



SISTEMA DI MONITORAGGIO MULTISCALARE

Calibrazione e modellizzazione delle informazioni derivate da Sentinel-2 mediante rilievi a terra e da drone di seconda fase, e implementazione del sistema Web-GIS

Report del progetto “Sviluppo di un Sistema di monitoraggio multiscalare a supporto della pioppicoltura di precisione nella regione Lombardia”

(PRECISIONPOP progetto: E86C18002690002)

Giugno 2021



Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria – Centro di Ricerca Foreste e Legno (CREA-FL)



Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI)

Gruppo di lavoro: Francesco Chianucci, Francesca Giannetti, Clara Tattoni, Achille Giorcelli, Domenico Coaloa, Carlo Bisaglia, Elio Romano, Massimo Brambilla, Giovanni Cabassi, Nicola Puletti, Luca Marchino, Claudio Bidini, Mirko Grotti, Walter Mattioli, Sofia Bajocco, Piermaria Corona, Gherardo Chirici.

Premessa

Il progetto “Sviluppo di un Sistema di monitoraggio multiscalare a supporto della pioppicoltura di precisione nella regione Lombardia” (PRECISIONPOP) si pone l’obiettivo di realizzare un sistema di mappatura continua (*wall-to-wall*) e monitoraggio multiscalare delle superfici pioppicole presenti nella Regione Lombardia tramite l’utilizzo di informazioni derivanti dal telerilevamento. Per tali finalità di mappatura, il progetto prevede in una prima fase la realizzazione di un inventario delle piantagioni di pioppo presenti nel territorio regionale della Lombardia, che rappresenti il dato di verità a terra (*ground truth*) per istruire il sistema semiautomatico di mappatura delle superfici a scala regionale. Nella prima fase del progetto è stato realizzato un inventario delle piantagioni di pioppo presenti nel territorio regionale della Lombardia (Chianucci et al. 2019).

La seconda fase del progetto prevede la calibrazione delle stime derivanti dalle immagini satellitari con misure dendrometrico-strutturali e rilievi con sistemi aerei a pilotaggio remoto (SAPR), realizzati in aree campione. Tali rilievi di seconda fase pertanto forniranno sia il riferimento per calibrare e modellizzare le stime derivanti da Sentinel-2, e fornire un raccordo al sistema multiscalare dato dall’integrazione delle informazioni a terra, aree e satellitari. In questo documento si descrivono le caratteristiche dei rilievi a terra effettuati nella seconda fase, i rilievi ottenuti tramite utilizzo di SAPR, e l’integrazione di tali dati con le informazioni desumibili da Sentinel-2. I risultati ottenuti in questa fase costituiscono la base per sviluppare il sistema di monitoraggio multiscalare che verrà implementato nella piattaforma web-gis di progetto, anch’essa descritta nel presente documento.

Materiali e metodi

L’area di interesse è costituita da alcune aree coltivate a pioppo dislocate nella Regione Lombardia (Figura 1). Le aree campione in cui sono stati condotti i rilievi a terra di seconda fase sono state individuate in tre siti, dislocati a Pomponesco (MN), Boretto (PV) e Torre d’Oglio (MN). In questi siti, sono state individuate un totale di 57 aree campione di dimensione 0.25 ha e forma quadrata, scelte tra popolamenti di pioppo di età variabile dai 4 e i 12 anni, che rappresentano il target delle aree mappate nella precedente fase di progetto. Le aree di campionamento sono state scelte nelle province a maggior coltivazione di pioppo, in modo che fossero rappresentative delle piantagioni della Regione Lombardia.

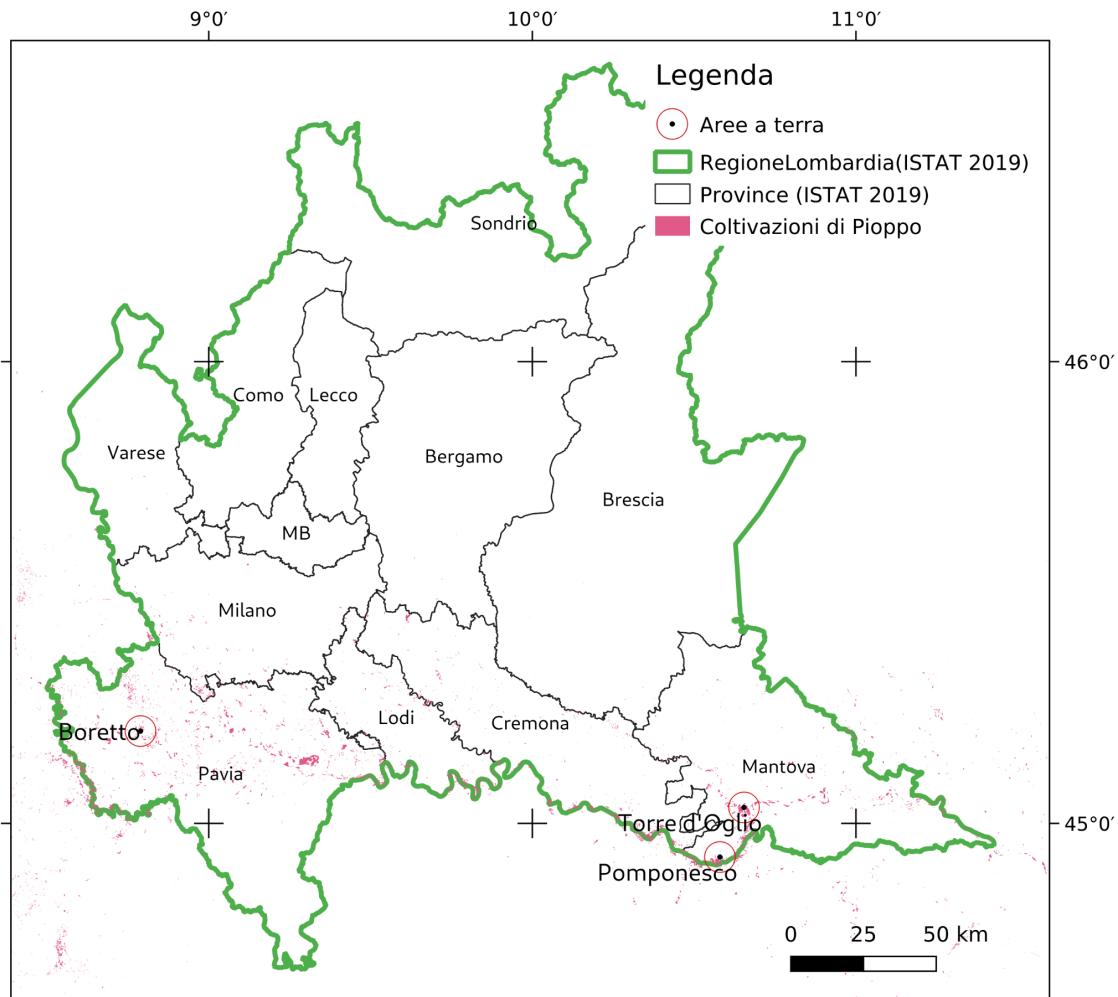


Figura 1.
Dislocazione dei siti dove sono stati effettuati i rilievi di seconda fase

Rilievo degli attributi dendrometrico-strutturali

Nei tre siti sono state selezionate un totale di 57 aree campione (di seguito denominate plot), ciascuna di 2500 m² di superficie, in piantagioni di età variabile tra i 4 e i 12 anni (Figura 2). Delle iniziali 57 aree campione previste, 32 in provincia di Pavia e 25 in provincia di Mantova, ne sono state campionate 53, a causa del taglio in uno degli appezzamenti di Boretto. Nel 71% circa delle piantagioni campionate viene coltivato il clone ibrido 'I-214' (*Populus × americana*), il più diffuso e utilizzato in Italia, gli altri cloni campionati comprendono Boccolari (11%), Beauprè (8%) Polargo (5%) e altri (5%). Nelle parcelle campionate, il sesto di impianto varia da 36 m² (6x6 m) a 49 m² (7x7 m).

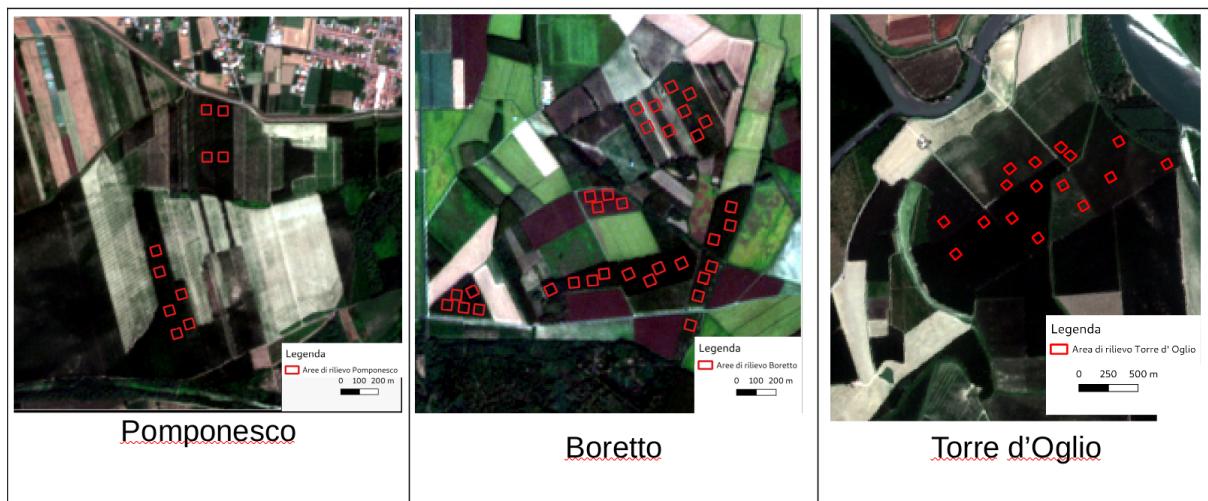


Figura 2.
Dislocazione dei plot di rilievo a terra nelle aree di studio e immagine Sentinel-2 RGB

