagine su di un monitor o per registrarla su supporti magnetici, oppure può essere convertita in formato digitale. La sua conversione in formato digitale (digitalizzazione) si basa sul concetto chiave della quantizzazione, ossia la mappatura del segnale continuo dalla scena in un numero discreto di punti (pixel) spazialmente organizzati con una capacità di rappresentazione finita; grazie alla quantizzazione si otterrà quindi una matrice di pixel, ciascuno associato ad un valore numerico, che darà l'immagine digitale.

I nuovi sistemi di analisi sono dispositivi automatici o semiautomatici che permettono di effettuare misurazioni non invasive e ripetute dei parametri macroscopici che caratterizzano una pianta correlati alla crescita, alle caratteristiche strutturali e alle componenti tissutali (Fiorani et al., 2013). I più comuni sistemi di imaging 2D sono in genere basati su telecamere a colori RGB ed i software dedicati possono permettere di calcolare l'area fogliare e il volume di biomassa o quantificare specifici organi vegetali. Sistemi più avanzati possono includere telecamere iperspettrali VIS-NIR, dispositivi di imaging a fluorescenza o termocamere a infrarossi.

In bibliografia le prime applicazioni di imaging 2D a colori per monitorare la crescita della lattuga risalgono alla fine del secolo scorso ed erano finalizzate a studiare il possibile utilizzo dell'area della pianta (rilevata tramite immagini dall'alto) per identificare eventuali carenze nutrizionali in colture idroponiche (Giacomelli et al., 1998).

Analizzando anche studi più recenti si può notare come le tecniche di imaging 2D a colori risultino utili nel caso in cui si voglia descrivere e individuare fattori distinguibili sulla base del colore, come l'individuare aree verdi (Jung et al., 2015; Ide and Oguma, 2010; Casadesus et al., 2007; Neeser et al., 2009).

Consultando la bibliografia si può concludere che l'approccio top-view è un metodo accurato per misurare indirettamente il LAI e la biomassa di lattuga durante le fasi iniziali della crescita in cui si ha una buona correlazione tra i valori dei parametri misurati (con metodi distruttivi) e quelli stimati (tramite imaging), mentre negli stadi avanzati, quando il cespo si chiude, la correlazione è indebolita dalle occlusioni nella vista dall'alto della pianta a causa delle foglie che si sovrappongono (Bumgarner et al., 2012).

Un ulteriore problema che si può avere con le tecniche di imaging RGB è dato dal rumore di fondo dell'immagine (per esempio il colore del terreno) che può alterare l'analisi dell'immagine (Fiorani et al., 2013).

1.4. Approcci automatizzati (non invasivi) per la misura di caratteristiche fenologiche quali la biomassa fogliare e la dinamica di crescita

L'automazione e la robotica, grazie anche a nuovi sensori e tecnologie di imaging (hardware e software), stanno avendo negli ultimi anni un'ampia gamma di applicazioni nei sistemi di ricerca e screening di laboratorio, in sistemi di produzione orticoli e per l'intera filiera alimentare, permettendo un rapido sviluppo del settore dell'agricoltura di precisione (Fiorani et al., 2013).

I primi approcci automatizzati per l'analisi non invasiva di elementi vegetali riguardano lo sviluppo morfologico della pianta, la dinamica di crescita e lo stato fisiologico e si basano su diverse tecnologie di imaging 2D utilizzando diverse tipologie di strumenti e sensori. Il più utilizzato, anche grazie ai bassi costi e alla elevata diffusione e semplicità di utilizzo, è la fotocamera digitale che raccoglie informazioni riguardanti il colore nello spettro della luce visibile tramite il quale si possono ottenere dati su colore, forma e architettura di pianta e frutti, che in seconda analisi possono darci informazioni sulla dinamica di crescita, vigore della

pianta, malattie fogliari (Bock et al., 2010). L'utilizzo di fotocamere RGB digitali hanno come vantaggio la rapidità di acquisizione e i costi contenuti ma nel contempo rendono un limitato numero di informazioni riguardanti lo stato fisiologico della pianta.

Se si vogliono analizzare i fenomeni fotosintetici e tutto ciò che influenzano, si possono utilizzare sistemi a fluorescenza che permettono di individuare sintomi di stress in stadi precoci, prima che appaiano sintomi macroscopici (Gorbe et al., 2012). In bibliografia sono riportati come limiti la possibilità di utilizzo di questi sistemi solo su colture che presentano una struttura a rosetta. Inoltre viene individuata nella ricostruzione 3D un possibile miglioramento dei risultati ottenuti tramite l'analisi della fluorescenza (Furbank et al., 2011).

Un altro strumento che permette di ottenere immagini 2D sono le termocamere, che misurano la temperatura delle foglie o di intere canopy restituendo una mappa di calore. La temperatura è un buon indicatore collegato alla traspirazione e alla dissipazione del calore della pianta; inoltre è utile per valutare lo stato idrico della pianta (Jones et al., 2009). Numerosi sono però i limiti evidenziati in bibliografia sull'utilizzo della termografia in campo poiché ci sono disturbi dovuti alla temperatura del suolo o alla presenza di venti e condizioni atmosferiche che possono alterare le misurazioni.

Ulteriori tecnologie disponibili sul mercato sono tutte quelle che vanno ad analizzare zone dello spettro elettromagnetico con lunghezze d'onda diverse da quelle del visibile, tipo le camere multispettrali ed iperspettrali, di interesse sono le zone attorno al picco di riflettanza verde e le bande di assorbimento dell'acqua nel vicino infrarosso. Le principali applicazioni di questa tecnologia riguardano la stima dei contenuti di acqua nelle foglie in maniera non invasiva e la risposta a stress idrici (per Phenotyping); inoltre permettono lo studio dei pigmenti fogliari. Il principale limite delle fotocamere multispettrali e iperspettrali sono gli elevati costi della strumentazione e la necessità di continue calibrazioni nel loro utilizzo tra le diverse specie e in condizioni differenti.

Secondo i più recenti studi bibliografici tutte le tecnologie di imaging bidimensionale sopra elencate potrebbero essere integrate e migliorate utilizzando sistemi tridimensionali perché permetterebbero di migliorare

notevolmente le stime dei sistemi non invasivi specialmente quando si vanno a considerare caratteristiche strutturali come l'architettura della pianta, la biomassa fogliare o il volume della canopy. Per fare chiarezza è giusto precisare alcuni termini: in primis quando si ha a che fare con rappresentazioni 3D, in cui si analizzano i volumi spaziali, la porzione spaziale più piccola nel volume è chiamata voxel (volumetric pixel) e non pixel come nelle immagini 2D tradizionali. Un altro concetto molto importante è quello di nuvola di punti (point cloud) che è un insieme di punti caratterizzati dalla loro posizione in un sistema di coordinate e da eventuali valori di intensità (colore, profondità, ecc.) ad essi associati; le nuvole di punti servono per rappresentare una struttura solida in un sistema di coordinate tridimensionali.

Nei paragrafi successivi si analizzeranno le tecnologie per l'acquisizione di immagini 3D.

1.5. Tecniche di visione 3d

In alternativa ai costosi sistemi di misurazione 3D stanno emergendo sensori di imaging 3D a basso costo, particolarmente interessanti per esperimenti che riguardano la fenotipizzazione su piccola scala e su misura (Azzari et al., 2013; Paulus et al., 2014).

Fiorani et al. (2013), prendendo in analisi i possibili scenari di evoluzione dei metodi di fenotipizzazione evidenziano un grande potenziale delle tecniche 3D in questo campo su diverse scale come per esempio la ricostruzione della singola foglia, di interi germogli o di tutta la canopy.

Nei paragrafi seguenti vengono analizzate alcune delle più comuni tecniche di visione 3D e delle loro applicazioni reperite in bibliografia.

1.5.1. Sistemi a visione stereoscopica

-Principi di funzionamento

I sistemi di visione stereoscopica utilizzano due fotocamere che, da punti diversi, guardano la stessa scena. La profondità è stimata misurando la differenza nella

posizione di punti corrispondenti (disparità), tramite calcoli trigonometrici si ottiene la posizione nello spazio rispetto ad un certo sistema di riferimento.

In pratica confrontando due immagini della stessa scena, provenienti da due camere disallineate, l'informazione di profondità relativa può essere ottenuta sotto forma di una mappa di disparità, che codifica la differenza di coordinate orizzontali dei corrispondenti punti dell'immagine. I valori in questa mappa di disparità sono inversamente proporzionali alla profondità della scena nella posizione dei pixel corrispondenti (punti più vicini all'osservatore avranno una disparità tra le due immagini inferiore rispetto a punti più lontani). Questo metodo è basato sugli stessi principi della visione stereoscopica degli occhi.

-Applicazioni in bibliografia

Questa tecnica di visione 3D è stata utilizzata da Biskup et al., (2007) per l'analisi e la segmentazione delle componenti strutturali di piante con portamento a rosetta *Arabidopsis* e tabacco giovane; Van der Heijden et al., (2012) la applicano per la ricostruzione della canopy in serra.

1.5.2. Sistemi a luce strutturata (*Kinect V1*)

-Principi di funzionamento

Con il termine luce strutturata ci si riferisce ad una tecnica di rilevamento tridimensionale, che si basa sulla proiezione di un pattern noto tramite raggi laser, infrarossi o altre sorgenti luminose (spesso righe orizzontali o verticali) su una scena, una telecamera acquisisce poi il pattern proiettato distorto dalla conformazione dell'oggetto. I pattern non sono casuali ma precedentemente codificati così che ogni pixel abbia un suo codice identificativo: in questo modo è possibile stabilire una corrispondenza diretta tra il pixel proiettato e quello acquisito.

Tramite la misurazione dello scostamento tra le linee visualizzate sull'oggetto ed il pattern iniziale e conoscendo la geometria del sistema di acquisizione è possibile determinare le coordinate tridimensionali della superficie dell'oggetto in esame.

I vantaggi degli scanner a luce strutturata sono le elevate velocità e precisione; si possono infatti scannerizzare contemporaneamente centinaia di migliaia di punti, se

non l'intero campo di vista. La qualità dei risultati dipende però fortemente dal livello di precisione con cui è possibile rilevare la deformazione del pattern proiettato sull'oggetto nell'immagine acquisita. È quindi necessario effettuare un'accurata calibrazione dello scanner prima di procedere all'acquisizione dei dati.

I primi sistemi di visione 3D a luce strutturata appaiono in letteratura nel 1990 ma solamente nel 2010 entra in commercio un visore per l'utilizzo di massa con l'introduzione della prima versione di Microsoft Kinect. Kinect è commercializzato da Microsoft per fini ludici in abbinata alla console Xbox 360 e consente al giocatore di controllare il videogioco senza la necessità di indossare o impugnare alcunché. Il pattern di Kinect non è composto da linee come nella maggior parte degli scanner 3D a luce strutturata ma da un insieme di cerchi (figura 2) tramite infrarossi.



Figura 2: Sistema a luce strutturata: proiezione dei punti tramite Kinect V1

I cerchi proiettati aumenteranno il loro raggio all'aumentare della distanza e diventeranno delle ellissi nel momento in cui saranno proiettati su piani inclinati. Un limite tecnologico di Kinect V1 è il fatto che la presenza di elementi in grado di attenuare o disturbare il pattern proiettato dall'emettitore IR possono interferire sul funzionamento del Kinect; la luce solare diretta è un'importante fonte di disturbo che rende il dispositivo poco adatto all'uso esterno (diurno) ma solo in ambienti chiusi ed in condizioni di penombra. Anche l'utilizzo di due dispositivi contemporaneamente mostra problemi poiché si corre il rischio di interferenze tra i due pattern nelle aree comuni con la conseguenza che il pattern acquisito da un dispositivo sia compromesso dalla presenza di un secondo pattern.

-Applicazioni in bibliografia

L'utilizzo di questo strumento trova alcune applicazioni in bibliografia, ne è un esempio l'utilizzo su lattuga effettuato da Bulgari et al., (2017) per valutare l'effetto di estratto di borraggine come biostimolante; in particolare è stato utilizzato Kinect V1 per stimare la crescita delle piante. Secondo alcuni autori però Kinect V1 ha un campo di utilizzo limitato poiché può essere utilizzato solo in ambienti chiusi (Jingwei Guo et al., 2017).

1.5.3. Sistemi a tempo di volo (Kinect V2)

-Principi di funzionamento

Lo scanner a tempo di volo (Time of Flight) utilizza un fascio luminoso per misurare le distanze e determinare quindi la forma di superfici riflettenti. L'emettitore emette un impulso luminoso che verrà riflesso dalla superficie in esame. Viene quindi cronometrato con elevata precisione il tempo in cui la luce riflessa è vista da un rilevatore.

Dato che la velocità della luce è nota ($c = 299,792,458$ m/s), mediante l'informazione del tempo è possibile determinare la distanza percorsa dal fascio del laser, che è pari al doppio della distanza della superficie dal sensore. Siano c la velocità della luce e t il tempo misurato dal sensore; il valore della distanza d può essere calcolato mediante la formula: $d = t \cdot c / 2$.

Questa tipologia di sensore permette di conoscere la posizione reale di ogni singolo pixel (cosa non possibile per i sistemi a luce strutturata).

La principale limitazione di questo metodo è l'impossibilità di ottenere un'elevata precisione nella misurazione, in quanto essa dipende direttamente dall'accuratezza con cui il sensore è in grado di misurare il tempo (1 mm viene percorso in circa 3.3 ps).

Questa tecnica è utilizzata nella versione V2 di Microsoft Kinect commercializzata dal novembre 2013. Kinect V2 abbandona la tecnologia della camera a luce strutturata per la ricostruzione 3D a favore della camera a tempo di volo (Time of Flight). Questa nuova tecnologia porta ad avere performance migliori poiché aumenta il range di distanze alle quali si può utilizzare il dispositivo (da 0.5 m a 7 m) ed inoltre si riduce notevolmente il disturbo causato dalla luce solare. Rimane

comunque il limite dell'interferenza tra più dispositivi dovuta alla possibile sovrapposizione dei raggi infrarossi provenienti da due dispositivi.

-Applicazioni in bibliografia

Non si ritrovano nella bibliografia specializzata applicazioni in campo agricolo del dispositivo Microsoft Kinect V2.

1.6. Obiettivo del lavoro

1.6.1. Utilizzo delle tecnologie di imaging classico 3D per la valutazione della dinamica di crescita della lattuga romana (stima della biomassa e dell'area fogliare)

L'obiettivo che si pone questo lavoro di tesi è quello di valutare l'applicazione di approcci bidimensionali nell'analisi delle curve di crescita di lattuga romana considerandone limiti e pregi. Si vuole inoltre considerare la possibilità di utilizzare sensori e sistemi di analisi tridimensionali come per migliorare le stime della biomassa e dell'area fogliare. Inoltre si propone uno studio delle potenzialità di utilizzo di strumentazione sensoristica semplificata a basso costo, come il dispositivo Microsoft Kinect, confrontando i risultati ottenuti da tecniche di imaging 3D con le tradizionali metodiche 2D.

Il progetto prende in considerazione l'accrescimento volumetrico delle piantine di lattuga romana, rilevato tramite sensori 2D e 3D, al fine di stimarne il LAI e la biomassa con metodi non invasivi. Il confronto che si propone è quantitativo, allo scopo di valutare quale sia l'approccio non distruttivo (2D o 3D) che meglio approssima i reali valori di area fogliare e biomassa.

2. SPERIMENTAZIONI

Per cercare di raggiungere gli obiettivi prefissati per questo lavoro è stato in primis predisposto un piano sperimentale. Nei paragrafi seguenti verrà analizzato nel dettaglio in tutti i suoi passaggi.

2.1. Allevamento di piantine di *Lattuga Romana*

La lattuga (*Lactuca sativa L.*) è una pianta angiosperma, dicotiledone appartenente alla famiglia delle *Asteraceae*. La varietà lattuga romana (*Lactuca sativa L. var. longifolia*) presenta foglie dritte e cespo allungato e compatto, con costa robusta e nervature evidenti; la sua colorazione varia dal bianco della parte centrale al verde chiaro fino al verde scuro delle foglie più esterne e della parte più alta. La lattuga romana può raggiungere una lunghezza di 40 cm e un peso di 300 grammi; è una pianta presente in tutte le zone del Mediterraneo e in tutta Italia, dove si adatta ad essere coltivata nei vari mesi dell'anno e nei differenti ambienti climatici.

La coltivazione delle piante di lattuga romana utilizzate per il progetto si è svolta in una serra della Facoltà di Scienze Agrarie e Alimentari di Milano, in condizioni controllate; è durata circa 6 mesi, da febbraio a luglio 2017, al fine di ottenere lotti di prodotto con diverse caratteristiche strutturali. Si è provveduto alla semina

in semenzaio e successivamente le piantine di due settimane sono state trapiantate in vasi di plastica di 10 cm di diametro, su un substrato torboso. Le condizioni ambientali in serra durante il periodo sperimentale erano in media tra i 20 °C e i 24 °C con una umidità relativa del 60-70%. Sono state trapiantate 150 piantine di lattuga e tra queste ne sono state selezionate 84 sulla base delle caratteristiche che le rendevano più adatte alla sperimentazione quali il migliore portamento e l'assenza di malformazioni fogliari causate da stress biotici o abiotici. Ad ogni piantina scelta è stato assegnato un codice progressivo.

Si è scelta la lattuga romana come campione poiché risulta essere di facile coltivazione ed è inoltre un elemento importante del tessuto agro-economico lombardo dove l'orticoltura, specialmente per la IV gamma, è molto sviluppata.

2.2. Setup di acquisizione e dati acquisiti

Le prove di acquisizione si sono svolte tutte presso il laboratorio di automazione della facoltà di Scienze Agrarie e Alimentari dell'Università degli studi di Milano. Il setup di acquisizione dei dati 3D e delle immagini RGB era composto da 2 dispositivi Microsoft Kinect V2 (figura 3): il primo acquisiva le immagini dall'alto, l'altro invece lo faceva da una vista laterale (figura 4).



Figura 3: Dispositivo Microsoft Kinect V2 utilizzato per le sperimentazioni

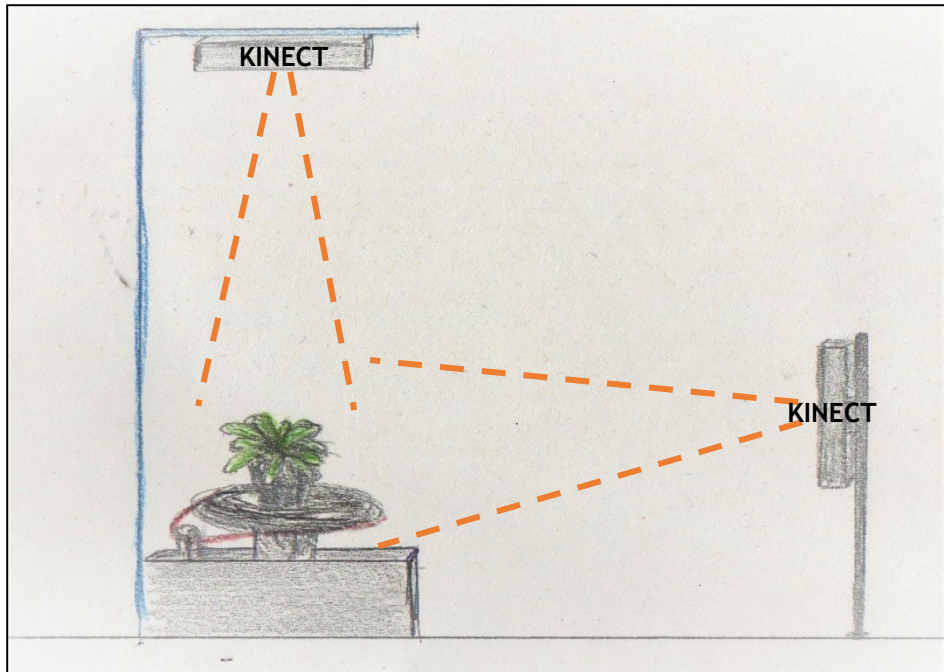


Figura 4: Setup di acquisizione di immagini RGB e 3D

Le misurazioni sono state effettuate in una cabina realizzata con teli scuri al fine di ridurre al minimo la presenza di radiazioni luminose dell'ambiente esterno che avrebbero potuto disturbare l'acquisizione tramite Kinect V2 (il quale basa il suo funzionamento su raggi infrarossi) anche il pavimento è stato coperto con materiale di colore nero con un elevato coefficiente di assorbanza al fine di ridurre il più possibile i disturbi luminosi. I due Kinect erano attivati dallo stesso computer ma non acquisivano i dati contemporaneamente per non rischiare fenomeni di interferenza dei segnali emessi dai due dispositivi; inoltre i driver concessi da Microsoft non ne consentono l'utilizzo simultaneo su un unico computer. Per la gestione dell'acquisizione è stato utilizzato il software MATLAB ed i driver Kinect disponibili per esso.

I dati acquisiti tramite Microsoft Kinect sono state immagini RGB (iRGB) con una risoluzione di 1920x1080 pixel e immagini distanza (iD) con risoluzione 512x424 pixel.

2.2.1. Acquisizione top view

Durante l'acquisizione dall'alto il vaso contenente la pianta in esame viene collocato su un disco fermo, all'interno della cabina di prova, a una distanza di 105 cm dal sensore Kinect (figura 5). Il sensore acquisisce una immagine RGB (figura 6) e contemporaneamente, grazie alla camera a tempo di volo, rileva la distanza dei punti degli oggetti dal sensore (figura 7).

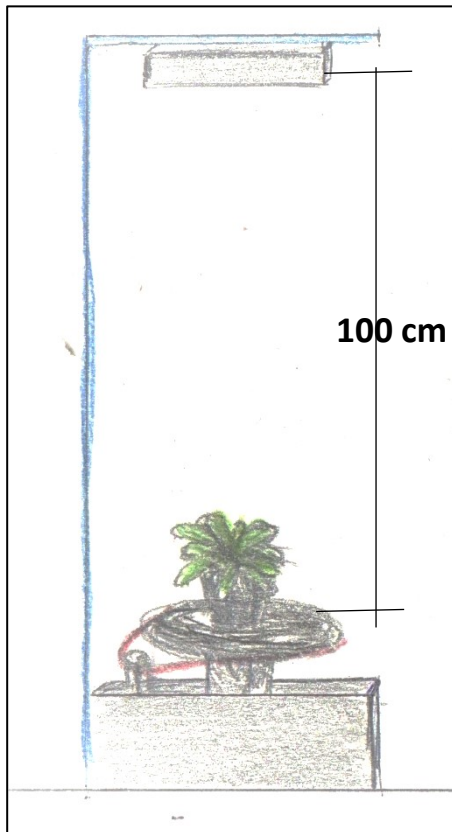


Figura 5 Setup di acquisizione di immagini RGB e 3D vista dall'alto

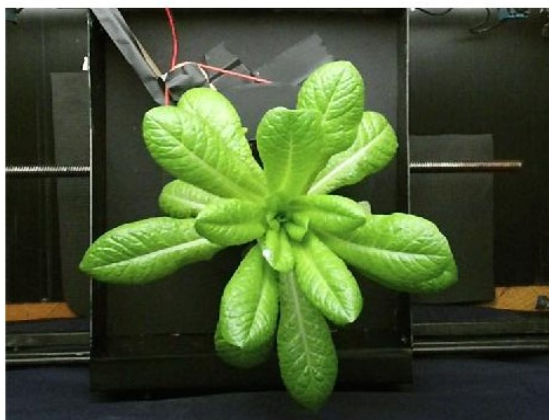


Figura 6 Immagine RGB dall'alto

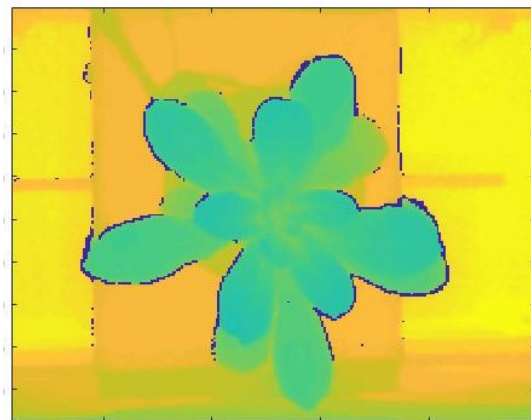


Figura 7 Immagine 3D dall'alto

2.2.2. Acquisizioni laterali

Per le acquisizioni laterali il vaso contenente la pianta di lattuga romana è sempre collocato sul disco, a una distanza dal dispositivo Kinect di 95 cm posto lateralmente al vaso (figura 8).

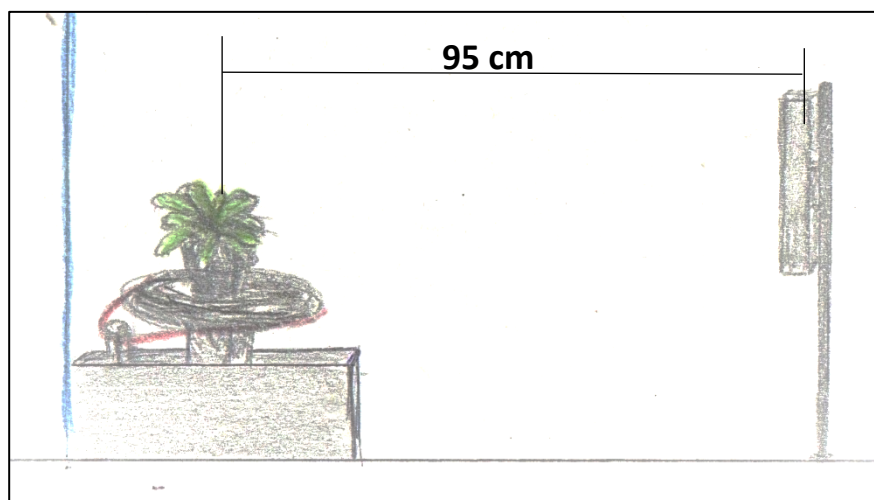


Figura 8 Setup di acquisizione di immagini RGB e 3D con vista laterale

Il disco, unito ad un albero folle libero di girare, è messo in rotazione per mezzo di una puleggia collegata all'albero motore di un motorino elettrico; la trasmissione del moto avviene grazie a una corda non elastica che connette la puleggia al disco.

