



Regione
Lombardia

Introduzione al telerilevamento in ambito forestale

Edolo, 20 aprile 2023

Donato Morresi
Postdoc presso il Dipartimento di Scienze Agrarie,
Forestali e Alimentari – Università di Torino

Struttura della presentazione

1. Concetti chiave
2. Introduzione ai dati ottici satellitari
3. Introduzione ai dati LiDAR
4. Applicazioni per la mappatura del volume legnoso: il progetto USEFOL

Il concetto di scala

La scala è costituita da due componenti: (1) risoluzione ed (2) estensione.

1) RISOLUZIONE: la più piccola unità omogenea (di spazio o tempo).

❑ **RISOLUZIONE SPAZIALE (Grain)** definita da:

- Risoluzione dei dati raster acquisiti con il telerilevamento (es. dimensione pixel foto aeree).
- Minimum Mapping Unit (MMU): la dimensione minima utilizzata nel processo cartografico (es. dimensione minima dei poligoni di una carta dell'uso del suolo).
- Dimensione del pixel di una carta tematica (es. carta forestale).

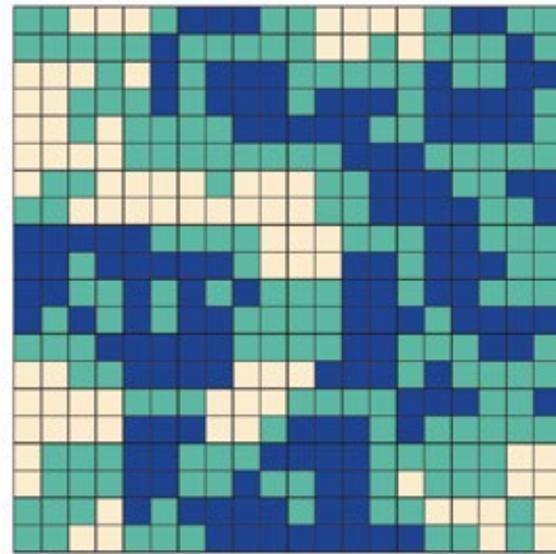
❑ **RISOLUZIONE TEMPORALE** definita da:

- La più piccola unità di tempo omogenea (es. anno).
- L'intervallo di tempo utilizzato nell'analisi (es. simulazioni ogni 10 anni).

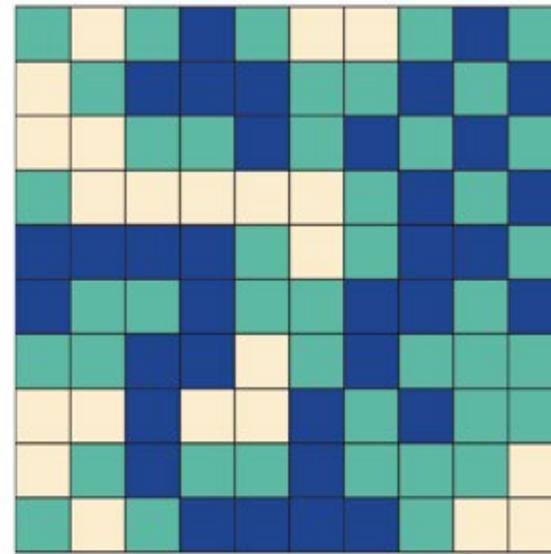
Il concetto di scala

RISOLUZIONE SPAZIALE: esempio di aumento della dimensione del *grain*: aumento della lunghezza del lato del pixel (da $n = 1$ m a $n = 4$ m).

(a) Increasing Grain Size



$n = 1$



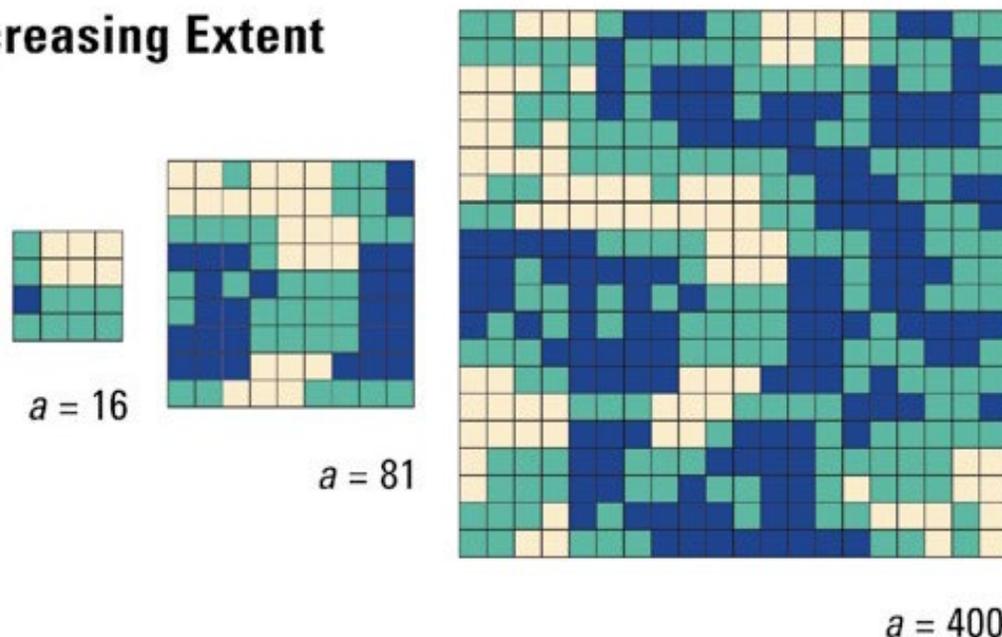
$n = 4$

Il concetto di scala

2) ESTENSIONE (Extent): massimo dominio di interesse (limite esterno dell'area o il periodo massimo).

- ❑ **ESTENSIONE SPAZIALE:** massimo dominio di interesse (limite esterno, confine dell'area di studio).
- ❑ **ESTENSIONE TEMPORALE:** intervallo (*range*) di tempo massimo studiato.

(b) Increasing Extent



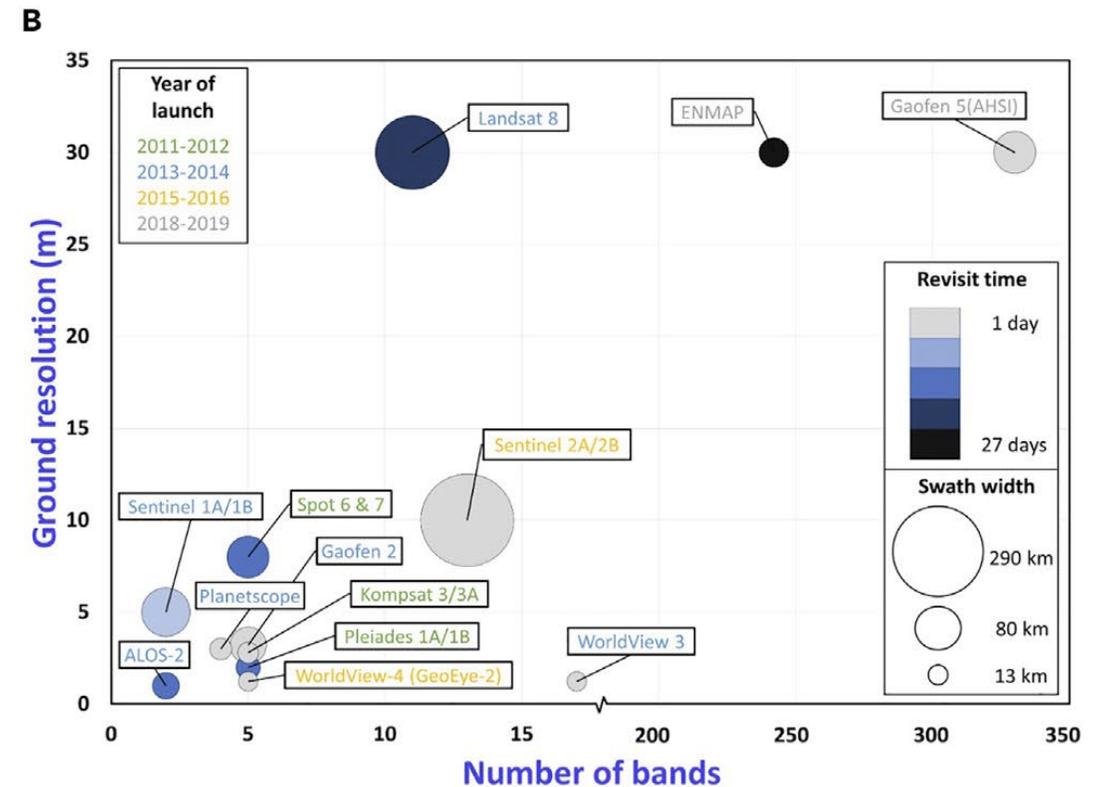
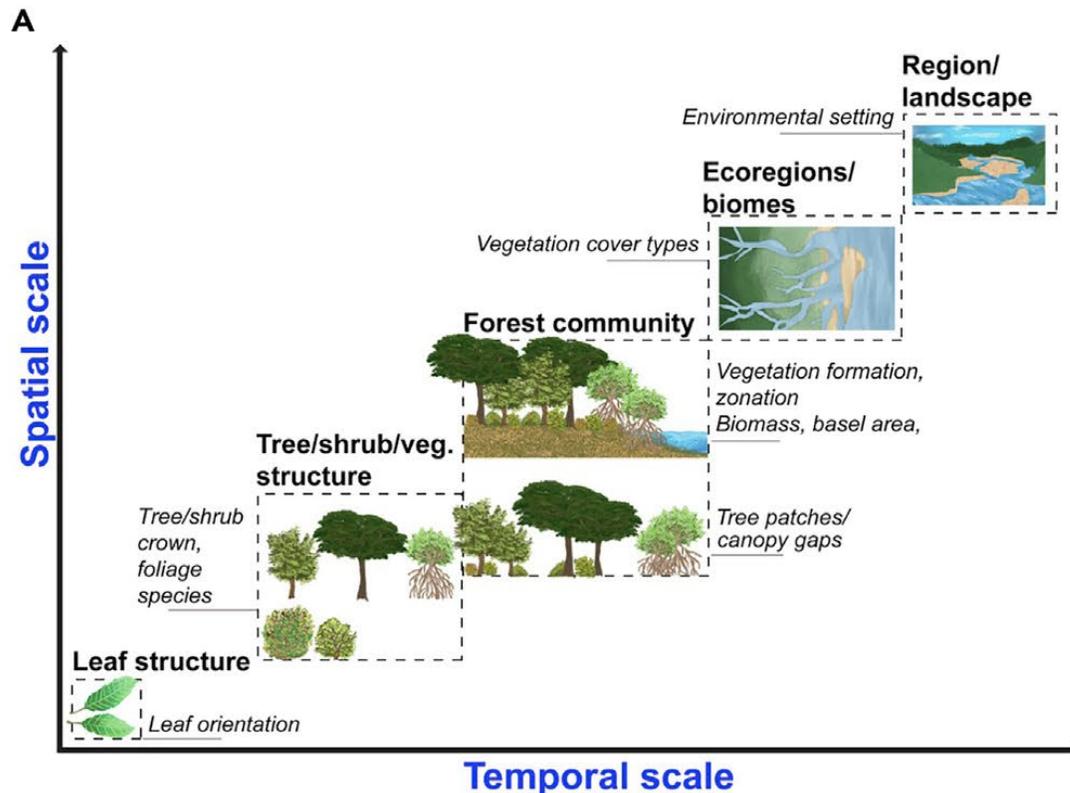
Esempio di aumento della estensione spaziale attraverso l'aumento della lunghezza del lato dell'intero paesaggio analizzato (da $a = 16$ pixel a $a = 400$ pixel).

Fonte: Turner *et al.* 2001.

Il concetto di scala

Scala spaziale e temporale di indagine in funzione dell'obiettivo di ricerca.

- Scelta del dato telerilevato più adatto



fonte: Lechner *et al.* 2020

I dati telerilevati: tipologie

I sensori remoti acquisiscono dati ottici, radar e lidar e si suddividono in sensori passivi e sensori attivi.

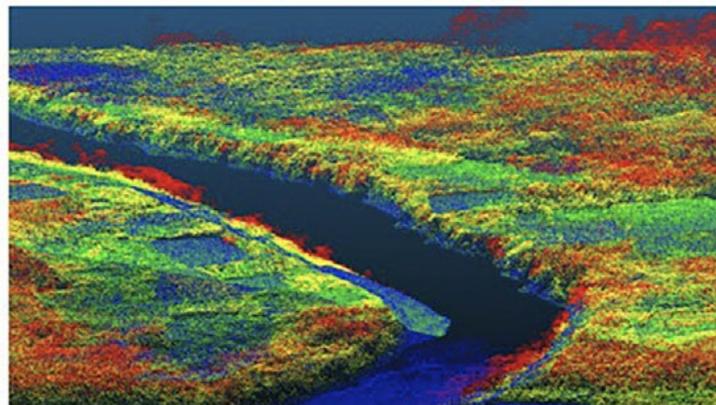
SENSORI PASSIVI



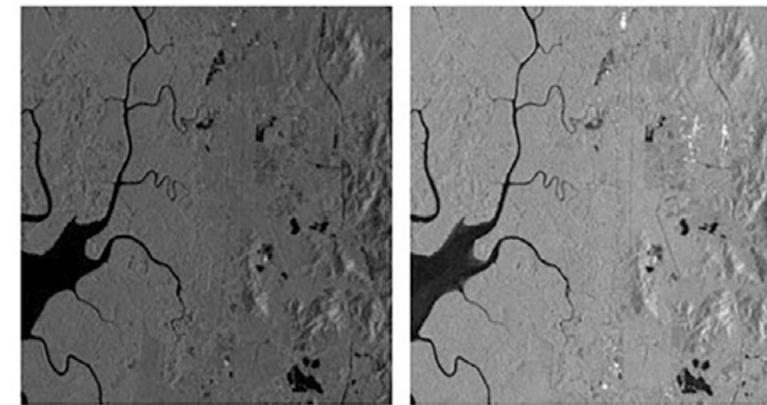
True-colour
Multi-spectral

False-colour
Multi-spectral

SENSORI ATTIVI



LiDAR 3D point cloud

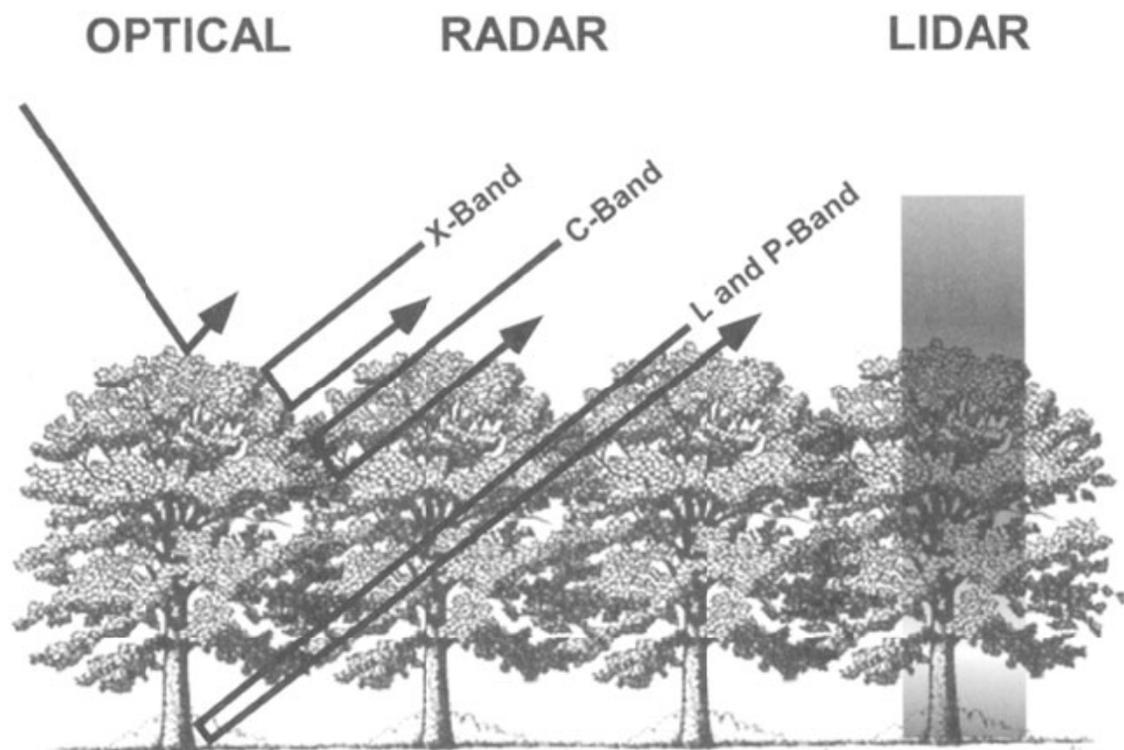


Synthetic Aperture Radar

I dati telerilevati: tipologie

Le informazioni sulla copertura forestale fornite dai dati telerilevati cambiano in funzione della loro tipologia.