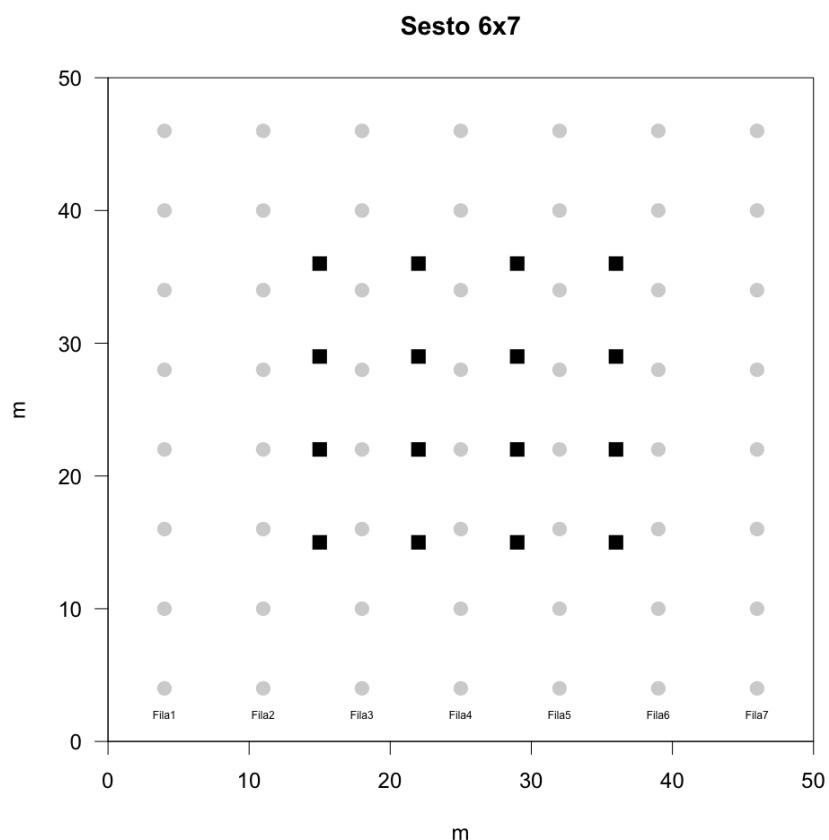


Figura 3.

Esempio di protocollo in area campione di seconda fase in piantagioni con sesto di impianto 6x 7 m. I quadrati neri sono relativi alle fotografie cover (DCP). In grigio le piante disposte secondo il sesto di impianto.

Durante il rilievo a terra sono stati misurati tutti i diametri a petto d'uomo (D) utilizzando un cavalletto forestale. L'altezza dell'albero (H) è stata invece derivata da D utilizzando equazioni allometriche derivate in uno studio indipendente da un numero di alberi modello selezionati e misurati in un sottoinsieme di alberi campionati nelle stesse piantagioni di

Pomponesco (Chianucci et al. 2020). La stima dell'altezza e dei volumi è stata derivata a seconda della classe di diametro dell'albero, secondo le seguenti formule :

$$H = 1.3 + \frac{22.51}{1+231.82 \cdot \exp(-0.264D)}, \text{ per } D \geq 24 \text{ cm} \quad (1a)$$

$$H = 1.3 + \frac{12.49}{1+33.32 \cdot \exp(-0.420D)}, \text{ per } D < 24 \text{ cm} \quad (1b)$$

Analogamente, il volume del fusto (V_{st}) e della chioma (V_{cr}) sono stati derivati per ogni singolo albero da modelli allometrici, separati per classi di diametro, sviluppati nello stesso studio (Chianucci et al. 2020), secondo le seguenti formule:

$$V_{st} = \exp(-7.40)D^{2.02}, \text{ per } D \geq 24 \text{ cm} \quad (2a)$$

$$V_{st} = \exp(-8.13)D^{2.26}, \text{ per } D < 24 \text{ cm} \quad (2b)$$

$$V_{cr} = \exp(-4.10)D^{2.87}, \text{ per } D \geq 24 \text{ cm} \quad (3a)$$

$$V_{cr} = \exp(-0.91)D^{1.90}, \text{ per } D < 24 \text{ cm} \quad (3b)$$

Rilievo degli attributi della copertura

In ciascuna area campione, sono state raccolte 12-20 immagini digitali utilizzando la tecnica *cover photography* (DCP; Figura 4) in una griglia di punti di campionamento, utilizzando una fotocamera Nikon D90 Digital Single-Lens Reflex (DSLR) dotata di Nikkor obiettivo fisso 50 mm 1:1.8 D con un angolo di campo (Field Of View) di circa 30°. Tutte le immagini sono state acquisite ed elaborate utilizzando il protocollo di Chianucci (2020b) a cui si rimanda per dettagli. La procedura comporta l'acquisizione di immagini in formato RAW, al quale vengono applicati delle enfatizzazioni di contrasto prima della conversione a 8 bit, tramite il software "RAW2JPG" (Macfarlane et al. 2014). L'immagine enfatizzata viene poi classificata usando il software DCP 3.15 (Macfarlane et al. 2014). I risultati della classificazione sono immagini binarie di pixel cielo (bianco) e vegetazione (nero). La gap fraction (GF) viene calcolata come la frazione di pixel classificati cielo. Mediante lo stesso software la GF viene ulteriormente distinta in gap tra chiome e gap all'interno delle chiome. Da questi parametri sono stati calcolati la Copertura della Chioma (CC), la Copertura Fogliare (FC) e l'indice di area fogliare (LAI, Leaf Area Index), secondo le formule riportate in Chianucci (2020b). I dati raccolti sono disponibili nel dataset pubblicato da Chianucci 2020a.

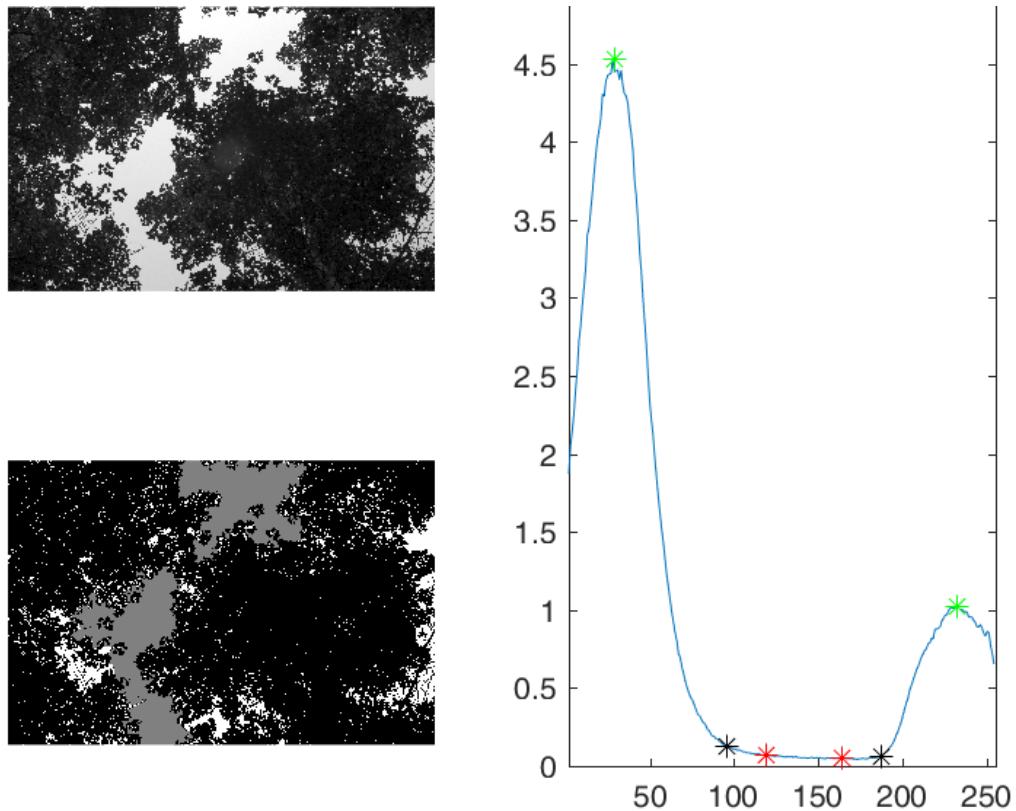


Figura 4.

Esempio di classificazione di una immagine cover usando il software DCP 3.15 (Macfarlane et al. 2014). Nella figura in basso a sinistra, in grigio vengono individuati i gap tra chiome, in bianco i gap all'interno delle chiome, e in nero la vegetazione

Rilievi in aree campione effettuati da drone e satellite

Rilievo da drone (UAV)

I voli sono stati effettuati con un drone multi-rotore ottacottero (8 motori coassiali) modello STC_X8_U5 del costruttore Sport Turf Consulting, con Targa ITA-3050130, autorizzato ENAC per operazioni critiche, dotato di paracadute, doppio GPS e capacità di trasportare un payload fino a 4 kg e con un'autonomia massima di volo di 25' (tale valore varia con il payload e il tipo di batteria utilizzato).