L'acquisizione laterale delle immagini è stata effettuata in due modi diversi: "Rotazione continua" e "step by step".

Nel primo caso, una volta messo in rotazione il disco ($\omega=0.42^\circ/s$), si è proceduto all'acquisizione dei dati. Kinect, controllato tramite il software MATLAB, effettua acquisizioni con intervalli ripetuti di 0.75 secondi: per ogni pianta sono state quindi portate a termine 20 acquisizioni, una ogni 18° .

Nel secondo caso ("Step by step") il disco, inizialmente fermo, viene fatto ruotare di un angolo noto (14°), fermato, acquisita l'immagine, e successivamente fatto ripartire: la pianta risulta quindi completamente ferma nel momento dell'acquisizione. Per ogni campione vengono acquisite 26 immagini laterali; questo sistema ha permesso di ridurre l'errore di misurazione dell'angolo e migliorare la qualità dell'immagine. Per fare ciò è stato installato un Encoder (Trasduttore di posizione angolare) collegato al convertitore analogico digitale

USB-6008, prodotto dalla National Instruments, a sua volta connesso al PC e controllato tramite il software MATLAB. Al convertitore analogico digitale è stato collegato anche il motore elettrico che permette la rotazione del disco così da poterne controllarne l'avvio e lo stop.



Figura 9 immagine RGB con vista laterale



Figura 10 immagine 3D con vista laterale

2.3. Raccolta distruttiva delle piante

I parametri presi in analisi in questo lavoro di tesi sono la biomassa fogliare e l'area fogliare di piantine di lattuga romana.

La biomassa fogliare è la massa del solo apparato epigeo della piantina quindi eliminando l'apparato radicale ed il fusto.

L'area fogliare è l'area totale di una faccia del tessuto fotosintetizzante ed è stata calcolata come la somma dell'area di una pagina di tutte le foglie.

2.3.1. Misurazione della biomassa

La misurazione della biomassa aerea delle piantine di lattuga romana è stata svolta immediatamente dopo aver effettuato le acquisizioni con Kinect. Si è provveduto al prelievo delle foglie tramite un taglio netto con le forbici all'altezza del colletto; la biomassa prelevata è stata quindi pesata con una bilancia di precisione (figura 11) e i valori raccolti (espressi in grammi) sono stati riportati su un foglio Excel precedentemente predisposto.

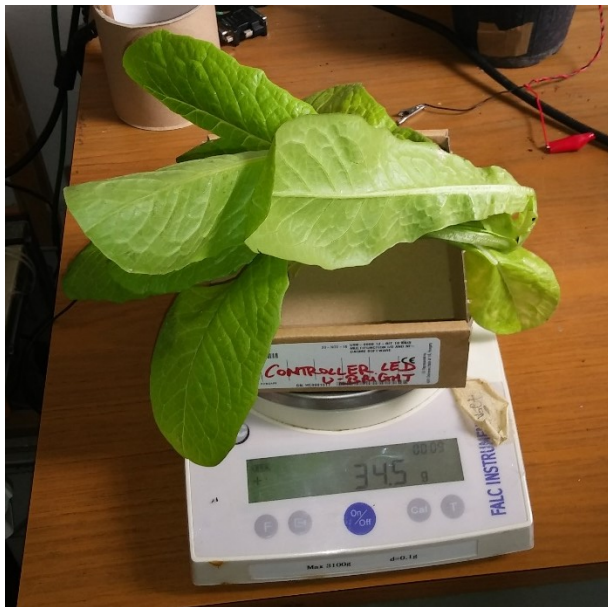


Figura 11; Operazioni di pesatura

2.3.2. Acquisizione dell'area fogliare

Per la misurazione dell'area fogliare ci si è avvalsi di Kinect V2 e di un'apposita funzione preparata con il software MATLAB. Ecco quali sono state le fasi: i cespi di lattuga sono stati tagliati all'altezza del colletto, e le foglie sono state adagiate su un pannello di colore nero opaco collocato nella cabina di misura utilizzata anche per le acquisizioni coi Kinect in modo da ridurre al minimo il disturbo causato dalla luce ambientale; il pannello distava 110 cm dal sensore. Con la telecamera a colori del Kinect (non con quella 3D) è stata scattata una fotografia, che è stata poi processata tramite MATLAB. Nel paragrafo 3.1 sarà spiegato l'algoritmo per la misura dell'area fogliare

3. METODI DI ANALISI DEI DATI

3.1. Misure di riferimento mediante raccolta distruttiva delle piante

3.1.1. Misurazione dell'area fogliare

Per la misurazione dell'area fogliare ci si è avvalsi di Kinect V2 e di un'apposita funzione preparata con il software MATLAB. Ecco quali sono state le fasi: i cespi di lattuga sono stati tagliati all'altezza del colletto, e le foglie sono state adagiate su un pannello di colore nero opaco collocato nella cabina di misura utilizzata anche per le acquisizioni coi Kinect in modo da ridurre al minimo il disturbo causato dalla luce ambientale (figura 12); il pannello distava 110 cm dal sensore. Successivamente con la telecamera a colori del Kinect (non con quella 3D) è stata scattata una fotografia, che è stata poi processata tramite MATLAB.

È stata utilizzata la funzione “graythresh” che è in grado, tramite una sogliatura dinamica, di separare i pixel neri dello sfondo da quelli delle foglie in due classi distinte (l'algoritmo di questa funzione, basato sul metodo Otsu, è spiegato nel paragrafo 3.3.1). Sulla base della sogliatura è stata realizzata un'immagine binaria (figura 13), mediante la funzione MATLAB “im2bw”, la quale permette di rendere binaria un'immagine in scala di grigi applicando il valore soglia trovato tramite l'algoritmo di Otsu, che ha permesso di contare il numero di pixel appartenenti alle foglie e moltiplicarli poi per l'area coperta da ciascun pixel (precedentemente calcolata tramite la calibrazione) trovando così l'area fogliare totale (in cm²). L'area fogliare trovata è stata poi riportata in un foglio Excel già predisposto.

Tutte le operazioni sono state svolte presso il laboratorio di automazione della Facoltà di Scienze Agrarie e Alimentari dell'Università degli Studi di Milano.



Figura 12 Disposizione delle foglie per il calcolo dell'area fogliare



Figura 13 immagine binaria ottenuta con la sogliatura dinamica

3.2. Analisi non distruttiva con imaging 2D (immagini RGB)

Per l'analisi non distruttiva 2D delle piantine di insalata è stato utilizzato il software MATLAB tramite il quale si è stimata la superficie fogliare vista dall'alto e laterale dell'immagine ripresa dal Kinect.

Questo metodo 2D non considera la sovrapposizione fogliare.

Si è proceduto con 2 tecniche: in un caso è stata effettuata la sogliatura dinamica solo sulla base del colore, nel secondo caso invece è stata utilizzata anche una maschera che ripuliva l'immagine anche sulla base della distanza.

Nei due paragrafi seguenti verranno analizzate nel dettaglio entrambe le tecniche.

3.2.1. Analisi di immagine basata sul colore

Per analizzare l'immagine della piantina di lattuga romana scattata in laboratorio si è considerata la fotografia nelle componenti HSI (Hue Saturation Intensity) e non RGB (Red, Green, Blue).

Si è quindi proceduto in questo modo: si è caricata l'immagine RGB (Figura 14) da analizzare sul software MATLAB; è stata convertita in formato HSI (figura 15) tramite la funzione MATLAB "rgb2hsv", che trasforma le coordinate RGB di ogni singolo pixel in coordinate HSI.

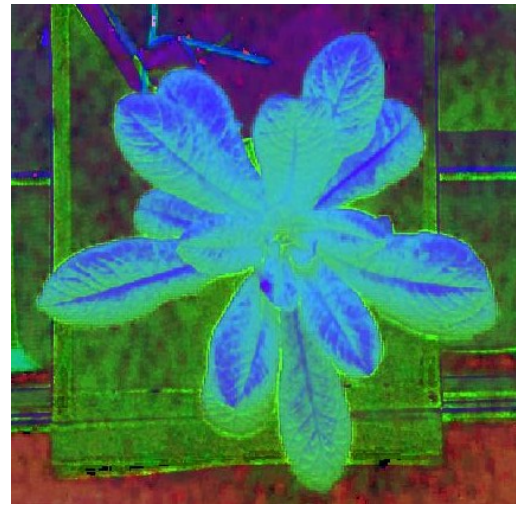


Figura 14: immagine RGB di una pianta di lattuga romana Figura 15 corrispondente immagine HSI

Il modello HSI è un sistema codificato con il quale è possibile definire dei colori attraverso tre parametri: colore, saturazione e valore o intensità. HSI è l'acronimo delle parole inglesi hue, saturation e intensity, tre parole che identificano uno specifico colore assegnando quindi tre dimensioni che descrivono matematicamente lo spazio o lo spettro dei colori. Questo sistema nasce da un'idea sviluppata da Albert Henry Munsell (1858-1918), pittore e inventore

statunitense, all'inizio del XX secolo e adottata negli anni trenta dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti d'America come sistema di colori ufficiale per le ricerche sul suolo. Tale sistema di codici dei colori ha il vantaggio di identificare un certo colore con l'utilizzo di soli tre fattori numerici, è quindi un modello semplice da capire e intuitivo. Il modello HSV ha trovato applicazioni in quasi tutti gli ambiti grafici ed informatici.

La funzione MATLAB “rgb2hsv” converte una mappa di colore RGB in una HSI; ossia in una matrice con un numero qualsiasi di righe (dipendente dal numero di pixel) e da 3 colonne: tutti gli elementi contenuti in essa sono compresi nell'intervallo [0;1]. Le colonne della matrice di input contengono i valori dell'intensità di rosso, blu e verde, mentre la matrice risultante presenta nelle tre colonne la conversione in tonalità, saturazione e intensità. Questa funzione si basa su un algoritmo di conversione proposto nel 1978 da Alvy Ray Smith; qui di seguito se ne propone lo pseudocodice.

Pseudocodice di conversione da RGB a HSI.

Dati i valori di R, G e B (compresi nell'intervallo [0:1]) vogliamo trovare H, S, I

- 1) $I := \max(R, G, B)$;
- 2) $X := \min(R, G, B)$;
- 3) $S := \frac{V-X}{V}$; if $S=0$ return;
- 4) $r := \frac{V-R}{V-X}$; $g := \frac{V-G}{V-X}$; $b := \frac{V-B}{V-X}$;
- 5) if $R=V$ then $H :=$ (if $G=X$ then $5+b$ else $1-g$);
if $G=V$ then $H :=$ (if $B=X$ then $1+r$ else $3-b$);
else $H :=$ (if $R=X$ then $3+g$ else $5-r$);
- 6) $H := \frac{H}{6}$;

Dell'immagine HSI sono state prese in considerazione le componenti H, tonalità (figura 16), e I, intensità (figura 17).

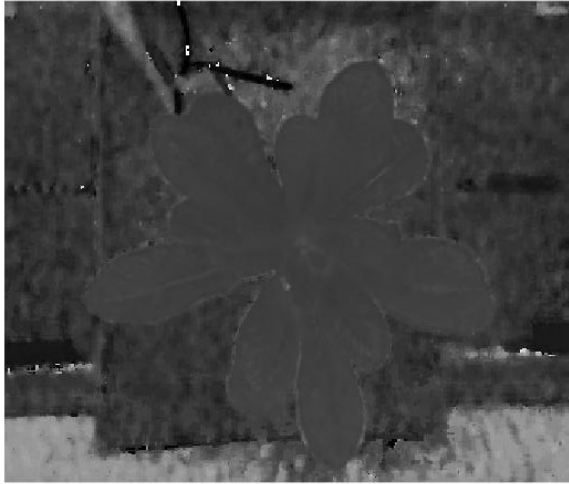


Figura 16 componente H



Figura 17 componente I

Successivamente è stata effettuata una sogliatura dinamica per cercare di separare i pixel delle foglie, tendenti al verde, dai pixel dello sfondo. La sogliatura, in inglese *thresholding*, è un metodo di segmentazione; da un'immagine a livelli di grigio restituisce un'immagine binaria. Per fare ciò è stata utilizzata la funzione MATLAB “*graythresh*”, che utilizza il metodo Otsu; quest'ultimo, introdotto per la prima volta nel 1979 da Nobuyuki Otsu, permette individuare automaticamente un valore ottimale di soglia per separare in due classi omogenee i pixel dell'immagine utilizzando solamente computazioni basate sull'istogramma dell'immagine. Questo è un tipo di istogramma che rappresenta in modo grafico la distribuzione tonale o di intensità di un'immagine digitale e traccia il numero di pixel per ogni valore di tono o intensità. L'algoritmo presume che nell'immagine da sogliare siano presenti due sole classi e quindi calcola la soglia ottima per separare queste due classi minimizzando la varianza intra classe. Nel caso preso in esame è stato utilizzato il metodo Otsu per le variabili tono e intensità poiché si è visto essere quelle che segmentano al meglio il verde delle foglie dai colori scuri dello sfondo.

Metodo di Otsu per la sogliatura dinamica

Considerando un'immagine di dimensioni $M \times N$ con L livelli distinti di intensità, n_i il numero di pixel di intensità i , supponendo di voler individuare sull'istogramma una soglia $T(k)=k$, $0 < k < L-1$, e di dividere in base ad essa l'immagine in due classi, C_1 (tutti i pixel con intensità $[0, k]$) e C_2 (tutti i pixel con intensità $[k+1, L-1]$) si può procedere tramite l'algoritmo di Otsu con i seguenti passaggi:

- 1) Calcolare l'istogramma normalizzato dell'immagine;
- 2) Calcolare le somme cumulative $P1(k)$ per $k=0, 1, \dots, L-1$;
- 3) Calcolare le medie cumulative $m(k)$ per $k=0, 1, \dots, L-1$;
- 4) Calcolare la media globale delle intensità, mG ;
- 5) Calcolare la varianza inter-classe per $k=0, 1, \dots, L-1$;
- 6) Ottenere la soglia k^* che massimizza la varianza inter-classe; Se il massimo non è unico, ricavare k^* come media dei valori di k corrispondenti ai vari massimi trovati;
- 7) Ricavare la misura di separabilità η^* per $k=k^*$.

In figura 18 è riportato l'istogramma ottenuto con i valori di intensità dell'immagine analizzata, la linea rossa rappresenta la soglia individuata col metodo Otsu (0.44). Nella parte sinistra troviamo la maggior parte dei pixel, hanno una intensità bassa, sono quindi quelli dello sfondo scuro. Nella parte destra troviamo i pixel che corrispondono alle zone con una intensità luminosa più alta (le foglie).

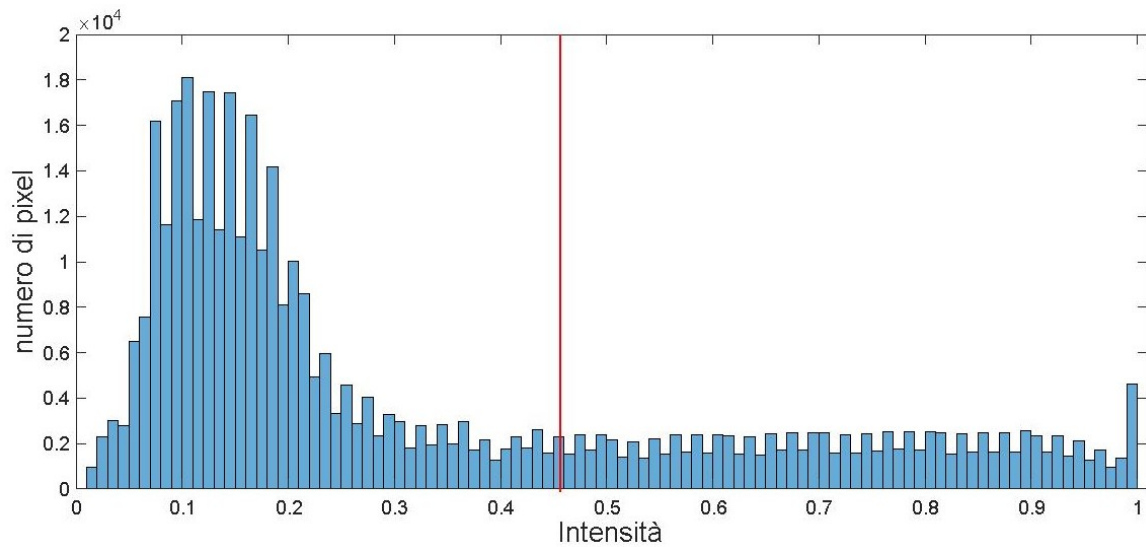


Figura 18: Istogramma dell'intensità, la linea rossa rappresenta la soglia individuata tramite il metodo Otsu.

Successivamente, in base ai valori di sogliatura dell'istogramma ottenuti con il metodo Otsu, le immagini in scala di grigio sono state convertite in immagini binarie (in bianco e nero); per fare ciò è stata utilizzata la funzione MATLAB "im2bw" che permette di rendere binaria un'immagine in scala di grigi, applicando il valore soglia trovato tramite l'algoritmo di Otsu. Sono state così ottenute due immagini binarie, una sulla base del tono (figura 19) e una sulla base dell'intensità (figura 20).



Figura 19 Immagine binaria della componente H Figura 20 Immagine binaria della componente I

Queste due immagini sono state poi unite con un “&” logico che ha permesso di ripulire ulteriormente l’immagine da eventuali errori (figura 21) nella figura 22 sono evidenziati i punti in cui si sono ottenuti miglioramenti dalla fusione delle due immagini.

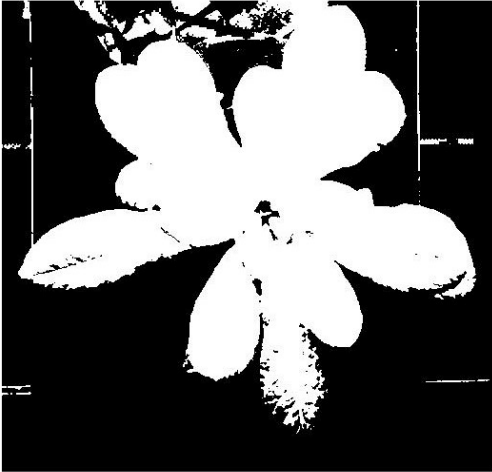


Figura 21: fusione delle immagini binarie delle componenti H e I

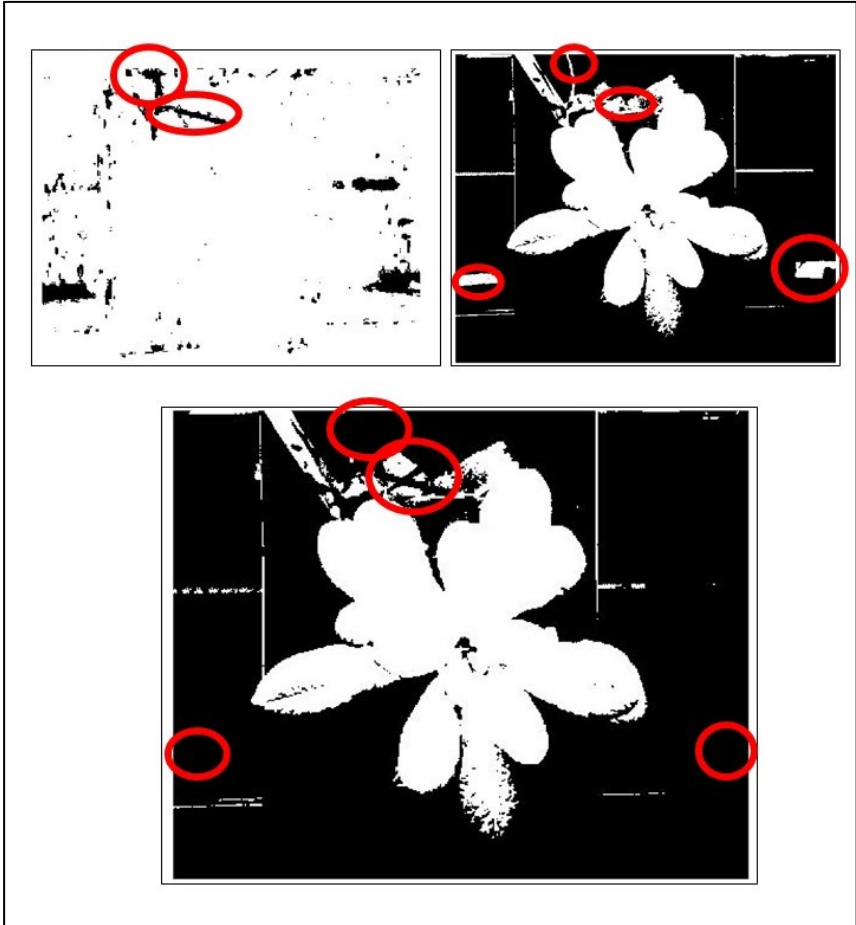


Figura 22: Punti in cui la fusione delle immagini delle componenti H e I ha portato dei miglioramenti

Questo tipo di analisi porta a possibili errori nella sogliatura a causa della diversa saturazione della luce; come si può vedere nella figura 23 il modello può comprendere aree dello sfondo (cerchi arancione) oppure perdere parti di foglia (cerchi rossi). L'inclusione dello sfondo è dovuta alla tipologia e al colore del materiale, ne è un esempio il nastro adesivo che viene incluso poiché riflettendo molta luce ha valori di intensità e tonalità molto simili alle foglie e, nel momento in cui si applica l'algoritmo di Otsu per la sogliatura dinamica, questa parte viene assimilata alle foglie. Anche le parti tondeggianti metalliche, come le barre filettate che permettono il movimento del carrello, hanno lo stesso problema. La perdita di parti di tessuto vegetale durante la sogliatura è invece causata dalla presenza di zone d'ombra nelle quali l'intensità del verde è molto simile a quella dello sfondo. Questo è dovuto alla posizione delle foglie rispetto alla sorgente luminosa che colpisce la pianta, alla loro sovrapposizione che crea coni d'ombra e alla presenza di accentuate nervature fogliari.



Figura 23: esempi di errori dell'analisi basata solamente sul colore: in Rosso le aree dove vi sono delle perdite dovute alle zone d'ombra, in arancione le aree in cui è stata compresa parte dello sfondo

È stata poi calcolata l'area verde in cm^2 moltiplicando il numero di pixel bianchi dell'immagine binaria per la superficie media coperta da ogni singolo pixel (0.7647 mm^2). Per conoscere l'area media coperta da ogni pixel è stata effettuata una calibrazione tramite un parallelepipedo di dimensioni note che è stato collocato al posto del vasetto con la pianta di lattuga romana, sotto al sensore; è stata scattata un'istantanea con il Kinect ed è stato calcolato il numero di pixel nell'immagine digitale della faccia superiore del parallelepipedo. L'area nota (in mm^2) di questa superficie è stata divisa per il suo numero di pixel ottenendo così il valore medio in mm^2/pixel .

Durante l'operazione di calcolo dell'area fogliare sono state escluse le superfici con area inferiore a 100 pixel poiché non possono essere parti di pianta in quanto troppo piccole per poter corrispondere a foglie.

Nella figura 24 si può vedere la corrispondenza tra la fotografia RGB e l'immagine binaria ottenuta tramite la sogliatura.

L'area fogliare trovata è stata poi riportata su un foglio Excel precedentemente predisposto.



Figura 24 Corrispondenza tra immagine RGB e immagine binaria

3.2.2. Analisi di immagini basata sul colore con l'applicazione di una maschera di distanza

Per migliorare i risultati ottenuti dall'analisi 2D sulla base del colore è stata effettuata una pre-sogliatura basata sulla distanza, ossia si sono eliminati tutti i punti con una distanza dal sensore superiore ai 100 cm i quali non potevano appartenere sicuramente alla pianta ma solamente allo sfondo; inoltre sono stati eliminati anche tutti i pixel con una distanza di 0 cm che corrispondono alle zone in cui la telecamera a tempo di volo ha perso il segnale e non è stata in grado di misurare la distanza. Questi punti sono situati maggiormente sui bordi e sugli spigoli delle superfici. Per fare questa operazione sono stati utilizzati i dati di distanza ottenuti tramite la camera 3D a tempo di volo del dispositivo Kinect dal quale si ottiene una matrice di punti i cui indici contengono i valori X, Y e Z; una immagine a colori permette di vederne la conformazione grazie ad una scala cromatica (figura 25).

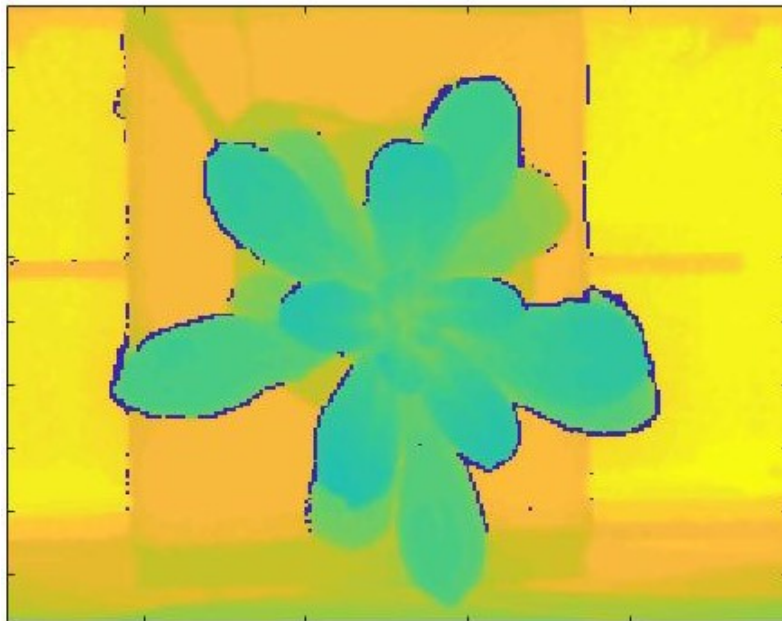


Figura 25 : Immagine 3D

In questo modo è stata ottenuta una maschera (figura 26) che è stata utilizzata per ritagliare l'immagine originale alla quale è stato fatto anche l'imaging basato sul colore (spiegato nel paragrafo precedente). Per fare ciò è stato necessario far corrispondere i punti dell'immagine RGB (1920X1080) con la matrice derivata dalla

telecamera che misura la profondità (512X424) tramite l'utilizzo di una trasformata geometrica applicata grazie alla funzione MATLAB "imwarp", la quale applica la trasformazione geometrica ad una immagine rendendola perfettamente sovrapponibile ad un'altra.

