

Borgogno Mondino 2023

Introduzione al LiDAR aereo (ALS)

Borgogno Mondino 2023

Borgogno Mondino 2023

LiDAR = *Light Detection and Ranging*

Borgogno Mondino 2023

COUSA E'?

Si tratta di una tecnica di telerilevamento «attivo» ad alta risoluzione per il rilievo topografico.

Il rilievo topografico serve a posizionare punti nello spazio, la cui interpretazione grafica definisce le forme che compongono il contesto territoriale.

Più punti siamo in grado di rilevare, migliore è la rappresentazione del territorio che esprimiamo.

La posizione di punti nello spazio passa attraverso la misura delle loro coordinate tridimensionali (X,Y,Z) rispetto ad un certo sistema di riferimento.

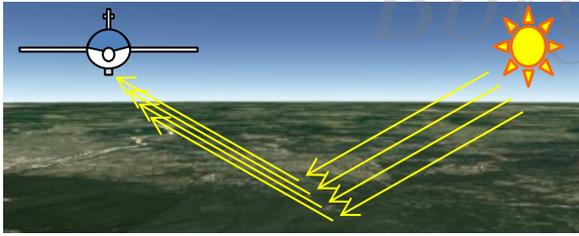
La misura è sempre costituita da due numeri: **VALORE (X,Y,Z)** ± **PRECISIONE (s_{xy} , s_z)**

Operare un rilievo LiDAR significa rilevare quasi istantaneamente un numero elevatissimo di punti (cioè definire la tema di coordinate che ne caratterizza la posizione). **QUANTI PUNTI?**

Borgogno Mondino 2023

TELERILEVAMENTO PASSIVO E ATTIVO

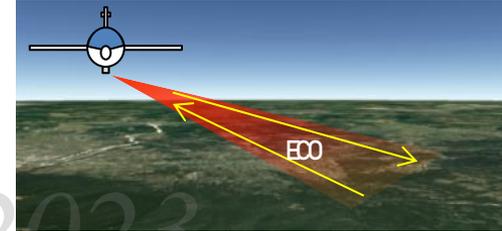
TR passivo → Sensori Multispettrali



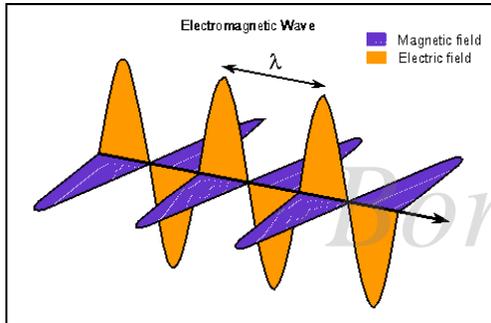
Nel TR passivo la sorgente di segnale è esterna al sistema rilevatore

Nel TR attivo la sorgente di segnale costituisce parte del sistema rilevatore → ECO

TR attivo → LIDAR, RADAR



Il fondamento è l'interpretazione quantistica della radiazione EM (legge di Planck) per la quale 1 FOTONE (pacchetto di energia che viene trasferito sotto forma d'onda) trasporta un carico energetico (Joule) pari a :



$$E = h\nu = hc/\lambda$$

© Nck Strobel - <http://astronomynotes.com/light/s2.htm>

Dove:

$c = v \cdot \lambda$: è la velocità della luce nel vuoto [m/s]

λ : lunghezza d'onda [m]

ν : frequenza [Hz]

E : energia di un fotone [Joule]

h : $6.626 \cdot 10^{-34}$ [J·sec], costante di Planck

ACQUISIZIONE LIDAR AEREO (ALS, AERIAL LASER SCANNER)

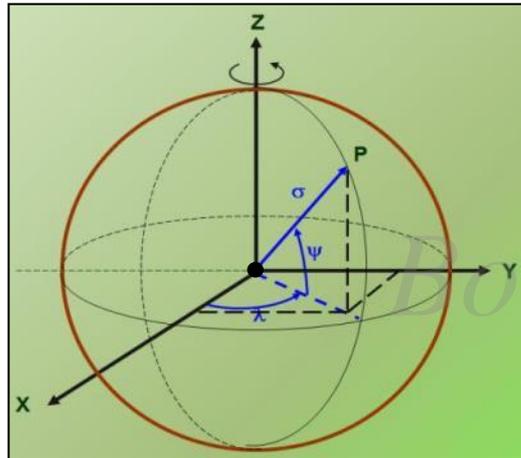
Il LiDAR è in grado di battere milioni di punti in pochissimo tempo.