La fotocamera utilizzata per i rilievi è una multispettrale a cinque bande Micasense RedEdge 3 con risoluzione di 1280 x 960 pixels (12-bit RAW). Le bande spettrali acquisite sono riportate nella Tabella 1.

Le immagini sono state acquisite ad una altitudine di circa 120 metri impostando una sovrapposizione dei fotogrammi dell'85% ai lati e lungo la linea di volo. La precisione del posizionamento delle immagini è stato migliorata utilizzando una serie di punti di controllo a terra (GCP) acquisiti tramite stazione rover GNSS RTK multi-frequenza collegato con protocollo NTRIP alla rete SPIN3 GNSS della regione Lombardia.

Tabella 1. Caratteristiche delle bande rilevate dal Drone

Numero Banda	Nome Banda	Lunghezza d'onda centrale (nm)	Aampiezza banda FWHM (nm)
1	Blu	475	20
2	Verde	560	20
3	Rosso	668	10
4	IR vicino (NIR)	840	40
5	Red Edge	717	10

Tramite il software Pix4D è stato infine ottenuta una ortoimmagine dalle immagini acquisite seguendo una procedura standard di tipo fotogrammetrico. Tale procedura prevede la co-registrazione delle immagini tramite algoritmi di *image matching*; tramite l'individuazione di punti di omologhi (*tie points*) è possibile ricostruire l'orientamento dei fotogrammi e la creazione dei modelli digitali di superfici (DSM) e del terreno (DTM) da cui si ottiene l'ortomosaico (Figura 5). La risoluzione impostata per la generazione dell'ortoimmagine finale è <10 cm.

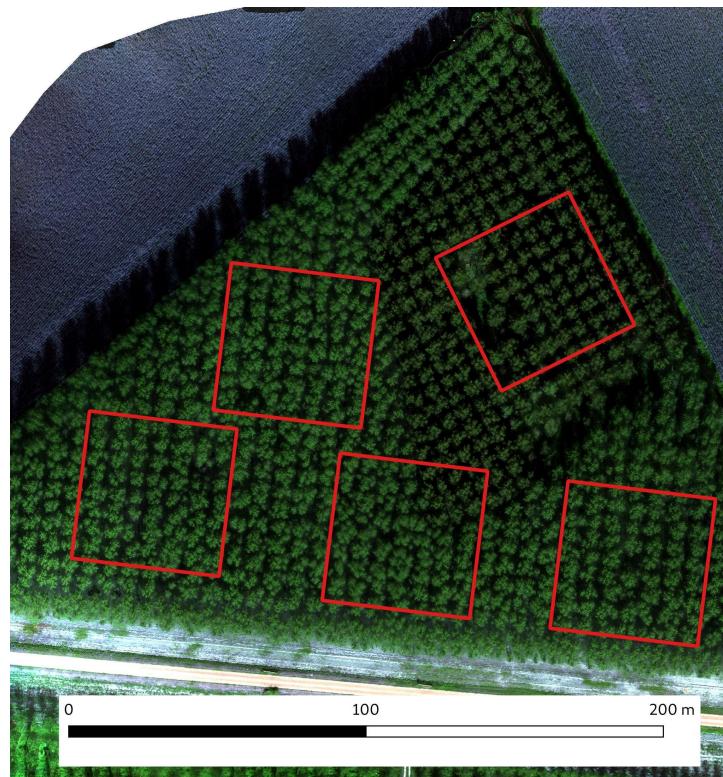


Figura 5.
Esempio di ortomosaico di immagini acquisite da drone per l'area di Boretto

Acquisizione dati da Satellite

I dati satellitari Sentinel 2 relativi alle due aree di studio sono stati scaricati dal portale Copernicus Open Access Hub. Le immagini Sentinel-2 individuate per questo studio sono quelle effettuate nelle date più vicine possibili a quelle relative al campionamento a terra e con la copertura nuvolosa più bassa. Per le analisi sono state utilizzate le bande: 2, 3, 4, 5 e 8 ovvero Blu, Verde, Rosso, Red Edge e NIR (infrarosso vicino).

Analisi dei dati

Tramite i dati misurati a terra sono stati calcolati alcuni parametri dendrometrici-strutturali a scala di plot quali area basimetrica, densità, altezza media e diametro medio. Analogamente per gli attributi della copertura sono stati calcolati i valori medi di copertura fogliare (FC), copertura delle chiome (CC), e LAI medio a scala di area campione.

Questi valori sono stati poi confrontati con gli indici vegetazionali derivati dalle ortoimmagini ottenute da drone e da Sentinel-2. In particolare, sono stati calcolati i seguenti indici vegetazionali: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*).

L'indice NDVI, è utilizzato per evidenziare la presenza di vegetazione viva in un'immagine, si ottiene combinando le bande dell'infrarosso vicino e del rosso secondo la formula:

$$\text{NDVI} = \text{NIR} - \text{red} / \text{NIR} + \text{red} \quad (4a)$$

L'indice GNDVI è simile al precedente ma ritenuto più sensibile alle variazioni di contenuto in clorofilla rispetto a NDVI (Gitelson et al., 1996). Si calcola con la formula:

$$\text{GNDVI} = \text{NIR} - \text{green} / \text{NIR} + \text{green} \quad (4b)$$

I valori delle singole bande e degli indici calcolati per ogni pixel ricadente all'interno dei plot sono stati poi mediati per ogni plot. I dati raccolti con i vari metodi sono stati confrontati tra loro utilizzando il test di associazione/correlazione di Spearman e modelli di regressione lineare utilizzando i software R e R studio.

Risultati

Aree a terra descrizione

La campagna di rilievo a terra ha permesso di misurare i parametri dendrometrici per ogni pianta all'interno dei plot. In Tabella 2 si riportano i risultati medi delle caratteristiche strutturali dei popolamenti secondo classi di età. L'analisi in particolare mostra come all'aumentare dell'età ci sia un incremento dell'area basimetrica e del volume (Figura 6).

Tabella 2.

Attributi dendrometrico-strutturali medi per età misurati nelle 53 aree campione di progetto. Dg: diametro quadratico medio (cm); Hm: altezza media (m); Hd: altezza dominante (m); G_ha: area basimetrica ($m^2 ha^{-1}$); Vst_ha: volume del fusto ($m^3 ha^{-1}$).

Età	Dg	Hm	Hd	G_ha	Vst_ha
4	19.91	13.68	17.41	8.50	70.06
5	23.53	16.64	18.92	9.63	79.83
6	25.32	18.05	22.17	13.72	114.14
7	28.65	20.36	22.16	14.76	123.09
8	33.49	22.43	23.51	25.23	210.75
9	31.96	22.43	23.46	23.08	192.58
10	31.39	21.91	23.44	17.34	144.58
12	34.64	22.29	23.69	25.43	212.60

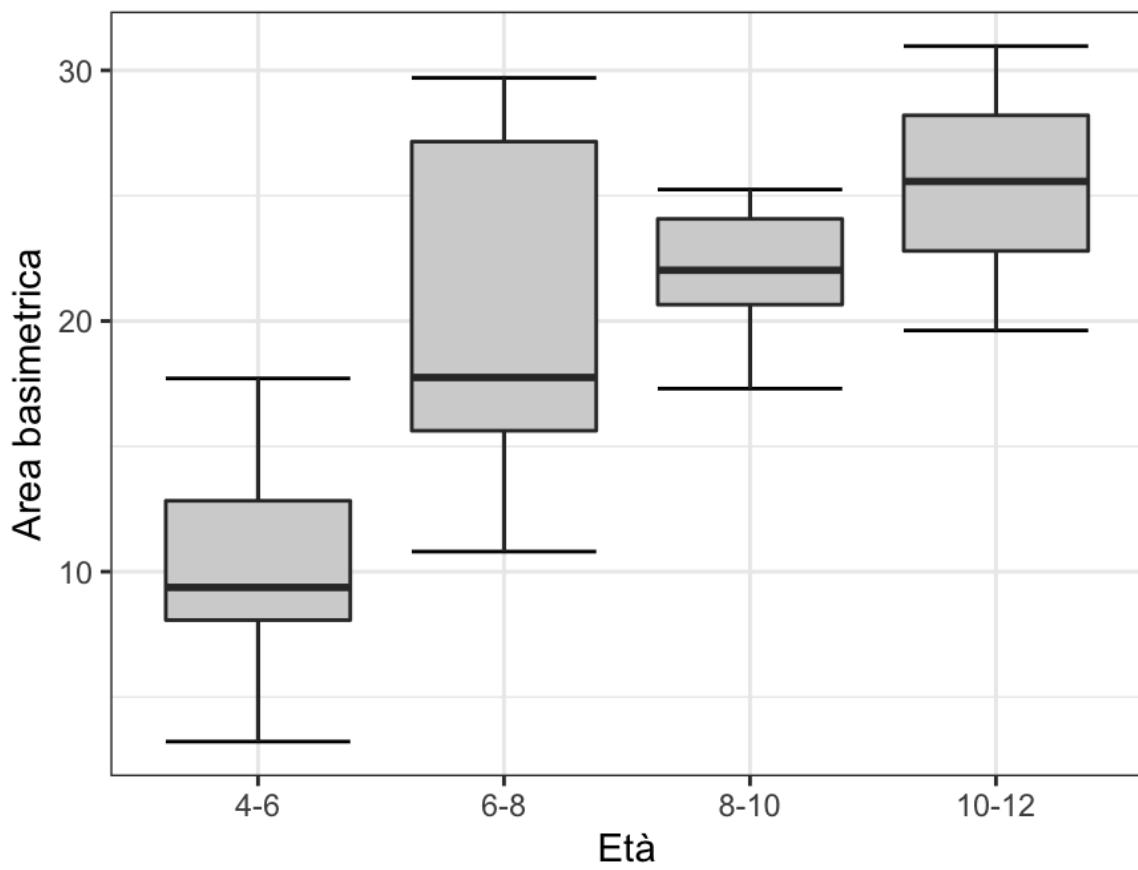


Figura 6.