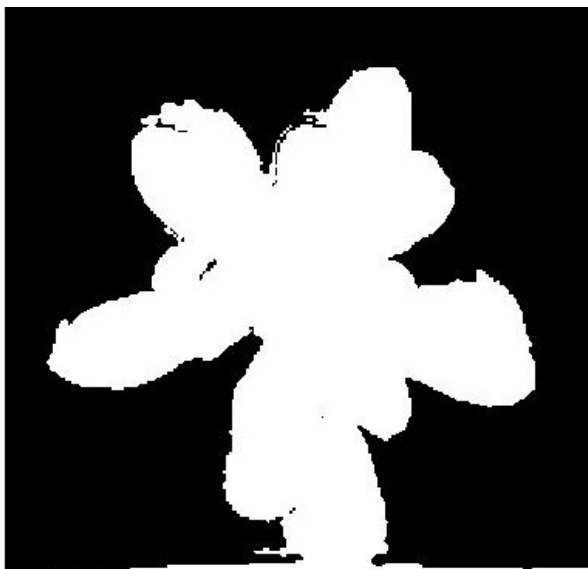


Figura 26: maschera distanze

La maschera distanza binaria (figura 26) è stata poi unita con l'immagine binaria ottenuta con l'imaging a colori (figura 21) tramite un "&" logico ottenendo così una nuova maschera che permette di eliminare gli errori dovuti ai colori dello sfondo (figura 27).

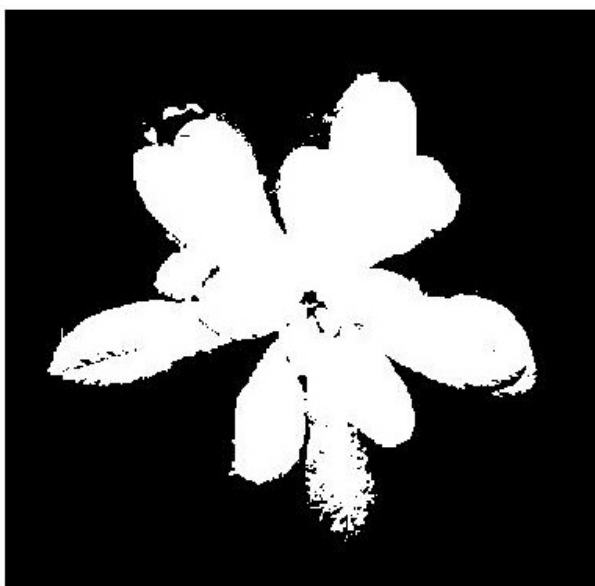


Figura 27: fusione delle immagini binarie ottenute sulla base del colore e della distanza

Nella figura 28 si può vedere la corrispondenza tra la fotografia RGB e la maschera finale ottenuta tramite la sogliatura basata su distanza e colore.



Figura 28 Corrispondenza tra immagine RGB e immagine binaria

Come si può vedere dalla figura 29, che confronta i risultati ottenuti con e senza l'applicazione della maschera distanza, vi sono notevoli miglioramenti generati dall'esclusione delle variazioni di intensità cromatica dello sfondo. Si può notare come sia stato risolto il problema del nastro adesivo e delle componenti metalliche riflettenti. Permangono però gli errori a livello fogliare generati dalle zone d'ombra che vi sono sulle foglie date dalla loro forma e posizione. L'apporto dato alla maschera distanza dalla maschera colore è da considerarsi maggiormente nelle piante di piccole dimensioni che non coprono interamente il vaso; questa parte infatti viene inclusa nella maschera distanza, poiché altrimenti si rischierebbe la perdita di parte di tessuto vegetale, ma grazie al colore scuro e poco intenso della terra viene escluso dalla maschera colore.

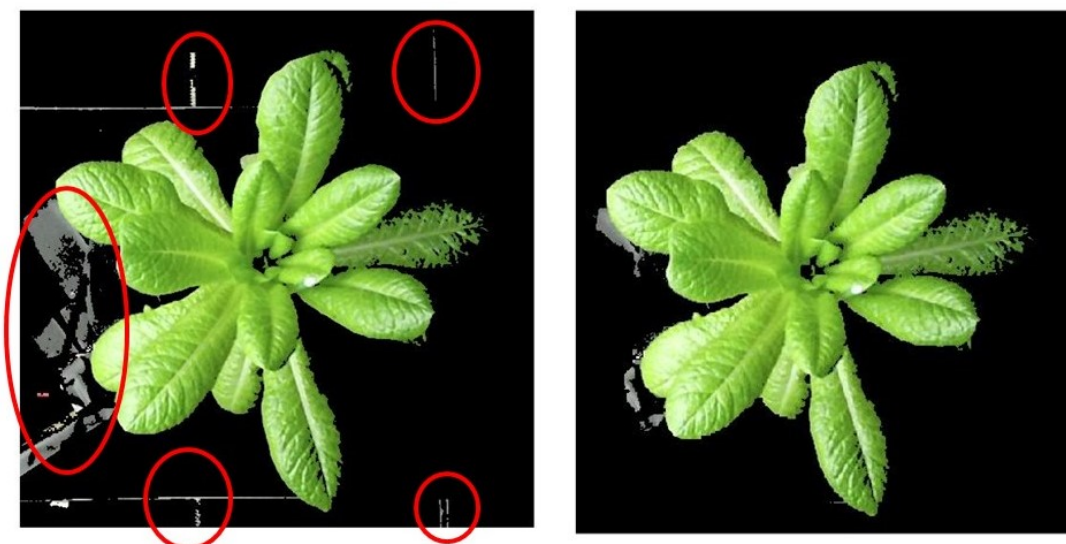


Figura 29: confronto tra l'immagine ottenuta tramite la sogliaatura basata solo sul colore e quella con la maschera distanza.

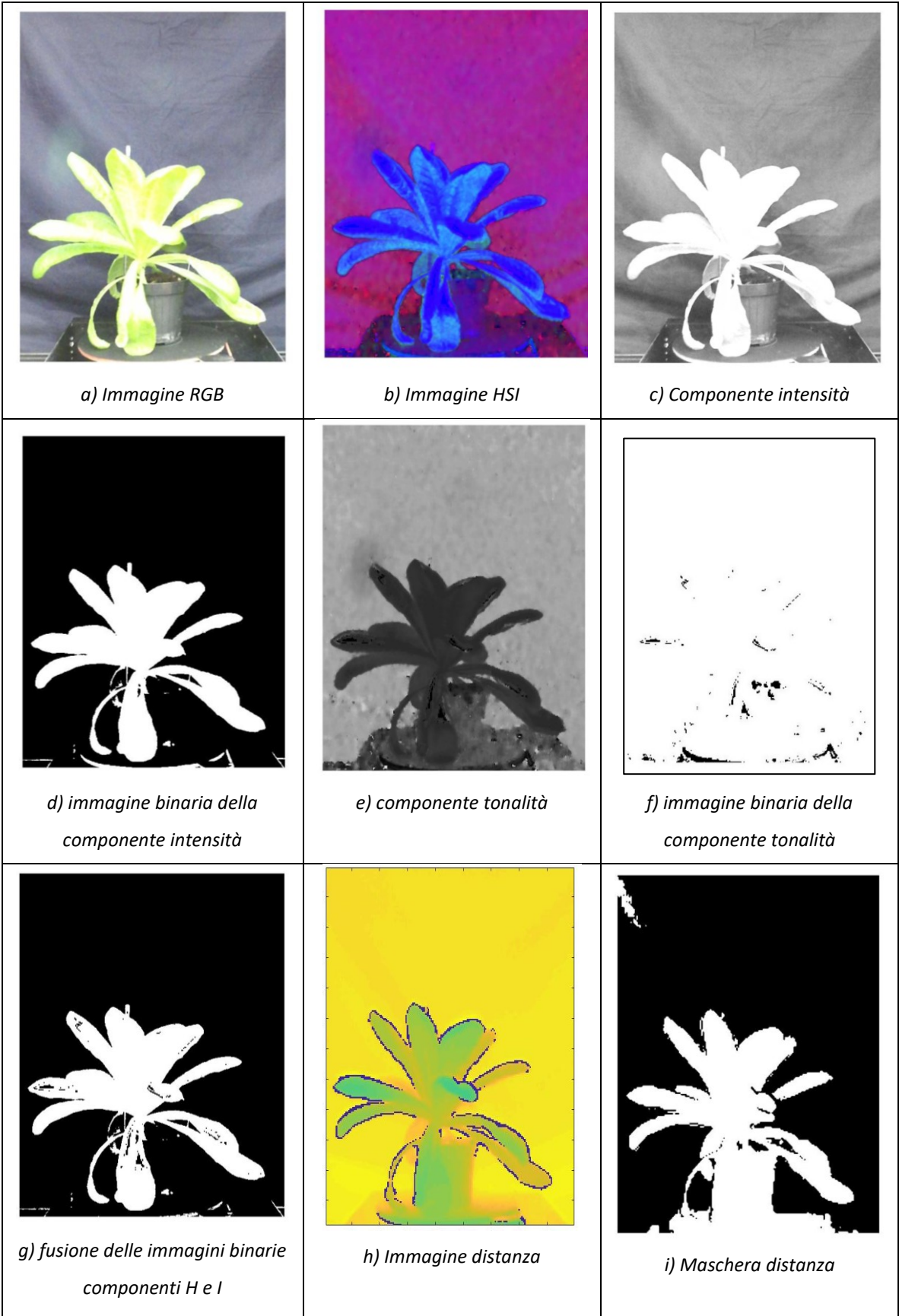
3.2.3. Analisi delle immagini laterali basata sul colore con l'applicazione di una maschera distanza

Per ciascuna pianta è stata effettuata anche un'analisi delle immagini scattate lateralmente in modo tale da riuscire a vedere la pagina abassiale delle foglie e vedere se vi fosse una correlazione tra biomassa e area fogliare calcolata in questa maniera. Queste sono state acquisite mentre la pianta ruotava su sé stessa grazie al sistema spiegato nei paragrafi 2.3.1 e 2.3.2.

In base alla distanza del centro del vaso dal sensore è stato stimato una superficie media per pixel pari a $0.9013 \text{ mm}^2/\text{pixel}$.

Sono state analizzate tutte le immagini acquisite per ciascuna pianta (20 nel caso delle acquisizioni a rotazione continua e 26 per le acquisizioni stepbystep), con lo stesso metodo spiegato nei paragrafi precedenti per la visione dall'alto, ottenendone l'area di ogni fotogramma, che successivamente è stata utilizzata per calcolare la media totale della pianta.

Nella figura 30 seguenti sono riportate le immagini di ciascuna fase dell'analisi 2D laterale.



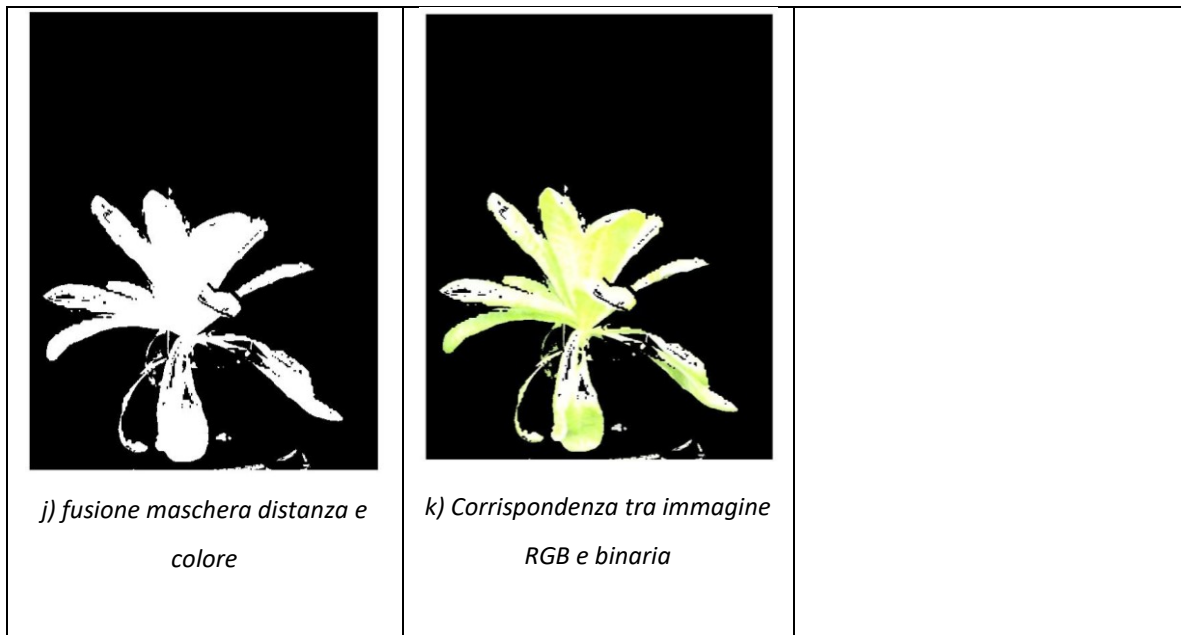


Figura 30: Rappresentazione di tutte le fasi dell'analisi delle immagini con vista laterale

3.3. Analisi non distruttiva con imaging 3D

L'analisi con imaging 3D delle piante di lattuga è stata volta ad indagare la possibilità di utilizzare tecniche che possano fornire risultati che superino le limitazioni che hanno le figure bidimensionali, nelle quali non è possibile rilevare le reali dimensioni dell'apparato epigeo delle piante di lattuga romana poiché non si conosce la profondità e l'inclinazione delle foglie. Il principale vantaggio che ha il sensore Kinect V2 è quello che riesce a fornire sia un'immagine bidimensionale a colori (iRGB) che una immagine distanze (iD), le quali possono essere assemblate per ottenere una ricostruzione tridimensionale a colori, mediante un procedimento che verrà discusso nel successivo paragrafo.

L'analisi non distruttiva con imaging 3D è stata effettuata tramite due metodiche distinte: una ha indagato il volume totale del cespo di lattuga, l'altra l'area delle porzioni di foglia visibili ottenute tramite segmentazione. Nei paragrafi seguenti verranno approfondite entrambe.

3.3.1. Fusione delle immagini RGB e 3D: point-cloud della pianta

Per poter lavorare su immagini 3D è necessario generare una point-cloud, ovvero una struttura di dati che permette di rappresentare una raccolta di punti multidimensionali che è comunemente utilizzata per raffigurare dati tridimensionali. In una point-cloud 3D, i punti rappresentano solitamente le coordinate geometriche X, Y e Z di una superficie campionata rappresentate in un sistema di riferimento con origine centrata nel sensore. Spesso alle coordinate spaziali 3D del punto sono associate anche le informazioni sul suo colore, ottenendo di fatto una nuvola di punti caratterizzati da 6 dimensioni (X,Y,Z, r,g,b). Le nuvole di punti possono essere acquisite da sensori hardware come telecamere stereo, scanner 3D e telecamere a tempo di volo o generate sinteticamente da un programma per computer; nel nostro caso, il sensore Microsoft Kinect V2 permette di acquisire la posizione dei corpi sulla scena grazie alla telecamera a tempo di volo che incorpora e successivamente, grazie al software MATLAB, è stata ricreata la point-cloud corrispondente.

Il primo step dell'analisi 3D delle piante di lattuga romana prevede la ricostruzione della nuvola di punti corrispondente ad ogni pianta analizzata. La point-cloud utilizzata deriva dalla fusione di ogni pixel dell'immagine iD (immagine distanza, ottenuta tramite il sensore a tempo di volo del Kinect V2) con il corrispondente colore dell'immagine iRGB (immagine RGB, ottenuta tramite la fotocamera del Kinect V2). La conversione da RGB e iD a point-cloud avviene tenendo conto delle caratteristiche intrinseche del dispositivo di acquisizione. In particolar modo sono utili la lunghezza focale della camera e la distorsione della lente, che permettono di individuare i coefficienti di correlazione tra il sistema di riferimento reale della scena e il sistema di riferimento del sensore che sono resi noti dalla casa costruttrice del sensore. Questa operazione di correlazione prende il nome di calibrazione ed è necessaria poiché le immagini iRGB e iD hanno due risoluzioni diverse e poiché vi è un problema di parallasse dovuto al fatto che la telecamera a colori e quella a tempo di volo sono poste sul sensore ad una certa distanza l'una dall'altra.

Per la calibrazione e il centramento delle point-cloud sono stati utilizzati i parametri proposti da Latchat et al. (2015). È stato effettuato il centramento

rispetto al centro del sensore, che corrisponde al punto di coordinate (0,0,0), tramite le seguenti formule:

$$X = (0.00273 * u_x - 0.9378) * Z$$

$$Y = (0.00273 * v_y - 0.7546) * Z$$

Dove X , Y e Z sono le coordinate del sistema tridimensionale reale; mentre u_x e v_y servono per identificare la posizione dei pixel sull'immagine 2D. Il prodotto tra u_x e 0.00273 permette di calcolare il valore della tangente dell'angolo che si crea tra l'asse Z e la congiungente tra il centro del sensore e la coordinata del punto, del pixel in analisi, lungo l'asse X ; lo stesso ragionamento vale per la componente Y . I valori 0,9378 e 0,7546 sono necessari per allineare il sistema di riferimento con il centro del sensore. Le coordinate spaziali X e Y si trovano quindi svolgendo la relazione trigonometrica sopra riportata, in cui la distanza Z misurata dal dispositivo è moltiplicata per la tangente dell'angolo che si crea con l'asse Z uscente dal centro del sensore

Nell'immagini seguenti sono riportate le immagini RGB (figura 31), iD (figura 32) e la corrispondente point-cloud da esse generata (figura 33).



Figura 31 immagine RGB

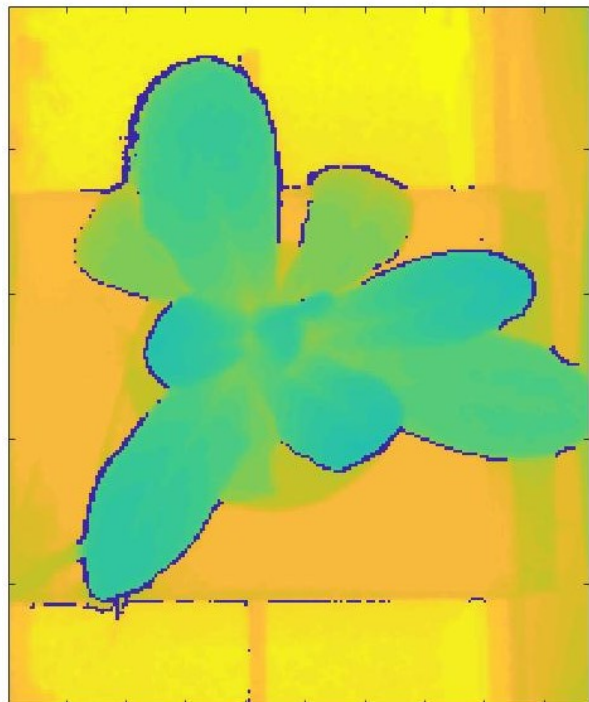


Figura 32 immagine distanza.

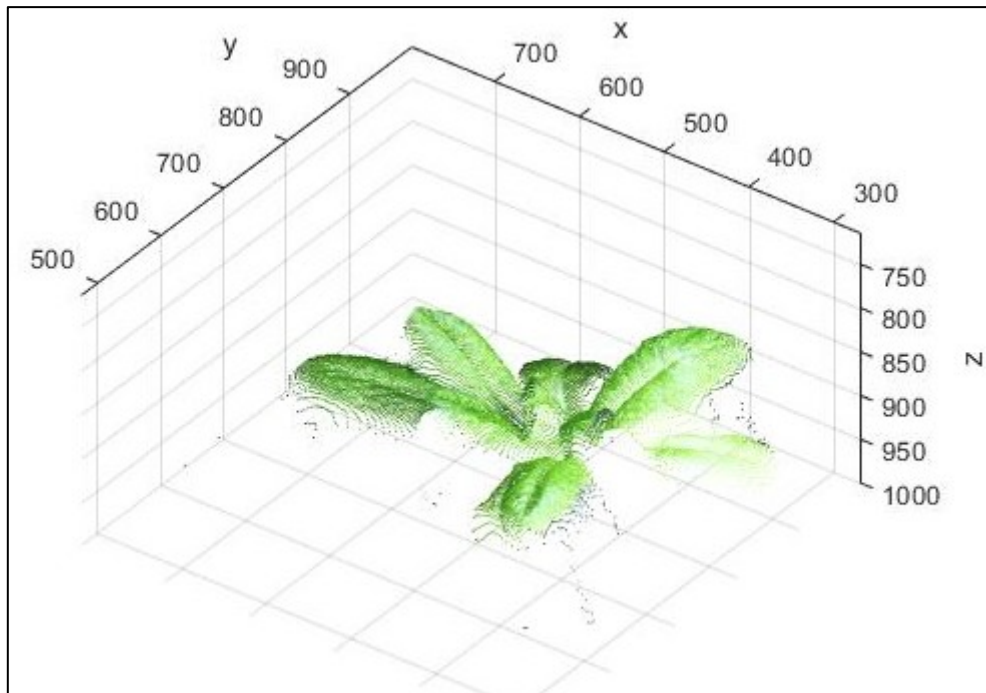


Figura 33: Point-cloud generata tramite le immagini RGB e distanza mostrate sopra

Una volta ricostruita la point-cloud, risulta necessario individuare la regione d'interesse (ROI) che, nel nostro caso, è la parte di spazio in cui è presente la pianta. Verranno analizzati solo i punti presenti nella ROI mentre la restante parte sarà scartata al fine di ridurre la quantità di punti da analizzare, velocizzando il processo e diminuendo la possibilità di errore. La ROI corrisponde a un parallelepipedo di cui vengono definiti i vertici e nel quale è contenuta la pianta.

Grazie alla ricostruzione 3D della point-cloud è possibile visualizzare nello spazio la disposizione dei pixel appartenenti alla pianta, questo fa sì che si possa applicare funzioni di analisi 3D poiché è possibile misurare le reali distanze tra punti mediante la geometria euclidea. Il fatto di aver associato ad ogni punto nello spazio anche il reale colore della scena permette di associare ad analisi distanziometriche approcci colorimetrici.

3.3.2. Analisi del volume della canopy mediante la triangolazione di Delaunay

Il primo approccio all'utilizzo di tecniche di analisi delle immagini tridimensionali ha riguardato la stima del volume aereo del cespo di Lattuga Romana. Sono state

analizzate sia le riprese effettuate con il dispositivo Microsoft Kinect V2 dall'alto, che quelle laterali.

Per questa tipologia di analisi della point-cloud (ottenuta con il metodo spiegato nel paragrafo precedente) è stata utilizzata la *triangolazione di Delaunay* che è un algoritmo ampiamente diffuso nel calcolo scientifico e in molte applicazioni. Questo sistema ricostruisce un poliedro che avvolge l'intera nuvola di punti e le cui facce sono triangoli scaleni che sono inscritti in circonferenze all'interno delle quali non giace nessun punto del poliedro d'origine. Il software MATLAB mette a disposizione nelle proprie librerie la funzione "*boundary*" che applica la triangolazione di Delaunay alla point-cloud, permettendo di scegliere il *fattore di restringimento (Shrink factor)*, un parametro che è compreso tra zero e uno: con zero si ottiene un solido convesso poiché l'adattamento alla forma della point-cloud è minimo, con 1 il poligono avvolge meticolosamente la nuvola realizzando moltissimi triangoli di piccole dimensioni. Per questa parte del lavoro è stato scelto di impostare lo shrink factor a 1 poiché, adattandosi maggiormente alla nuvola di punti, permette una migliore stima del volume senza sovradimensionamenti. La figura seguente (figura 35) mostra la ricostruzione di una pianta di lattuga romana con la triangolazione e uno shrink factor pari a 1.



Figura 34:immagine RGB

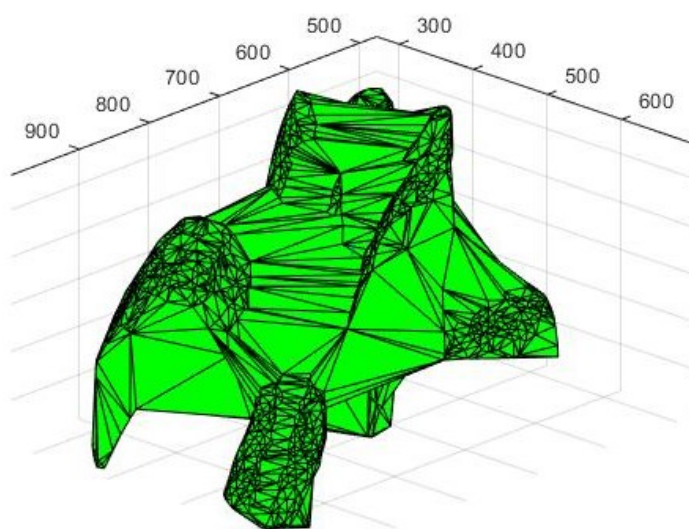


Figura 35: figura solida ottenuta tramite la triangolazione di Delaunay e applicando un fattore di restringimento pari a 1 (il massimo)

In questa fase del processo sono state applicate anche le funzioni “pcdenoise”, che elimina eventuali punti dovuti a errori del sensore utilizzato, e “pcdownsample” che riduce il numero di punti utilizzati per la triangolazione.