Esempio: differente capacità di penetrazione delle chiome arboree da parte dei dati ottici, radar e lidar.



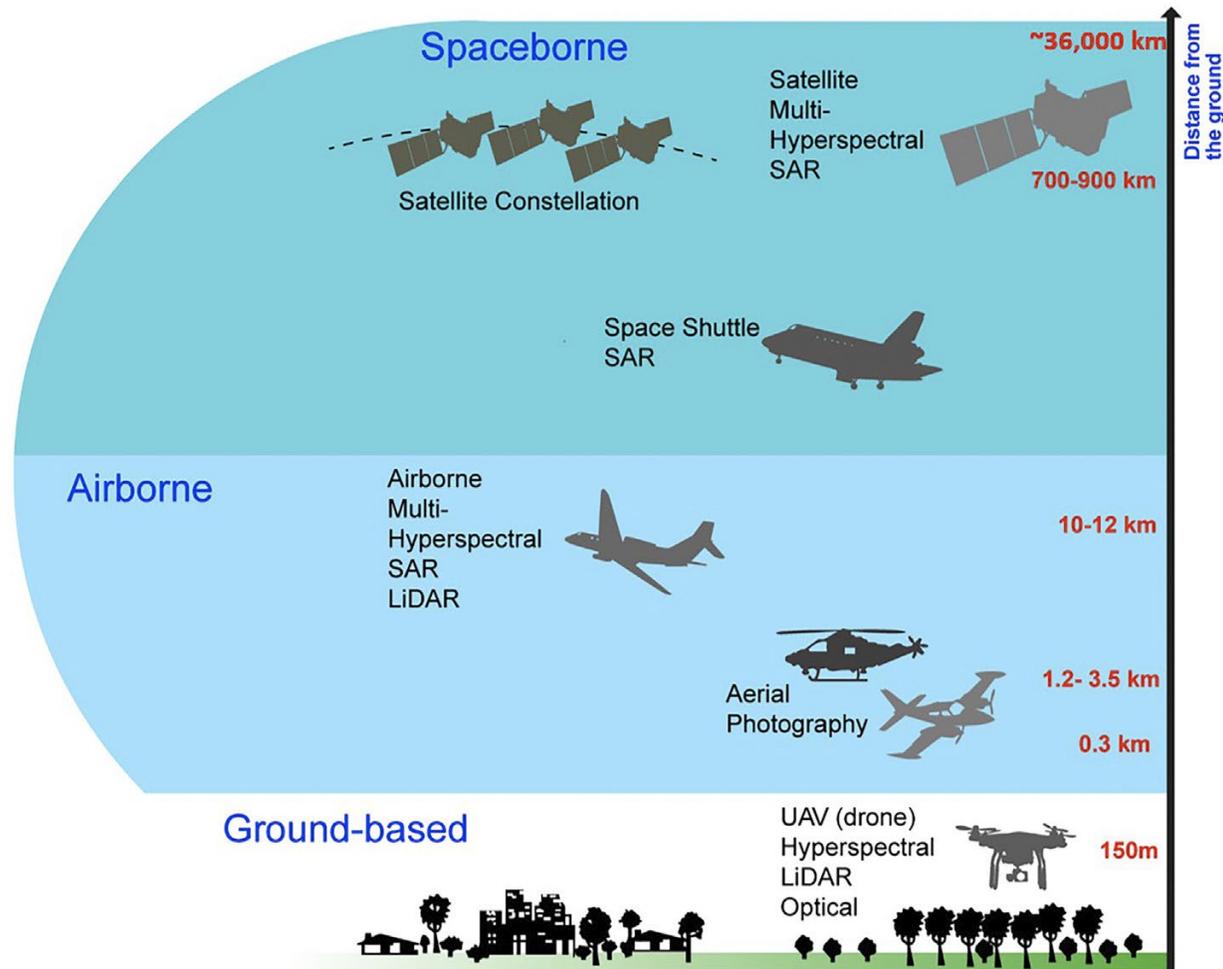
fonte: Wulder & Franklin 2003

I dati telerilevati: piattaforme

Lo sviluppo di piattaforme per sensori remoti inizia a metà '800.



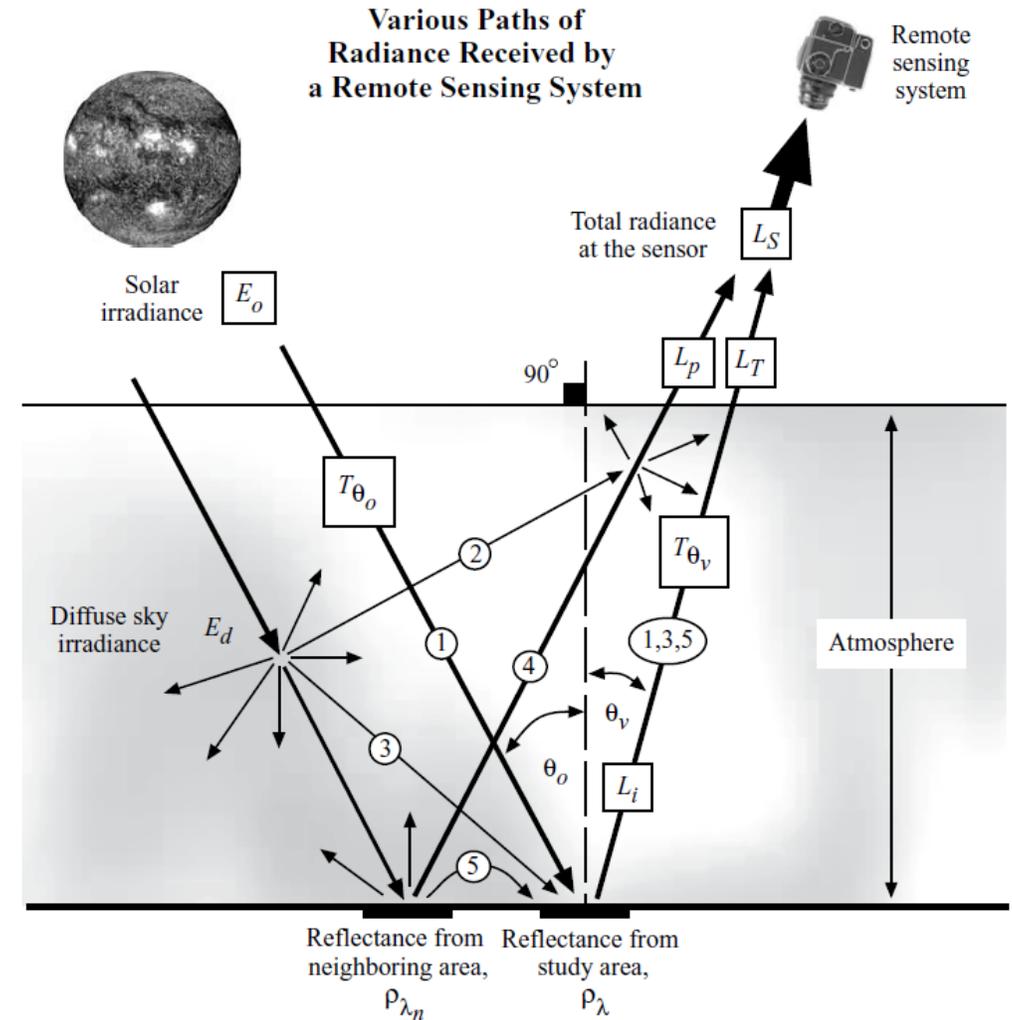
fonte: <https://gistbok.ucgis.org/bok-topics/remote-sensing-platforms>



fonte: Lechner *et al.* 2020

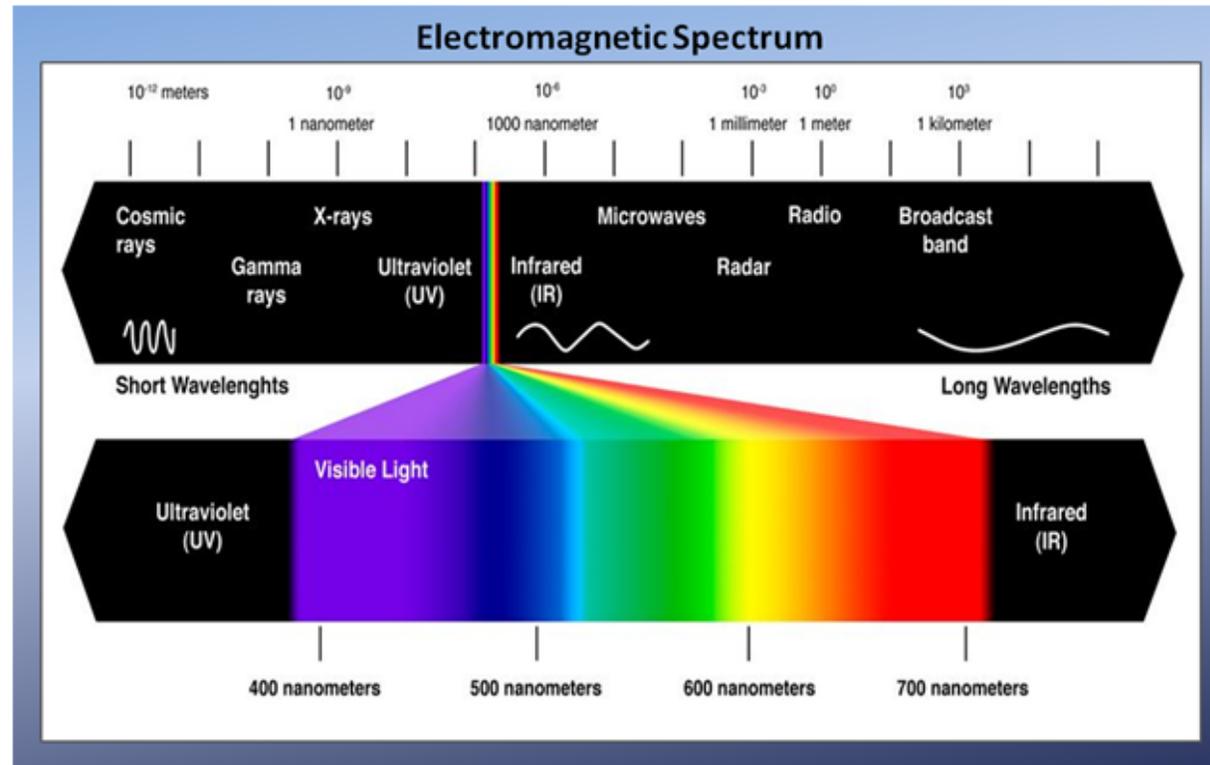
Il telerilevamento ottico

- Radianza totale al sensore: somma della radianza proveniente dalla superficie di interesse (L_T) e di quella da sorgenti esterne (L_p).
- Riflettanza: rapporto tra la radianza riflessa (L_i) e la radiazione solare incidente su una superficie (E_0).
- Contributo dalle superfici adiacenti a quella di interesse.
- Angolo di ripresa del sensore influenza la radianza totale al sensore.



Il telerilevamento ottico

- Sensori ottici passivi rilevano porzione dello spettro elettromagnetico nelle lunghezze d'onda tra 400 e 2500 nm dove la radiazione è di tipo riflesso.
- Rilievo anche nella regione dell'infrarosso termico (15000 nm) dove la radiazione viene emessa dalle superfici.



Visibile: 400nm - 700nm
(blu 475nm, verde 510nm e rosso 650nm)

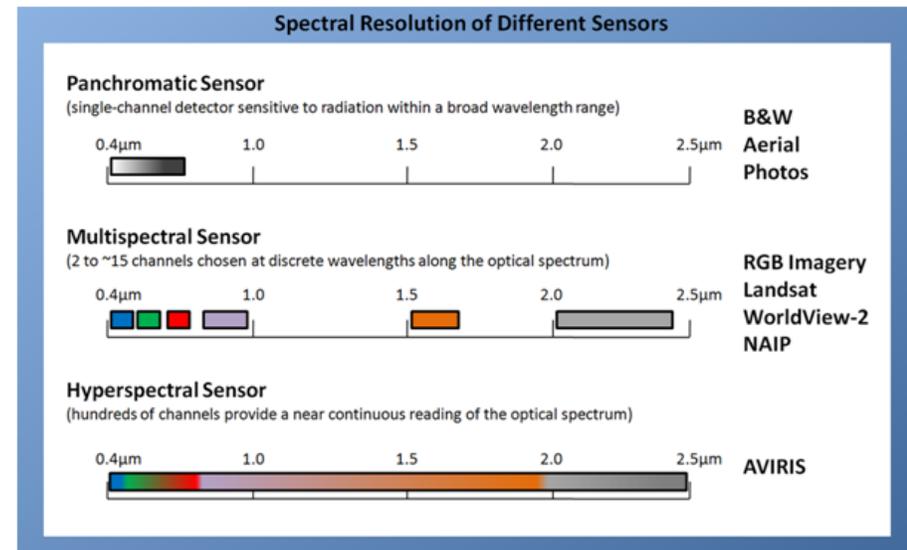
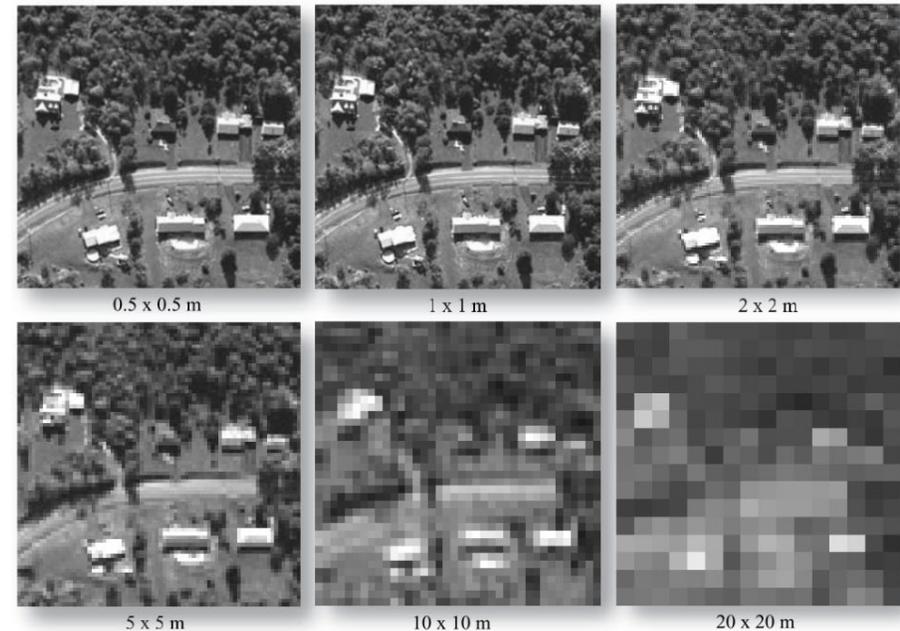
Infrarosso vicino (NIR):
700nm - 1300nm

Infrarosso ad onda corta 1 (SWIR1): 1300nm - 1900nm

Infrarosso ad onda corta 2 (SWIR2): 1900nm - 2500nm

Introduzione al telerilevamento ottico

- **Risoluzione spaziale:** dimensione al suolo del singolo pixel di un'immagine.
- **Risoluzione temporale:** tempo che intercorre tra due acquisizioni successive di una determinata area.
- **Risoluzione spettrale:** ampiezza di ciascuna banda spettrale rilevata, indicata con la lunghezza d'onda (nm o μm).
- Sensori ottici passivi classificati in base alla risoluzione spettrale: pancromatici, multispettrali ed iperspettrali.