Distribuzione dell'area basimetrica ($m^2 ha^{-1}$) per classi di età.

Per quanto riguarda gli attributi della copertura, in Tabella 3 si riportano i dati medi ottenuti a livello di area campione, raggruppati secondo classi di età. Anche per tali attributi, l'analisi ha mostrato come l'area fogliare aumenti con l'età dei pioppi (Figura 7).

Tabella 3.

Descrizione degli attributi dendrometrici misurati per età : Copertura Fogliare (FC), Copertura della Chioma (CC), porosità delle chiome (CP), Indice di area Fogliare (LAI)

Età	FC	CC	CP	LAI
4	0.22	0.29	0.25	0.51
5	0.47	0.53	0.13	1.42
6	0.30	0.39	0.24	0.68
7	0.69	0.79	0.13	1.97
8	0.64	0.80	0.21	1.51
9	0.72	0.84	0.14	1.94
10	0.61	0.82	0.25	1.34

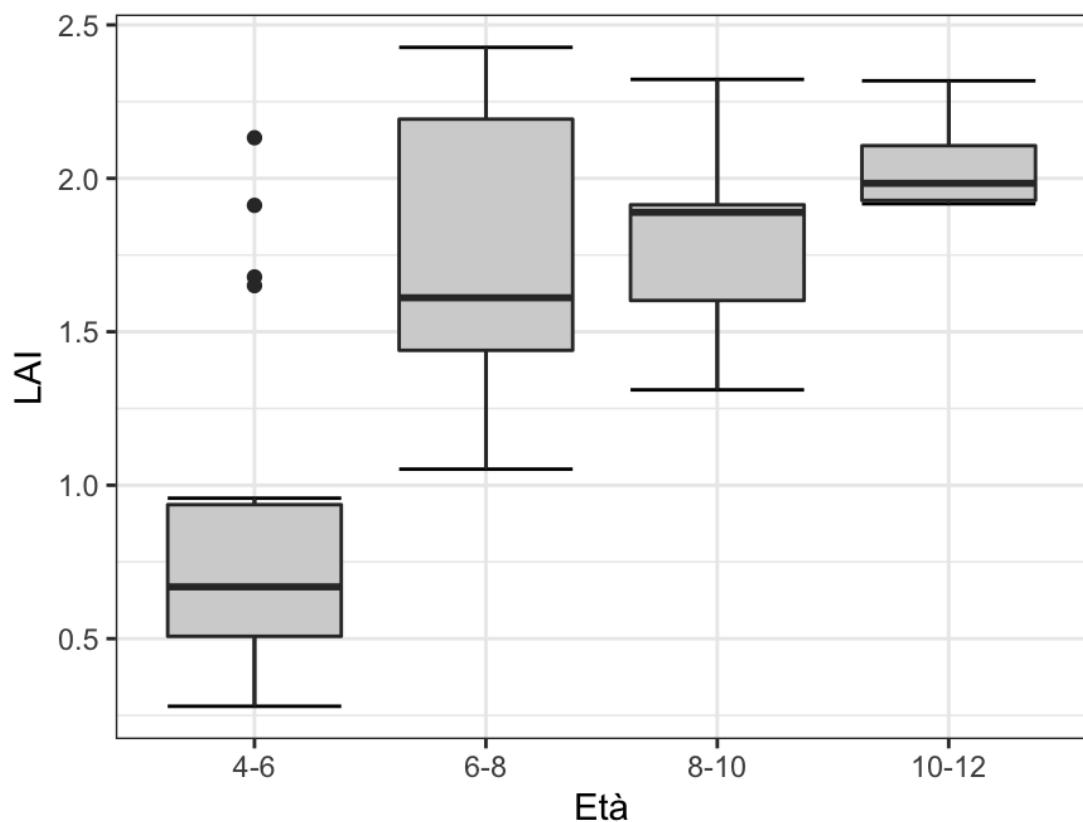


Figura 7.

Distribuzione del LAI per classi di età.

Confronti multiscalari tra immagini

In Figura 8 e 9 vengono mostrati esempi di mappe derivate da Drone e Sentinel-2 nei due siti campionati. La correlazione tra i dati acquisiti con il Drone e con Sentinel-2 è significativa per tutte le bande e per gli indici NDVI e GNDVI.

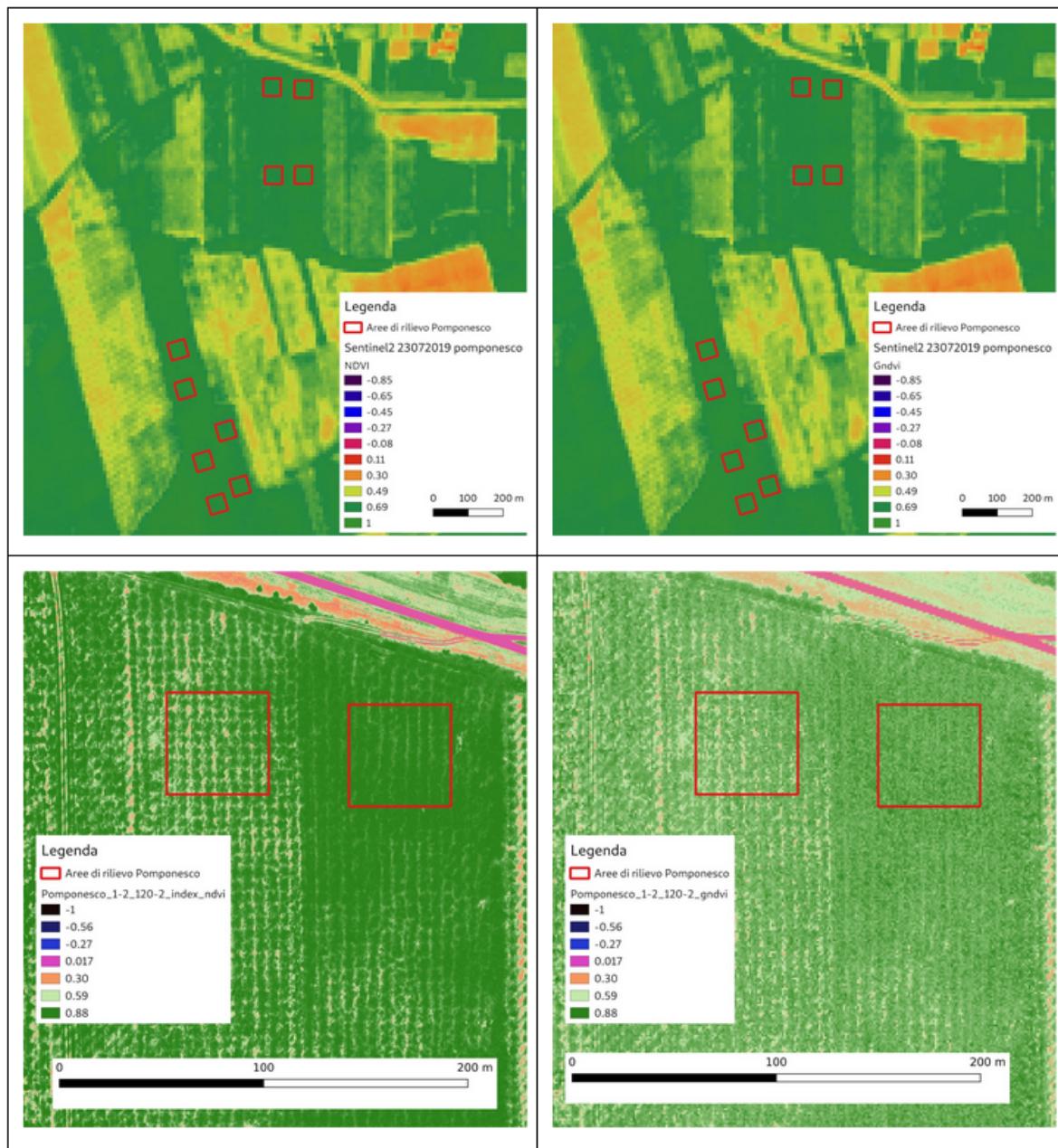


Figura 8.

Indici multiscalari per l'area campione di Pomponesco. In alto a sinistra: GNDVI calcolato da immagine Sentinel-2; in alto a destra: NDVI calcolato da immagine Sentinel-2; in basso a sinistra: GNDVI calcolato da immagine UAV, particolare su due plot; in basso a destra: NDVI calcolato da immagine UAV, particolare su due plot.