Tramite la funzione *Boundary* è stato anche calcolato il volume del solido, da essa generato, il cui valore è stato riportato in un foglio di calcolo Excel e successivamente processato.

La suddetta procedura è stata iterata per tutte le immagini acquisite dai due Kinect, per quelle laterali inoltre è stata poi calcolata la media del volume dei 20 fotogrammi acquisiti per pianta (26 nel caso delle acquisizioni step by step). I risultati ottenuti saranno discussi nel prossimo capitolo.

3.3.3. Segmentazione delle foglie per il calcolo dell'area fogliare

L'analisi 3D effettuata in questo lavoro ha l'obiettivo di valutare la possibilità di ottenere una migliore stima dell'area fogliare attraverso una misura reale delle parti di foglie visibili. Sono state utilizzate le riprese dall'alto, effettuate con il sensore Microsoft Kinect V2 posto sopra alla pianta di lattuga romana e tutte le acquisizioni erano di tipo statico (sia il dispositivo che il vaso erano fermi); questo setup non permette di risolvere il problema della sovrapposizione fogliare e quindi la stima dell'area fogliare si basa esclusivamente sulla parte di tessuto vegetale visibile dall'alto.

Il metodo di analisi utilizzato in questo lavoro prevede la segmentazione della nuvola di punti: per segmentazione (o clusterizzazione) si intende il processo con il quale si classificano i pixel (o i voxel) che hanno caratteristiche comuni, pertanto ciascun pixel in una regione è simile agli altri della stessa regione per una qualche proprietà o caratteristica. Regioni adiacenti sono significativamente differenti rispetto alla caratteristica considerata; il risultato di un'immagine segmentata è un insieme di segmenti che, collettivamente, coprono l'intera scena. Con segmento (o cluster) si intende la regione di immagine i cui punti sono raggruppabili per la proprietà considerata.

L'algoritmo utilizzato per l'analisi 3D delle piante di lattuga può essere riassunto in 5 passaggi fondamentali che sono discussi qui di seguito.

Il primo step della procedura di analisi consiste nella generazione della point-cloud partendo dall'immagine a colori (iRGB) e dall'immagine distanza (iD) che vengono unite mediante una trasformazione geometrica come spiegato nel paragrafo 3.3.1.

Una volta ricostruita la point-cloud, risulta necessario individuare la regione d'interesse (ROI) che, nel nostro caso, è la parte di spazio in cui è presente la pianta. Verranno analizzati solo i punti presenti nella ROI mentre la restante parte sarà scartata al fine di ridurre la quantità di punti da analizzare, velocizzando il processo e diminuendo la possibilità di errore.

Il passaggio successivo è quello della segmentazione (o clusterizzazione) delle foglie di lattuga: in questo lavoro si vuole segmentare la pianta di lattuga individuando tutte le singole foglie visibili. Si intende raggruppare i punti appartenenti a ogni foglia ottenendo quindi cluster composti solamente da tutti i pixel presenti su di essa. Il metodo di segmentazione utilizzato si basa su quello proposto da Rabbani et al. (2006) per applicazioni industriali dell'imaging 3D.

Questo metodo di segmentazione basa il suo funzionamento sul raggruppamento dei punti in base alle loro proprietà geometriche; in particolare viene preso in considerazione l'inclinazione del vettore normale alla superficie in un dato punto e la distanza tra punti adiacenti. Si analizzano ora i passaggi fondamentali dell'algoritmo di segmentazione col *metodo Rabbani*.

Il primo passaggio prevede la generazione dei vettori normali alla superficie in ciascun punto della point-cloud; con vettore normale a una superficie si intende quel vettore perpendicolare al piano tangente alla superficie nel punto considerato. La normale è stimata trovando il piano interpolante i pixel vicini al punto considerato e tracciando poi la perpendicolare al piano trovato nel punto scelto. Dopo diverse prove si è deciso di considerare il piano composto dai 9 punti più vicini; per individuare la normale a ciascun punto è stata utilizzata la funzione MATLAB "pcnormals" che restituisce una matrice contenente le normali ad ogni punto della nuvola di punti. Poiché il verso dei vettori normali dipende da come il software considera i punti, è necessario effettuare un raddrizzamento di tutte le normali in modo che possano essere confrontate; si è scelto quindi di indirizzare i vettori verso il centro del sistema di riferimento (che corrisponde al centro del

senso). L'immagine 36 mostra i vettori generati sulla point-cloud dopo essere stati raddrizzati.

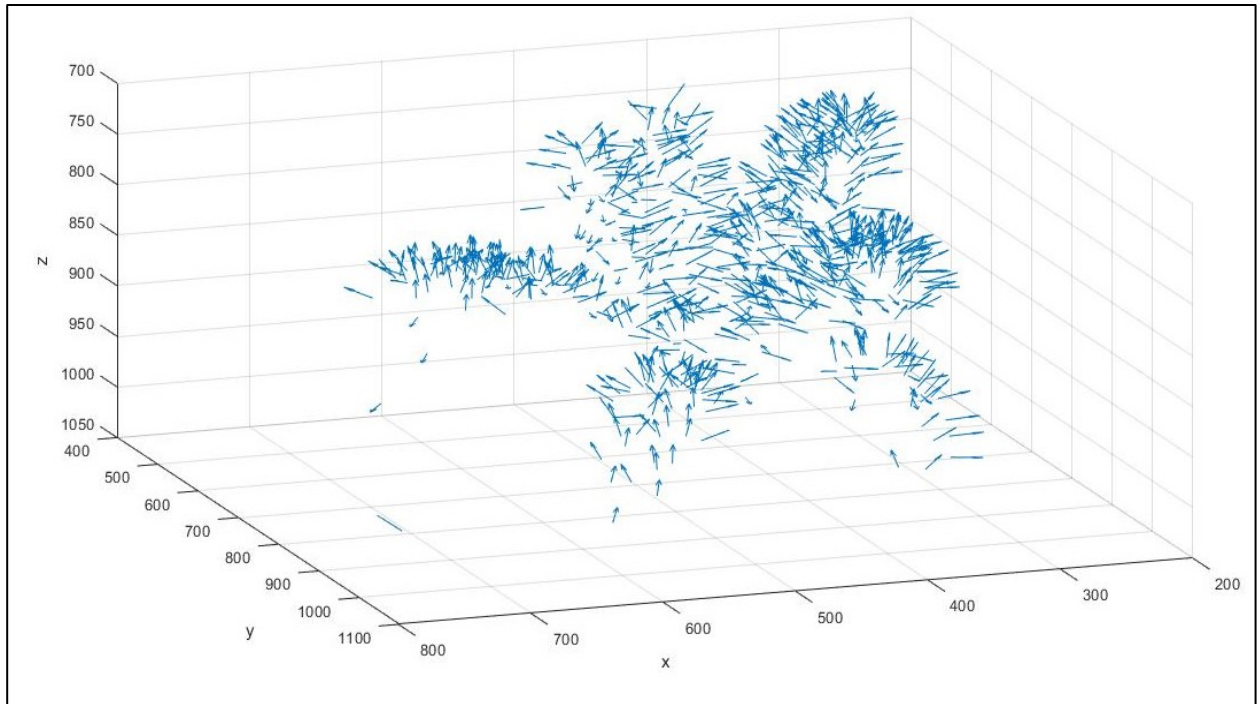


Figura 36: l'immagine rappresenta i soli vettori normali ai punti della point-cloud

Lo step successivo al processo di segmentazione è quello del calcolo della distanza tra ciascun punto e il piano interpolante i 10 punti adiacenti; questa distanza prende il nome di “residuo”. Questo sistema si basa sul *metodo dei k-nearest neighbors* (KNN), il quale seleziona i k punti della point-cloud che hanno la distanza minima dal pixel considerato. Poiché il numero k di punti rimane fisso, il volume analizzato varia al variare della densità di punti.

A questo punto vengono analizzati i residui dei punti, i quali sono accorpate in un unico cluster solo se le distanze misurate rientrano al di sotto di un certo percentile (con percentile si intende quell'unità di misura che indica il valore al di sotto del quale cade una data percentuale di osservazioni in un gruppo di osservazioni). Sono stati condotti test con diversi valori di percentile (50°, 60°, 70°, 80° e 90° percentile), al fine di individuare quello che permetteva la miglior segmentazione individuando cluster che coprissero l'intera superficie visibile di tessuto vegetale (nel capitolo RISULTATI saranno ripresi gli esiti delle prove).

I punti appartenenti a un segmento dovrebbero generare localmente una superficie liscia, le cui normali non abbiano una eccessiva diversa inclinazione l'una dall'altra. A questo punto viene introdotto il concetto di “angolo soglia” (α) con il quale si intende il massimo valore accettabile dell'angolo che si ottiene confrontando la diversa inclinazione dei vettori normali di due punti vicini. Sono stati condotti test con valori diversi di angolo soglia (20° , 40° , 60° , 80° , 100°) al fine di trovare quali fossero quelli che meglio si adattavano alla segmentazione delle piante di lattuga romana (poiché al variare dell'angolo soglia varia la quantità di punti accettabili in un cluster): valori di angolo soglia bassi creano cluster con punti appartenenti a superfici piane, mentre impostando il parametro a 80° - 100° si ottengono cluster che raggruppano punti con vettori normali di diversa inclinazione. Questo porta però ad avere spesso l'unione di foglie diverse nello stesso cluster (nel capitolo risultati si discuterà delle analisi per scegliere quale sia il valore di angolo soglia che meglio si adatta al nostro studio).

L'algoritmo di segmentazione a questo punto prevede che si confronti l'angolo del vettore normale di ciascun punto con quello dei vicini: se esso è al di sotto del valore soglia stabilito i due punti saranno unificati in un unico cluster, altrimenti no. Se i due punti possono rientrare nello stesso cluster, secondo α , si confrontano anche i loro residui e se rientrano nel percentile stabilito vengono definitivamente raggruppati nello stesso cluster. Se il punto non può essere annesso viene escluso e conservato per un'ulteriore analisi, finché tutti i pixel non siano stati confrontati.

Essendo la foglia il nostro obiettivo d'interesse, una volta ottenuti i cluster, saranno considerati accettabili solo quelli composti da un numero minimo di punti (assimilabile alle dimensioni minime di una foglia) al fine di evitare fenomeni di eccessiva oversegmentazione. Anche in questo caso sono stati condotti test per individuare quale sia il numero minimo di punti per segmento, al fine di ottenere la miglior segmentazione della point-cloud. Si sono studiati i casi di 50, 70 e 100 punti per cluster.

Ultimata la segmentazione col metodo Rabbani si ottiene una nuvola di punti (figura 37) dove si possono vedere i diversi cluster rappresentati con colori diversi e il numero totale di cluster individuati.

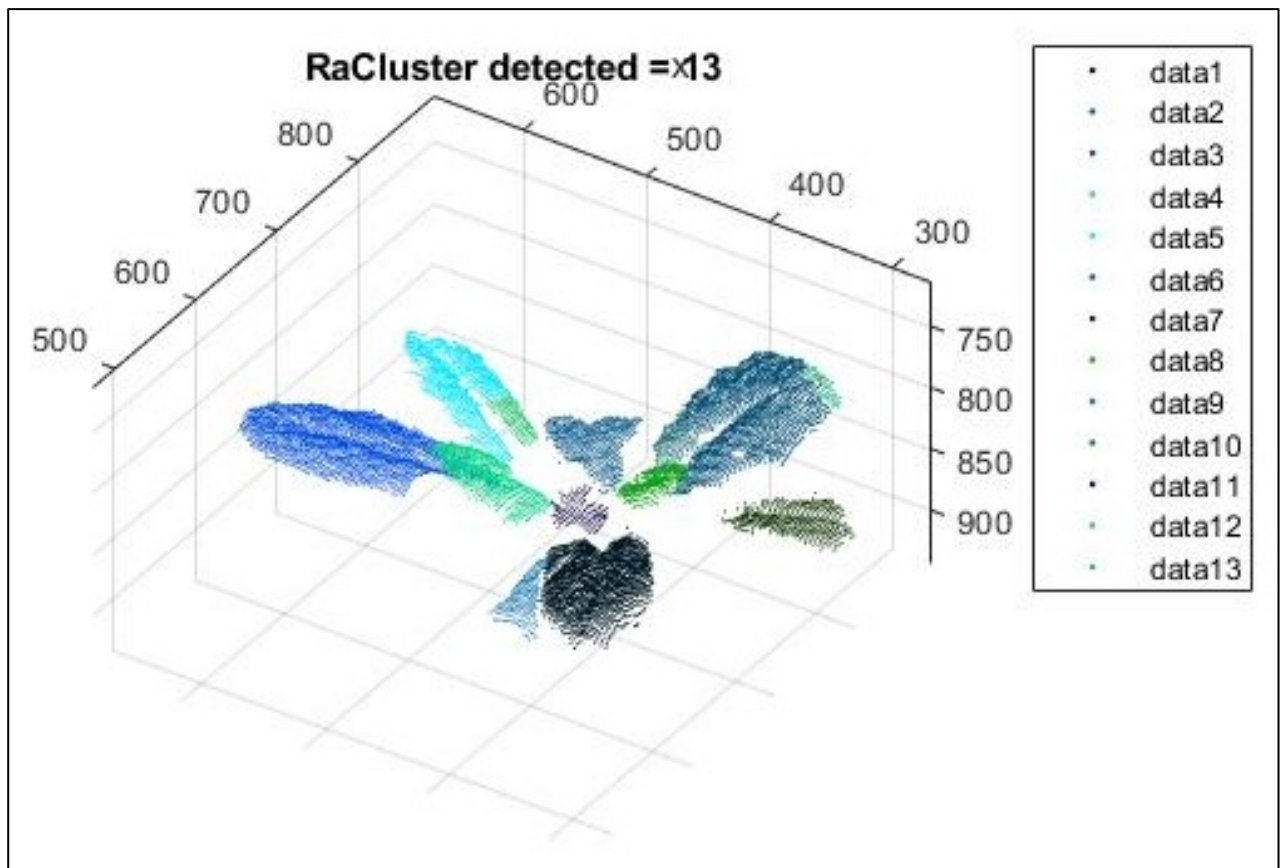


Figura 37: Point-cloud della lattuga segmentata, sono stati individuati 13 diversi cluster

Il passaggio successivo della procedura di analisi 3D prevede un'analisi colorimetrica tra i cluster, al fine di individuare possibili oversegmentazioni di una stessa foglia e risolverle. Questo approccio, sviluppato ad hoc per questo progetto, verifica le distanze tra i cluster e, se la distanza è al di sotto di una definita soglia (distanza soglia), vengono estrapolati i punti di vicinanza massima tra i due cluster (compresi in un raggio pari alla distanza soglia). Con questi punti si effettua un'analisi basata sul colore tramite le componenti intensità e tonalità dello spazicolore (HSI).

Ipotizzando di voler analizzare i due cluster adiacenti A e B (figura 38) si calcola la mediana dei valori di intensità e tonalità per ciascuna porzione dei due segmenti presi in esame (M_a e M_b), e successivamente si calcola la mediana delle distanze dei valori di intensità e tonalità di ciascun pixel all'interno del proprio cluster, dalla mediana di intensità e tonalità precedentemente calcolata (M_{Da} e M_{Db}). A questo punto, plottando i valori delle mediane dei due cluster su un piano cartesiano (M_a e M_b), i cui assi rappresentano intensità e tonalità, si misura la

distanza tra le mediane dei cluster (M_a e M_b) e la si confronta con la mediana delle distanze all'interno dei cluster (M_{Da} e M_{Db}): se la somma delle mediane delle distanze dalla mediana all'interno dei due cluster (M_{Da} e M_{Db}) è minore della distanza tra le mediane dei due cluster (M_{Da} e M_{Db}) i due segmenti possono essere accorpati, altrimenti resteranno due segmenti distinti.

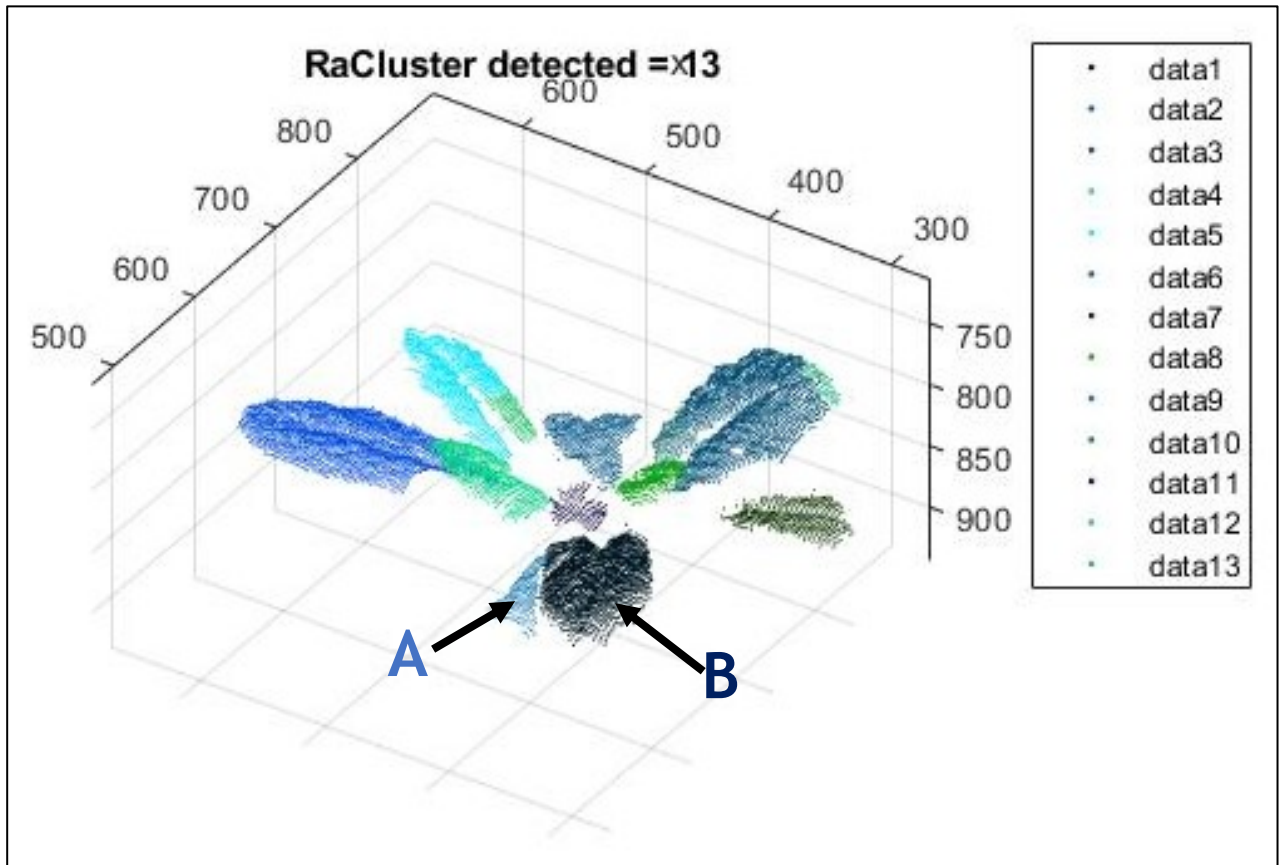


Figura 38: clusterizzazione di una pianta di lattuga, i segmenti A e B sono subiscono anche l'analisi colore poiché sono vicini.

In figura 40 è visibile la point-cloud corretta con l'analisi colorimetrica; come si può notare il numero di segmenti si è ridotto rispetto all'analisi effettuata solo con la segmentazione geometrica (figura 39), poiché si sono eliminate le oversegmentazioni.

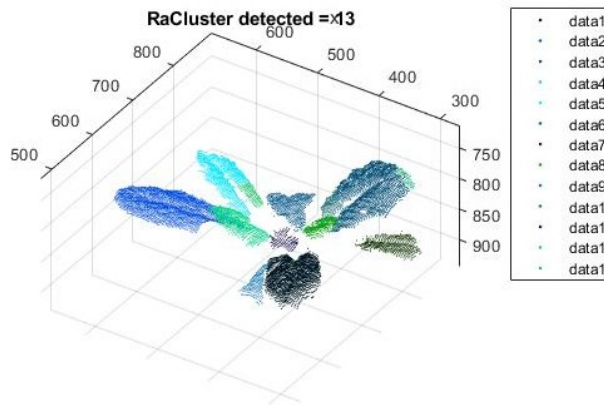


Figura 39: point-cloud segmentata con la sola analisi geometrica mediante il metodo Rabbani

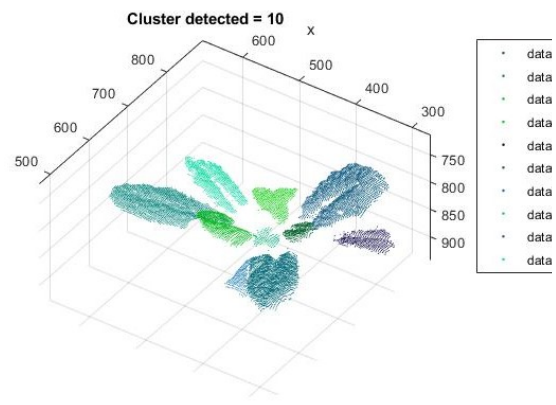


Figura 40: point-cloud segmentata con il metodo Rabbani e corretta con l'analisi colore. Come si può notare il numero di cluster è diminuito poiché sono state effettuate delle correzioni ed eliminate le oversegmentazioni

Ultimata la segmentazione fogliare la procedura prevede il calcolo dell'area fogliare tramite un procedimento che basa il suo funzionamento sulla rappresentazione della point-cloud mediante un poliedro, le cui facce sono composte esclusivamente da triangoli che avvolgono tutta la nuvola di punti (figura 41). Questo sistema deriva dalla *triangolazione di Delaunay* che è un algoritmo ampiamente utilizzato nel calcolo scientifico e in molte applicazioni diverse: il sistema connette i punti della point-cloud ottenendo triangoli i cui vertici giacciono sul cerchio circoscritto al triangolo stesso. La funzione MATLAB "*Boundary*" permette di effettuare la triangolazione delle figure solide impostando un fattore di restringimento (shrink factor) compreso tra 0 e 1. Se lo shrink factor è pari a zero la point-cloud viene triangolata utilizzando pochi punti, mentre se è pari a 1 verranno utilizzati tutti i punti ottenendo tanti triangoli di piccole dimensioni.

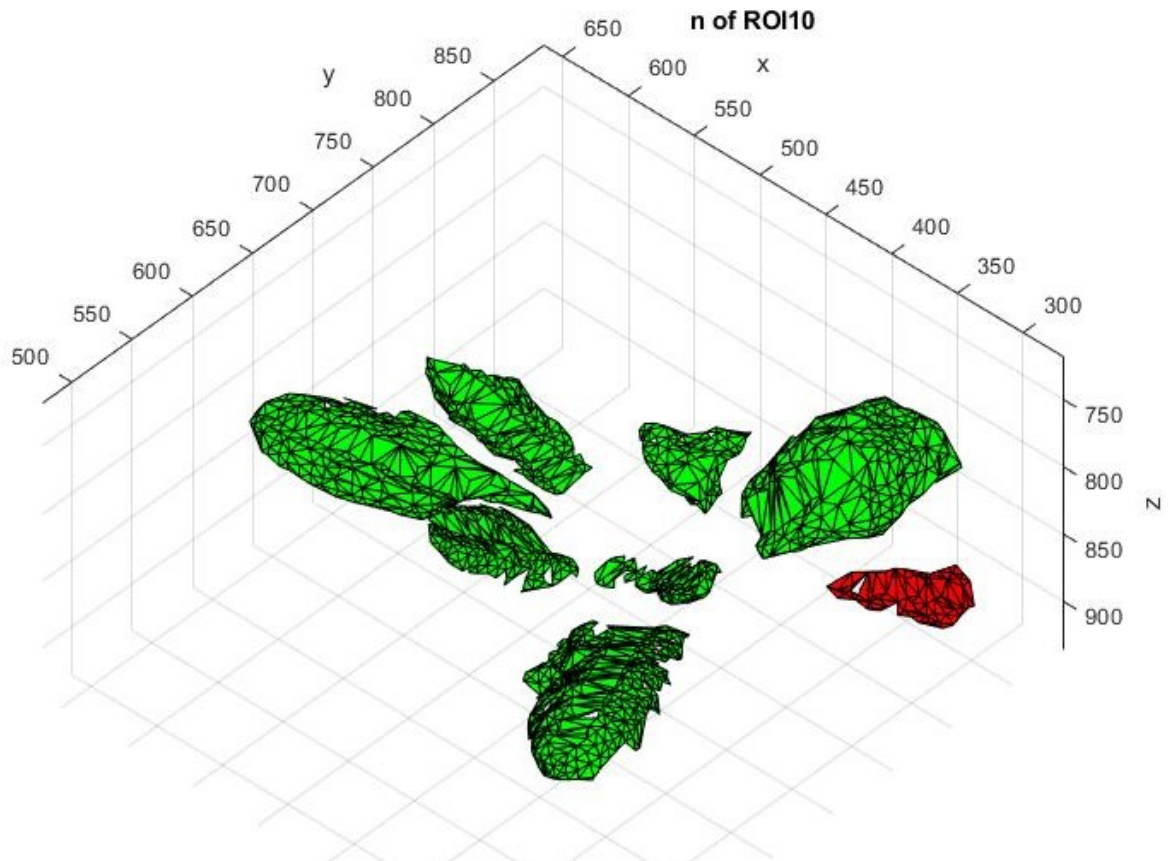


Figura 41: Ricostruzione, mediante la triangolazione di Delaunay, del poliedro che approssima la nuvola di punti.