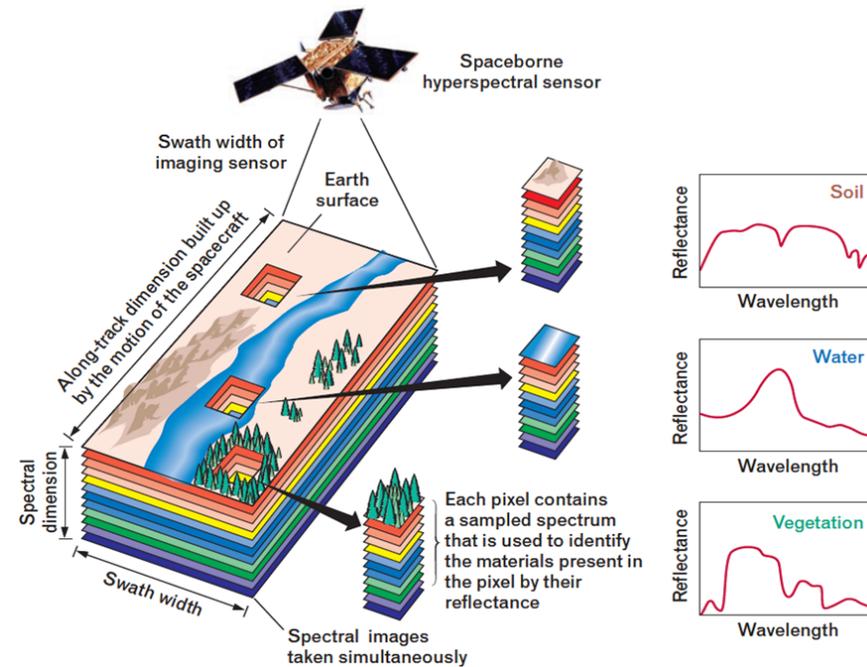


Introduzione al telerilevamento ottico

- **Sensori iperspettrali** (centinaia di bande con ampiezza tra 3 – 10 nm ciascuna): separazione ottimale delle firme spettrali degli elementi presenti.
- Classificazione specie vegetali e rilievo stato fitosanitario, minerali del suolo, elementi chimici, etc.



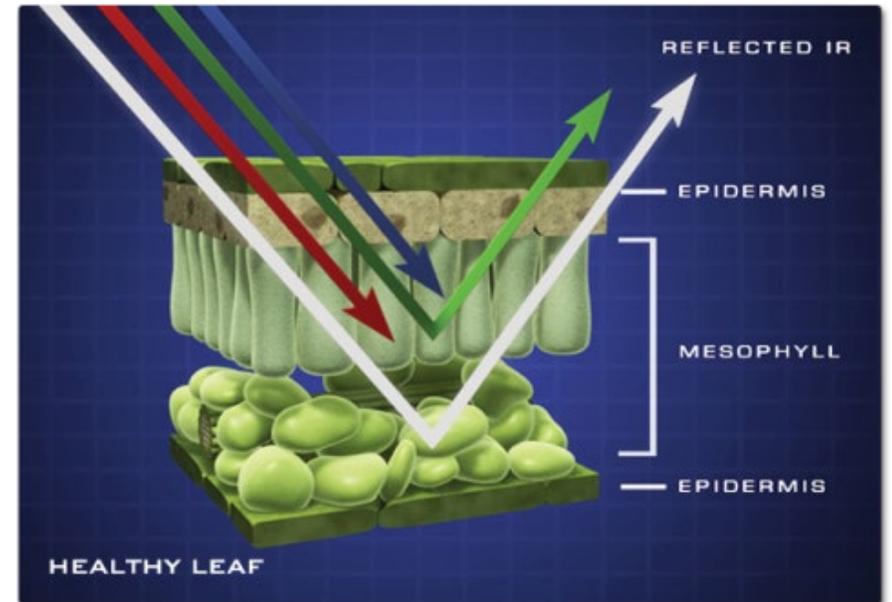
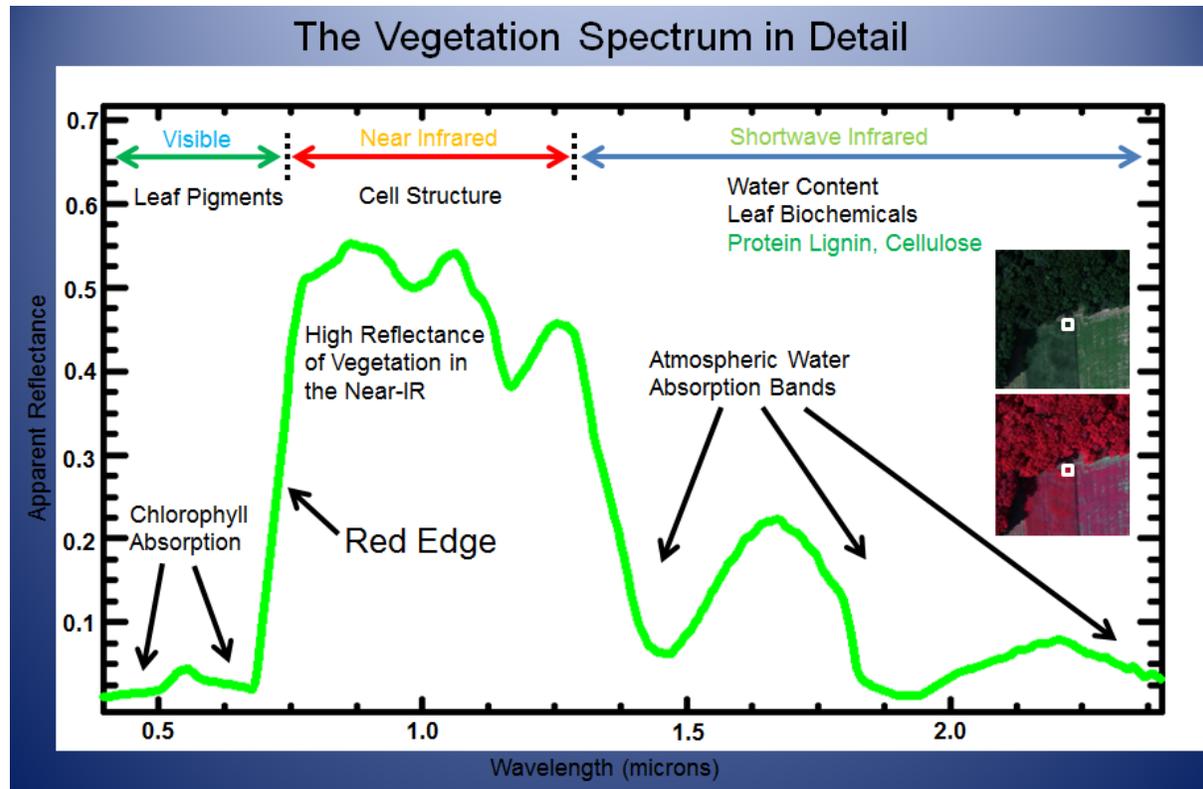
Camera iperspettrale e termica su piattaforma



Caratteristiche spettrali della vegetazione

Curva di riflettanza tipica della vegetazione fotosintetizzante:

- forte assorbimento nella regione della luce visibile e dell'infrarosso ad onda corta (SWIR)
- alta riflettanza nella regione dell'infrarosso vicino (NIR)

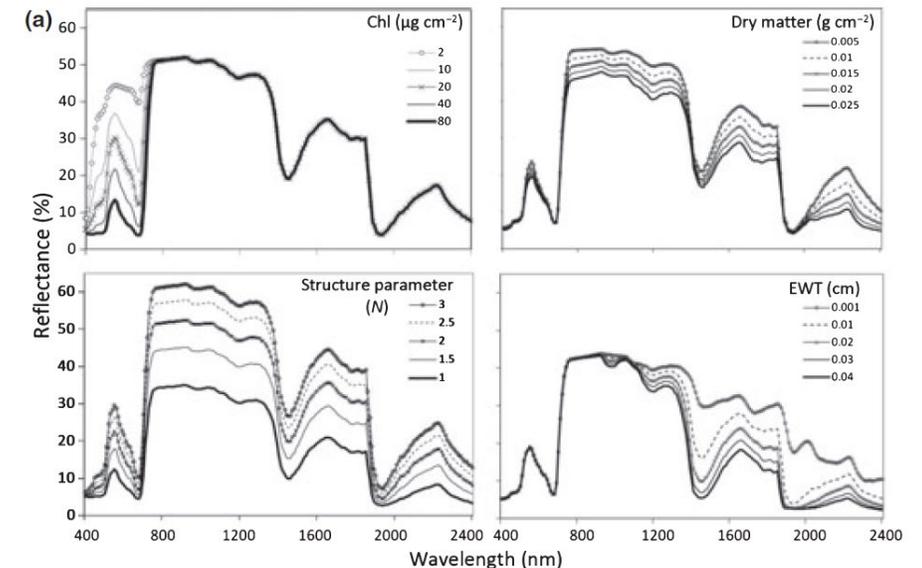
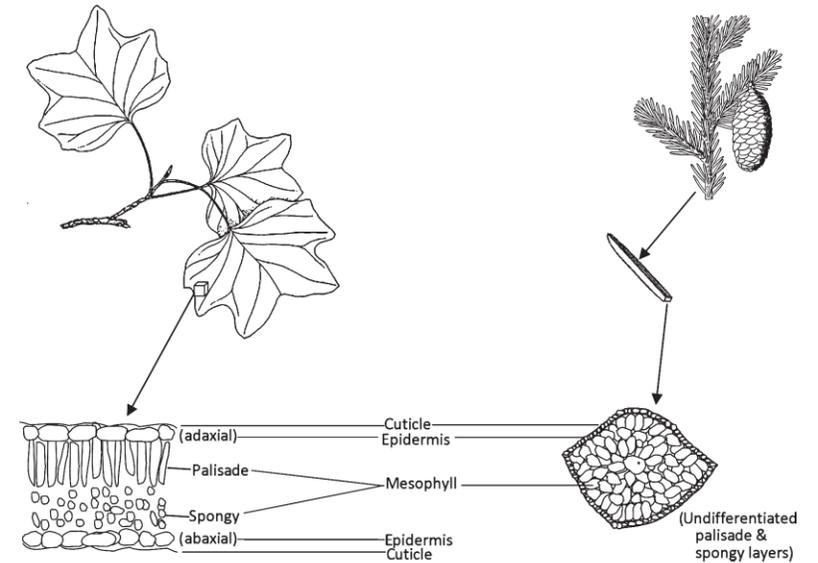


fonte: https://science.nasa.gov/ems/08_nearinfraredwaves

Caratteristiche spettrali a livello della foglia

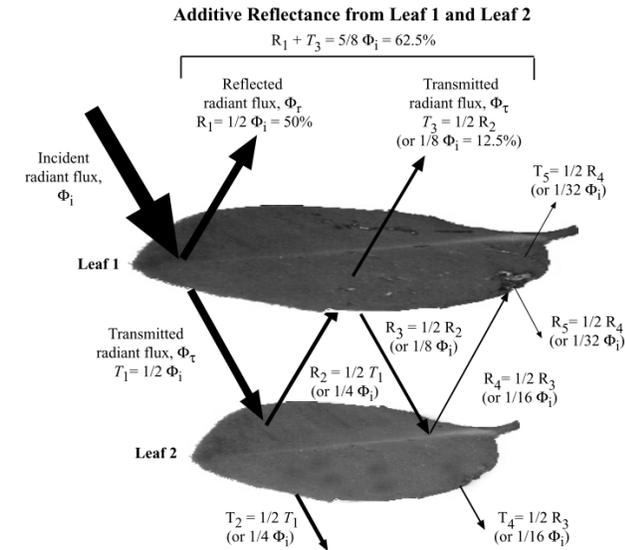
Proprietà strutturali e chimiche dei tessuti vegetali:

- contenuto di clorofilla A e B (Chl), antociani, carotenoidi, pigmenti marroni
- contenuto di sostanza secca (Dry matter)
- parametri di struttura (N) (spessore fogliare, abbondanza degli spazi intercellulari, dimensione delle cellule dell'epidermide e del mesofillo)
- contenuto di acqua (Equivalent Water Thickness, EWT)

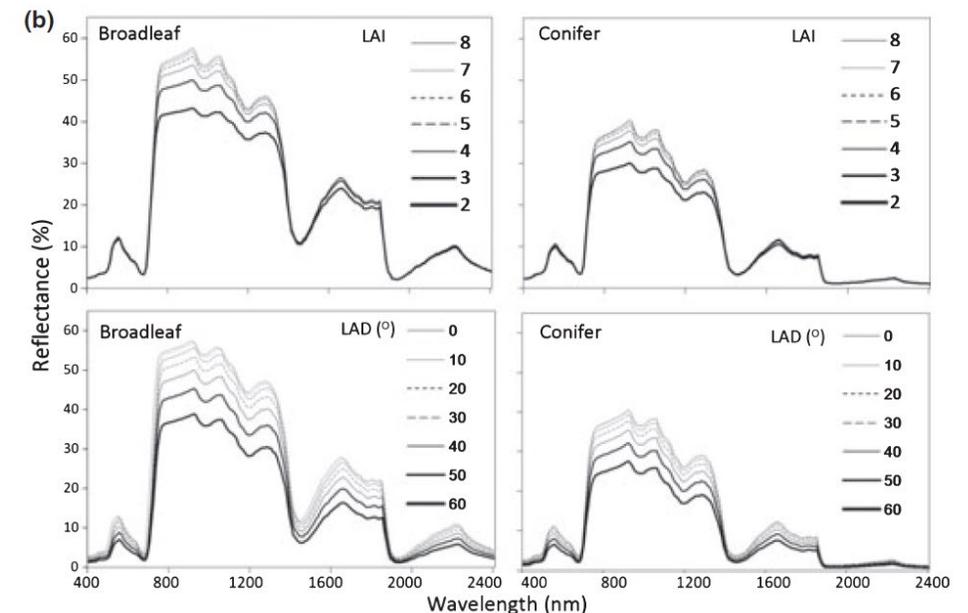


Caratteristiche spettrali a livello della chioma

- Densità fogliare (*Leaf Area Index, LAI*): importante per trasmissione e riflessione della radiazione incidente.
- Fattori interni: struttura dei rami principali e secondari, angolo di inclinazione delle foglie (*Leaf Angle Distribution, LAD*).
- Fattori esterni: forma, volume e densità.
- Influenza delle superfici sottostanti le chiome (lettiera e suolo nudo).



fonte: Remote Sensing of the Environment, Jensen 2014



fonte: Ollinger S. V. 2011

Indici spettrali di vegetazione

- Misure adimensionali derivate dalla combinazione di due o più bande spettrali.
- Capacità di variare linearmente con i parametri biofisici di interesse.
- Limitano l'influenza di fattori esterni come l'angolo solare, l'angolo di acquisizione, gli effetti dell'atmosfera e della topografia.
- *Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI):* correlazione con quantità di biomassa fotosinteticamente attiva.

$$\text{NDVI} = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \text{ (Tucker 1979)}$$

$$\text{EVI} = 2.5 \frac{NIR - RED}{(NIR + 6*RED - 7.5*BLUE) + 1} \text{ (Huete et al. 1999)}$$

$$\text{NDMI} = \frac{(NIR - SWIR1)}{(NIR + SWIR1)} \text{ (Hardisky et al. 1983)}$$

$$\text{NBR} = \frac{(NIR - SWIR2)}{(NIR + SWIR2)} \text{ (López García \& Caselles 1991)}$$

$$\text{Tasseled Cap Brightness} = 0.3037 * BLUE + 0.2793 * GREEN + 0.4743 * RED + 0.5585 * NIR + 0.5082 * SWIR1 + 0.1863 * SWIR2$$

$$\text{Tasseled Cap Greenness} = -0.2848 * BLUE - 0.2435 * GREEN - 0.4743 * RED + 0.7243 * NIR + 0.0840 * SWIR1 - 0.1800 * SWIR2$$