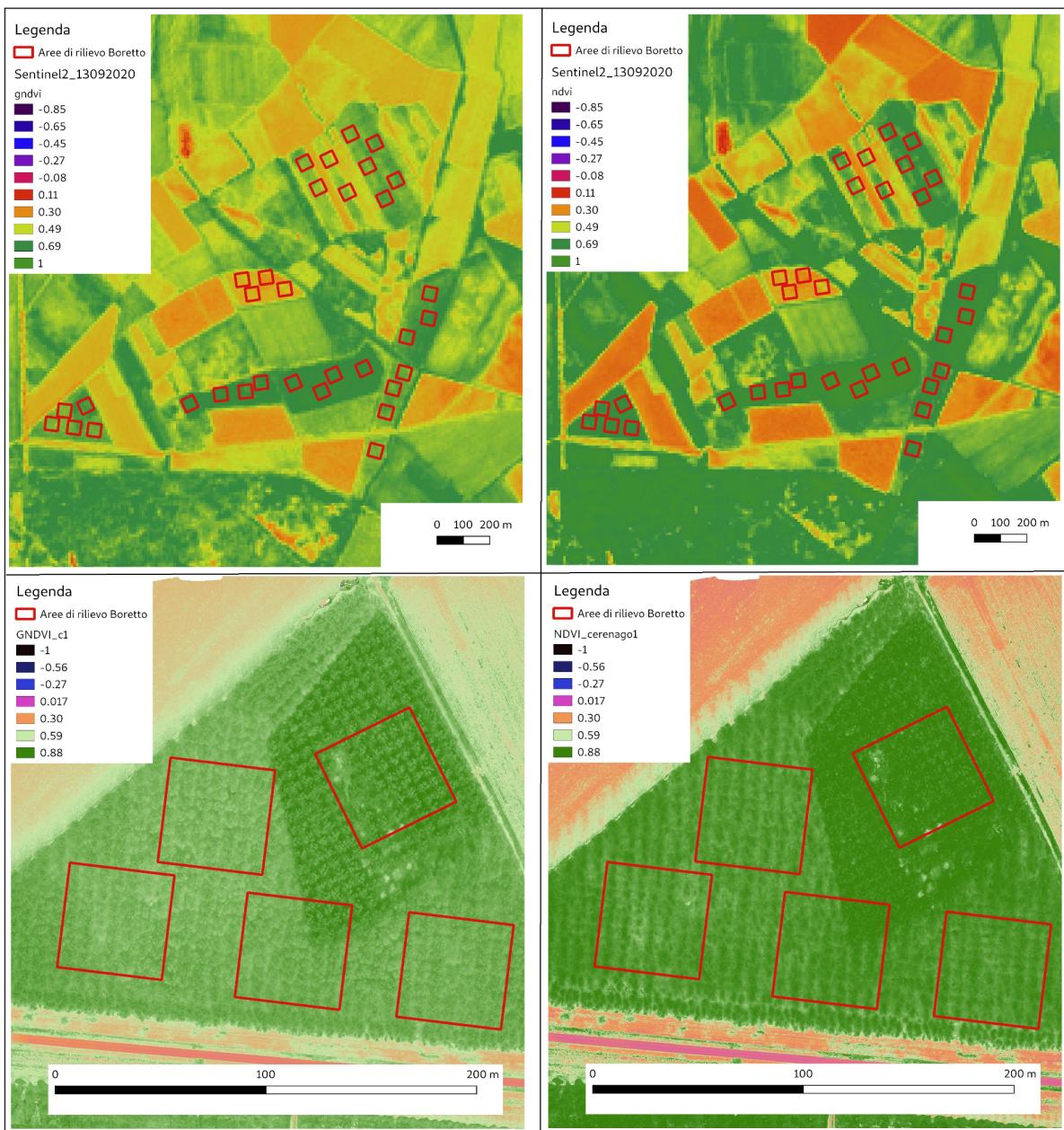


Figura 9.

Indici multiscalari per l'area campione di Boretto. In alto a sinistra: GNDVI calcolato da immagine Sentinel-2; in alto a destra: NDVI calcolato da immagine Sentinel-2; in basso a sinistra: GNDVI calcolato da immagine UAV, particolare su quattro plot; in basso a destra: NDVI calcolato da immagine UAV, particolare su quattro plot.