I vertici dei triangoli che compongono la figura sono noti e quindi si può calcolare l'area di ciascuno tramite la formula di Erone che utilizza esclusivamente la lunghezza dei lati:

$$A = \sqrt{p * (p - a) * (p - b) * (p - c)}$$

dove a , b , c è la lunghezza dei lati e p è il semiperimetro del triangolo.

Sommando l'area di tutti i triangoli si ottiene la superficie laterale del solido generato.

Poiché questo progetto vuole individuare la superficie fogliare risulta necessario individuare quali siano i triangoli che ricoprono la sola pagina adassiale delle foglie: per fare questo è stata sviluppata una apposita funzione MATLAB la quale si basa sul fatto che se la congiungente del baricentro del triangolo con il centro

del sensore non interseca nessun altro triangolo, questo appartiene sicuramente alla pagina adassiale.

A questo punto le aree dei triangoli che compongono la faccia superiore delle foglie possono essere sommate ottenendo una stima dell'area fogliare dell'intera pianta di lattuga. I risultati ottenuti saranno discussi nel successivo capitolo e confrontati con le altre metodologie di analisi di imaging 2D e 3D proposte in questo lavoro.

3.3.4. Stima dell'area della foglia mediante proiezione su piano interpolante

L'analisi 3D con segmentazione fogliare è stata applicata in due diverse tipologie di analisi e con entrambe è stata calcolata l'area fogliare stimata nelle due diverse tecniche. La prima è stata discussa nel paragrafo precedente e prevedeva l'utilizzo della triangolazione di Delaunay, la seconda verrà trattata qui di seguito.

Questo metodo, una volta effettuata la segmentazione geometrica e l'analisi del colore, basa il suo funzionamento sull'individuazione di un piano interpolante i punti del cluster, la proiezione geometrica di questi su tale piano e, infine, il calcolo dell'area sul piano racchiusa tra i punti.

Il primo passaggio è la creazione della point-cloud unendo le immagini RGB e distanza, come spiegato al punto 3.2.1 di questo capitolo, successivamente è stata effettuata la segmentazione geometrica con il metodo Rabbani e con l'analisi del colore, come discusso al punto 3.2.6.

La prima parte di algoritmo permette di ottenere una point-cloud segmentata i cui cluster corrispondono alle singole foglie individuate (figura 42).

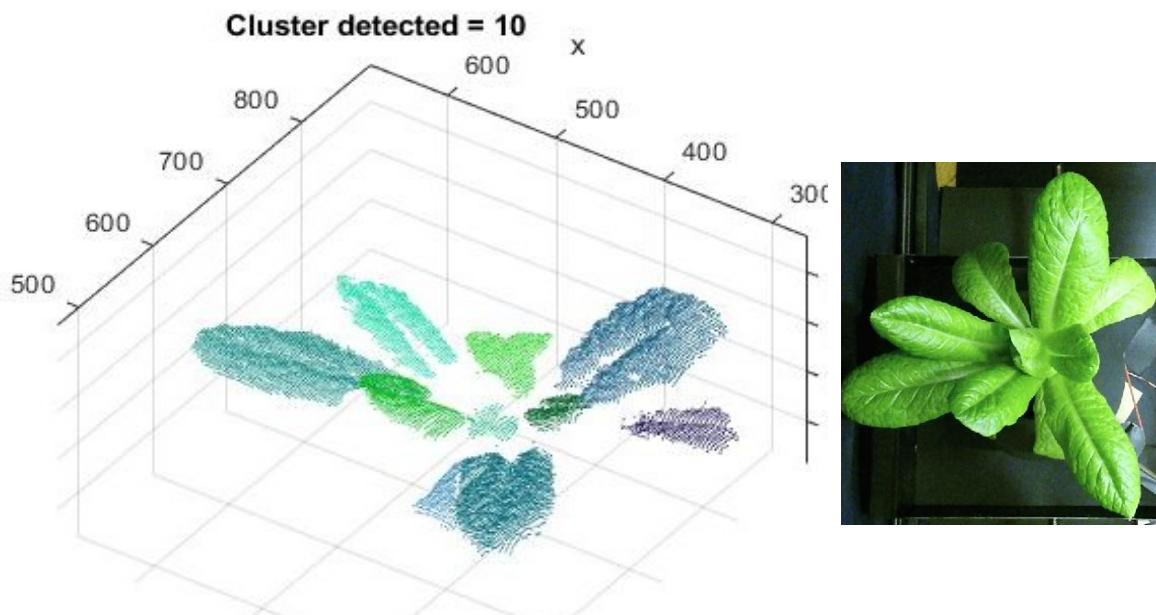


Figura 42: Point-cloud segmentata. Sono stati individuati 10 cluster. In alto a destra si può vedere l'immagine RGB corrispondente.

A questo punto la procedura, eseguita con il software MATLAB, prosegue andando ad analizzare ogni cluster, preso singolarmente. In primis viene individuato il piano interpolante tutti i punti del cluster (figura 43) mediante la funzione “fitPlane” che, appunto, determina col metodo dei minimi quadrati l’equazione del piano che meglio interpola il gruppo di punti nello spazio che vengono passati come input alla funzione stessa.

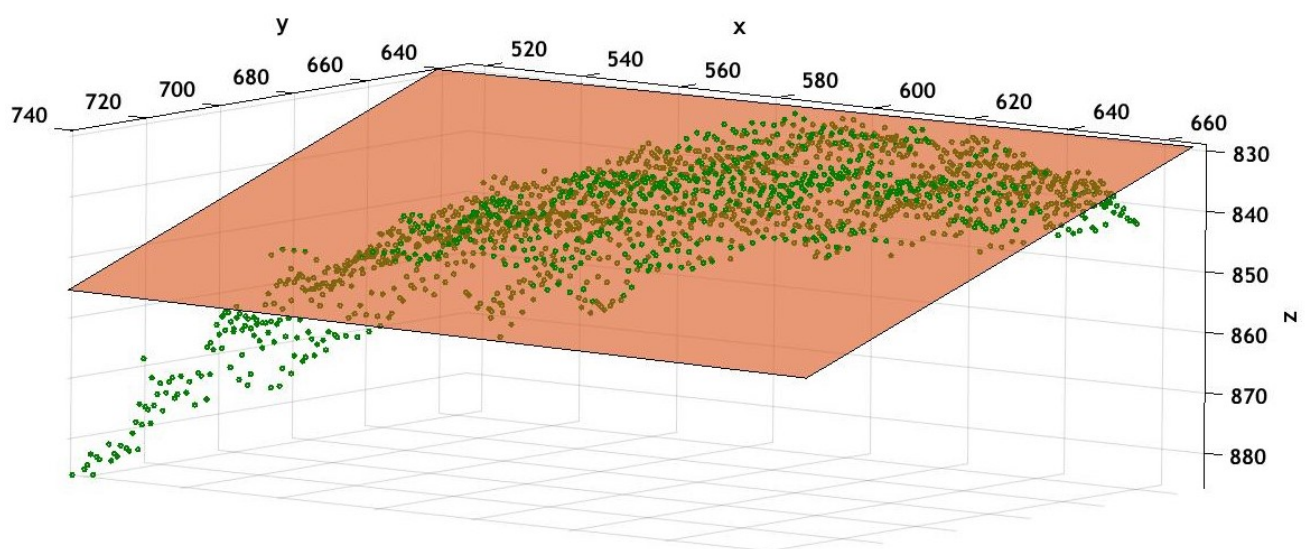


Figura 43: In rosso si può vedere il piano interpolante tutti i punti del cluster analizzato

Sul piano trovato sono stati proiettati tutti i punti del cluster, tracciando le perpendicolari al piano passanti per i punti della point-cloud.

Il piano, contenente i punti proiettati, è stato fatto rototraslare, calcolando le coordinate dei punti espresse in un nuovo sistema di coordinate avente gli assi x e y giacenti sul piano stesso (e asse z coincidente con la normale a esso). In questo nuovo sistema di coordinate, i punti proiettati hanno quindi tutti coordinata $z=0$. È stato così possibile calcolare la superficie dell'area coperta dai punti sul piano, per fare ciò è stata effettuata una triangolazione sul piano bidimensionale che ha permesso di delimitare l'area della foglia (figura 43). Per fare questa operazione è stata utilizzata la funzione "boundary" per il piano 2D che come nel caso del 3D basa il suo funzionamento sui principi della *triangolazione di Delunay*. Il fattore di restringimento impostato era di 0,2 poiché dopo i test iniziali è risultato essere quello più adatto in quanto valori più bassi realizzavano solidi convessi che in caso di errori di segmentazione creavano figure sovradimensionate, mentre valori più alti tendevano a frastagliare il bordo della foglia in maniera eccessiva. Successivamente è stata calcolata l'area all'interno della linea rossa (figura 44).

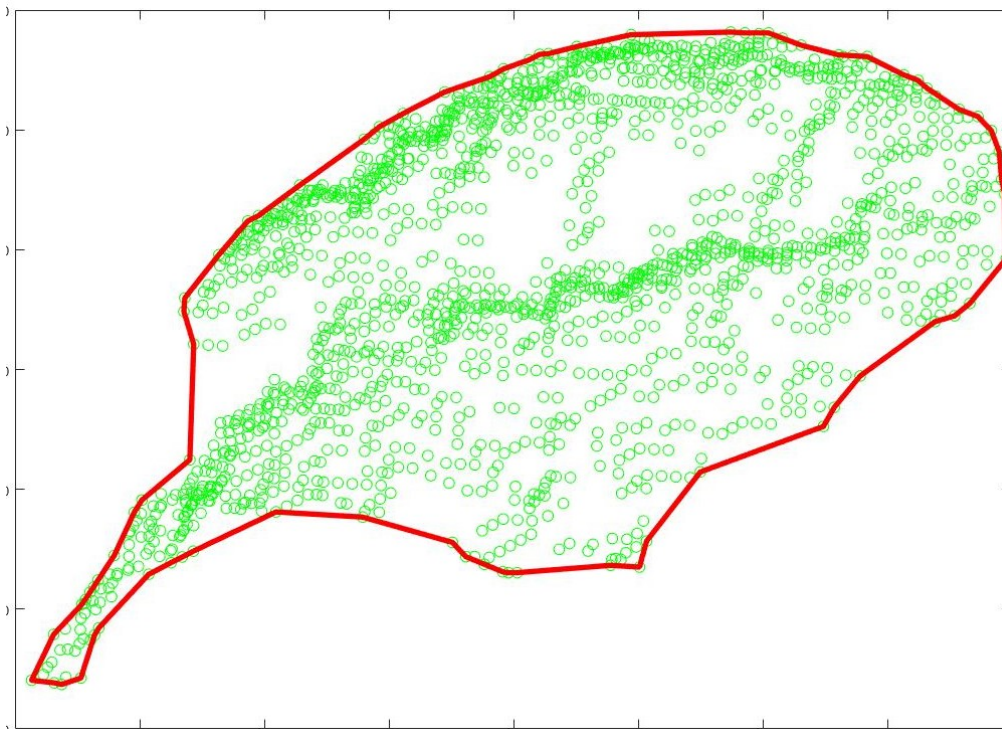


Figura 44: Immagine bidimensionale dei punti proiettati sul piano interpolante il cluster. La linea rossa rappresenta il bordo individuato

La superficie fogliare dell'intera pianta è stata stimata sommando l'area di ogni singolo cluster e riportata in un foglio di calcolo Excel precedentemente predisposto.

3.4. Studio delle correlazioni fra misure di riferimento e risultati delle analisi di immagini

Sui dati raccolti dall'analisi distruttiva e dalle acquisizioni tramite Kinect è stata fatta l'analisi di correlazione lineare, al fine di valutare se vi sia una relazione statistica tra i valori di biomassa e area fogliare e se questa persista nelle stime ottenute tramite l'analisi delle immagini.

L'analisi di correlazione misura semplicemente la forza della relazione lineare tra due variabili quantitative; l'output dell'analisi è un singolo numero ed è chiamato coefficiente di correlazione (Pelosi et al., 2004). Un coefficiente di correlazione (r) di -1 indica una perfetta relazione negativa, coefficiente di 0 corrisponde all'assenza di relazione e infine una correlazione di +1 indica una perfetta relazione positiva. Per calcolare r si utilizza la seguente formula:

$$r = \frac{\sum xy - (\sum x)(\sum y)/n}{\sqrt{\sum x^2 - (\sum x)^2/n} \sqrt{\sum y^2 - (\sum y)^2/n}}$$

L'indice è basato sul rapporto tra due quantità, al numeratore troviamo:

- $\sum xy$ =somma del prodotto di ciascun valore di x per ciascun valore di y
- $(\sum x)(\sum y)/n$ = somma dei valori di x moltiplicato per i valori di y, tutto diviso per n che è il numero di valori

al denominatore troviamo:

- $\sqrt{\sum x^2 - (\sum x)^2/n}$ = scarto quadratico medio della variabile x
- $\sqrt{\sum y^2 - (\sum y)^2/n}$ = scarto quadratico medio della variabile y

Tramite l'indice di correlazione è possibile trovare il coefficiente di determinazione (R^2) che è una proporzione tra la variabilità dei dati e la

correttezza del modello statistico utilizzato. Esso misura la frazione della varianza della variabile dipendente espressa dalla regressione. Se R^2 è prossimo ad 1 significa che il modello è in grado di predire bene il valore della variabile dipendente in campione, mentre se è pari a 0 significa che non individua una buona capacità di predirlo.

Per le correlazioni lineari semplici (come nel nostro caso) R^2 è calcolato come il quadrato dell'indice di correlazione. Per il calcolo del coefficiente di determinazione R^2 si è utilizzata la funzione dedicata presente nel software Excel del pacchetto Office 2016.

Per l'analisi di correlazione è stato confrontato il rapporto biomassa-area fogliare misurata col metodo distruttivo, biomassa-area fogliare calcolata con l'analisi delle immagini 2D e biomassa-area fogliare ottenuta con l'analisi 3D; nel capitolo 4 ne verranno discussi i risultati.

4. RISULTATI

4.1. Risultati delle misure distruttive di riferimento

Analizzando i dati di biomassa ed area fogliare (tabella A, in appendice), ottenuti con i metodi distruttivi trattati nei paragrafi precedenti, è stata riscontrata una netta correlazione tra le due misure come si può vedere dal grafico in figura 45. Entrando nel dettaglio si può vedere come la correlazione sia sostenuta da un buon R^2 che è pari a 0.974 ed è quindi prossimo a 1. Prendendo in considerazione le piante che discostano maggiormente dalla linea di tendenza si è arrivati alla conclusione che la massa (espressa in grammi) è influenzata anche dallo stato di idratazione della pianta; se essa si presentava in leggero stress idrico la massa potrebbe essere stata sottostimata rispetto alle piante con un elevato grado di turgore dato da una abbondante irrigazione, nelle quali la massa potrebbe essere stata sovrastimata.

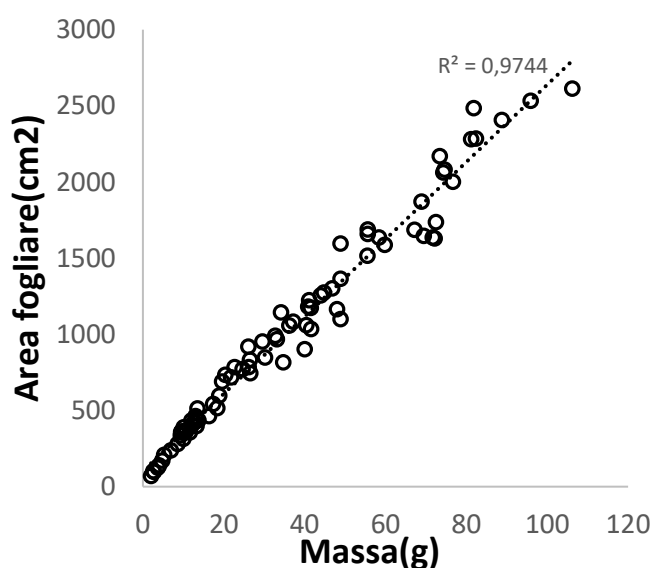


Figura 45: Relazione tra biomassa ed area fogliare misurate con il metodo distruttivo

Anche per quanto riguarda la misura dell'area fogliare il sistema, basato sulla sogliatura con il metodo Otsu, in alcuni casi va incontro a perdite del tessuto vegetale a causa delle condizioni di illuminazione che possono saturare l'immagine, ne è un esempio l'immagine 46 che confronta l'immagine RGB con la corrispondente digitalizzata in 2 colori (bianco e nero) dove nel cerchio rosso si può vedere un'area in cui, a causa di una zona d'ombra, una parte di foglia viene scartata e considerata come sfondo.



Figura 46: in rosso sono evidenziate le aree che la funzione di sogliatura ha perso.

4.2. Risultati dell'analisi delle immagini 2D

4.2.1. Risultati dell'analisi top view

Le immagini RGB acquisite dalla fotocamera del kinect, posta sull'asse verticale, sono state analizzate con la tecnica della sogliatura, basata sul colore e sulla distanza, hanno mostrato risultati altalenanti. Prenderemo in considerazione i risultati ottenuti con la sogliatura basata solo sul colore, solo sulla distanza, e poi quelli ottenuti dalla fusione dei due metodi (tabella B, in appendice).

Per quanto riguarda l'analisi colore, come si può notare dai grafici di figura 47 e 48, la correlazione tra la massa (misurata con il metodo distruttivo) e l'area

fogliare proiettata (stimata) presenta un R^2 pari a 0.76 se si considerano tutte le piante prese in esame. Se invece dividiamo la popolazione in due blocchi sulla base della loro massa vediamo che per le piante con una massa minore di 40 grammi la correlazione è più accentuata, come dimostra l' R^2 pari a 0.89, quindi prossimo a uno, mentre per le piante con massa maggiore di 40 grammi la correlazione è quasi inesistente come mostrato dalla linea di tendenza e dal R^2 che assume un valore di 0.08 ed è quindi prossimo allo zero evidenziando la scarsa correlazione tra i parametri di massa fogliare e superficie. Quanto sopra evidenziato può anche essere notato osservando il grafico: nella parte destra, la nuvola dei punti gialli, che corrispondono alle piante più grandi, con massa superiore ai 40 grammi, ha una maggiore dispersione sul grafico; invece i punti azzurri, che raggruppano le piante con massa inferiore ai 40 grammi, sono molto più prossimi alla linea di tendenza.

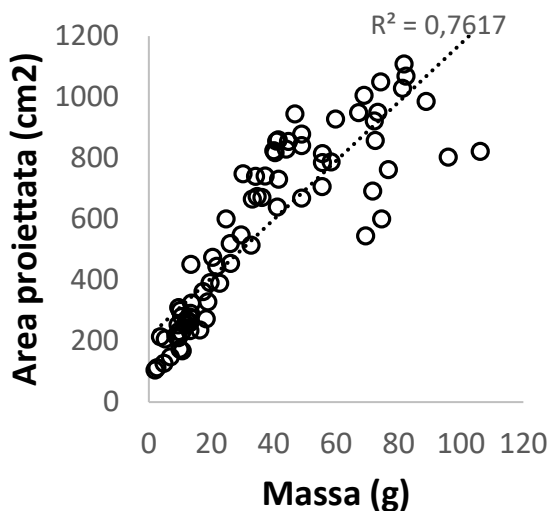


Figura 47: Relazione tra la massa misurata mediante raccolta distruttiva e l'area stimata con l'analisi 2D basata solo sul colore top view

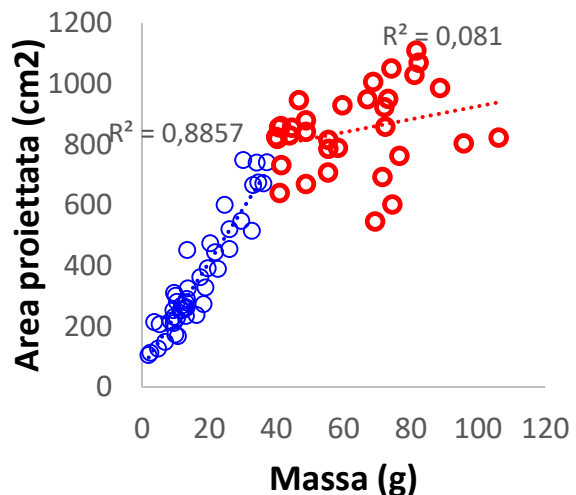


Figura 48: Dividendo le piante studiate in due classi, utilizzando come soglia una massa di 40 grammi, si può vedere la diversa relazione tra massa e area stimata con l'analisi 2D basata solo sul colore top view

Questo fenomeno è causato principalmente dal fatto che per le piante di piccola taglia la sovrapposizione fogliare è assai limitata e la maggior parte delle foglie sono ben visibili all'obiettivo della fotocamera; aumentando la dimensione delle piante aumenta anche la quantità di tessuto vegetale che rimane nascosto. Trovare una correlazione tra le piante di maggiori dimensioni risulta molto difficile anche

a causa della diversa architettura che la lattuga può assumere. A seconda delle condizioni di crescita infatti la pianta può presentarsi con un portamento a rosetta molto compatto, oppure filare, assumendo una conformazione completamente diversa.

Un altro fattore che influenza le stime è la presenza di foglie con una spiccata verticalità, infatti la superficie vista della fotocamera risulta essere molto minore di quella che effettivamente ha la foglia se la stendiamo orizzontalmente (figura 49).

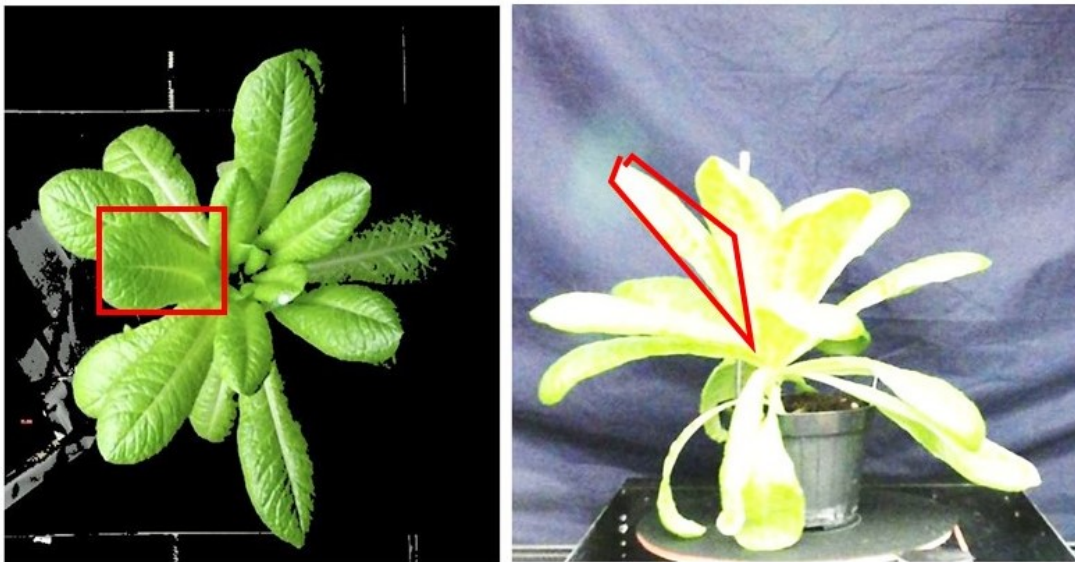


Figura 49: Errore dato dalla verticalità delle foglie

Come detto nei capitoli precedenti, le stime di area fogliare proiettata, ottenute tramite l'algoritmo di sogliatura basato solo sull'analisi del colore con il metodo Otsu, hanno lo svantaggio di includere nell'area del tessuto vegetale verde parti di immagine che appartengono allo sfondo, ma che a causa delle condizioni di illuminazione rientrano nella parte di istogramma che il metodo Otsu associa alle foglie.

Passando ad analizzare i dati ottenuti tramite la sogliatura basata esclusivamente sulla distanza, la quale elimina tutti i pixel con una distanza superiore ai 100 cm, si può notare come gli indici di correlazione siano simili a quelli dell'analisi colore

(figure 50 e 51). Se si considera la totalità delle piante analizzate l' R^2 è di 0,77 contro lo 0,76 del test colorimetrico. Anche per questo metodo si evidenzia una variazione nell'andamento delle linee di tendenza e di R^2 tra le piante piccole e quelle grandi. Come valore soglia discriminante, dopo attenta analisi, è stata scelta la massa di 40 grammi. Per le piante con una massa minore di 40 grammi l' R^2 è di 0.89 il quale fa capire come sia stretta la relazione tra i due parametri di biomassa e area fogliare, mentre per le piante più grandi di 40 grammi l' R^2 è molto basso (0.11) evidenziando una correlazione quasi inesistente.