Si basa sull'invio ripetuto di un impulso elettromagnetico a lunghezza d'onda singola (vedi seguito) con frequenza (*pulse rate*) che dipende dalle caratteristiche e regolazioni dello strumento.

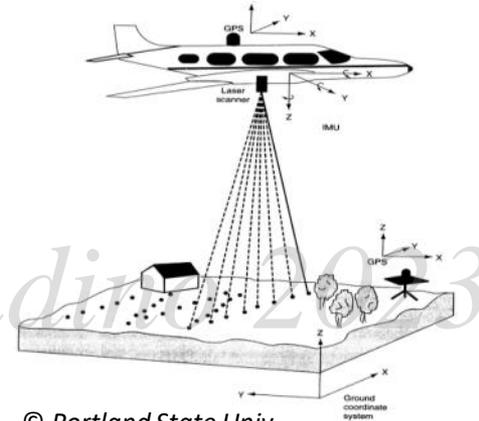
Il ritorno dell'impulso inviato viene registrato e processato per derivare il **tempo di volo** tra il momento dell'emissione e la registrazione del ritorno.

Nota la posizione e l'assetto del sensore al momento dell'invio è possibile risolvere la posizione del punto riflettente mediante un sistema di coordinate polari, facilmente traducibili poi nelle corrispondenti coordinate cartesiane.

s è derivata noto il tempo di volo del segnale (in andata e ritorno) e le coordinate del sensore;

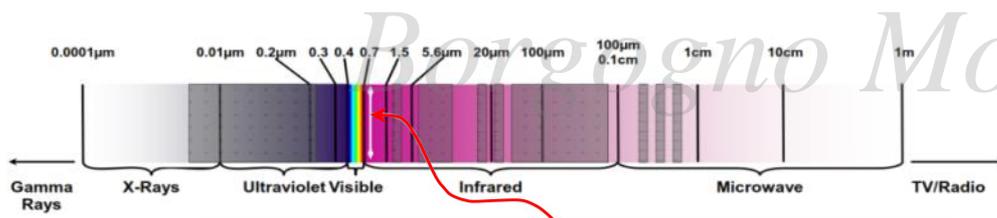


$$\begin{cases} X = \sigma \cos \psi \cos \lambda \\ Y = \sigma \cos \psi \sin \lambda \\ Z = \sigma \sin \psi \end{cases}$$



© Portland State Univ.

QUALI LUNGHEZZE D'ONDA?



La maggior parte dei laser lavorano nella regione del NIR dello spettro EM (0.7 -1.6 μm).

- Medio Infrarosso (SWIR, 1500-2000 nm) per METEO
- **NR (700-1060 nm)** per rilievo territoriale e terrestre
- **BLUE-VERDE (500-600 nm)** per batimetria
- **UV (250 nm)** per METEO

COMPONENTI del SISTEMA ALS

- LASER SCANNER
- OROLOGIO AD ALTA PRECISIONE (o misuratore di fase)
- Sistema di posizionamento satellitare GNSS per misurare la posizione del sensore
- Sistema di misura dell'assetto (angoli) del sensore (l'ipotesi di NADIRALITA' non è mai rispettata) → IMU *Inertial Measurement Unit*
- Sistema di registrazione ed archiviazione dati
- Stazione MASTER GNSS per rilevamento RTK (tempo reale con precisione centimetrica)