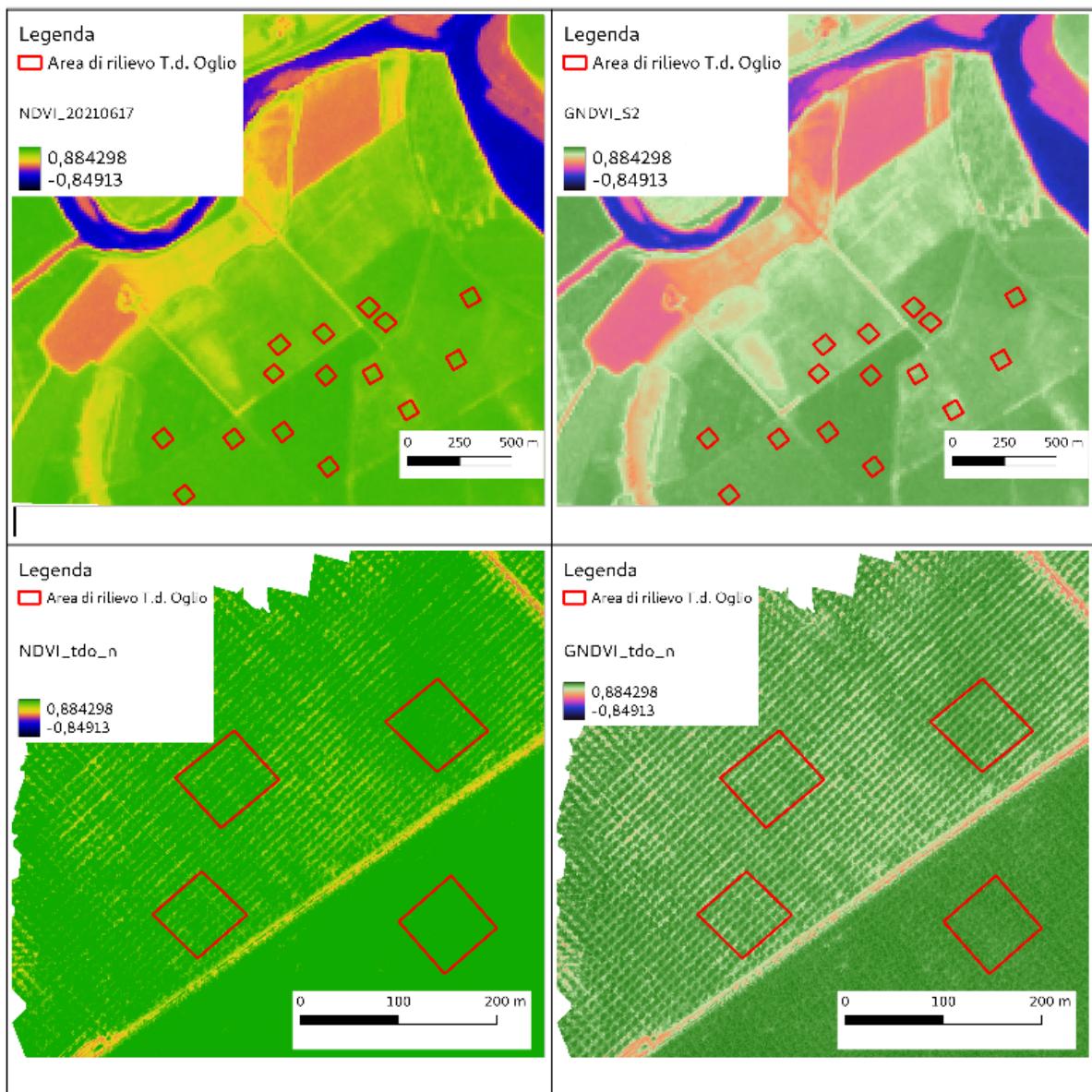


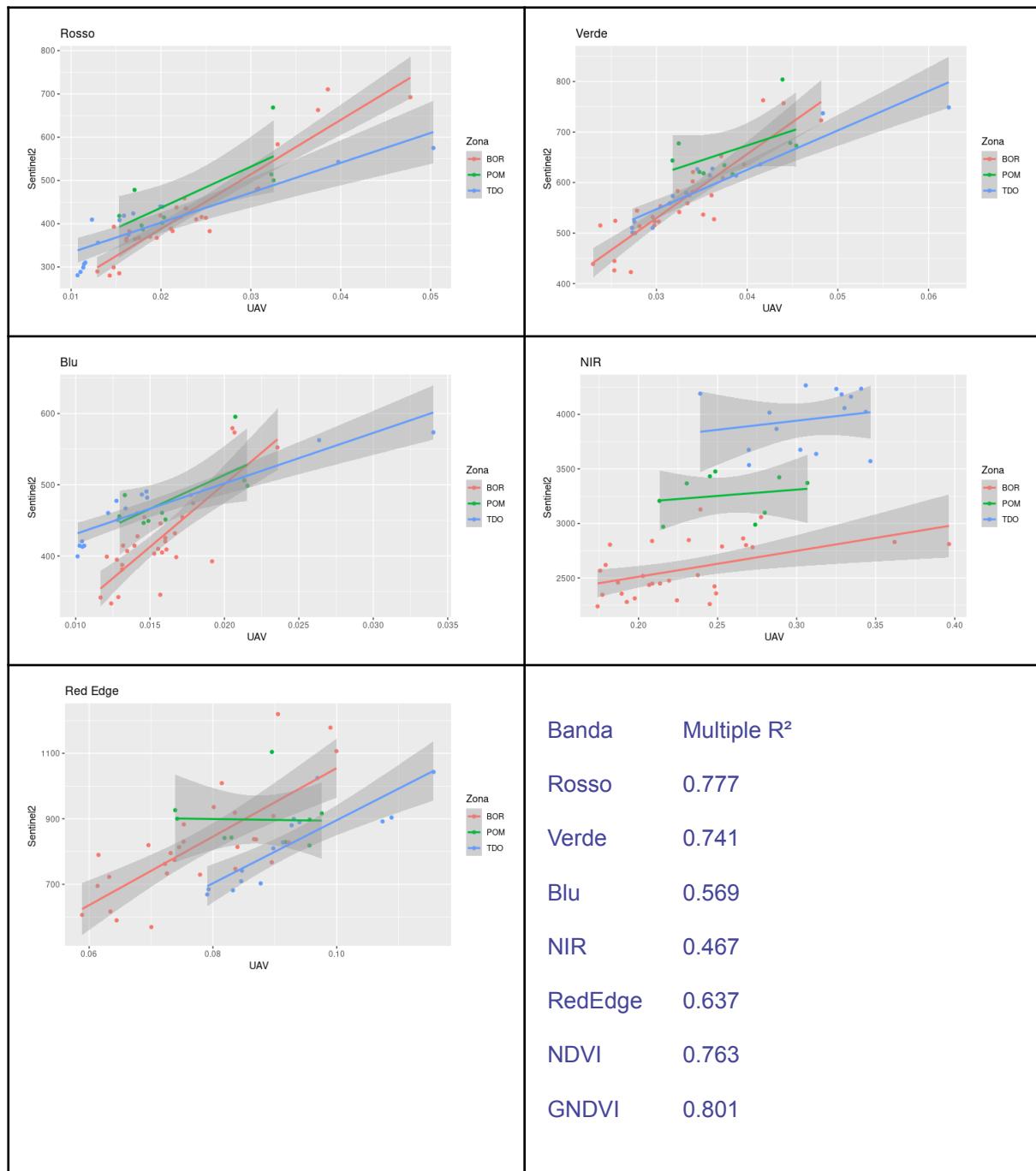
Figura 10

Indici multiscalari per l'area campione di Torre d'Oglio. In alto a sinistra: NDVI calcolato da immagine Sentinel-2; in alto a destra: GNDVI calcolato da immagine Sentinel-2; in basso a sinistra: NDVI calcolato da immagine UAV, particolare su quattro plot; in basso a destra: GNDVI calcolato da immagine UAV, particolare su quattro plot.

I grafici delle figure seguenti (Figura 11) e la Tabella 4 mostrano la correlazione tra le singole bande e gli indici: i punti corrispondono ai dati medi per plot, la regressione lineare è rappresentata dalle linee colorate a seconda dell'area di studio (BOR: Boretto, POM: Pomponesco, TDO: Torre d'Oglio), mentre l'area grigia rappresenta l'intervallo di confidenza al 95%. Le regressioni migliori sono state ottenute per la banda del rosso, del verde, dell'NDVI e del GNDVI. Si osserva un effetto delle aree di studio, legato probabilmente a caratteristiche locali ed al fatto che si tratta di rilievi fatti in 3 anni diversi e diversi momenti della stagione vegetativa (inizio stagione: TDO; pieno stagione: POM; fine stagione: BOR).

Figura 11.

Grafici della regressione lineare le bande misurate da Sentinel-2 (asse-y) e da Drone (UAV; asse-x) e relativi indici R^2 . BOR: Boretto, POM: Pomponesco, TDO: Torre d'Oglio



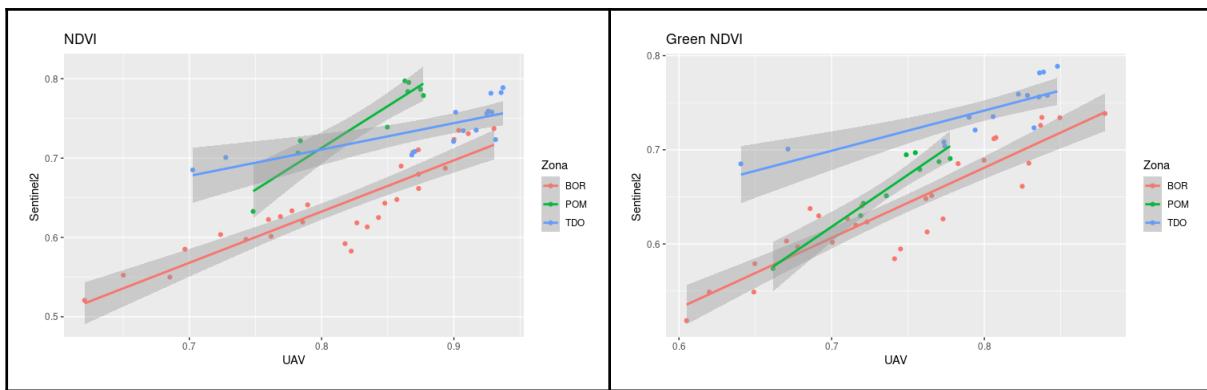


Tabella 4.

Valori del test di correlazione di Spearman e significatività tra le bande e gli indici vegetazionali calcolati da Drone e Satellite

Banda/Indice	Test di Spearman (r_s)	p
Rosso	0.871	<0.01
Verde	0.852	<0.01
Blu	0.686	<0.01
NIR	0.677	<0.01
RedEdge	0.614	<0.01
NDVI	0.781	<0.01
GNDVI	0.839	<0.01

Confronti multiscalari con dati a terra

Le comparazioni tra i dati rilevati a terra, i dati da drone e le immagini da satellite hanno mostrato come le tre diverse scale di misura siano significativamente tra loro correlate. In particolare, i due indici testati (NDVI e GNDVI) sono risultati entrambi validi per stimare sia gli attributi strutturali che della copertura. Pertanto, a partire dalle analisi di correlazione, sono stati sviluppati modelli lineari semplici per la stima di tali attributi usando tali indici. Le equazioni dei modelli lineari sono riportati in appendice.

In generale possiamo concludere che i dati da drone e da satellite sono coerenti tra loro. Sebbene il dato rilevato dal drone sia di maggior dettaglio spaziale (risoluzione geometrica) e si presta pertanto maggiormente per la stima degli attributi a scala di singola piantagione, l'elevata correlazione con il dato Sentinel-2 permette di concludere che la scala spaziale di Sentinel-2 (10 m) sia affidabile ed idonea per monitorare i pioppi a scala regionale.

I dati raccolti a terra permettono di caratterizzare la struttura delle piantagioni di pioppo, insieme alla sua variazione nel tempo (considerando il periodo tipico di rotazione di 10 anni

di questa tipologia di piantagioni). Se da un lato attributi quali area basimetrica e il volume del fusto siano appropriati per la valutazione strutturale, ma anche economica dei pioppi, dell'approvvigionamento di legno e degli assortimenti di tronchi di queste piantagioni, i dati di copertura consentono anche di poter fare delle valutazioni sull'effetto dell'età, dei sesti di impianto e dei diversi schemi di spaziatura sullo sviluppo del pioppo (Chianucci et al. 2020).

L'indice di area fogliare e gli altri attributi della copertura sono utili per molteplici scopi, tra cui i) valutare la relazione tra accrescimento e la struttura della chioma; ii) monitorare la vitalità e la produttività della piantagione; iii) calibrare e convalidare le informazioni desumibili dal telerilevamento. In particolare, la dimensione dei plot di 0.25 ha è risultata idonea per il confronto con immagini aeree e satellitari ad alta e media risoluzione e UAV.

Nella Tabella 5 sono riportate le correlazioni tra le principali misure prese a terra (Copertura Fogliare,, LAI e Area basimetrica) e gli indici di vegetazione calcolati da Sentinel-2 e dal rilievo da drone. In queste correlazioni non si evidenzia invece un effetto dell'area di studio.

I dati strutturali rilevati in campo correlano meglio con gli indici di vegetazione derivati dalle riprese del drone, come atteso dato che sono a maggiore risoluzione (Figure 12-14). In generale GNDVI si correla meglio con i dati presi a terra rispetto a NDVI , infatti GNDVI è stato proposto come indice migliorativo rispetto a NDVI per il monitoraggio della vegetazione (Gitelson et al. 1996).