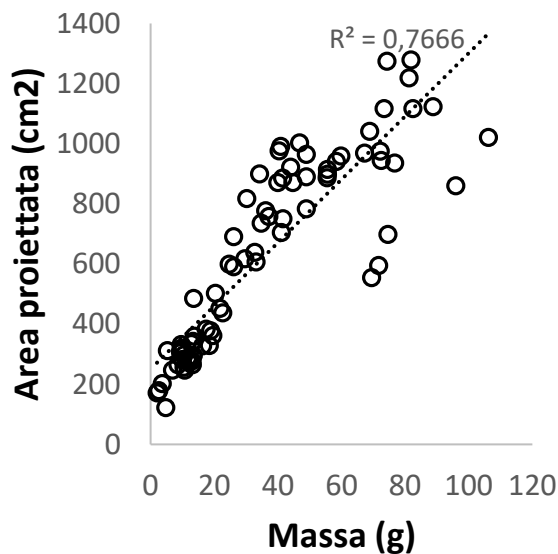


Figura 50: Relazione tra la massa misurata mediante raccolta distruttiva e l'area stimata con l'analisi 2D basata solo sulla distanza

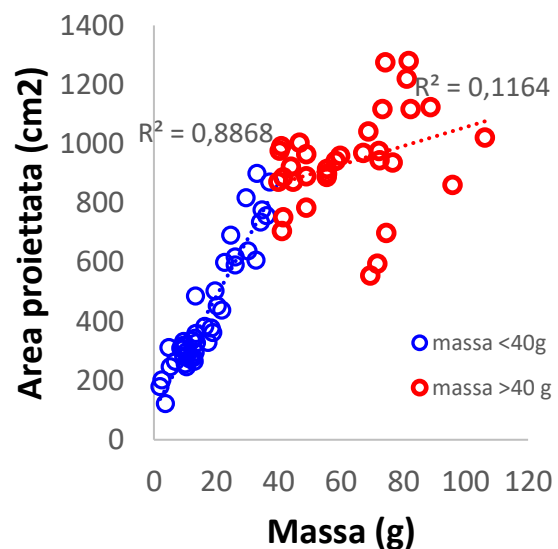


Figura 51: Dividendo le piante studiate in due classi, utilizzando come soglia una massa di 40 grammi, si può vedere la diversa relazione tra massa e area stimata con l'analisi 2D basata solo sulla distanza

I fattori che influenzano le stime sono: la sovrapposizione fogliare, per le piante di grandi dimensioni, e l'inclusione della terra del vaso nella stima per quelle piccole. Quest'ultimo fenomeno di disturbo è dato dal fatto che la parte superiore del vaso si trova ad una distanza dal sensore inferiore ai 100 cm ed è quindi compreso nella maschera distanza; per le piante di grandi dimensioni questo non è un problema poiché la rosetta della lattuga va a coprire tutto il vaso nascondendolo. Per le piante piccole, che non coprono il vaso, questo è un problema, come si può vedere dalla figura 52, poiché porta ad una sovrastima dell'area fogliare.

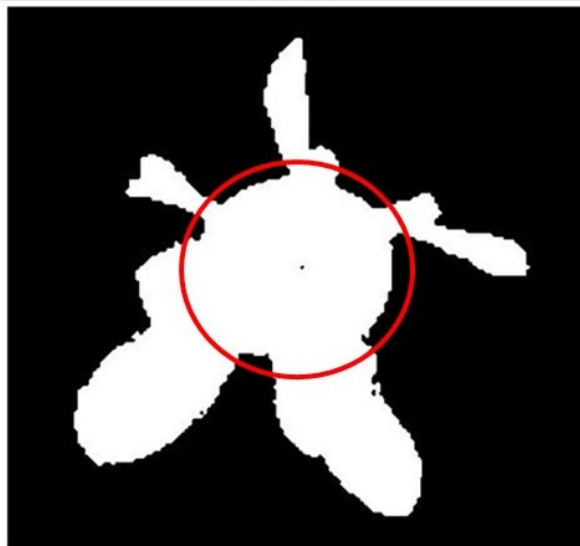


Figura 52: Maschera distanza di una pianta di piccole dimensioni: il cerchio rosso evidenzia il vaso

Il terzo metodo utilizzato per l'analisi delle immagini con vista dall'alto è stato quello che prevedeva una soglia basata sulla fusione di imaging di colore e distanza. Questo sistema permette di ottenere una migliore corrispondenza tra la pianta fotografata e la maschera utilizzata per calcolare la superficie verde poiché vengono eliminati un maggior numero di elementi dello sfondo.

Osservando i grafici delle figure 53 e 54 si può notare che, anche in questo caso, le piante con massa minore di 40 grammi presentano una migliore correlazione tra area proiettata e biomassa ($R^2=0.89$) rispetto alle piante più grandi che non presentano correlazione ($R^2= 0.08$). Per questa tipologia di analisi si può affermare che il motivo principale della differenza presente tra le due classi è dovuto alla sovrapposizione fogliare, poiché la quasi totalità degli elementi di disturbo dello sfondo sono stati eliminati. L'unico difetto che rimane è quello dovuto alle zone d'ombra sulle foglie che, durante l'analisi colore, fanno perdere parte del tessuto vegetale poiché i valori di intensità e tonalità della scala HSI sono prossimi a quelli dello sfondo.

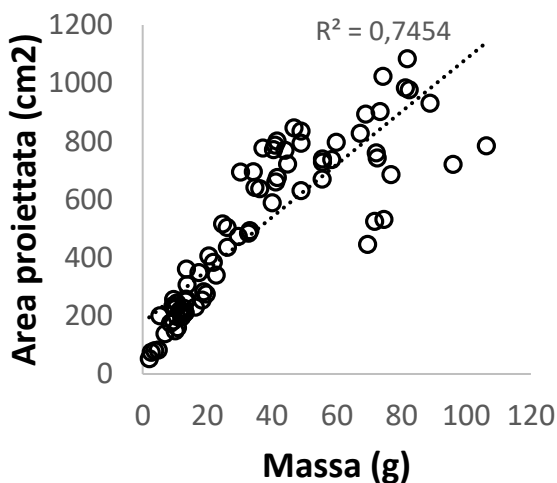


Figura 53: Relazione tra la massa misurata con il metodo distruttivo e l'area stimata con l'analisi 2D basata colore e distanza

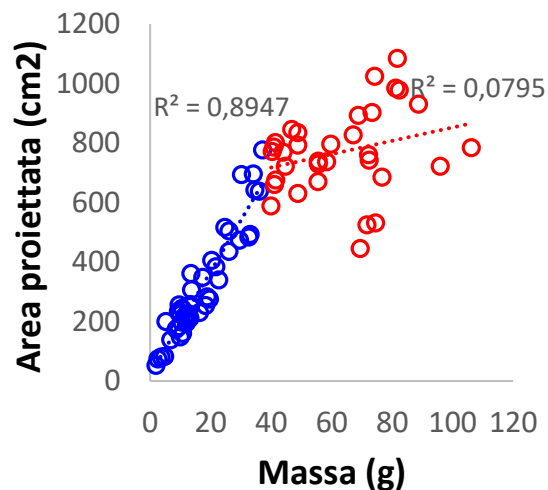


Figura 54: Dividendo le piante studiate in due classi, utilizzando come soglia una massa di 40 grammi, si può vedere la diversa relazione tra massa e area stimata con l'analisi 2D basata su colore e distanza

In conclusione possiamo dire che l'analisi delle immagini top view presentano risultati accettabili per piante di piccole dimensioni, man mano queste aumentano l'indice di determinazione è sempre più basso e quindi stimare la biomassa o l'area fogliare diventa sempre più difficile. Il problema principale risulta essere quello della sovrapposizione fogliare che impedisce la visualizzazione del tessuto vegetale sottostante.

4.2.2. Risultati dell'analisi del colore con vista laterale

L'analisi delle immagini è stata svolta anche tramite fotografie acquisite lateralmente con il dispositivo Microsoft Kinect V2.

Nella tabella B in appendice sono riportati i valori medi delle acquisizioni effettuate per ciascuna pianta. Fino alla pianta P47 è stato utilizzato il metodo a rotazione continua che scattava 20 fotografie per ciascun giro (una ogni 18°) mentre dalla pianta P48 alla P84 è stato utilizzato il metodo "step by step" che acquisiva 26 immagini (una ogni 14° circa). Ciascun fotogramma è stato analizzato e se ne è calcolata l'area con il metodo di sogliatura basato sul colore e sulla

distanza si è poi calcolata la media delle aree misurata per ogni pianta e si è calcolata anche la deviazione tra le 20 o 26 aree di ogni individuo di lattuga romana. I valori di deviazione standard sono consultabili nella tabella XXXX in appendice. La deviazione standard assume il valore minimo di 0.5 e massimo di 14, ma la maggior parte dei punti è compresa tra 1 e 6, mostrando un andamento crescente all'aumentare della massa della pianta di lattuga romana. Analizzando il grafico di figura 55 si può vedere che il coefficiente di variazione dell'area di ciascun fotogramma per pianta varia dal 4% al 25 % e tende, i valori più alti si registrano per piante piccole.

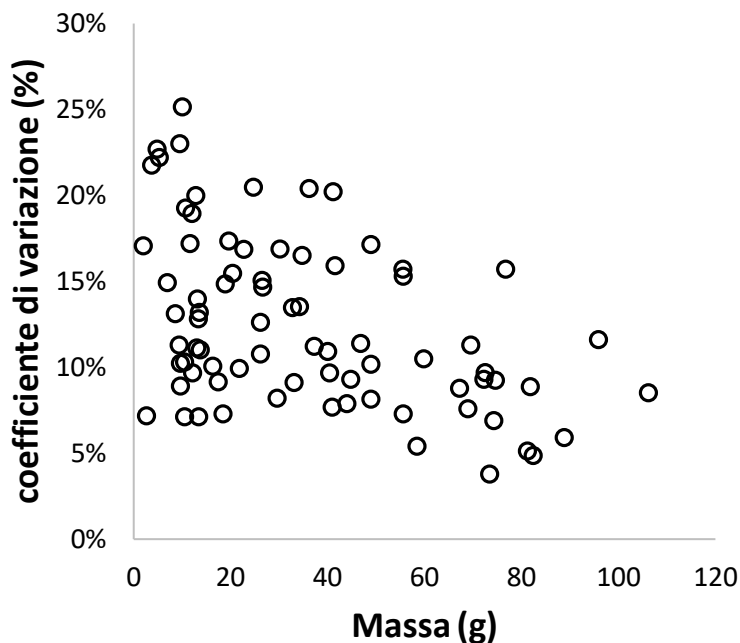


Figura 55 Relazione tra massa e deviazione standard delle aree di ciascun fotogramma di ogni singola pianta acquisita con il metodo rotazionale

Prendendo in considerazione i risultati ottenuti mediando le aree di ogni singolo fotogramma (figure 56 e 57) si può vedere come la correlazione tra massa ed area fogliare stimata lateralmente sia consistente, come dimostra l' R^2 pari a 0.93. Anche per questo caso la stima per le piante piccole ($R^2=0.88$) risulta essere leggermente migliore rispetto alle piante grandi ($R^2=0.79$).

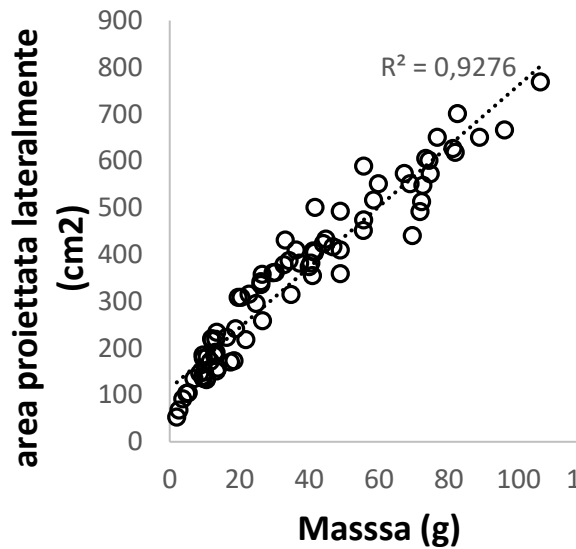


Figura 56: Relazione tra la massa misurata mediante raccolta distruttiva e l'area stimata con l'analisi 2D basata colore e distanza lateral view

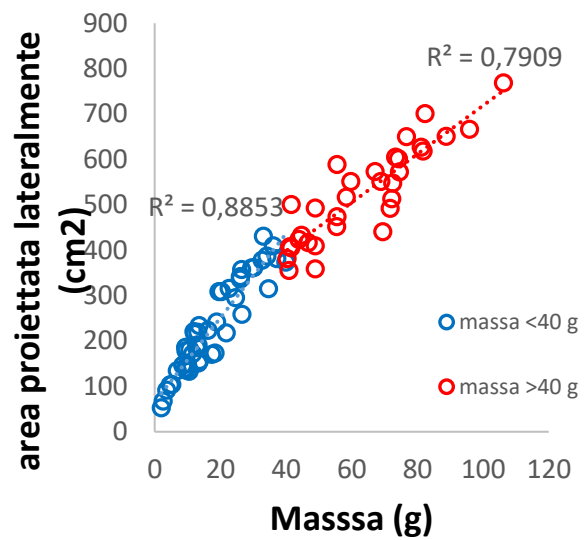


Figura 57: Dividendo le piante studiate in due classi, utilizzando come soglia una massa di 40 grammi, si può vedere la diversa relazione tra massa e area stimata con l'analisi 2D basata su colore e distanza lateral view

Analizzando nel complesso i risultati ottenuti con l'imaging 2D possiamo dire che la visione laterale multipla della pianta risulta essere nettamente migliore rispetto alla visione dall'alto, questo perché permette di ottenere valori di area verde che presentano un andamento più simile a quello dell'area fogliare misurata col metodo distruttivo. Questo è confermato anche dall'indice R^2 . Nella tabella 1 a pagina seguente si propone un confronto tra gli indici di correlazione dei diversi casi.

	Tutte le piante	Piante < 40 grammi	Piante > 40 grammi
Metodo distruttivo	0,97	0,94	0,90
Imaging colore dall'alto	0,76	0,90	0,08
Imaging distanza dall'alto	0,77	0,89	0,11
Imaging colore+distanza dall'alto	0,74	0,89	0,08
Imaging laterale	0,93	0,88	0,79

Tabella 1: confronto degli indici di correlazione ottenuti per ciascun metodo di imaging 2D

4.3. Risultati dell'analisi con imaging 3D

Nei paragrafi seguenti si discuteranno i risultati ottenuti con i due approcci di imaging 3D approfonditi in questo lavoro; in primis si presenteranno anche le operazioni di settaggio dei diversi parametri necessari per adattare il sistema allo studio dei cespi di lattuga romana.

Il primo parametro analizzato è stato il fattore di restringimento, utilizzato dalla funzione "boundary", per la triangolazione con il metodo Delaunay.

L'applicazione della triangolazione di Delaunay per ricostruire la superficie fogliare delle piante di lattuga romana risulta essere uno strumento molto interessante. Presenta tuttavia alcune limitazioni sul calcolo dell'area fogliare che possono derivare da diversi aspetti riguardanti tutte le fasi dello studio. Ruolo importante nella ricostruzione 3D è giocato dal fattore di restringimento (*shrink factor*) che può assumere valori tra 0 (nessun restringimento) e 1 (massimo restringimento attorno alla foglia).

Nelle immagini seguenti (figure 58, 59, 60, 61) si può vedere il comportamento di diversi fattori di restringimento sullo stesso campione



Figura 58:immagini RGB bidimensionale

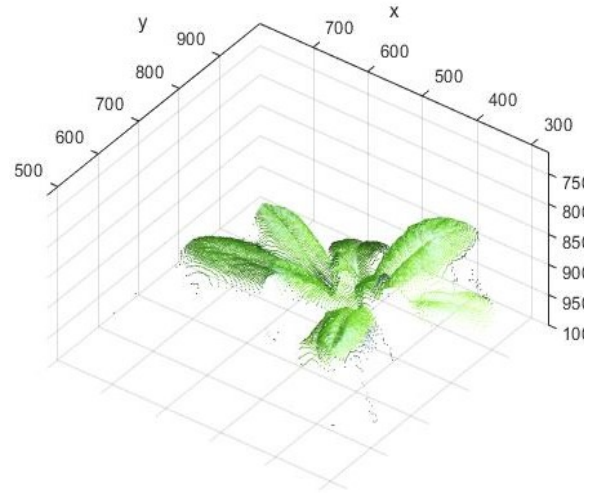


Figura 59:Point-cloud

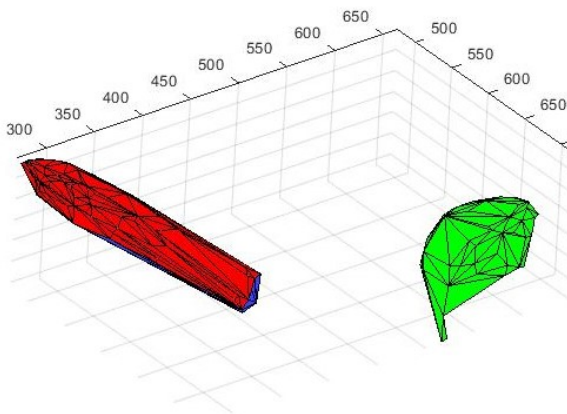


Figura 60: Ricostruzione 3D tramite la triangolazione di Delaunay di due foglie di una pianta di lattuga romana, utilizzando un fattore di restringimento pari a 0.

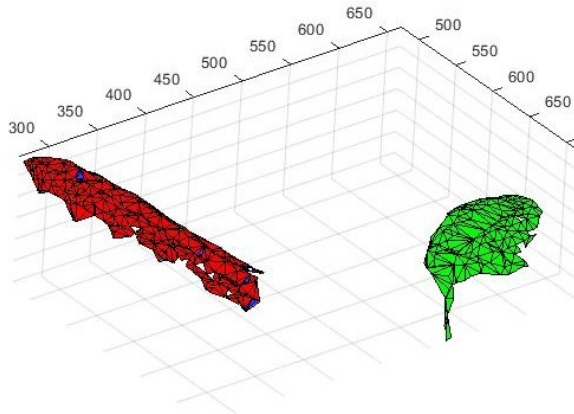


Figura 61 Ricostruzione 3D tramite la triangolazione di Delaunay di due foglie di una pianta di lattuga romana, utilizzando un fattore di restringimento pari a 1.

Come si può vedere, un fattore di restringimento molto basso porta ad ottenere triangoli di grandi dimensioni ed il volume viene sovrastimato poiché il solido generato attorno alla point-cloud è un poliedro convesso che non avvolge in modo compatto i punti della nuvola. L'area che si ottiene risulta invece essere minore di quella stimata con fattori di restringimento più alti.

Se si utilizzano fattori di restringimento più elevati, prossimi a uno, si può notare che i triangoli sono molto piccoli e vanno ad avvolgere molto di più la point-cloud generando un solido che non è più convesso. Il fattore di restringimento elevato permette di ottenere un solido che aderisce maggiormente alla superficie della nuvola di punti poiché utilizza un maggior numero di pixel come vertici dei

triangoli. Tuttavia non è detto che uno shrink factor elevato sia da considerarsi migliore per il calcolo della superficie fogliare, questo perché la generazione di tanti piccoli triangoli porta ad ottenere una figura con moltissime facce ed un elevato grado di “accartocciamento” che, nel momento del calcolo dell’area, porta ad avere una elevata sovrastima della reale superficie fogliare. Il successo della triangolazione di Delaunay per il calcolo della superficie fogliare è limitato anche dalla qualità dei rilievi tridimensionali effettuati dal sensore; infatti la mediocre sensibilità di Kinect V2 (si ricordi che è un sensore a basso costo) porta ad avere una precisione nelle rilevazioni delle distanze, in fase di acquisizione, non eccellente. Questo implica una certa dispersione dei pixel componenti una foglia, ottenendo una figura molto increspata e non ben planare, così da sovrastimare l’area fogliare.

Un ulteriore problema si ha nel caso in cui la segmentazione abbia degli errori e accorpi più foglie. Come si può vedere dalle figure 62 e 63 questo porta ad ottenere un solido che unisce le foglie che appartengono al cluster ottenendo una notevole alterazione delle misure reali di area e volume fogliare. Le due immagini permettono di confrontare il la triangolazione di cluster sottosegmentati realizzata con due fattori di restringimento diversi; la prima con shrink factor pari a zero fa perdere completamente la reale struttura dell’apparato fogliare e restituisce un solido convesso che accorpa nel quale difficilmente si individuano le foglie. Qui il reale volume della porzione di pianta interessata sarà sicuramente sovrastimato. Se si osserva la seconda immagine, dove è stato impiegato un fattore di restringimento pari a uno (il massimo) si vede che il solido si adatta molto bene alle foglie, permettendo di individuarne i contorni, tuttavia ci sono delle superfici che collegano i pixel di foglie diverse, realizzando così un solido ad elevata superficie totale; infatti i triangoli che collegano foglie diverse innalzano notevolmente la superficie che rientra nell’area utilizzata per il calcolo della superficie fogliare.

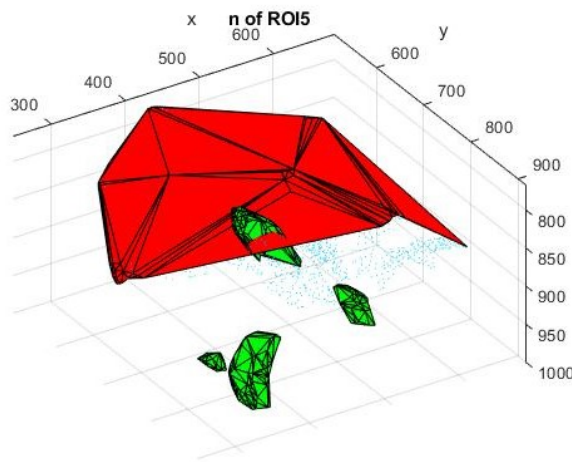


Figura 62 Esempio di utilizzo della triangolazione di Delaunay, un fattore di restringimento pari a zero, su una pianta di lattuga romana in cui la segmentazione ha accorpato alcune foglie.

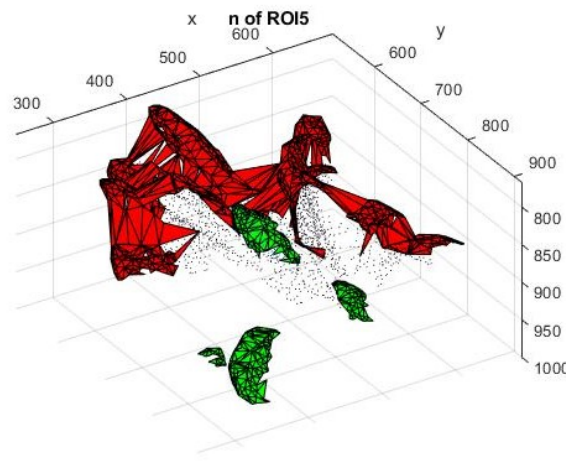


Figura 63: Esempio di utilizzo della triangolazione di Delaunay, un fattore di restringimento pari a uno, su una pianta di lattuga romana in cui la segmentazione ha accorpato alcune foglie.

In conclusione si può affermare che lo shrink factor gioca un ruolo molto importante nella triangolazione di Delaunay; a seconda delle caratteristiche che si vogliono indagare può essere consono applicare un valore del parametro piuttosto che un altro. Per esempio fattori di restringimento bassi risultano essere adatti nel caso in cui si vogliono studiare le superfici di corpi compatti, come una singola foglia. Per lo studio del volume risulta migliore l'applicazione di fattori alti; questi infatti permettono un maggior grado di aderenza del solido generato attorno alla point-cloud studiata. Nel caso la segmentazione accorpi più foglie in un unico cluster il calcolo della superficie fogliare diventa di difficile realizzazione a causa del principio di funzionamento del metodo Delaunay che unisce pixel anche di foglie diverse. La triangolazione può trovare una possibile applicazione concreta nello studio del volume dell'intera canopy, parametro che sta acquisendo sempre più importanza nella gestione delle quantità di agrofarmaci da utilizzare in campo.

Analizzando invece i parametri necessari per la segmentazione con il metodo Rabbani e l'analisi del colore si vede che è importante applicare dei parametri che si adattino al meglio alle condizioni in cui si sta operando. Nel caso di questo lavoro di tesi la segmentazione 3D è atta ad individuare le foglie dei cespi di lattuga romana; quindi sarà necessario settare il programma di analisi affinché riconosca un numero di cluster il più possibile prossimo al numero di foglie reali visibili dal sensore.

I parametri che sono stati presi in analisi sono stati: angolo soglia e percentile nella segmentazione geometrica con il metodo Rabbani, distanza soglia per l'analisi del colore e numero di punti minimo per cluster. Le prove sono state effettuate su un numero limitato di piante scelte per la loro struttura e disposizione fogliare, al fine di poter studiare il comportamento delle diverse combinazioni dei parametri per tutti i casi che si propongono durante l'analisi di tutte le piante. Questa ricerca è stata effettuata al fine di trovare dei parametri che si adattino allo studio di tutte le 84 piante di lattuga considerate in questo lavoro, le quali differiscono per dimensioni e struttura fogliare.

I campioni analizzati sono stati suddivisi in piante piccole, medie e grandi (small, medium e large) in base al grado di sviluppo dell'apparato fogliare. L'algoritmo è stato applicato prima sull'intera pianta e poi sono stati poi scelti dei casi critici per l'analisi della disposizione fogliare come: sovrapposizione di due foglie, affiancamento, elevata inclinazione fogliare, accartocciamenti fogliari, foglie arrotondate, foglie con nervatura centrale accentuata.

I diversi parametri sono stati prima studiati singolarmente e poi si è analizzato il loro comportamento in combinazione con gli altri. Per il confronto dei diversi casi si è scelto di utilizzare un indice, proposto per questo progetto, che è calcolato rapportando il numero di cluster, individuati dalla segmentazione, con il numero reale di foglie visibili dall'alto. Se l'indice assume un valore superiore a 1 significa che c'è stata una oversegmentazione, ossia sono stati caratterizzati più cluster delle reali foglie presenti, se è minore di 1 non tutte le foglie sono state individuate, oppure più foglie sono state accorpate in un unico cluster. Se l'indice è pari a 1 il numero di cluster individuati con la segmentazione è uguale al numero di foglie visibili della pianta.

Per ciascun campione si è applicato dapprima l'algoritmo di segmentazione, col metodo Rabbani, variando i parametri "percentile" (con valori pari a: 50-60-70-80-90) e "angolo soglia" (con valori pari a: 20° 40° 60° 80° 100°). Sono state testate tutte le 25 combinazioni possibili, la tabella 2 riporta come esempio il foglio di calcolo utilizzato per il confronto delle diverse combinazioni su di una pianta campione.

Come si può notare angoli soglia e percentili bassi tendono a oversegmentare individuando un numero di cluster maggior di quelli reali, mentre al crescere dei valori delle due variabili il numero di cluster diminuisce e l'indice diventa notevolmente minore di 1. La sottosegmentazione è dovuta principalmente al fatto che il modello tende ad accorpare più foglie all'interno di un singolo cluster.