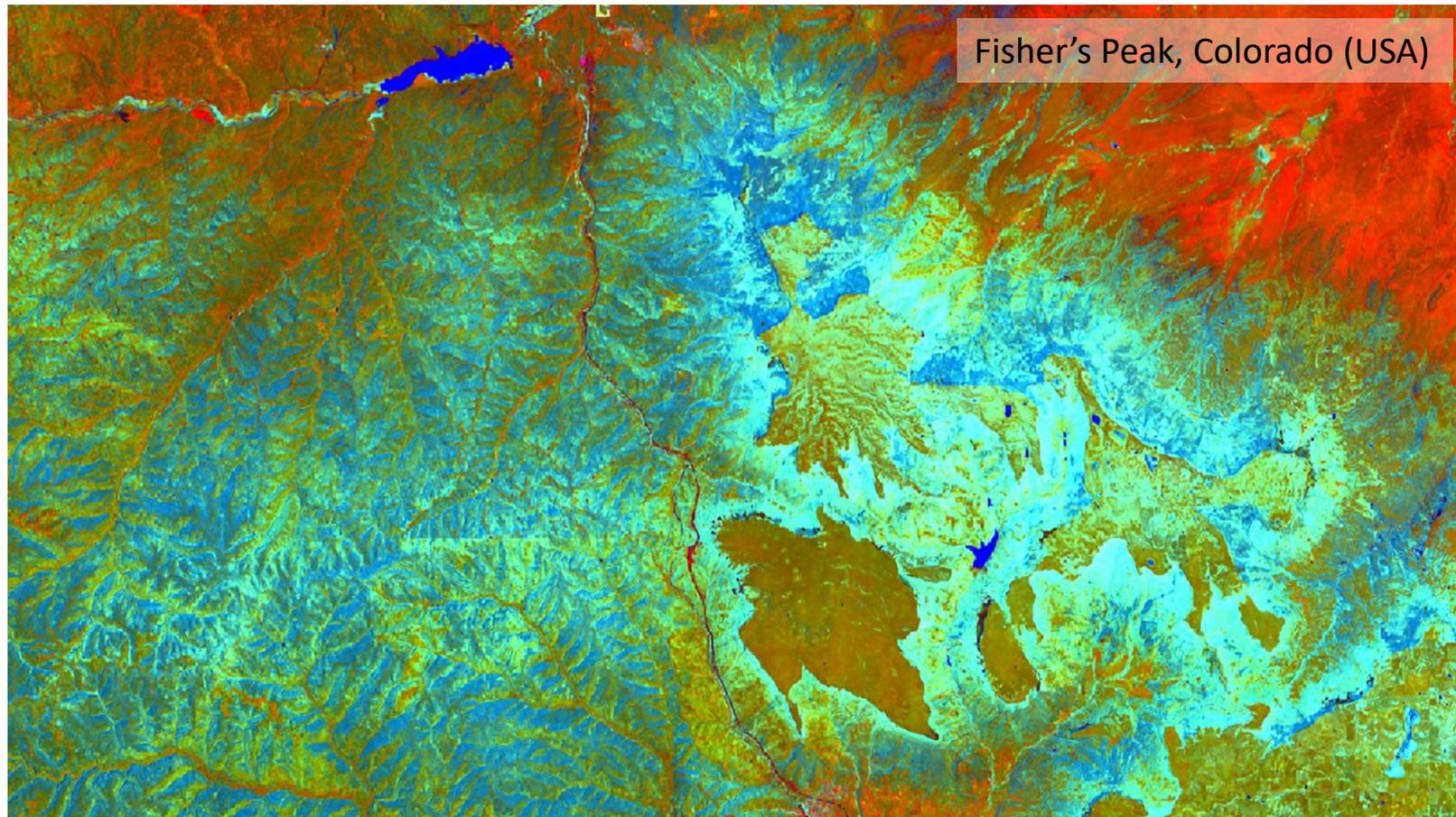
$$\text{Tasseled Cap Wetness} = 0.1509 * BLUE + 0.1973 * GREEN + 0.3279 * RED + 0.34065 * NIR - 0.7112 * SWIR1 - 0.4572 * SWIR2$$

(Christ and Cicone 1984)

$$\text{Tasseled Cap Angle} = \arctan \left(\frac{TCB}{TCG} \right)$$

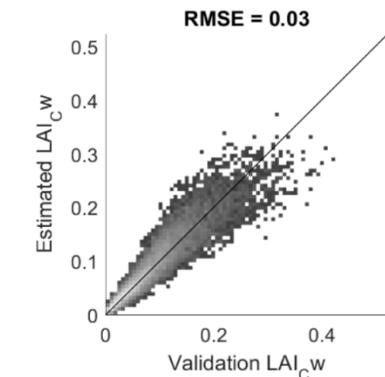
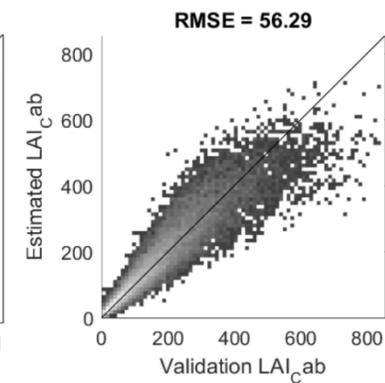
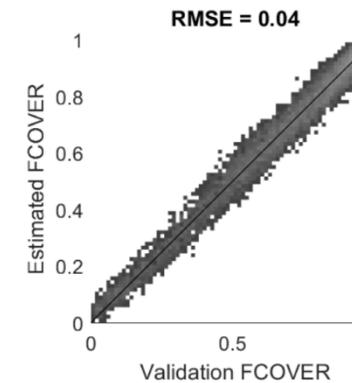
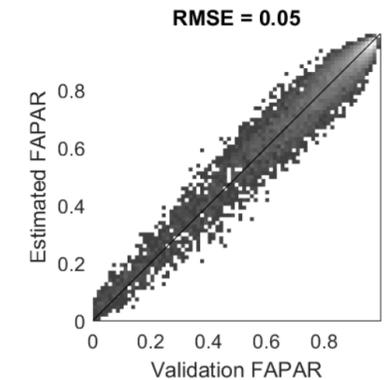
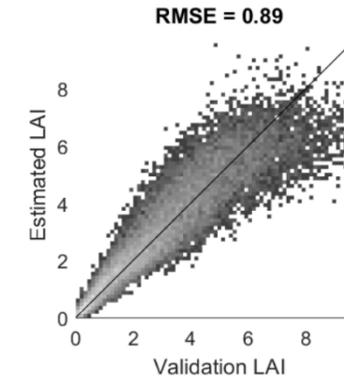
Indici spettrali di vegetazione

- Trasformazione Tasseled Cap di un'immagine multispettrale Landsat 8 OLI (9/7/2019)
- Combinazione RGB: RED = TC Brightness, GREEN = TC Greenness, BLUE = TC Wetness



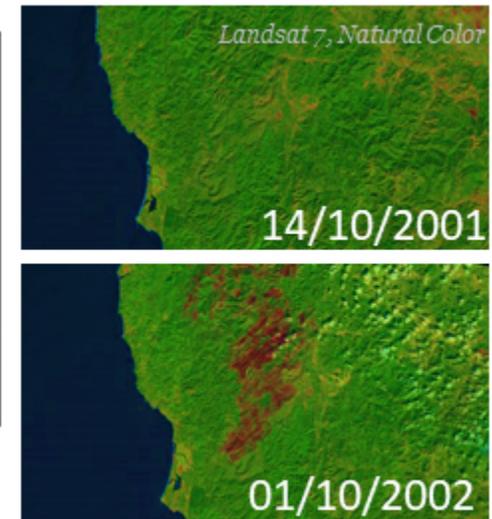
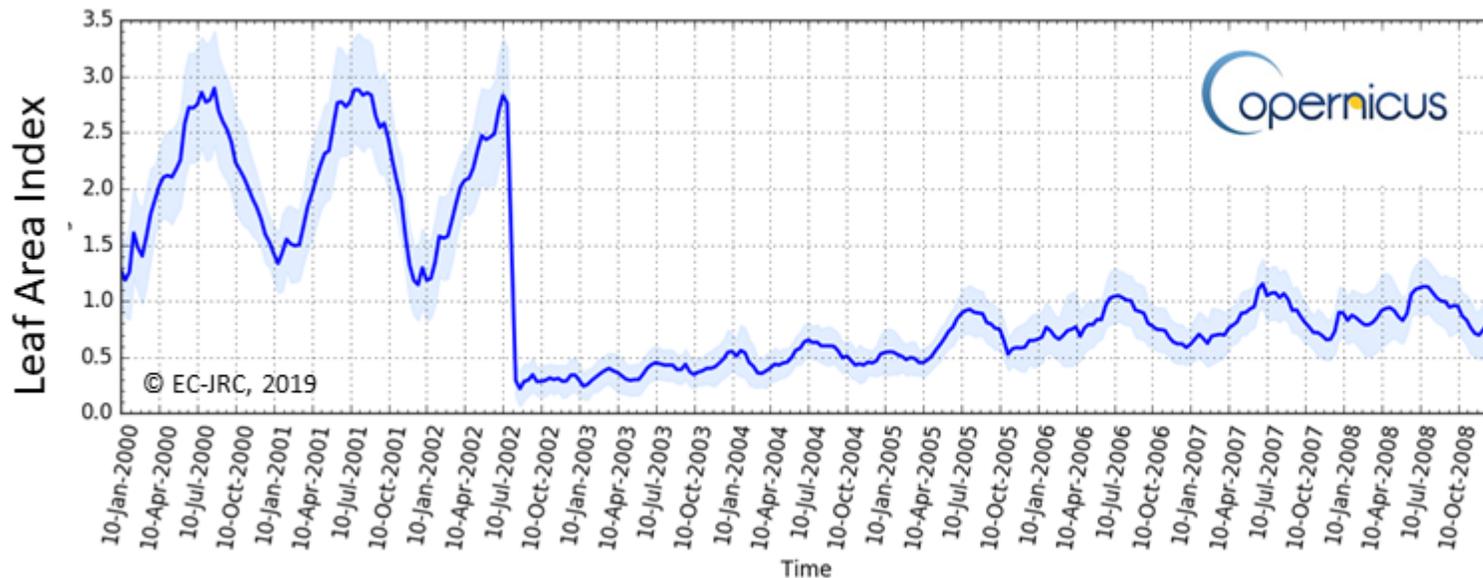
Stima dei parametri biofisici della vegetazione

- *Leaf Area Index* - LAI
- *Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation* - FAPAR
- *Fraction of vegetation cover* - FCOVER
- *Canopy chlorophyll content* – CCC
- *Canopy Water Content* – CWC
- Calcolo mediante algoritmi basati su modelli regressivi a scala regionale
- Disponibilità di strumenti basati su algoritmi di tipo machine learning e immagini Sentinel-2 (SNAP Sentinel-2 Toolbox)



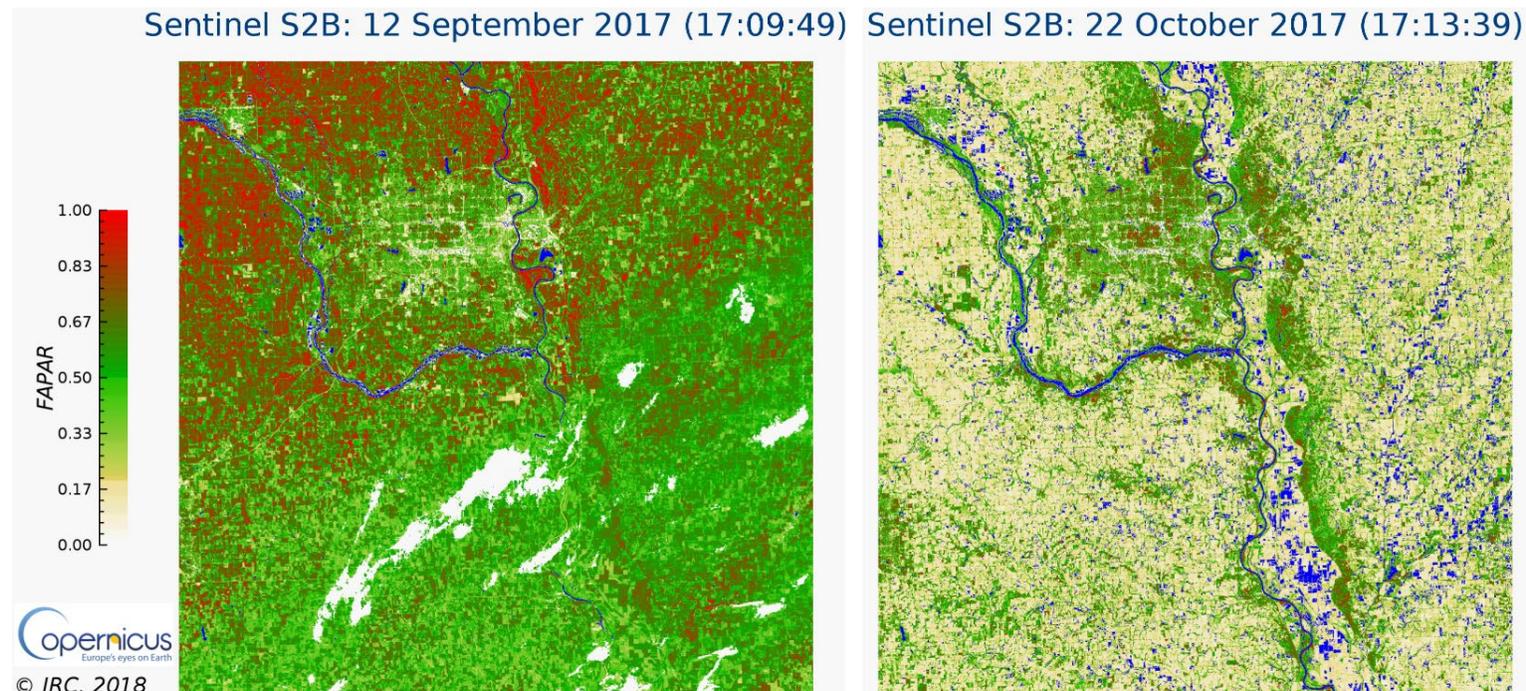
Stima dei parametri biofisici della vegetazione: LAI

- Misura della superficie fogliare per unità di superficie del suolo.
- Strettamente collegata all'attività fotosintetica, all'evapotraspirazione, all'intercettazione della pioggia e ai flussi di carbonio.
- Può essere stimata con indici di vegetazione come NDVI ed EVI.