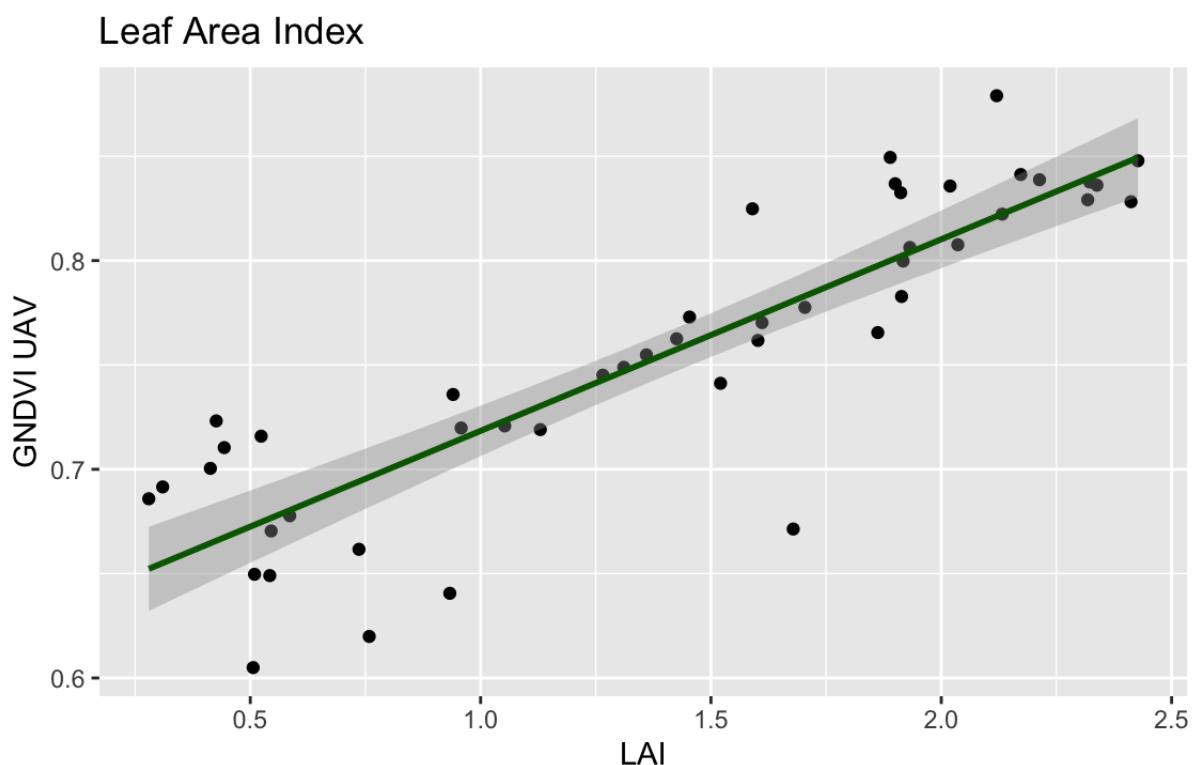


Figura 12.
Correlazione tra la LAI e GNDVI rilevato dal drone (UAV)

Area basimetrica

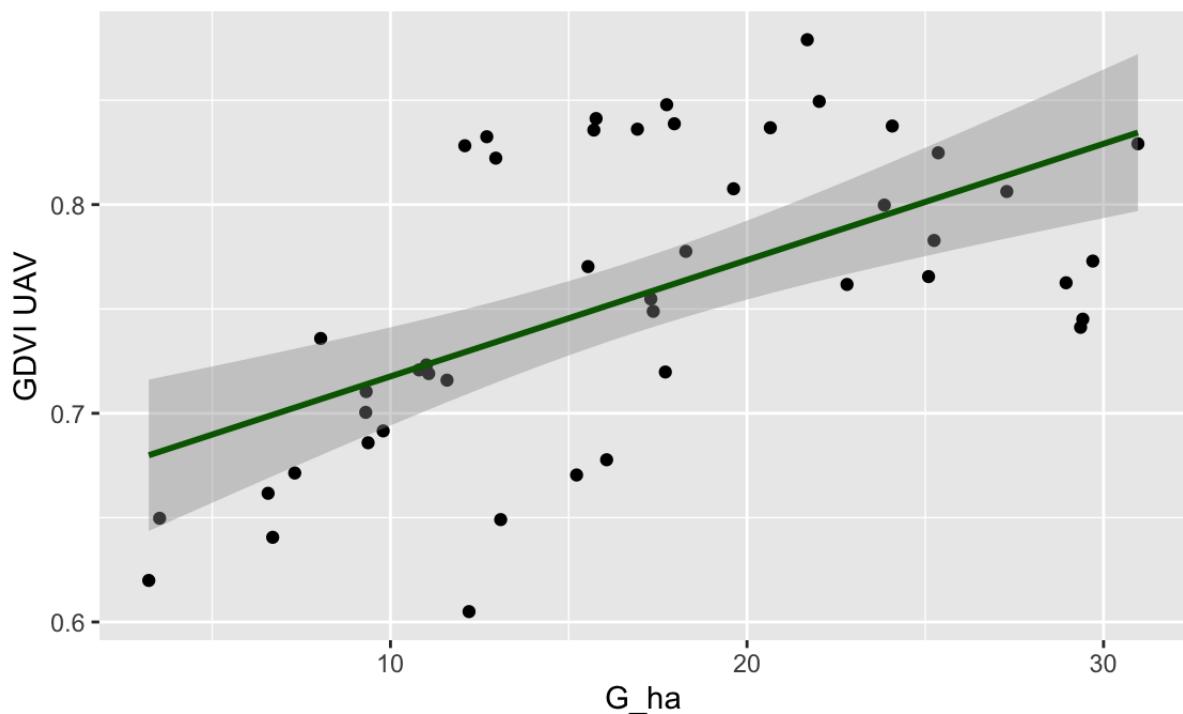


Figura 13.
Correlazione tra Area basimetrica (G_{ha}) e GNDVI rilevato dal drone (UAV)

Foliage cover

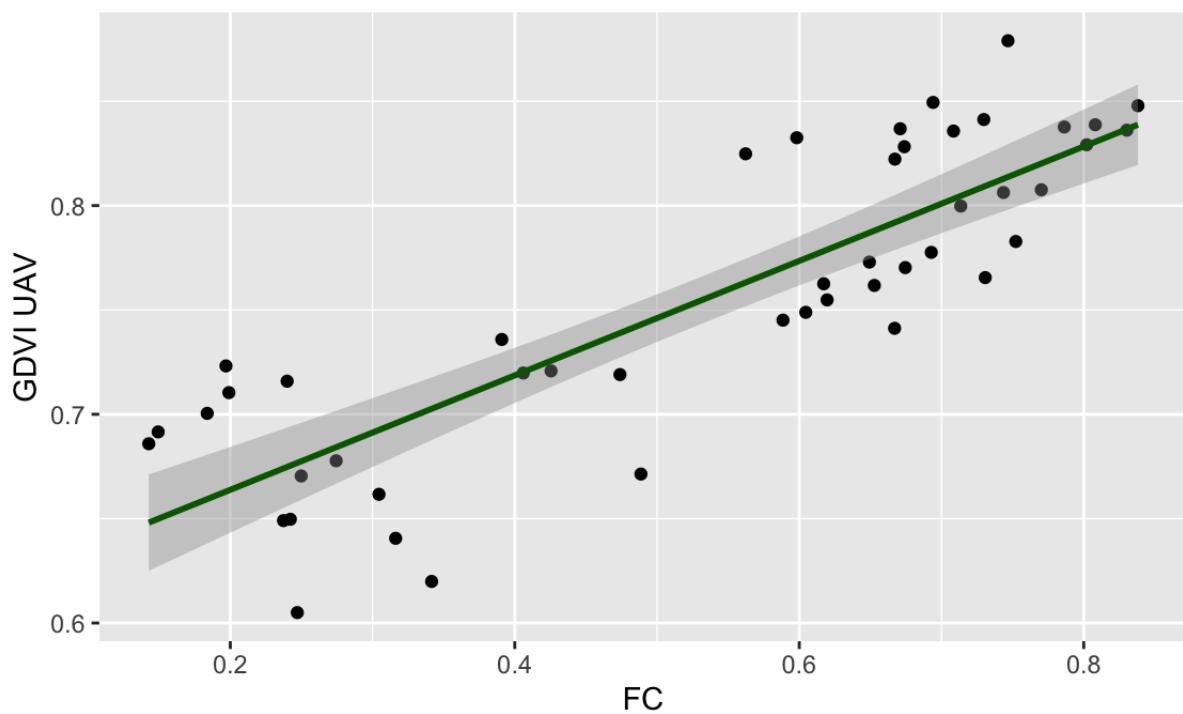


Figura 14.

Correlazione tra la Copertura Fogliare (FC) e GNDVI rilevato dal drone (UAV)

Tabella 6.

Valori del test di correlazione di Spearman e significatività tra gli indici vegetazionali calcolati da Drone (UAV_NDVI e UAV_GNDVI) e Satellite (S2_NDVI e S2_GNDVI) e valori dei rilievi a terra Copertura Fogliare (CF), Copertura della Chioma (CC), Indice di area Fogliare LAI e Area basimetrica G_ha (m²/ha)

Indice	Rilievo a terra	Test di Spearman	p
UAV_NDVI	FC	0.822	P<0.01
UAV_NDVI	CC	0.784	P<0.01
UAV_NDVI	LAI	0.832	P<0.01
UAV_NDVI	G_ha	0.512	P<0.01
UAV_GDVI	FC	0.848	P<0.01
UAV_GDVI	CC	0.798	P<0.01
UAV_GDVI	LAI	0.873	P<0.01
UAV_GDVI	G_ha	0.609	P<0.01
S2_NDVI	FC	0.669	P<0.01
S2_NDVI	CC	0.624	P<0.01
S2_NDVI	LAI	0.706	P<0.01
S2_NDVI	G_ha	0.139	ns
S2_GDVI	FC	0.737	P<0.01
S2_GDVI	CC	0.655	P<0.01
S2_GDVI	LAI	0.827	P<0.01
S2_GDVI	G_ha	0.258	ns

Web-GIS

Per l'implementazione del sistema Web-GIS è stata scelta la recente piattaforma Google Earth Engine (GEE) che permette le analisi geospatiali sulle immagini Sentinel-2 in modalità *cloud-computing*, senza scaricare cioè le immagini satellitari, e l'implementazione dei modelli di classificazione. Questo consente di visualizzare e analizzare immagini satellitari con velocità altissime senza bisogno di scaricarle su computer o server in locale. Infatti, utilizzando il linguaggio di programmazione Java sulla piattaforma GEE è possibile analizzare in pochi secondi tutte le immagini Sentinel-2 disponibili e tracciare traiettorie spettrali multitemporali.