Id pianta	Classe dimensionale	Percentile	Angolo soglia	n°cluster individuati	n°cluster reali	Indice di confronto
P44	large	50	20	16	10	1,6
P44	large	50	40	12	10	1,2
P44	large	50	60	12	10	1,2
P44	large	50	80	12	10	1,2
P44	large	50	100	12	10	1,2
P44	large	60	20	14	10	1,4
P44	large	60	40	12	10	1,2
P44	large	60	60	12	10	1,2
P44	large	60	80	11	10	1,1
P44	large	60	100	11	10	1,1
P44	large	70	20	12	10	1,2
P44	large	70	40	10	10	1
P44	large	70	60	9	10	0,9
P44	large	70	80	9	10	0,9
P44	large	70	100	9	10	0,9
P44	large	80	20	7	10	0,7
P44	large	80	40	7	10	0,7
P44	large	80	60	6	10	0,6
P44	large	80	80	6	10	0,6
P44	large	80	100	6	10	0,6
P44	large	90	20	7	10	0,7
P44	large	90	40	6	10	0,6
P44	large	90	60	3	10	0,3
P44	large	90	80	2	10	0,2
P44	large	90	100	2	10	0,2

Tabella 2: Monitoraggio del comportamento delle diverse combinazioni dei parametri di angolo soglia e percentile su una pianta di lattuga

Un altro parametro su cui si è lavorato è stata la distanza soglia, utilizzata per l'analisi del colore, sono stati fatti test con 5 mm, 8 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm;

confrontando i risultati ottenuti mediante l'indice di confronto sviluppato si è visto che per piante piccole (massa < 10g) l'analisi colore non serve poiché essendo le foglie piccole e molto regolari la segmentazione col metodo Rabbani è sufficiente dato che non vi è oversegmentazione. Per le piante con una massa compresa tra i 10 g e i 40 g il valore di distanza soglia più adatto è 5 mm perché con distanze superiori aumenta il numero di foglie accorpate in un unico cluster. Per piante grandi, con una massa maggiore di 40 grammi la distanza soglia è stata impostata a 10 mm poiché è elevato il numero di oversegmentazioni data la grande variabilità strutturale all'interno delle singole foglie.

In appendice sono riportate le tabelle con i risultati dei test su alcune piante campione.

4.3.1. Risultati dell'analisi basata sul calcolo del volume (top view)

Il primo approccio utilizzato per lo studio delle point-cloud 3D delle piante di lattuga, realizzate grazie alle acquisizioni effettuate mediante il dispositivo Kinect V2, è stato quello del calcolo del volume del solido generato mediante la funzione "Boundary" che basa il suo funzionamento sulla triangolazione di Delaunay. Dopo le analisi sul comportamento del fattore di restringimento, presentate precedentemente, è stato scelto di impostare tale parametro sul valore massimo (1) poiché permette di ottenere un poliedro che si adatta maggiormente alla pointcloud.

I risultati ottenuti hanno mostrato una buona correlazione lineare tra biomassa e volume calcolato (figure 64 e 65) come evidenzia l'indice di determinazione $R^2=0.77$. Se si divide la popolazione analizzata in due classi sulla base della massa, impostando come soglia 40 grammi, si vede che la relazione tra biomassa e volume è netta per le piante più piccole ($R^2= 0.77$), mentre per le piante grandi è solo accennata ($R^2= 0.31$). Questo valore risulta però essere promettente perché è nettamente superiore a quelli dell'analisi 2D con vista top view.

Anche per questa tipologia di analisi, slegata dalla superficie fogliare, permane il problema della sovrapposizione delle foglie mentre viene eliminato quello delle

ombre e dei riflessi della luce poiché non è stata utilizzata la componente colore ma solamente quella 3D delle point-cloud.

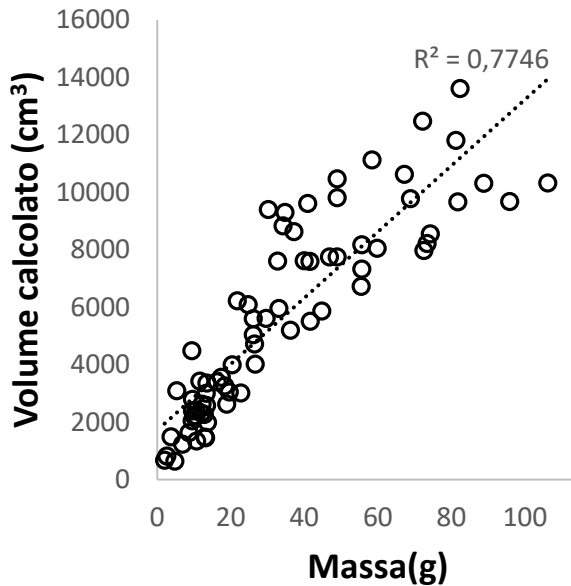


Figura 64: Relazione tra la massa misurata distruttivamente e il volume calcolato con la triangolazione 3D top view

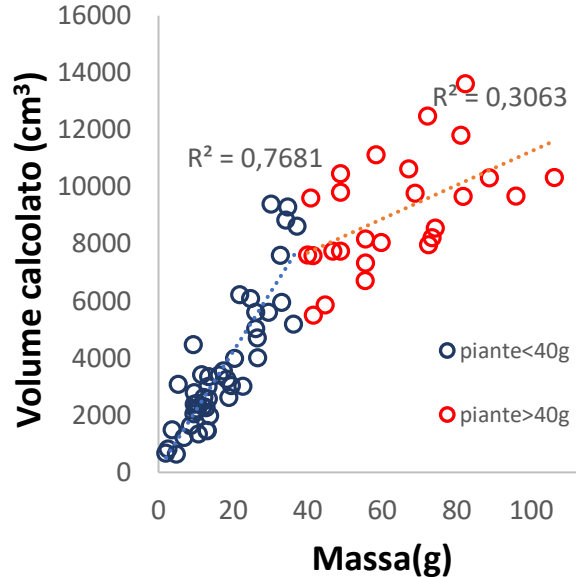


Figura 65: Dividendo le piante studiate in due classi, utilizzando come soglia una massa di 40 grammi, si può vedere la diversa relazione tra massa e volume calcolato con la triangolazione 3D top view

4.3.2. Risultati dell'analisi basata sul calcolo del volume (laterale)

Visti i miglioramenti ottenuti con la visione laterale per l'imaging 2D, si è scelto di adottare questa strategia anche per l'analisi 3D.

Come mostrano i grafici delle figure 66 e 67 si distingue una buona correlazione positiva per le piante di massa inferiore ai 40 grammi ($R^2=0,81$), mentre per quelle più grandi la dispersione sul grafico è molto più elevata.

In questo caso può essere interessante valutare il rapporto tra il volume calcolato e la superficie fogliare misurata distruttivamente; si nota una migliore correlazione specialmente, comunque non eccellente, per le piante di massa superiore ai 40 grammi manifestata dall' R^2 pari a 0,57. Tale valore è risultato essere il migliore per lo studio di piante di grandi dimensioni, seppur conservi una limitata capacità previsionale.

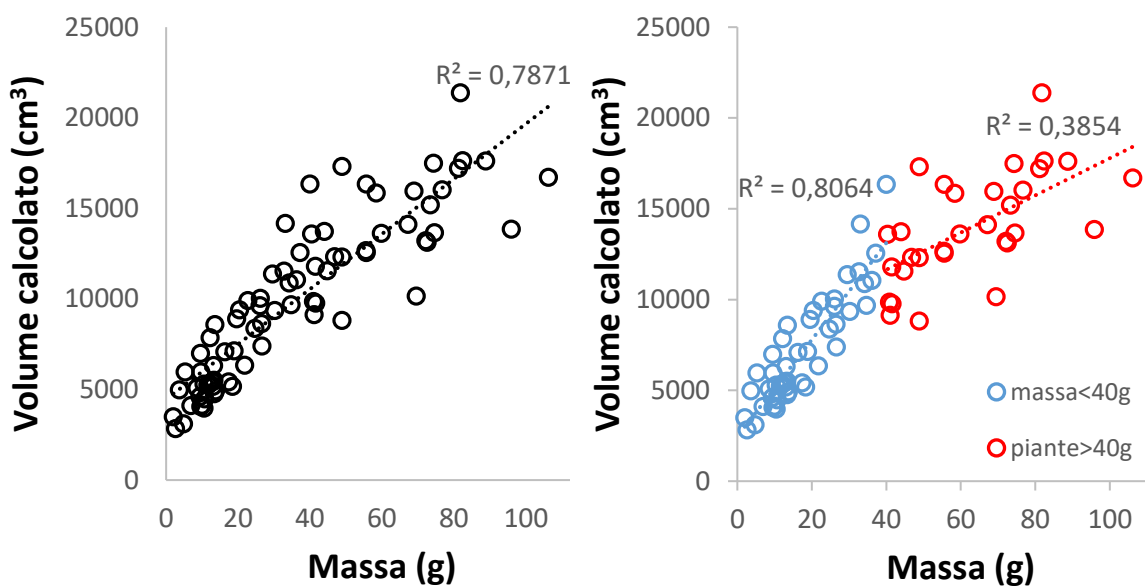


Figura 66: Relazione tra la massa misurata con la raccolta distruttiva e il volume calcolato con la triangolazione 3D lateral view

Figura 67: Dividendo le piante studiate in due classi, utilizzando come soglia una massa di 40 grammi, si può vedere la diversa relazione tra massa e volume calcolato con la triangolazione 3D

Questo metodo di analisi conserva alcuni deficit che si sono manifestati anche nell'analisi 2D, infatti non si è in grado di superare la sovrapposizione fogliare, però la rotazione e la conseguente media dei volumi dei fotogrammi di ciascuna pianta permette di ottenere stime migliori. È necessario precisare che i coefficienti di variazione dei volumi, calcolati per ogni cespo, si mantengono su valori compresi tra il 20% e il 50%, non mostrando alcuna correlazione con le dimensioni reali della pianta. Questa caratteristica si deve principalmente alle diverse conformazione e portamenti delle piante nei vasi.

Confrontando l'analisi 3D dei volumi con vista top view e lateral view non si evidenziano significative differenze nelle relazioni con la biomassa misurata distruttivamente, infatti gli indici R^2 assumono valori simili.

4.3.3. Risultati dell'analisi 3D con segmentazione fogliare

Per lo studio 3D mediante segmentazione fogliare le piante sono state suddivise in tre categorie a seconda della loro massa: piante piccole (fino a 10 grammi), medie

(tra 10 e 40 grammi) e grandi (sopra i 40 grammi). Questo ha permesso di modulare a seconda delle caratteristiche strutturali i parametri di percentile, angolo soglia e distanza soglia (vedi cap. 3.2.6). Sono stati testati due valori del fattore di restringimento (*Shrink factor*): il massimo ($S_f=1$) e il minimo ($S_f=0$). Per il calcolo dell'area sono stati utilizzati due diversi approcci: uno calcola l'area totale visibile, sommando la superficie misurata di ogni cluster individuato, l'altro stima l'area totale moltiplicando quella del cluster più grande per il numero totale di cluster individuati. Il primo metodo, secondo i risultati ottenuti, restituisce valori di area notevolmente inferiori rispetto a quelli ottenuti effettuando l'analisi distruttiva, e il gap tra i due valori aumenta al crescere delle dimensioni della pianta. Il secondo metodo di calcolo fornisce spesso valori più simili alla misura distruttiva, poiché stima anche la parte non visibile, ma ha presentato limiti nel momento in cui la segmentazione ha accorpato più foglie in un unico cluster poiché sovrastima eccessivamente l'area fogliare. Se si scartano le piante in cui vi sono stati errori di segmentazione l'indice di determinazione assume valori compresi tra 0,32 e 0,40 e la capacità previsionale è perciò piuttosto bassa.

Per quanto riguarda la scelta del fattore di restringimento della triangolazione si è visto che per le piante di dimensioni medio-grandi è più adatto utilizzare un valore alto del parametro poiché si ottengono aree più prossime a quelle reali e R^2 maggiori (seppur non soddisfacenti). Per le piante molto piccole, al di sotto dei 10 grammi, assimilabili alle *baby leaf* utilizzate nella produzione di insalate per il settore della IV gamma, sembra essere più adatto settare il parametro su valori bassi ma la quantità di piante analizzate per questa categoria è ridotta e sarebbe consono effettuare ulteriori approfondimenti.

La tipologia di segmentazione utilizzata è diversa per ciascuna classe dimensionale; per le piante piccole si è utilizzata la sola segmentazione geometrica che valuta la regolarità della superficie fogliare, mentre è stata saltata la parte dell'analisi dei cluster adiacenti sulla base del colore. Questa scelta è dovuta al fatto che nelle piante piccole non si sono presentati casi di oversegmentazione e quindi l'analisi del colore sarebbe stata superflua, portando maggiori probabilità di errore. Per le piante medie e grandi è stata effettuata anche l'analisi del colore con distanze soglia di 5 mm per le medie e 10 mm per le grandi. Questo strumento è risultato molto adatto nelle piante di grandi dimensioni

dove si presentavano la maggior parte delle oversegmentazioni a causa della morfologia molto varia delle singole foglie.

Gli indici di correlazione tra area stimata e biomassa evidenziano notevoli limitazioni nell'applicazione di questo strumento di analisi 3D, infatti solo per le piante piccole si ottengono valori di R^2 superiori a 0,70 mentre per le altre piante raggiunge il valore massimo di 0,39.

I limiti di questi risultati possono essere dovuti a diversi fattori; uno di questi è la sovrapposizione fogliare perché, come per gli altri metodi di analisi 2D e 3D, le foglie non visibili non possono essere misurate. Un altro fattore limitante sono i possibili errori che si possono verificare durante la segmentazione, infatti parti di foglie possono essere perse se non mostrano alcuna regolarità con il tessuto vegetale circostante oppure si possono avere casi di unione di più foglie in un unico cluster con conseguente sovrastima dell'area fogliare.

4.3.4. Risultati dell'analisi 3D mediante piano interpolante per il calcolo dell'area fogliare.

L'ultima tecnica provata per valutare le potenzialità dell'introduzione di strumenti d'analisi tridimensionali è quella che utilizza la proiezione dei punti su un piano ad essi interpolante. I risultati sembrano essere promettenti, infatti vi è una chiara correlazione ($R^2=0.84$) tra la massa delle piante di lattuga analizzate e l'area stimata con questo metodo, come si può vedere dal grafico in figura 68. Suddividendo le piante analizzate in classi dimensionali si è visto che per le piante di grandi dimensioni la capacità previsionale è comunque ridotta ($R^2=0.33$).

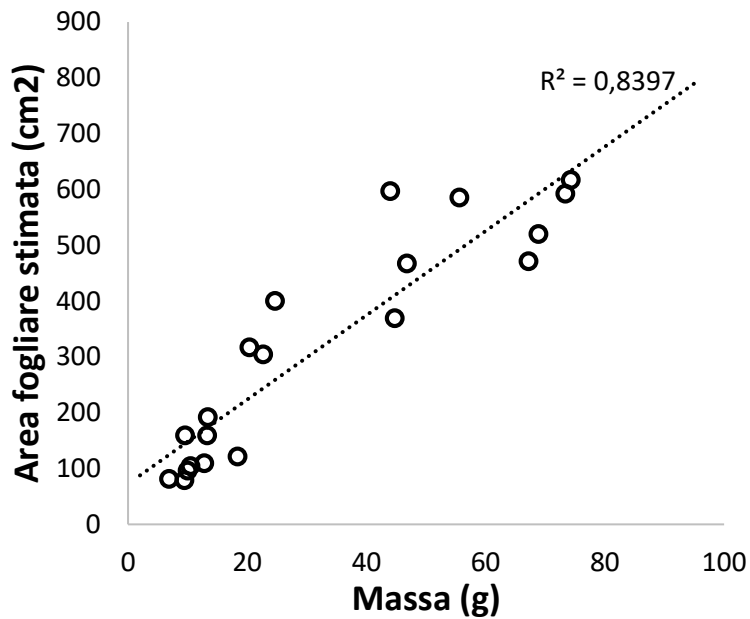


Figura 68: correlazione tra massa e area fogliare stimata con il metodo del piano interpolante

I miglioramenti apportati da questo metodo sono dovuti principalmente al fatto che la superficie della singola foglia è calcolata mediante la sua proiezione su un piano che cerca di adattarsi alla sua inclinazione e non su di un piano, comune a tutte le foglie, sempre orizzontale come nelle analisi 2D, tuttavia questo metodo, come gli altri, non è in grado di evitare il problema delle sovrapposizioni fogliari. Un limite ulteriore può essere dovuto ai possibili errori che si possono presentare in fase di segmentazione, dove si possono perdere parti di tessuto vegetale a causa della conformazione geometrica, molto variabile delle foglie.

4.4. Discussione dei risultati ottenuti con approcci 2D e 3D

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di valutare le potenzialità dell'impiego di tecniche di imaging 3D per la stima della dinamica di crescita di Lattuga Romana, confrontandole con le più diffuse tecniche di analisi delle immagini a colori bidimensionali.

Nella tabella 3 sono riportati i valori di correlazione tra le stime 2D e 3D con la massa misurata durante le acquisizioni distruttive.

Come si può notare in tutti i casi la correlazione si riduce notevolmente al crescere della massa, toccando i valori minimi con le tecniche di imaging 2D dall'alto, le quali sono completamente prive di correlazione ($R^2 < 0.1$). Queste tecniche sono risultate essere abbastanza adatte per l'analisi di piante di piccole dimensioni, al di sotto dei 40 grammi, come si può vedere dagli indici di correlazione prossimi allo 0.90.

	Tutte le piante	Piante <40 grammi	Piante >40 grammi
Metodo distruttivo	0,97	0,94	0,90
Imaging 2D colore top view	0,76	0,90	0,08
Imaging 2D distanza top view	0,77	0,89	0,11
Imaging 2D colore+distanza top view	0,74	0,89	0,08
Imaging 2D laterale	0,93	0,88	0,79
Volume 3D ottenuto con la triangolazione, top view	0,78	0,77	0,31
Volume 3D ottenuto con la triangolazione, laterale	0,79	0,81	0,38
Area 3D ottenuta con segmentazione fogliare e triangolazione, top view	0,46	0,57	0,30
Area 3D ottenuta con segmentazione e piano interpolante alle foglie, top view	0,84	0,78	0,34

Tabella 3: Valori di R2 per ogni tipologia di analisi, suddivise per dimensione delle piante

Il comportamento delle tecniche 2D dall'alto, poco affidabili per le piante di grandi dimensioni, è dovuto al fatto che, essendo in grado di calcolare la sola area proiettata dal cespo di lattuga, non tengono conto dello sviluppo verticale delle foglie, ben marcato nelle piante grandi. Le piante piccole, e con poche foglie, sono ben visibili dalla fotocamera e hanno un ridotto sviluppo verticale, la superficie fogliare e quella proiettata sono molto simili, quindi si ottengono correlazioni migliori con la biomassa.

Le analisi 3D dall'alto presentano una maggiore variabilità a seconda della tipologia impiegata. Il calcolo del volume tramite triangolazione e la stima

dell'area mediante la proiezione dei punti sul piano interpolante risultano migliori rispetto alla terza tipologia (calcolo della superficie fogliare mediante triangolazione) la quale ha un R^2 di 0.46 rispetto a 0.78 e 0.84 degli altri due metodi. Questo può essere dovuto al fatto che nel caso di una errata segmentazione fogliare si ottengono aree molto sovradimensionate. Il metodo migliore è risultato essere quello che si basa sulla proiezione dei punti su di un piano interpolante, anche in questo caso vi possono essere errori di segmentazione, ma pesano in minor misura poiché l'immagine è analizzata in due dimensioni e si riescono a definire con accuratezza i bordi del cluster e quindi il calcolo dell'area.

Il principale sviluppo apportato dalle tecniche 3D è quello di poter ottenere stime leggermente migliori per le piante di grandi dimensioni, infatti si passa dai valori prossimi allo zero per l'imaging 2D, a valori superiori a 0.3 per il 3D. Lo studio e l'implementazione di parametri più adatti per la segmentazione fogliare permetterebbe sicuramente di ottenere indici di correlazione più alti.

In questo lavoro di tesi è stata indagata anche la possibilità di effettuare acquisizioni della pianta lateralmente e da diverse angolazioni, seppur di difficile impiego in condizioni di campo. Per quanto riguarda l'imaging 2D la visione laterale è risultata notevolmente migliore delle corrispondenti tecniche top view raggiungendo indici di correlazione di 0.9; questo fatto è dovuto alla visuale più ampia che si ha sulle foglie, inoltre la rotazione della pianta e la visione da 20 diverse angolature permette di ottenere un valore medio più pulito da eventuali errori dovuti alla sovrapposizione fogliare. L'analisi 3D laterale, basata sul calcolo del volume, presenta risultati simili a quelli ottenuti con l'approccio top view.

Concludendo si può affermare che le tecniche di imaging 3D sono in grado di apportare miglioramenti nella stima della superficie fogliare delle piante di grandi dimensioni, grazie alla loro capacità di ottenere una misura reale delle porzioni di foglie visibili; tuttavia sono indispensabili ulteriori studi per migliorare le tecniche di imaging 3D i cui difetti sono dovuti principalmente a errori dati dalla loro recente introduzione e primitiva conoscenza dei dispositivi e delle tecniche di analisi.

5. CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi si è indagata la possibilità di impiegare tecnologie di imaging tridimensionale nel settore orticolo, il quale risulta essere caratterizzato, nel nostro Paese, da un elevato dinamismo e interesse particolare per l'innovazione tecnologica. È stato scelto di utilizzare strumentazione sensoristica a basso costo, poiché di più facile introduzione in campo agricolo, visti i limitati margini di guadagno che caratterizzano il settore e la necessità di mantenere basse le spese per i mezzi tecnici. Si è optato per impiegare il dispositivo *Microsoft Kinect V2* poiché permette di ottenere immagini 3D a colori grazie alla presenza di due telecamere: una RGB, per scattare fotografie a colori, e una a tempo di volo, per ottenere le distanze dei punti; la fusione delle due acquisizioni, fatte contemporaneamente, ha permesso di ottenere una point-cloud a colori per l'analisi 3D. L'insalata è la più importante coltivazione per il settore della IV gamma, per questo motivo si è scelto di utilizzare per questo studio piante di Lattuga Romana; questa specie inoltre è di facile coltivazione e ha permesso di ottenere lotti numerosi e omogenei per le sperimentazioni.

Questo lavoro ha confermato, come atteso, la netta correlazione positiva che lega biomassa e superficie fogliare misurate mediante raccolta distruttiva, che si conferma per l'analisi con tecniche di imaging 2D per piante di piccole dimensioni. Per le piante di grandi dimensioni, dove l'imaging 2D è molto deficitario a causa della sovrapposizione delle foglie e del loro marcato sviluppo verticale, risultati promettenti si hanno dalle tecnologie di imaging 3D; infatti si hanno accenni di correlazione, seppur contenuti, tra la stima del volume o dell'area fogliare e la biomassa reale misurata (R^2 prossimo a 0,4). Vi sono in bibliografia pochi studi pionieri riguardanti l'utilizzo di sensori 3D su piante erbacee e arboree, per questo

motivo l'elaborazione dai dati è risultata piuttosto complessa. Seppur la ricostruzione di forme tridimensionali che approssimino la superficie fogliare è stata molto difficile, data l'elevata variabilità geometrica che hanno le foglie di lattuga, è promettente il buon livello di segmentazione del cespo che si è riusciti ad ottenere basandosi sulle caratteristiche geometriche di levigatezza delle foglie. Sicuramente, per ottenere migliori stime della superficie fogliare, è necessario lavorare sulle tecniche di segmentazione, infatti il principale limite nelle analisi 3D è proprio la presenza di errori nel calcolo dell'area dovuti a difetti nell'individuazione dei cluster corrispondenti alle foglie.

L'impiego di un sensore a basso costo, quale è il dispositivo Microsoft Kinect V2, non ha dato particolari problemi in fase di analisi poiché, tramite le funzioni di aggiustamento, è stato possibile eliminare il rumore dato dai punti fuori posto nella point-cloud. È da evidenziare la grande potenzialità data dalla possibilità di ottenere immagini 3D a colori e quindi di poter unire l'analisi geometrica a quella colorimetrica.

Numerosi sono gli sviluppi futuri che possono arricchire le capacità delle tecnologie di imaging 3D, come per esempio la ricostruzione delle porzioni di foglie di lattuga non visibili, che permetterebbe di ottenere una stima della superficie fogliare molto vicina a quella reale. Durante questo studio sono state anche condotte piccole prove in campo aperto, su vigneto e meletto, per valutare se il dispositivo, che utilizza raggi infrarossi, non fosse disturbato dalla luce solare e per provare a individuare i frutti sulle piante; si sono ottenuti dei primi risultati che fanno ben sperare.

In conclusione si può dire che, da questo studio, emergono grandi e promettenti potenzialità degli approcci 3D per lo studio della dinamica di crescita delle piante, applicabili probabilmente anche in campo aperto, con numerose applicazioni possibili nel settore dell'agricoltura di precisione. È da sottolineare comunque la necessità di approfondire i metodi di elaborazione dei dati, vista la carenza di studi dovuta all'introduzione molto recente di queste tipologie di strumentazione.

6. BIBLIOGRAFIA

Azzari, G., Goulden, M. L., and Rusu, R. B. (2013). *Rapid characterization of vegetation structure with a Microsoft Kinect sensor*. *Sensors* 13, 2384-2398.

Biskup B, Scharr H, Schurr U, Rascher U. 2007. *A stereo imaging system for measuring structural parameters of plant canopies*. *Plant Cell Environ.* 30:1299-308.