Stima dei parametri biofisici della vegetazione: FAPAR

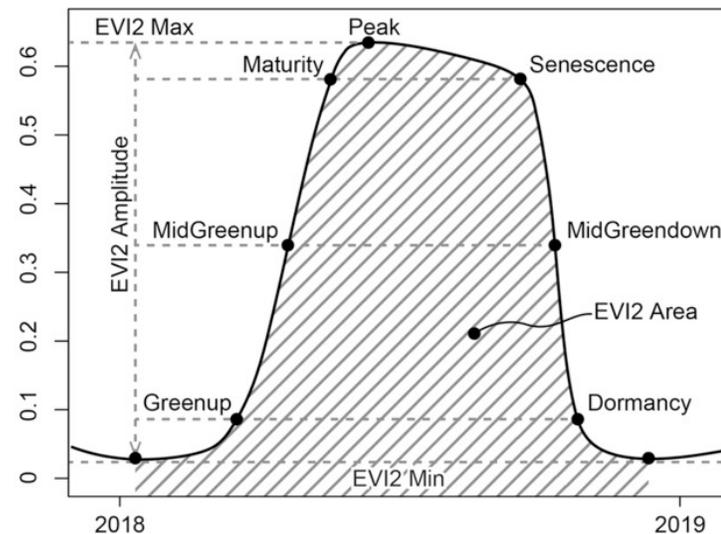
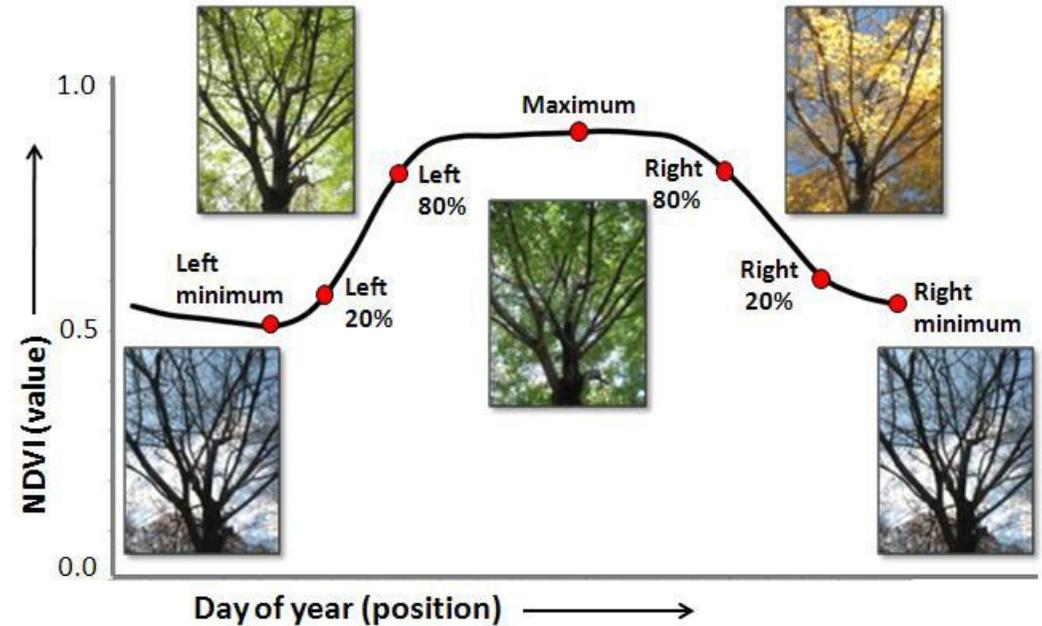
- Frazione della radiazione fotosinteticamente attiva (*Photosynthetically active radiation, PAR*) compresa tra 400 e 700 nm effettivamente utilizzata dalle piante.
- Importante per quantificare la produzione di biomassa e la relativa fissazione di carbonio atmosferico.



fonte: <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/fapar>

Monitoraggio della fenologia

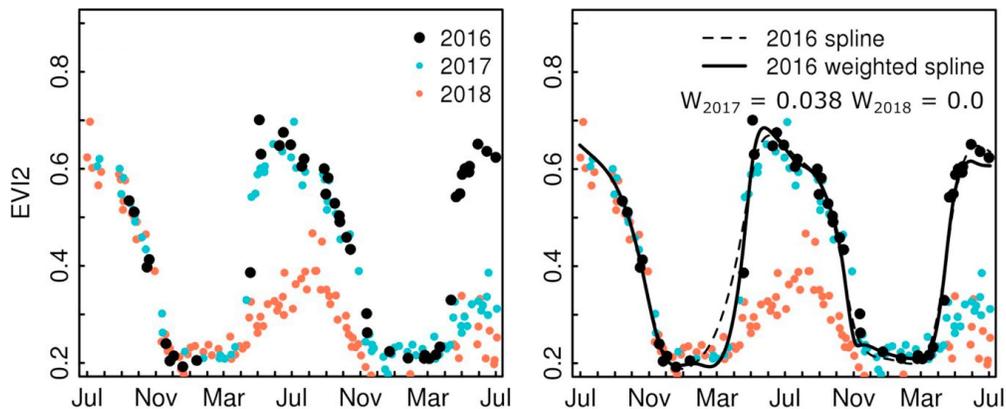
- Mappatura delle date relative alle transizioni tra diverse fasi fenologiche.
- Sensori multispettrali: MODIS, VIIRS, Landsat TM/ETM+/OLI, Sentinel-2 MSI.
- NDVI ed EVI: indici maggiormente utilizzati .
- Fusione tra dataset con differente risoluzione spaziale e temporale.
- Interpolazione dei dati mancanti a causa della copertura nuvolosa.



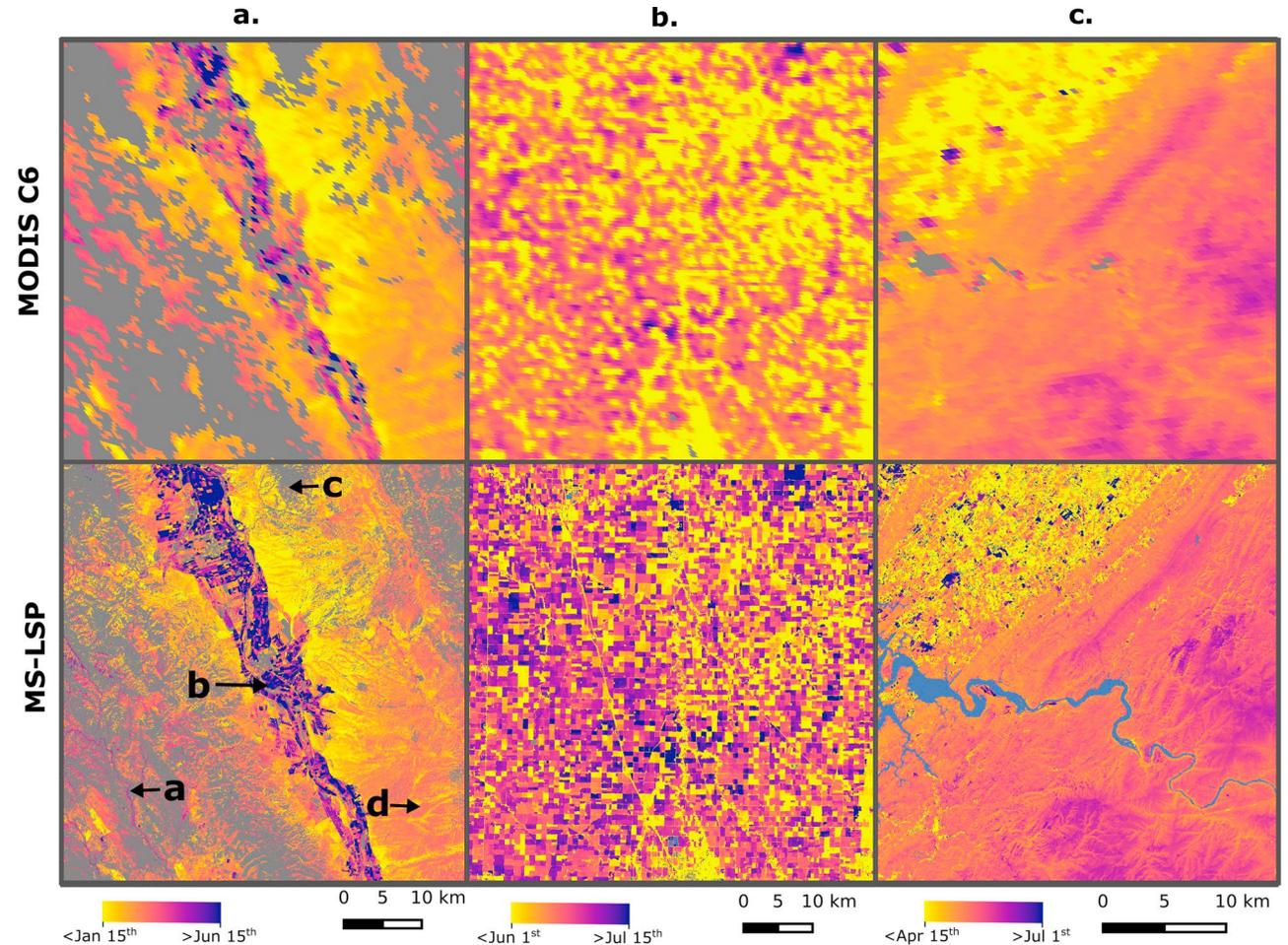
fonte: Bolton et al. 2020

Monitoraggio della fenologia

- Dati MODIS: risoluzione spaziale grossolana (500 m); risoluzione temporale alta (fino a 2 rivisitazioni al giorno)
- Dati L8 e S2 armonizzati a 30 m: aumento della risoluzione temporale fino a 3 giorni



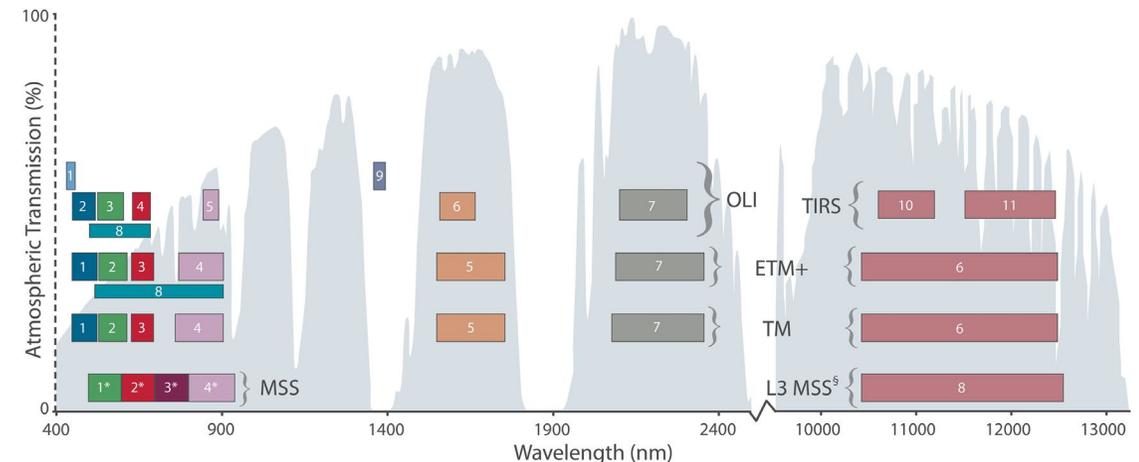
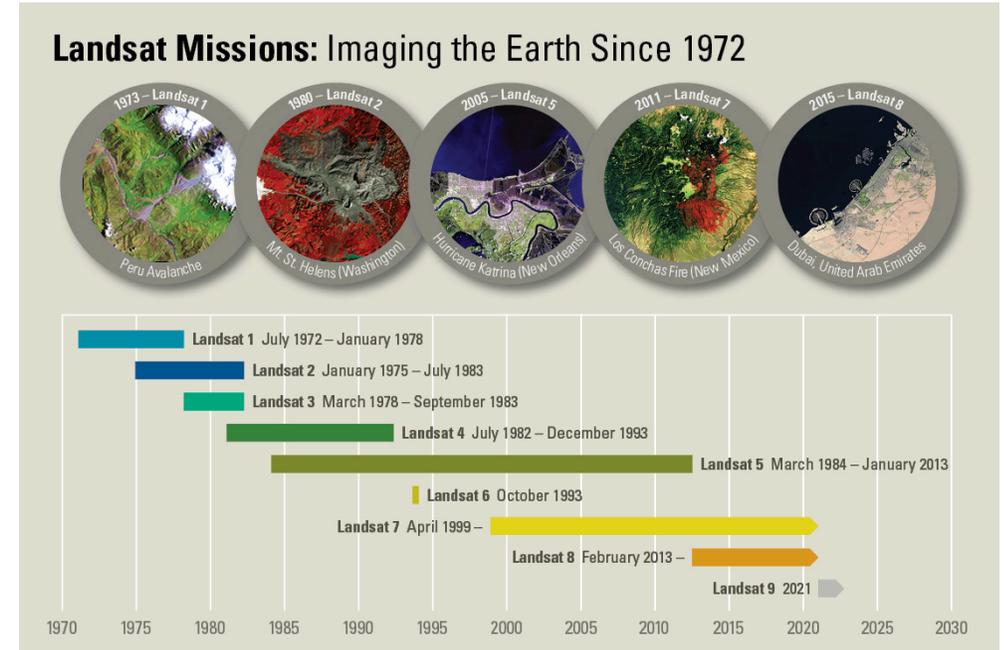
modificato da: Bolton et al. 2020



Mappe relative alla data di “mid-greenup” (anno 2018) in diverse regioni degli Stati Uniti a due risoluzioni spaziali, 500 m e 30 m (Bolton et al. 2020)

Dati satellitari multispettrali: missioni Landsat

- Primo satellite in orbita nel 1972, attualmente Landsat 7 e Landsat 8.
- Landsat 9 in orbita da fine settembre 2021.
- Risoluzione spaziale: 30 m multispettrale; 15 m pancromatico; infrarosso termico a 60 o 30 m.
- Risoluzione temporale: 16 giorni con un satellite; 8 giorni con 2 satelliti.
- Dal 2008 distribuiti gratuitamente dallo USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

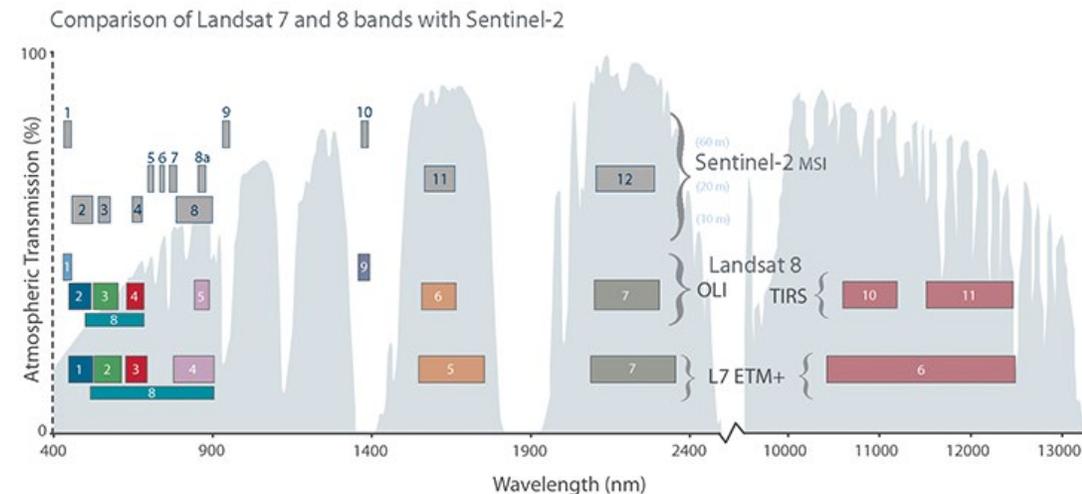
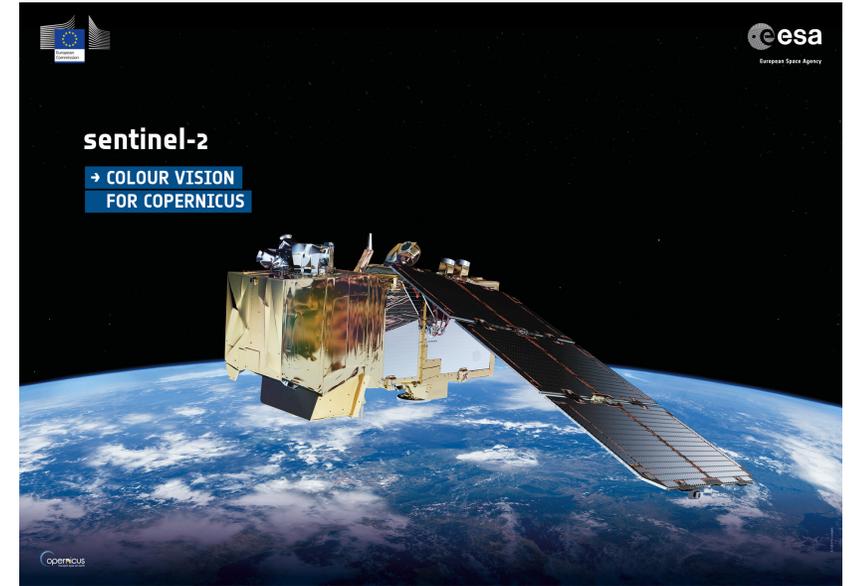


* MSS bands 1-4 were known as bands 4-7, respectively, on Landsats 1-3

§ The 240 m thermal band on Landsat 3 was out of spec within three weeks of launch and turned off in March 1979

Dati satellitari multispettrali: missione Sentinel-2

- Primo satellite in orbita nel 2015 (Sentinel-2A); Sentinel-2B in orbita nel 2017.
- 13 bande spettrali: RGB + NIR (10 m); 3 Red Edge, NIR, SWIR (20 m).
- Risoluzione temporale: 5 giorni (S2A + S2B nella stessa orbita ma separati di 180°).
- Continuità con le missioni SPOT e Landsat.
- Dati distribuiti gratuitamente dall'ESA.