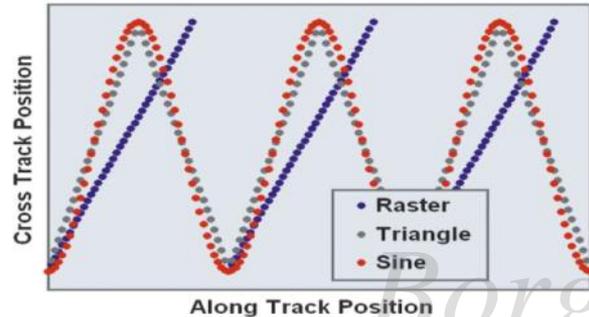
COMPONENTI del SISTEMA ALS: SCANNER

Borgognò Mondino 2023

Leica ALS70-CM



© Leica Geosystem



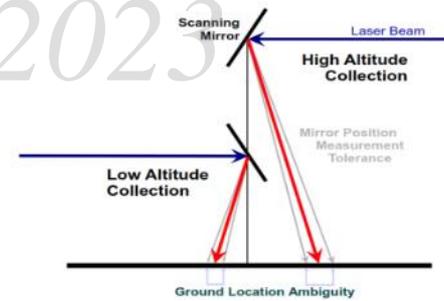
© Leica Geosystem

Sistemi di scansione

- a specchio oscillante (SO)
- a specchio rotante (SR)

Determinano diversi pattern di scansione

- (SO) Triangolo (o dente di sega) stabilizzato-sine, o semplice)
- (SR) Raster (o scansione parallela)



• Modalità di invio degli impulsi

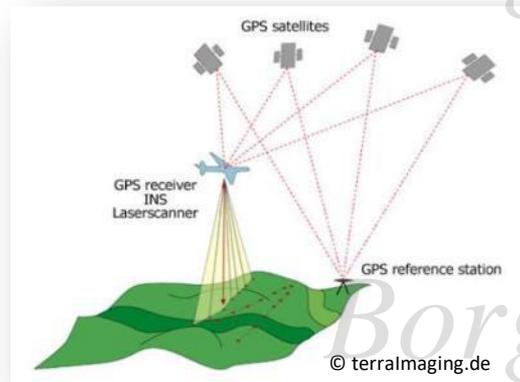
- Single Pulse in Air (SPIA) → l'impulso successivo parte quando il precedente è tornato
- Multi Pulse in Air (MPIA) → un secondo impulso parte prima del ritorno del precedente (maggiore densità).

© Leica Geosystem

		Model	
		ALS70-CM ALS70-HP	ALS70-HA
Size (cm), Weight (kg)	Scanner	37 W x 68 L x 26 H 43 kg	37 W x 68 L x 27 H 43 kg
	Control Electronics	45 W x 47 D x 36 H 45 kg	
Operating Temperature	Scanner	0-40°C cabin-side temperature	
	Control Electronics	0-40°C	
Flight Management		FCMS	
Power Consumption		910 W @ 22.0- 30.3 VDC	

Borgognò Mondino 2023

COMPONENTI del SISTEMA ALS: GNSS/IMU

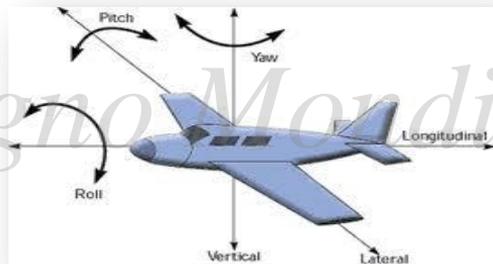
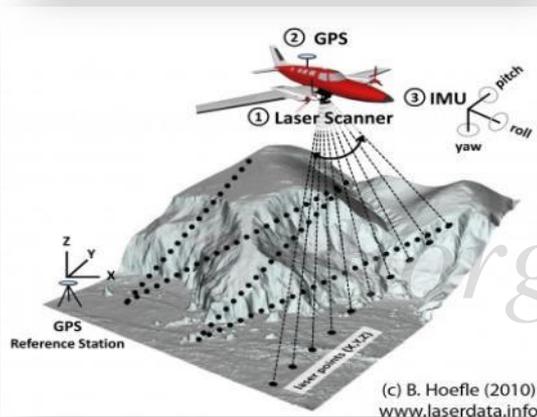


La misura della posizione di un generico punto a terra presuppone la conoscenza dei parametri di posizione (X,Y,Z) e assetto (ω, ϕ, κ) del centro di fase del LASER

Il GNSS (Global Navigation Satellite System) operante in modalità differenziale/relativo – RTK (*Real Time Kinematic*) o in post processamento – permette la misura della posizione con precisione di qualche centimetro.