Sono stati sviluppati codici in Java per selezionare sull'area della regione Lombardia tutte le immagini Sentinel-2 con percentuale di copertura nuvolosa inferiore al 20% e calcolare per ognuna di queste bande i due indici di vegetazione NDVI e GNDVI.

Di seguito riportiamo l'elenco delle funzioni implementate sulla piattaforma:

1. Funzione per mascherare le nuvole sulle immagini Sentinel-2
2. Funzione per importare tutte le immagini Sentinel-2 acquisite tra due specifiche date
3. Funzione per calcolare per ogni immagine anche la banda GNDVI
4. Funzione per calcolare per ogni immagine anche la banda NDVI

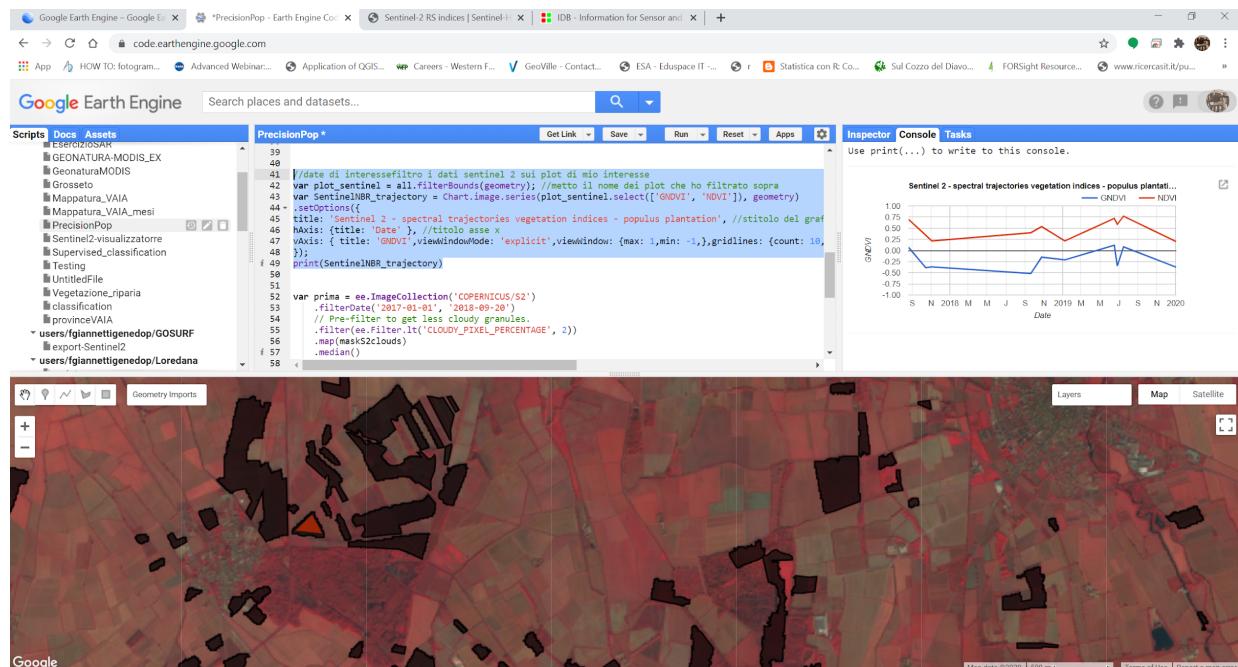


Figura 14.

Esempio dell'interfaccia WEBGIS del progetto PRECISIONPOP

Dopo aver sviluppato le seguenti funzione ed averle implementate nel sistema di classificazione abbiamo importato la mappatura delle superfici a pioppo effettuata in fase 1. E' stato poi sviluppata una ulteriore funzione per estrarre sulla base di un poligono disegnato a video dall'utente un grafico delle traiettorie multitemporali spettrali dei due indici di vegetazione NDVI e GNDVI. La funzione 6 genera il grafico delle traiettorie spettrali multitemporali del GNDVI e NDVI di uno specifico poligono disegnato dall'utente.

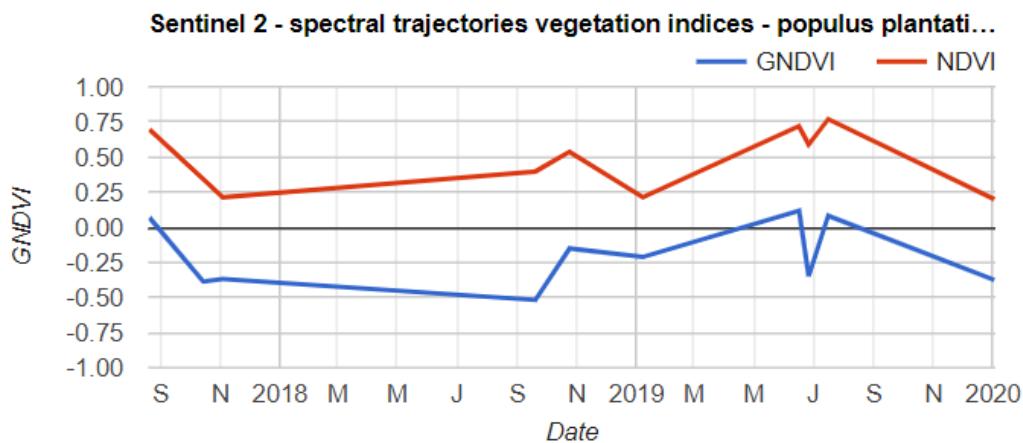


Figura 15.

Esempio dei grafici generati da una delle funzioni realizzate per il progetto PRECISIONPOP: andamento degli indici vegetazionali NDVI e GNDVI nel periodo di durata del progetto.

Bibliografia

Chianucci F. 2020a. Dataset of tree inventory and canopy structure in poplar plantations in Northern Italy. Mendely data, v.2 [Dataset], <http://dx.doi.org/10.17632/ycr7w5pvkt.1>.

Chianucci F. 2020b. An overview of in situ digital canopy photography in forestry. Canadian Journal of Forest Research 50(3): 227-242. doi: [10.1139/cjfr-2019-0055](https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0055).

Chianucci, F., Mattioli, W., Grotti, M., Puletti, N., Marcelli, A., Corona, P., Chirici, G., Giannetti, F., d'Amico, G., Francini, S., Giorcelli, A., Coaloa, D. 2019. Inventario Delle Piantagioni Di Pioppo Della Lombardia Tramite Fotointerpretazione. Report del Progetto "Sviluppo di un Sistema di monitoraggio multiscalare a supporto della pioppicoltura di precisione nella regione Lombardia" (PRECISIONPOP)", Giugno 2019. https://precisionpopnet.files.wordpress.com/2019/06/report_inventario_precisionpop-2.pdf

Chianucci, F., Puletti, N., Grotti, M., Ferrara, C., Giorcelli, A., Coaloa, D. and Tattoni, C., 2020. Nondestructive Tree Stem and Crown Volume Allometry in Hybrid Poplar Plantations Derived from Terrestrial Laser Scanning. Forest Science, <https://doi.org/10.1093/forsci/fxaa021>.

The Copernicus Open Access Hub (previously known as Sentinels Scientific Data Hub) <https://scihub.copernicus.eu/>

Gitelson A., Yoram J. Kaufman, Mark N. Merzlyak, 1996 Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS, Remote Sensing of Environment, 58 (3)289-298 [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7).

Macfarlane C. 2011. Classification method of mixed pixels does not affect canopy metrics from digital images of forest overstorey. Agricultural and Forest Meteorology 151: 833-840.

Macfarlane, C., Ryu, Y., Ogden, G.N., Sonnentag, O. 2014. Digital canopy photography: Exposed and in the raw. Agricultural and Forest Meteorology 197: 244-253.

R Development Core Team, R., R Development Core Team, R., 2011. R: a language and environment for statistical computing. R Found. Stat. Comput., R Foundation for Statistical Computing. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74686-7>

RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.

Appendice

Formule ottenute dalla regressione lineare tra dati telerilevati e dati a terra. Le abbreviazioni sono le stesse utilizzate nel testo: UAV_* dato da drone S2_* dato da Sentinel-2, FC Copertura Fogliare, CC Copertura della Chioma, Indice di area Fogliare LAI e Area basimetrica G_ha (m²/ha)

$$FC = -1.58 + 2.80 * UAV_GNDVI$$

$$LAI = -8.57 + 14.35 * UAV_GNDVI$$

$$G_ha = -22.5 + 47.4 * UAV_NDVI$$

$$G_ha = -28.8 + 60.4 * UAV_GNDVI$$

$$FC = -0.716 + 1.834 * S2_NDVI$$

$$FC = -0.716 + 1.834 * S2_NDVI$$

$$LAI = -3.81 + 8.92 * S2_NDVI$$

$$FC = -1.31 + 2.81 * S2_GNDVI$$

$$FC = -1.31 + 2.81 * S2_GNDVI$$

$$LAI = -7.29 + 14.57 * S2_GNDVI$$