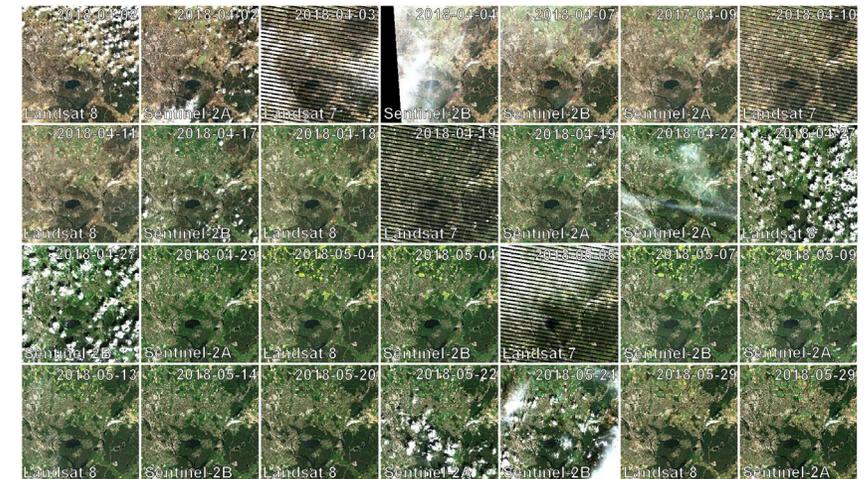
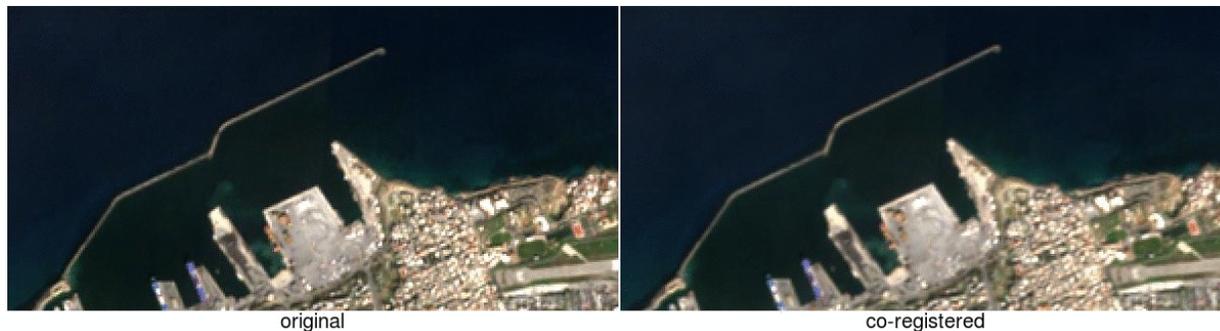
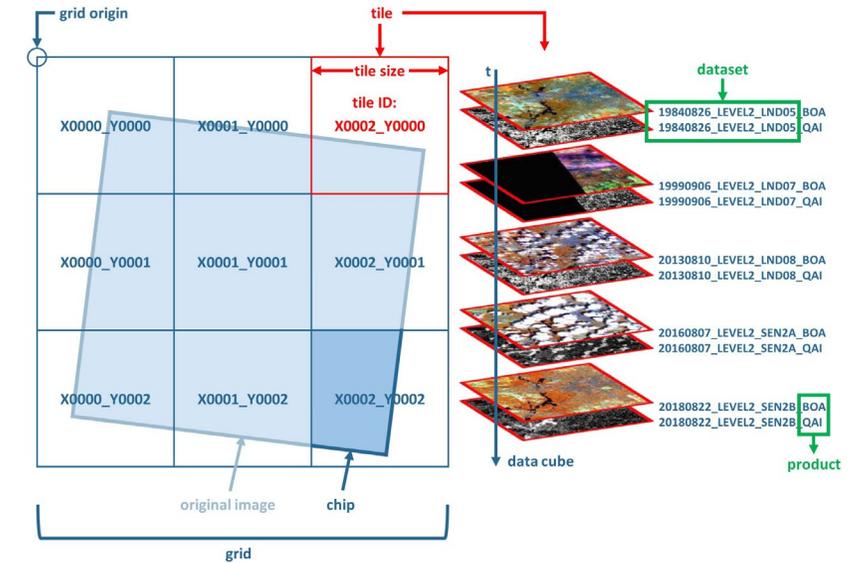
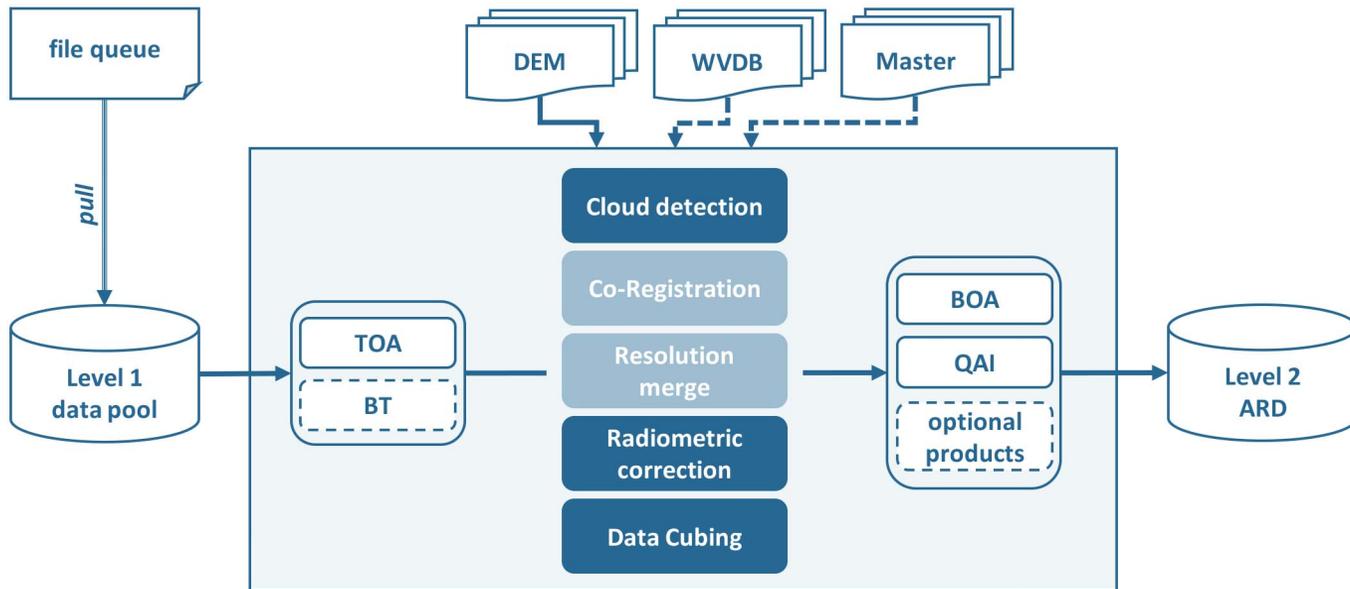


Dati satellitari multispettrali: preparazione del dataset

- Livello di preprocessing: corrisponde al tipo di informazione spettrale contenuta nell'immagine
- **LEVEL 1**: immagine georiferita e ortorettificata con valori di riflettanza al sensore (Top of Atmosphere – TOA)
- **LEVEL 2**: valori di riflettanza al suolo (Bottom of Atmosphere – BOA), correzione degli effetti topografici e dell'angolo di ripresa del sensore (Bidirectional Reflectance Distribution Function – BRDF)
- **LEVEL 2 ARD (Analysis Ready Data)**: valori BOA organizzati in una griglia con celle non sovrapposte di dimensione fissa (da 30 a 100 Km di lato)
- **LEVEL 3**: mosaici di immagini LEVEL 2, prodotti tematici (corpi idrici, aree bruciate, superfici coperte dalla neve)

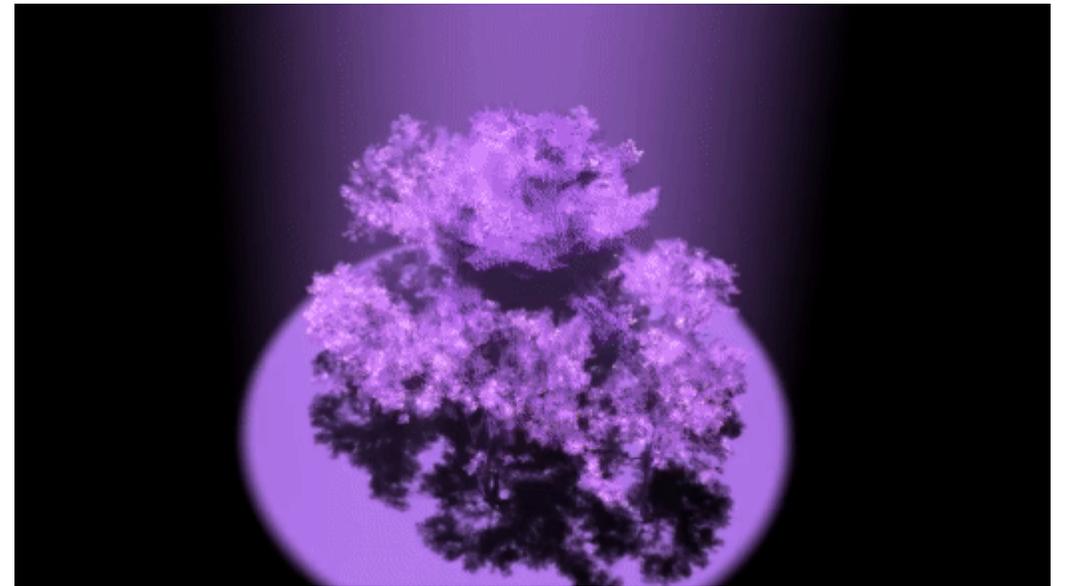
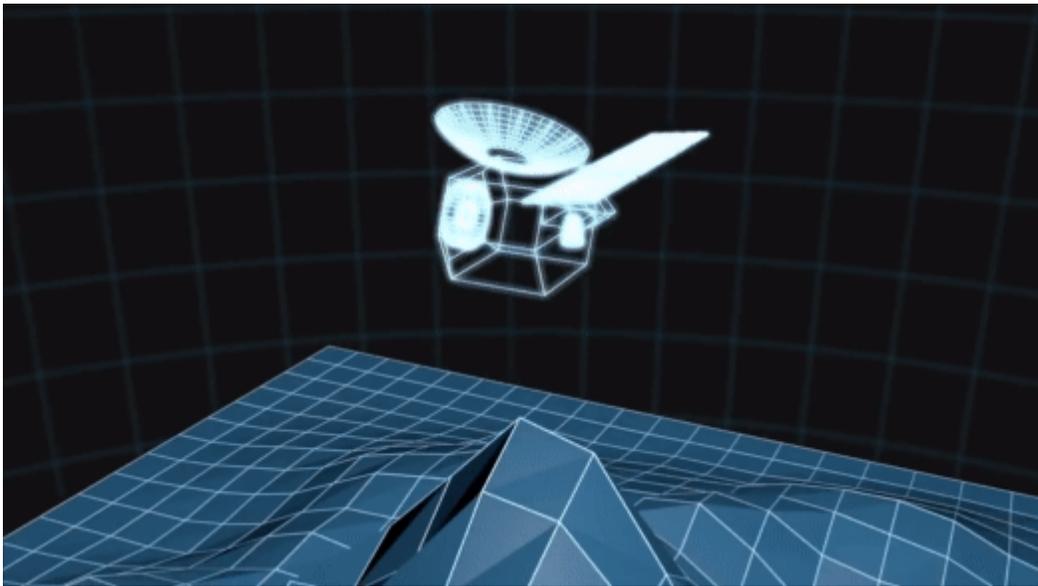
Dati satellitari multispettrali: preparazione del dataset

FORCE: Framework for Operational Radiometric Correction for Environmental monitoring
(<https://github.com/davidfrantz/force>)



I dati LiDAR

- Il LiDAR (Light Detection and Ranging) è una tecnologia che determina la distanza di un oggetto o una superficie usando impulsi laser.
- Come nella tecnologia RADAR, che opera nel campo delle radio onde, la distanza di un oggetto è determinata misurando l'intervallo di tempo tra la trasmissione di un impulso e la ricezione del segnale riflesso.
- Informazioni sulla struttura verticale delle chiome (altezza, inserzione chioma, geometria rami e foglie).

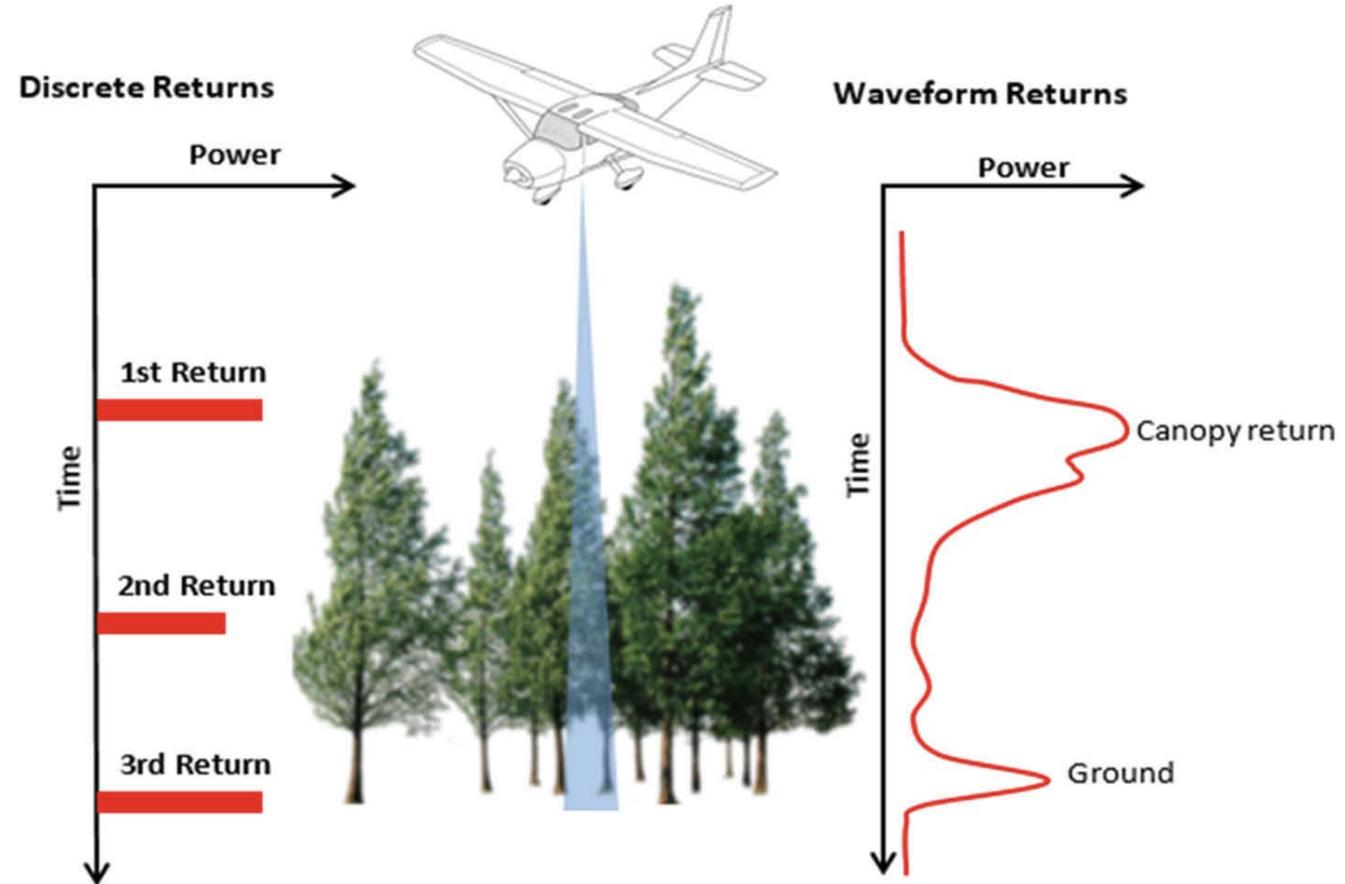


I dati LiDAR

Modalità di registrazione dell'energia luminosa che ritorna al sensore:

- Ritorni discreti (*discrete returns*), corrispondenti ai picchi di intensità dell'energia riflessa.
- Forma d'onda completa (*full waveform*).