Bock C.H., Poole G.H., Parker P.E., Gottwald T.R., (2010). *Plant disease severity estimated visually, by digital photography and image analysis, and by hyperspectral imaging*. *Crit. Rev. Plant Sci.* 29:59-107

Bulgari R., Morgutti S., Cocetta G., Negrini N., Farris S., Calcante A., Spinardi A., Ferrari E., Mignani I., Oberti R. and Ferrante A., *Evaluation of Borage extracts as potential biostimulant using a phenomic, Agronomic, Physiological, and Biochemical Approach*. *Frontiers in Plant Science*, Vol 8, Article 935.

Bumgarner N., Miller W., Kleinhenz M., (2012). *Digital image analysis to supplement direct measures of lettuce biomass*. *Horttechnology* 22, 547-555.

Campillo C., Prieto M. H., Daza C., Monino M. J. and Garcia M. I. (2008). *Using digital images to characterize canopy coverage and light interception in a processing tomato crop*. *Hortscience* 43(6):1780-1786.

Casadesus J, Kaya Y, Bort J, Nachit MM, Araus JL, (2007). *Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments*. Ann. Appl. Biol. 150:227-36.

Colelli G., Elia A. (2009). *I prodotti ortofrutticoli di IV gamma: aspetti fisiologici e tecnologici*. Italus Hortus 16 (1), 2009: 55-78.

Confalonieri, R., Foi, M., Casa, R., Aquaro, S., Tona, E., Peterle, M., Boldini, A., De Carli, G., Ferrari, A., Finotto, G., Guarneri, T., Manzoni, V., Movedi, E., Nisoli, A., Paleari, L., Radici, I., Suardi, M., Veronesi, D., Bregaglio, S., Cappelli, G., Chiodini, M.E., Dominoni, P., Francone, C., Frasso, N., Stella, T., Acutis, M., (2013). *Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods*. Computers and Electronics in Agriculture, 96, 67-74

D.G. Agricoltura Regione Lombardia (2017). *Sistemi di produzione integrata nelle filiere agroalimentari*. Bollettino ufficiale Regione Lombardia.

Fiorani, F., and Schurr, U. (2013). *Future scenarios for plant phenotyping*. Annu. Rev. Plant Biol. 64, 267-291.

Furbank RT, Tester M. (2011). *Phenomics technologies to relieve the phenotyping bottleneck*. Trends Plant Sci. 16:635-44.

Giacomelli, G. A., Ling, P. P., and Kole, J. (1998). *Determining nutrient stress in lettuce plants with machine vision technology*. Horttechnology 8, 361-365.

Golbach, F., Kootstra, G., Damjanovic, S., Otten, G., and van de Zedde, R. (2016). *Validation of plant part measurements using a 3D reconstruction method suitable for high-throughput seedling phenotyping*. Machine Vision and Applications 27, 663-680.

Gonzalez R. D., Woods R. E., Eddins S. L. (2009). *Digital image processing using MATLAB*. Gatesmark Publishing, USA.

Gorbe E., Calatayud A. (2012). *Applications of chlorophyll fluorescence imaging technique in horticultural research: a review*. Sci. Hortic. 138:24-35.

Guo j., Xu L., (2017) *Automatic Segmentation for Plant Leaves via Multiview Stereo Reconstruction*. Mathematical Problems in Engineering.

Jones HG, Serraj R, Loveys BR, Xiong L, Wheaton A, Price AH. (2009). *Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field*. Funct. Plant Biol. 36:978-89.

Jung, D. H., Park, S. H., Han, H. X., and Kim, H. J. (2015). *Image processing methods for measurement of lettuce fresh weight*. J. Biosyst. Eng. 40, 89-93.

Kim, M. H., Choi, E. G., Baek, G. Y., Kim, C. H., Jink, B. O., Moon, B. E., et al. (2013). *Lettuce growth prediction in plant factory using image processing technology*. in Proceedings of 2013 IFAC BioRobotics Conference, Sakai.

Lachat E., Macher H., Mittet M.-A., Landes T., Grussenmeyer P., (2015). *First experiences with kinect v2 sensor for close range 3d modelling*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W4, 2015 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 25-27 February 2015, Avila, Spain.

Nguyen T.T., Slaughter D.C., Max N., Maloof J.N., Sinha N. (2015). *Structured light-based 3D reconstruction system for plants*. Sensors 15, 18587-18612.

Otsu N. (1979). *A threshold selection method from gray-level histograms*. Transactions on systems, man, and cybernetics, vol. smc-9.

Paproki A, Sirault X, Berry S, Furbank R, Fripp J. (2012). *A novel mesh processing based technique for 3D plant analysis*. BMC Plant Biol. 12:63.

Pillai I. (2014). *Introduzione ai motion controllers ed al sensore Kinect*. Gami, Università degli Studi di Cagliari.

Pretolani R., Pieri R. (2017) *Il sistema agro-alimentare della Lombardia - 2017*. Franco Angeli, Milano.

Rabbani T., van den Heuvel F.A., Vosselman G. (2006) *Segmentation of point clouds using smoothness constraint*. IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25-27 September 2006.

Richtsfeld A., Mörwald T., Prankl J., Zillich M., Vincze M. (2014). *Learning of perceptual grouping for object segmentation on RGB-D data*. J. Vis. Commun. Image R. 25, 64-73.

Rusu R.B., Marton Z.C., Blodow N., Dolha M., Beetz M. (2008). *Towards 3D Point-cloud based object maps for household environments*. Robotics and Autonomous Systems 56, 927-941.

Sandmann M., Graefe J., Feller C. (2013). *Optical methods for the non-destructive estimation of leaf area index in kohlrabi and lettuce*. Scientia Horticulturae 156, 113-120.

Smith A.R., (1978). *Color Gamut Transform Pairs*. SIGGRAPH 78 Conference Proceedings, 12-19.

Solomon C., Breckon T., (2011). *Fundamentals of digital image processing*. Wiley-Blackwell, UK.

Tackenberg O. (2007). *A new method for non-destructive measurement of biomass, growth rates, vertical biomass distribution and dry matter content based on digital image analysis*. Annals of Botany. 99, 777-783.

Torr S., Zissermann A. (1999). *MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry*. Computer Vision and Image Understanding 78, 138-156.

UN, (2015). *Agenda 2030-Obiettivi per lo sviluppo sostenibile*.

UNAPROA (2016), Rapporto sulla competitività del settore ortofrutticolo nazionale.

Van der Heijden G, Song Y, Horgan G, Polder G, Dieleman A, et al. 2012. *SPICY: towards automated phenotyping of large pepper plants in the greenhouse*. *Funct. Plant Biol.* 39, 870-77.

Weight C, Parnham D, Waite R. 2008. *LeafAnalyser: a computational method for rapid and large-scale analyses of leaf shape variation*. *Plant J.* 53:578-86.

Zanuttigh, P., Marin, G., Dal Mutto, C., Dominio, F., Minto, L., Cortelazzo, G.M. (2016) *Time-of-flight and Structured Light Depth Cameras*. Springer International Publishing, Switzerland.

Zude M, (ed. 2009). *Optical Monitoring of Fresh and Processed Agricultural Crops*. Boca Raton, FL: CRC. 457 pp.

SITOGRAFIA

www.mathworks.com

www.microsoft.com

www.pointclouds.org

www.regione.lombardia.it

7.APPENDICE

Tabella A: valori di massa ed area fogliare misurati mediante raccolta distruttiva.

Data misurazioni	ID PIANTA	Data Rinvaso	Massa (g)	Area Fogliare (cm2)
2-feb-17	P2	29-dic-16	6,9	238,6
2-feb-17	P3	29-dic-16	8,6	280,8
2-feb-17	P5	5-gen-17	4,8	171,6
2-feb-17	P6	5-gen-17	10	314,1
8-feb-17	P7	29-dic-16	18,9	597,9
8-feb-17	P8	29-dic-16	12,8	424,3
8-feb-17	P9	29-dic-16	13,3	399
14-feb-17	P10	5-gen-17	13,15	450,5
14-feb-17	P11	5-gen-17	12,17	406,6
14-feb-17	P12	5-gen-17	10,72	366,5
14-feb-17	P13	29-dic-16	26,13	786,2
22-feb-17	P14	5-gen-17	24,7	772
22-feb-17	P15	5-gen-17	59,8	1588,7
22-feb-17	P16	5-gen-17	44,75	1274
22-feb-17	P17	5-gen-17	33,1	968,3
24-feb-17	P18	5-gen-17	16,32	463,5
24-feb-17	P19	5-gen-17	32,72	990,4
24-feb-17	P20	10-gen-17	19,6	691,1
24-feb-17	P21	5-gen-17	26,11	919,3
24-feb-17	P22	5-gen-17	11,6	356,2
24-feb-17	P23	5-gen-17	22,68	784,3
24-feb-17	P24	5-gen-17	29,57	953,1
9-mar-17	P25	5-gen-17	58,4	1636,7
9-mar-17	P26	5-gen-17	81,2	2282,1
9-mar-17	P27	5-gen-17	9,4	337,8
9-mar-17	P28	5-gen-17	73,4	2170,6
9-mar-17	P29	5-gen-17	74,3	2062,6
9-mar-17	P30	5-gen-17	55,6	1660,3
9-mar-17	P31	5-gen-17	81,8	2486,2
9-mar-17	P32	5-gen-17	44	1257
9-mar-17	P33	5-gen-17	48,9	1596,1
9-mar-17	P34	5-gen-17	55,6	1689,9
20-mar-17	P35	29-gen-17	46,8	1302,4

20-mar-17	P36	30-gen-17	48,9	1365,5
20-mar-17	P37	30-gen-17	40,4	1060,9
20-mar-17	P38	30-gen-17	40,9	1181,7
20-mar-17	P39	30-gen-17	41,5	1173,6
21-mar-17	P40	30-gen-17	88,8	2407,4
21-mar-17	P41	30-gen-17	106,2	2613
28-apr-17	P42	30-gen-17	76,7	2001,1
28-apr-17	P43	30-gen-17	82,4	2285,6
28-apr-17	P44	30-gen-17	68,9	1871,4
28-apr-17	P45	30-gen-17	72,5	1737,6
28-apr-17	P46	30-gen-17	55,5	1516
28-apr-17	P47	30-gen-17	67,2	1687,4
8-mag-17	P48	3-mag-17	18,4	515,6
8-mag-17	P49	27-mar-17	72,2	1630,3
8-mag-17	P50	3-mag-17	21,8	719
8-mag-17	P51	3-mag-17	10,5	358
8-mag-17	P52	3-mag-17	17,4	544,5
8-mag-17	P53	3-mag-17	9,6	362,1
8-mag-17	P54	3-mag-17	13,4	439,2
8-mag-17	P55	3-mag-17	10,5	366,5
8-mag-17	P56	3-mag-17	13,7	437,1
8-mag-17	P57	3-mag-17	13	463
8-mag-17	P58	27-mar-17	71,7	1636,4
8-mag-17	P59	27-mar-17	69,5	1647,2
8-mag-17	P60	27-mar-17	95,9	2534,8
8-mag-17	P61	27-mar-17	74,6	2081,7
1-giu-17	P62	16-mag-17	2	69,9
1-giu-17	P63	16-mag-17	2,6	101,9
1-giu-17	P64	16-mag-17	3,7	125,4
13-giu-17	P65	16-mag-17	9,6	358,6
13-giu-17	P66	16-mag-17	9,5	359
13-giu-17	P67	16-mag-17	13,5	515,2
13-giu-17	P68	16-mag-17	5,3	210,4
22-giu-17	P70	16-mag-17	12	433,4
22-giu-17	P71	16-mag-17	20,4	734,6
20-lug-17	P72	20-giu-17	26,5	833
20-lug-17	P80	20-giu-17	26,6	745,4
26-lug-17	P73	20-giu-17	34,2	1143,7
26-lug-17	P75	20-giu-17	30,2	847,7
26-lug-17	P76	20-giu-17	37,2	1084,7
26-lug-17	P77	20-giu-17	40	902,2
26-lug-17	P78	20-giu-17	41,1	1224,2
26-lug-17	P81	20-giu-17	48,9	1099,9

26-lug-17	P82	20-giu-17	41,6	1035,7
26-lug-17	P83	20-giu-17	36,2	1057,7
26-lug-17	P84	20-giu-17	34,7	816

TABELLA B: risultati delle analisi 2D

Data misurazioni	ID PIANTA	Massa (g)	Area Fogliare (cm ²)	Area Top-view solo colore	Area Top-view solo distanza	Area top-view colore+distanza	Analisi ROT colore+distanza	Deviazione Standard
2-feb-17	P2	6,9	238,6	14,79	24,70	13,80	13,46	2,01
2-feb-17	P3	8,6	280,8	21,72	26,53	17,44	14,66	1,92
2-feb-17	P5	4,8	171,6	12,67	12,22	8,22	10,32	2,34
2-feb-17	P6	10	314,1	17,28	28,18	14,81	14,93	3,76
8-feb-17	P7	18,9	597,9	32,83	37,75	28,30	24,17	3,59
8-feb-17	P8	12,8	424,3	25,98	33,48	22,52	18,50	3,70
8-feb-17	P9	13,3	399	26,12	34,28	25,04	19,08	2,45
14-feb-17	P10	13,15	450,5	23,40	26,50	21,10	21,90	3,06
14-feb-17	P11	12,17	406,6	25,25	28,08	21,31	21,61	2,09
14-feb-17	P12	10,72	366,5	16,77	24,64	15,95	18,12	3,49
14-feb-17	P13	26,13	786,2	45,47	59,07	43,55	33,59	4,24
22-feb-17	P14	24,7	772	60,02	59,87	51,63	29,52	6,04
22-feb-17	P15	59,8	1588,7	92,80	95,87	79,64	55,16	5,79
22-feb-17	P16	44,75	1274	85,48	87,11	72,14	43,30	4,03
22-feb-17	P17	33,1	968,3	66,58	60,63	49,28	43,09	3,92
24-feb-17	P18	16,32	463,5	23,66	32,73	22,98	22,30	2,24
24-feb-17	P19	32,72	990,4	51,46	63,85	48,39	37,81	5,09
24-feb-17	P20	19,6	691,1	39,17	36,18	27,52	30,86	5,35
24-feb-17	P21	26,11	919,3	51,97	69,09	50,42	34,20	3,69
24-feb-17	P22	11,6	356,2	25,44	28,70	21,95	17,19	2,96
24-feb-17	P23	22,68	784,3	38,89	43,78	33,94	31,55	5,32
24-feb-17	P24	29,57	953,1	54,79	61,72	47,28	36,09	2,96
9-mar-17	P25	58,4	1636,7	78,73	94,14	73,68	51,66	2,79
9-mar-17	P26	81,2	2282,1	102,89	121,91	98,43	62,68	3,22
9-mar-17	P27	9,4	337,8	25,30	30,89	23,42	13,98	1,58
9-mar-17	P28	73,4	2170,6	94,94	111,71	90,27	60,51	2,30
9-mar-17	P29	74,3	2062,6	104,95	127,43	102,37	60,15	4,14
9-mar-17	P30	55,6	1660,3	81,46	91,44	72,87	58,89	9,01
9-mar-17	P31	81,8	2486,2	110,83	127,85	108,40	61,85	5,49
9-mar-17	P32	44	1257	82,91	92,17	76,86	42,37	3,34
9-mar-17	P33	48,9	1596,1	66,87	78,35	62,99	49,25	4,01

9-mar-17	P34	55,6	1689,9	78,47	89,84	73,89	47,38	3,45
20-mar-17	P35	46,8	1302,4	94,50	100,32	84,57	41,66	4,75
20-mar-17	P36	48,9	1365,5	87,83	96,39	83,52	40,98	4,17
20-mar-17	P37	40,4	1060,9	81,76	97,65	77,12	38,16	3,69
20-mar-17	P38	40,9	1181,7	85,49	99,14	78,62	35,52	2,73
20-mar-17	P39	41,5	1173,6	85,94	88,58	80,14	40,50	6,45
21-mar-17	P40	88,8	2407,4	98,54	112,34	93,10	65,04	3,84
21-mar-17	P41	106,2	2613	82,15	102,06	78,43	76,85	6,55
28-apr-17	P42	76,7	2001,1	76,17	93,57	68,51	65,03	10,22
28-apr-17	P43	82,4	2285,6	106,84	111,63	97,75	70,08	3,41
28-apr-17	P44	68,9	1871,4	100,55	104,09	89,33	55,16	4,19
28-apr-17	P45	72,5	1737,6	85,74	94,38	74,23	54,81	5,31
28-apr-17	P46	55,5	1516	70,65	88,69	66,98	45,18	7,10
28-apr-17	P47	67,2	1687,4	94,88	96,83	82,72	57,31	5,03
8-mag-17	P48	18,4	515,6	27,26	32,85	25,38	17,29	1,26
8-mag-17	P49	72,2	1630,3	92,16	97,51	76,07	51,33	4,77
8-mag-17	P50	21,8	719	44,45	45,22	38,35	21,79	2,16
8-mag-17	P51	10,5	358	22,71	25,62	19,78	13,58	0,97
8-mag-17	P52	17,4	544,5	36,16	38,26	34,87	17,06	1,56
8-mag-17	P53	9,6	362,1	23,11	31,94	22,87	13,56	1,39
8-mag-17	P54	13,4	439,2	29,02	29,57	25,70	15,13	1,08
8-mag-17	P55	10,5	366,5	28,04	29,77	24,39	13,29	1,37
8-mag-17	P56	13,7	437,1	32,48	35,91	30,65	15,73	1,73
8-mag-17	P57	13	463	27,91	27,80	21,04	19,12	2,13
8-mag-17	P58	71,7	1636,4	69,15	59,46	52,44	49,20	13,84
8-mag-17	P59	69,5	1647,2	54,46	55,45	44,54	44,07	4,97
8-mag-17	P60	95,9	2534,8	80,25	85,98	72,12	66,64	7,74
8-mag-17	P61	74,6	2081,7	60,06	69,81	53,13	57,28	5,30
1-giu-17	P62	2	69,9	10,46	17,10	5,26	5,25	0,90
1-giu-17	P63	2,6	101,9	11,22	17,90	7,40	6,76	0,49
1-giu-17	P64	3,7	125,4	21,42	20,17	8,00	9,15	1,99
13-giu-17	P65	9,6	358,6	30,99	33,15	25,60	17,85	1,59
13-giu-17	P66	9,5	359	21,09	30,57	18,27	18,56	4,27
13-giu-17	P67	13,5	515,2	45,16	48,56	36,10	23,40	3,09
13-giu-17	P68	5,3	210,4	20,64	31,12	19,98	10,44	2,32
22-giu-17	P70	12	433,4	26,92	27,24	19,58	22,05	4,18
22-giu-17	P71	20,4	734,6	47,39	50,26	40,55	30,86	4,77
20-lug-17	P72	26,5	833	44,51	44,51	37,33	35,75	5,38
20-lug-17	P80	26,6	745,4	67,96	67,96	60,39	25,87	5,23
26-lug-17	P73	34,2	1143,7	73,95	73,95	69,57	38,70	6,11
26-lug-17	P75	30,2	847,7	74,79	74,79	69,41	36,17	4,28
26-lug-17	P76	37,2	1084,7	74,06	74,06	77,69	38,16	4,08
26-lug-17	P77	40	902,2	82,34	82,34	58,83	37,38	8,24

26-lug-17	P78	41,1	1224,2	63,87	63,87	65,98	40,77	3,79
26-lug-17	P81	48,9	1099,9	84,04	84,04	79,28	35,90	6,15
26-lug-17	P82	41,6	1035,7	73,04	73,04	67,52	50,06	14,17
26-lug-17	P83	36,2	1057,7	67,10	67,10	63,74	40,97	8,36
26-lug-17	P84	34,7	816	67,41	67,41	64,17	31,47	5,20

TABELLA B: risultati dell'analisi 3D

Data misurazioni	ID PIANTA	Massa (g)	Area Fogliare (cm ²)	Volume top-view (cm ³)	Volume lateral view (cm ³)
2-feb-17	P2	6,9	238,6	1225	4100
2-feb-17	P3	8,6	280,8	1634	5081
2-feb-17	P5	4,8	171,6	635	3102
2-feb-17	P6	10	314,1	2210	4125
8-feb-17	P7	18,9	597,9	2622	7129
8-feb-17	P8	12,8	424,3	2267	5422
8-feb-17	P9	13,3	399	2999	5503
14-feb-17	P10	13,15	450,5	1451	6316
14-feb-17	P11	12,17	406,6	2618	7848
14-feb-17	P12	10,72	366,5	1339	4483
14-feb-17	P13	26,13	786,2	5037	10024
22-feb-17	P14	24,7	772	6082	8374
22-feb-17	P15	59,8	1588,7	8049	13608
22-feb-17	P16	44,75	1274	5861	11554
22-feb-17	P17	33,1	968,3	5949	14153
24-feb-17	P18	16,32	463,5	3403	7084
24-feb-17	P19	32,72	990,4	7603	11524
24-feb-17	P20	19,6	691,1	3042	8892
24-feb-17	P21	26,11	919,3	5601	9626
24-feb-17	P22	11,6	356,2	3421	5235
24-feb-17	P23	22,68	784,3	3015	9910
24-feb-17	P24	29,57	953,1	5611	11363
9-mar-17	P25	58,4	1636,7	11129	15846
9-mar-17	P26	81,2	2282,1	11804	17202
9-mar-17	P27	9,4	337,8	4477	4606
9-mar-17	P28	73,4	2170,6	8216	15190
9-mar-17	P29	74,3	2062,6	8553	17480
9-mar-17	P30	55,6	1660,3	8175	16336

9-mar-17	P31	81,8	2486,2	9663	21373
9-mar-17	P32	44	1257	12864	13723
9-mar-17	P33	48,9	1596,1	7744	17303
9-mar-17	P34	55,6	1689,9	7330	12546
20-mar-17	P35	46,8	1302,4	7747	12328
20-mar-17	P36	48,9	1365,5	10463	12311
20-mar-17	P37	40,4	1060,9	11041	13583
20-mar-17	P38	40,9	1181,7	9608	9852
20-mar-17	P39	41,5	1173,6	7586	11798
21-mar-17	P40	88,8	2407,4	10311	17603
21-mar-17	P41	106,2	2613	10323	16699
28-apr-17	P42	76,7	2001,1	6724	16013
28-apr-17	P43	82,4	2285,6	13614	17629
28-apr-17	P44	68,9	1871,4	9778	15951
28-apr-17	P45	72,5	1737,6	7974	13111
28-apr-17	P46	55,5	1516	6721	12661
28-apr-17	P47	67,2	1687,4	10626	14114
8-mag-17	P48	18,4	515,6	3258	5175
8-mag-17	P49	72,2	1630,3	12477	13201
8-mag-17	P50	21,8	719	6224	6336
8-mag-17	P51	10,5	358	2425	5291
8-mag-17	P52	17,4	544,5	3556	5411
8-mag-17	P53	9,6	362,1	2791	4055
8-mag-17	P54	13,4	439,2	2578	4761
8-mag-17	P55	10,5	366,5	2205	3962
8-mag-17	P56	13,7	437,1	1981	4922
8-mag-17	P57	13	463	1470	5173
8-mag-17	P58	71,7	1636,4	4766	3097301
8-mag-17	P59	69,5	1647,2	2125	10144
8-mag-17	P60	95,9	2534,8	9675	13847
8-mag-17	P61	74,6	2081,7	6552	13655
1-giu-17	P62	2	69,9	674	3496
1-giu-17	P63	2,6	101,9	819	2827
1-giu-17	P64	3,7	125,4	1485	4968
13-giu-17	P65	9,6	358,6	2385	5965
13-giu-17	P66	9,5	359	2047	6982
13-giu-17	P67	13,5	515,2	3354	8579
13-giu-17	P68	5,3	210,4	3087	5958
22-giu-17	P70	12	433,4	2312	5333
22-giu-17	P71	20,4	734,6	3992	9391
20-lug-17	P72	26,5	833	4712	8635
20-lug-17	P80	26,6	745,4	4015	10867
26-lug-17	P73	34,2	1143,7	8831	9348

26-lug-17	P75	30,2	847,7	9395	12557
26-lug-17	P76	37,2	1084,7	8626	16340
26-lug-17	P77	40	902,2	7612	9130
26-lug-17	P78	41,1	1224,2	4191	7387
26-lug-17	P81	48,9	1099,9	9808	8811
26-lug-17	P82	41,6	1035,7	5509	9758
26-lug-17	P83	36,2	1057,7	5195	11049
26-lug-17	P84	34,7	816	9297	9671

Un sentito ringraziamento...

al professor Roberto Oberti, per avermi permesso di prendere parte a questo progetto, per aver condiviso con me il suo sapere e avermi trasmesso l'entusiasmo della ricerca e della scoperta.

al dottor Emanuele Tona, per questi mesi di intensa collaborazione e per i numerosi consigli, di cui ho fatto tesoro.

Un grazie di cuore...

A mia mamma e mio papà, per avermi supportato e sopportato in questi anni di studio e per avermi insegnato l'importanza di mettere coraggio e impegno in ogni sfida della vita.

A Cristina e Michele, i miei fratelli, e a Sergio e Valentina, per essere un importante esempio e modello.

Ai miei nonni e ai miei parenti, che ancora si chiedono perché io abbia studiato tanto per fare il contadino, perché ogni consulenza agronomica richiestami è stata un'occasione per curiosare nell'affascinante mondo della natura.

A Nicola, Alessandra, Maria Teresa e Marta, per gli spensierati anni del Liceo e per le mille avventure vissute insieme.

A Cristina, Federico, Paola e a tutti quelli che hanno affrontato con me la bellissima vita universitaria, per aver rallegtrato le giornate, stemperato le tensioni prima degli esami e aver gioito per ogni piccolo e grande successo.

A Mara, Nicla, Roberto e Vanessa, "Quelli delle olive", per tutti i progetti che con entusiasmo abbiamo realizzato e per quelli che ancora dobbiamo realizzare.

A Federica, per essere stata sempre al mio fianco, con amore, durante questi anni, per avermi consolato nei momenti difficili e per aver gioito con me per ogni piccola soddisfazione, perché con te voglio condividere qualsiasi attimo della mia vita, della nostra vita.