Ciascun sistema di registrazione offre pregi e difetti.



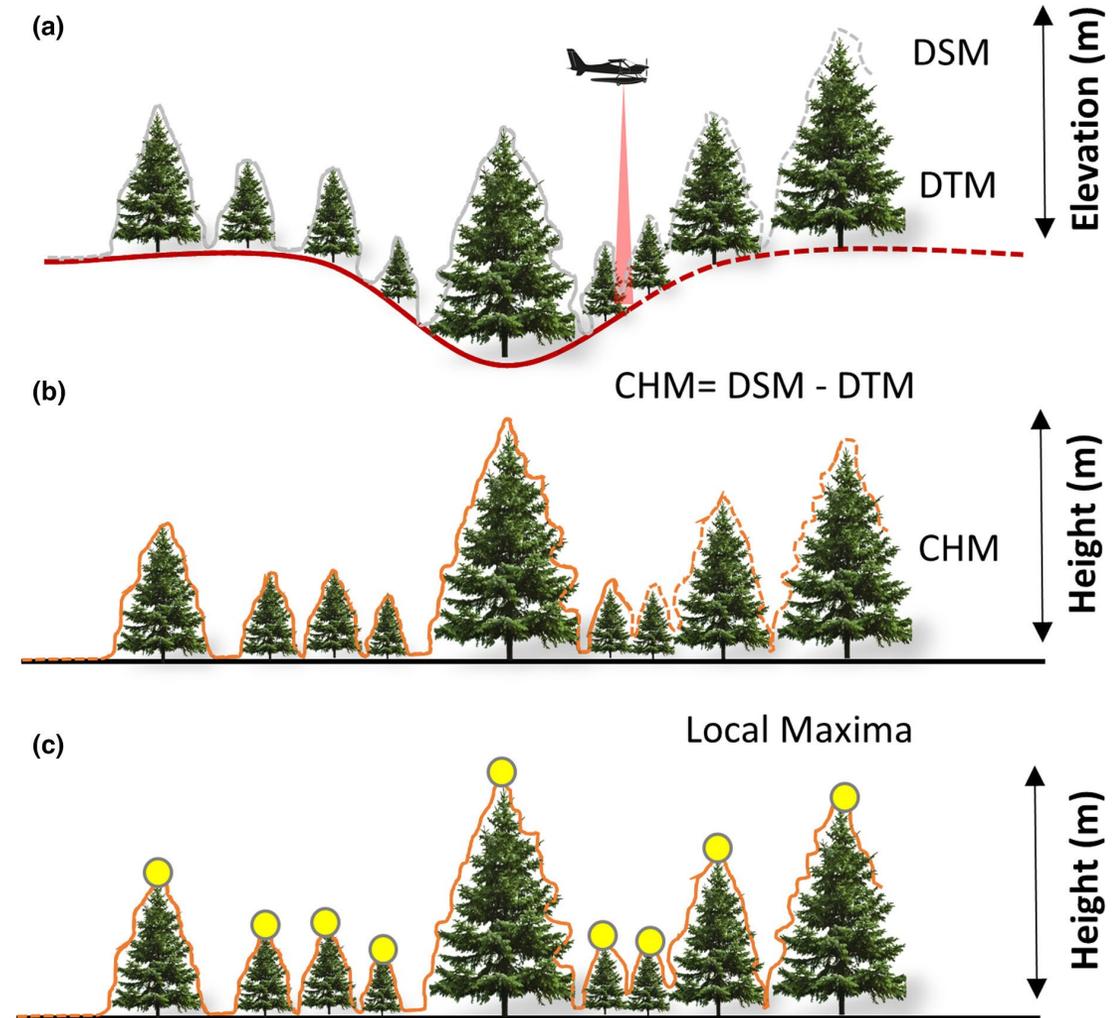
I dati LiDAR

I dati LiDAR forniscono tre prodotti principali:

- **DSM** – Digital Surface Model
- **DTM** – Digital Terrain Model
- **CHM** – Canopy Height Model

Il CHM si ottiene per sottrazione tra il DSM ed il DTM.

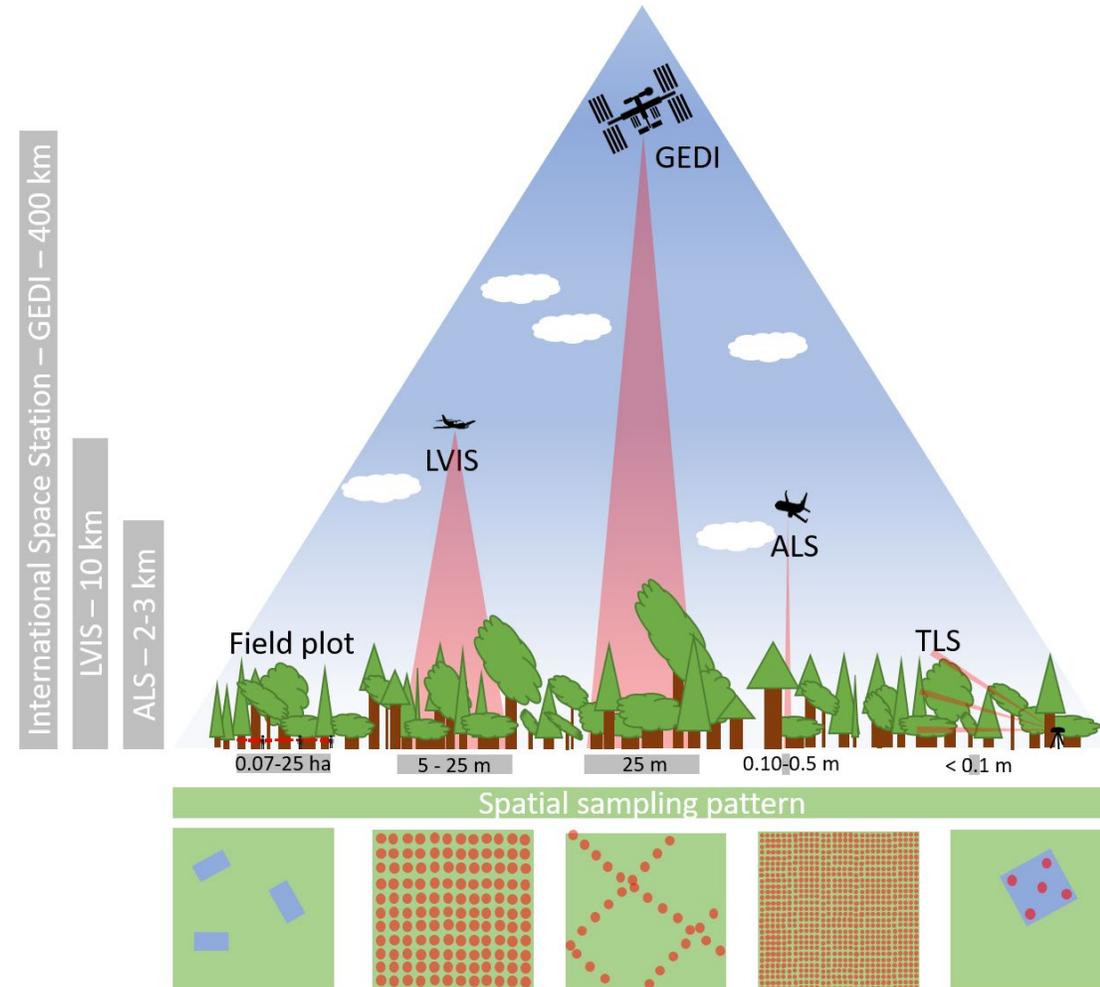
Dal CHM si possono ricavare informazioni specifiche sulle caratteristiche delle chiome.



I dati LiDAR

Sensori LiDAR montati su differenti piattaforme:

- Treppiedi – TLS (Terrestrial Laser Scanner).
- Droni.
- Aerei – ALS (Aerial Laser Scanner).
- Satelliti.



fonte: University of Maryland/ NASA

I dati LiDAR satellitari: la missione GEDI

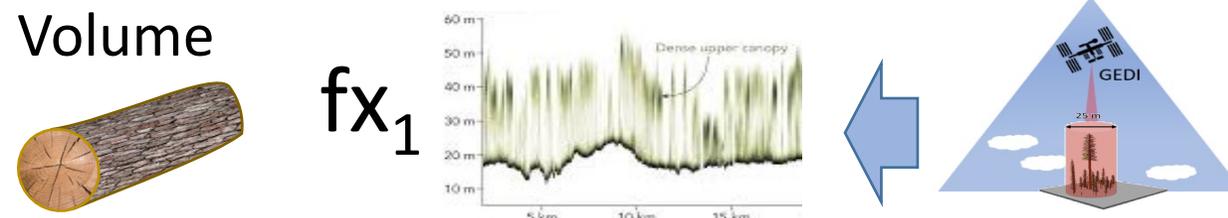


Mappatura del volume legnoso con dati GEDI

1. Rilievo e stima del volume legnoso a terra



2. Modello a scala locale:
volume a terra – LiDAR satellitare



3. Modello a scala regionale:
volume da LiDAR satellitare – dati
multispettrali

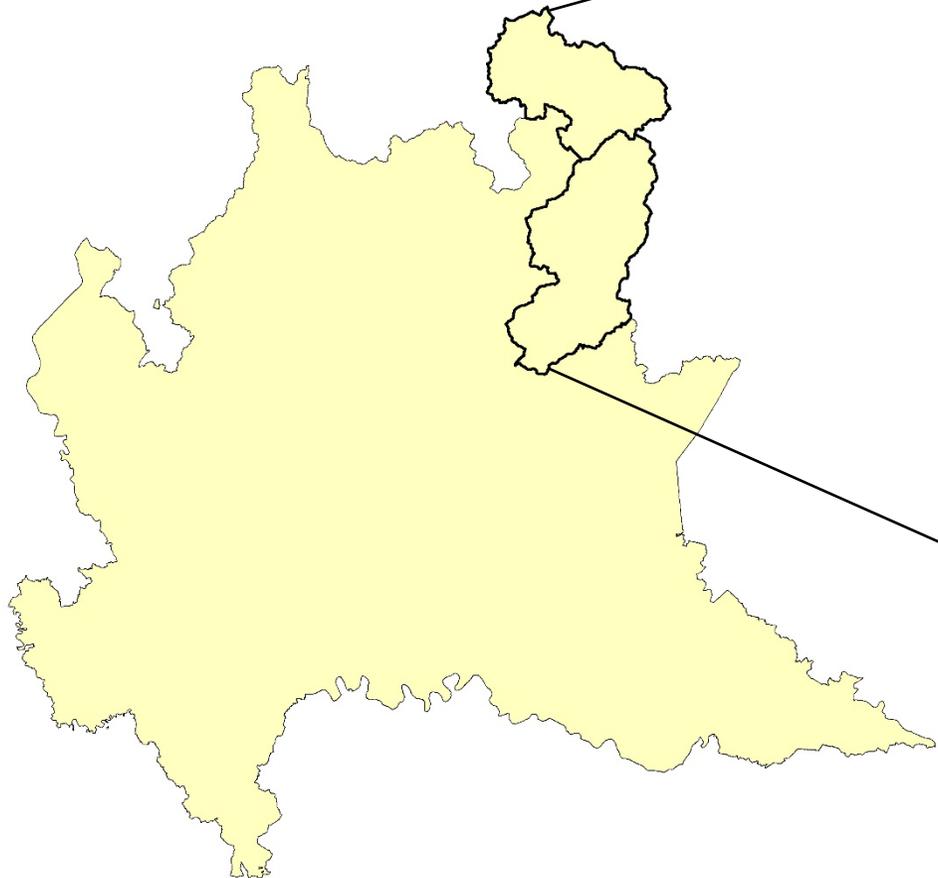


4. Stima volume su intera area

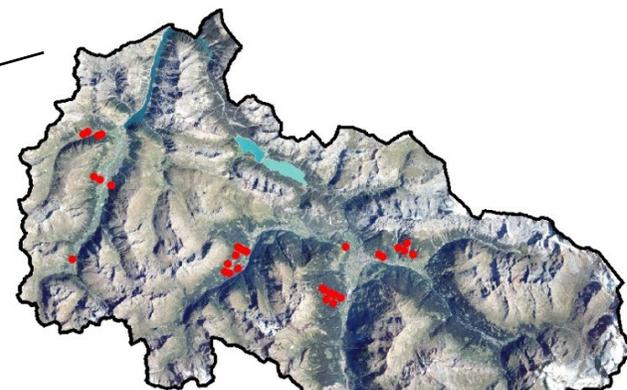


Mappatura del volume legnoso con dati GEDI

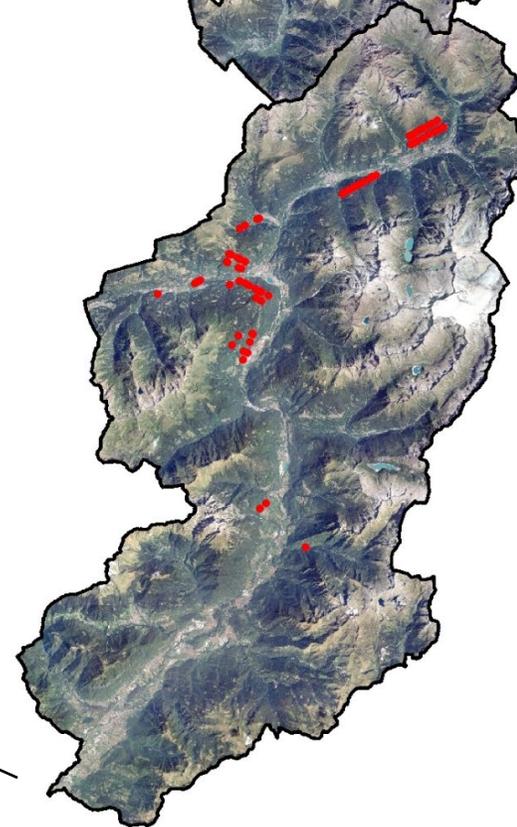
Fase 1. Rilievo e stima biomassa a terra



VALTELLINA



VALCAMONICA



Mappatura del volume legnoso con dati GEDI

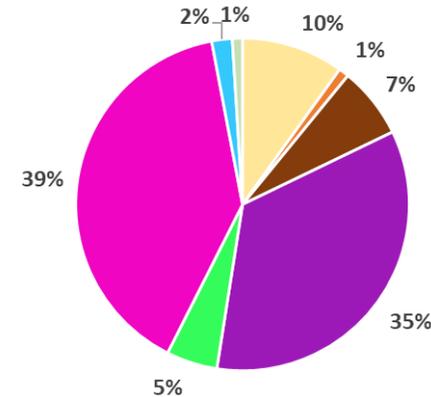
Fase 1. Rilievo e stima biomassa a terra

Aree di saggio & Categorie Forestali

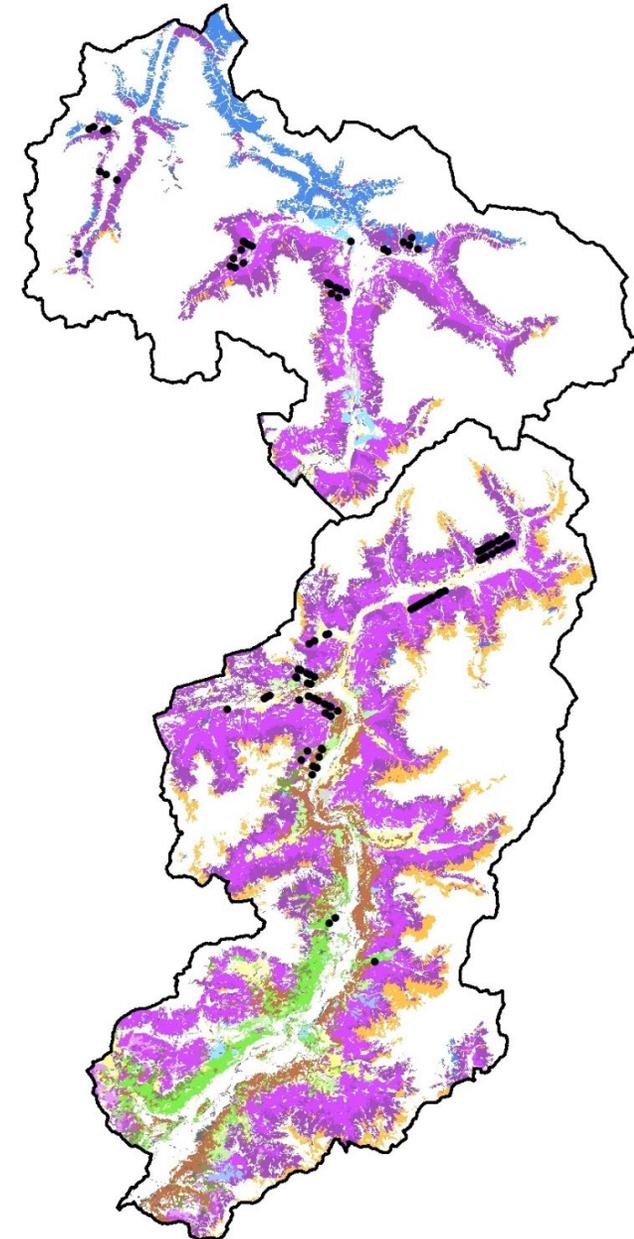
- numero di aree per categoria forestale proporzionale alla superficie occupata
- prevalenza di conifere (76%)

Stima del volume legnoso

- 4 comprensori: Valtellina zona Livigno, Valtellina zona Bormio, alta Valcamonica, bassa Valcamonica
- curve ipsometriche per ciascun comprensorio
- tavole di cubatura dell'inventario forestale nazionale (INFC)



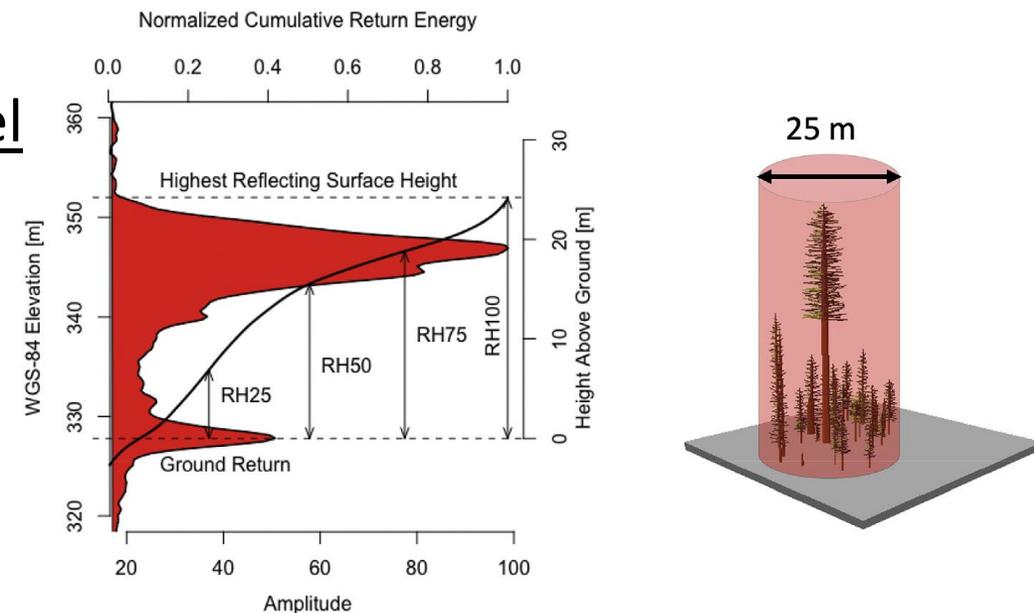
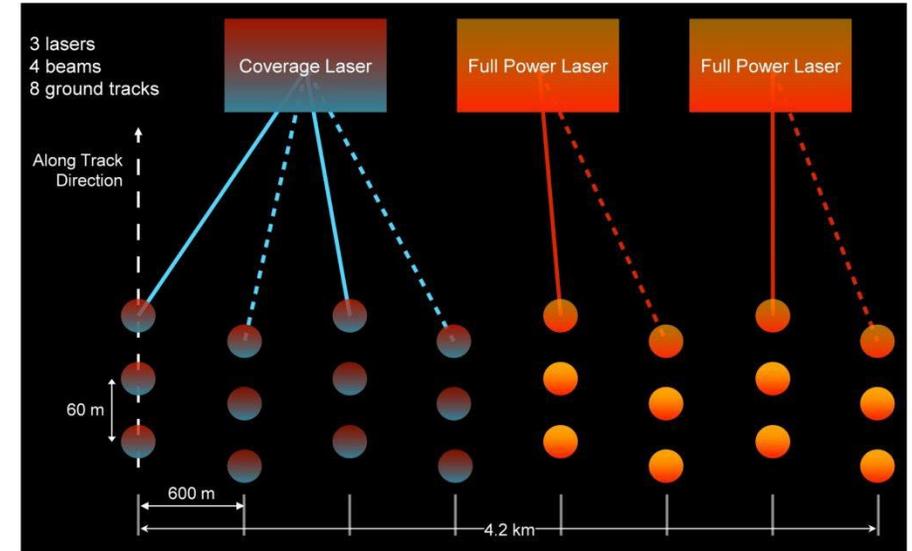
CATEGORIA FORESTALE



Mappatura del volume legnoso con dati GEDI

Fase 2. Modello a scala locale: volume a terra – LiDAR satellitare (GEDI):

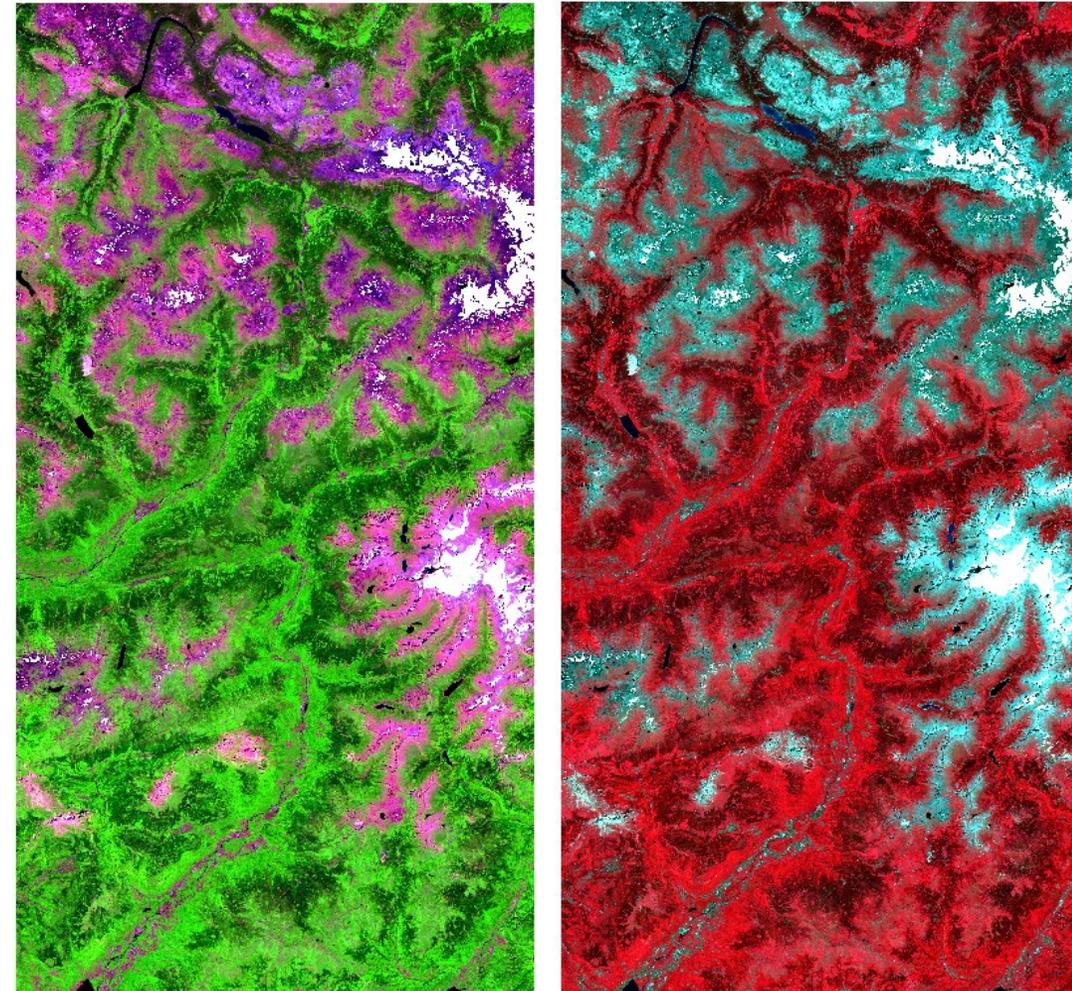
- Dati GEDI L2A acquisiti nel 2019 e 2020 (1/5 – 31/10), distribuzione cumulata delle altezze (altezze relative).
- Selezione punti GEDI in funzione della potenza del segnale inviato (power beams) e la qualità del segnale di ritorno
- Modello di regressione lineare multipla tra volume legnoso misurato in campo ed altezze relative da GEDI



Fase 3. Modello a scala regionale: volume da LiDAR – dati multispettrali Sentinel-2

Variabili predittive:

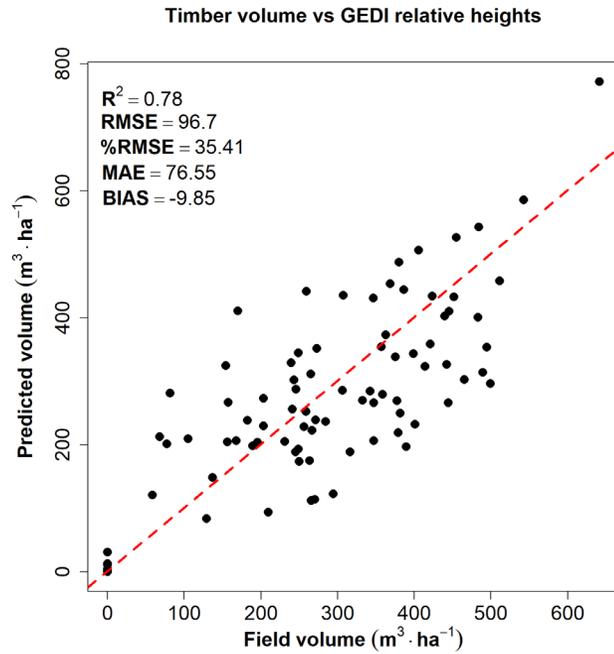
- 9 bande spettrali Sentinel-2 a 20 m (Blue, Green, Red, Rededge1, Rededge2, Rededge3, NIR, SWIR1, SWIR2).
- indici di vegetazione (es. NDVI, EVI, NDRE1, NDRE2, NDRE3, NDMI, NBR, NBR2, MSI).
- metriche relative alla fenologia (Spectral Angle Mapper Median Absolute Deviation).



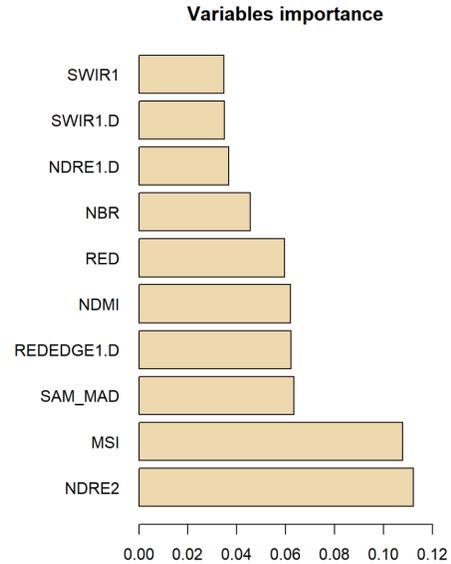
Mappatura del volume legnoso con dati GEDI

Risultati

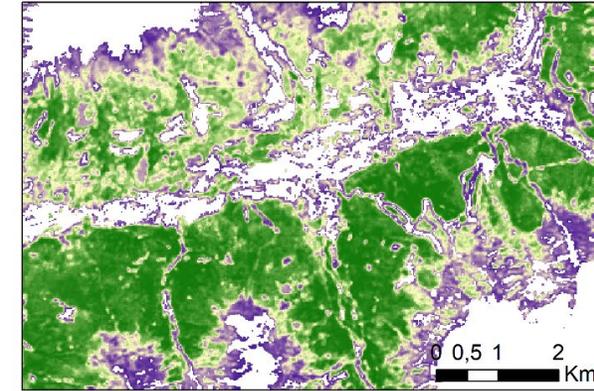
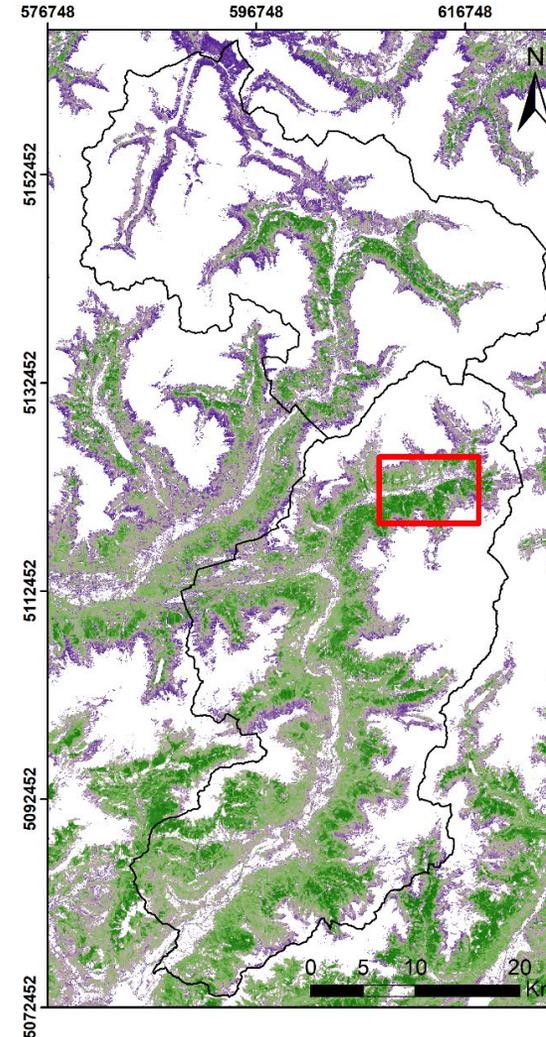
Fase 2



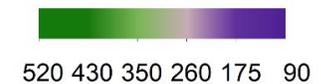
Fase 3



Fase 4



Timber volume (m^3 / ha)



Criticità e prospettive

Incertezza geolocalizzazione GEDI ($v1 \sim 20$ m; $v2 \sim 10$ m) riduce aree di saggio utili per il modello a scala locale.

Sensibilità limitata dei dati multispettrali alla quantità di biomassa.

Assenza di dati LiDAR impedisce una stima accurata dell'incertezza relativa alle altezze misurate con GEDI.

Dati GEDI unici dati LiDAR disponibili su tutto il territorio nazionale, utili per standardizzare informazioni su biomassa.

A photograph of a long, straight asphalt road stretching into the distance, flanked on both sides by tall, slender trees with vibrant red foliage. The sky is overcast with grey and white clouds. The overall scene is surreal due to the red color scheme.

Grazie per l'attenzione

donato.morresi@unito.it