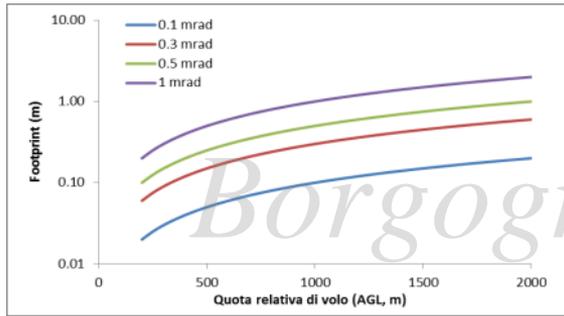
La piattaforma inerziale (IMU) è invece utilizzata per la misura degli angoli di assetto del velivolo (quindi del Laser che vi è solidale).

La precisione nella determinazione dell'assetto risulta per Beccheggio (*pitch*) e rollio (*roll*) $<0.005^\circ$; per imbardata (*yaw*): $<0.008^\circ$.

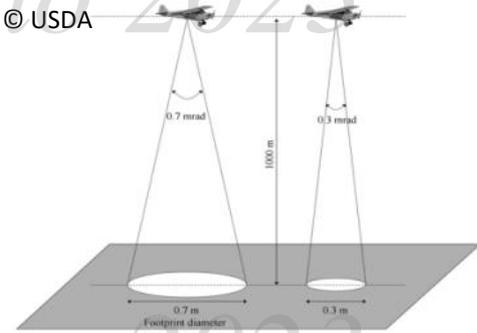


DEFINIZION

Beam Footprint (m): diametro dell'impronta a terra del raggio Laser (approssimativamente vale $F = H_{\text{volo}} \cdot \text{IFOV}$)

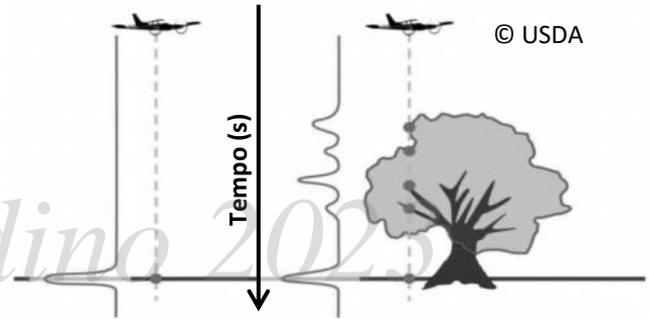


© USDA



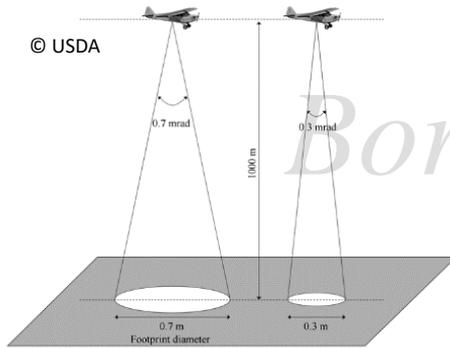
In forza della *beam divergence* lo stesso impulso colpirà una superficie più o meno estesa a terra generando, conseguentemente, ritorni multipli verso il sensore. La registrazione selettiva dei diversi ritorni permette dunque di misurare la posizione di più punti a partire da un singolo impulso. I primi ritorni al sensore saranno relativi a punti più vicini al sensore (verosimilmente più alti sul piano campagna), gli ultimi a quelli più lontani (più bassi).

© USDA



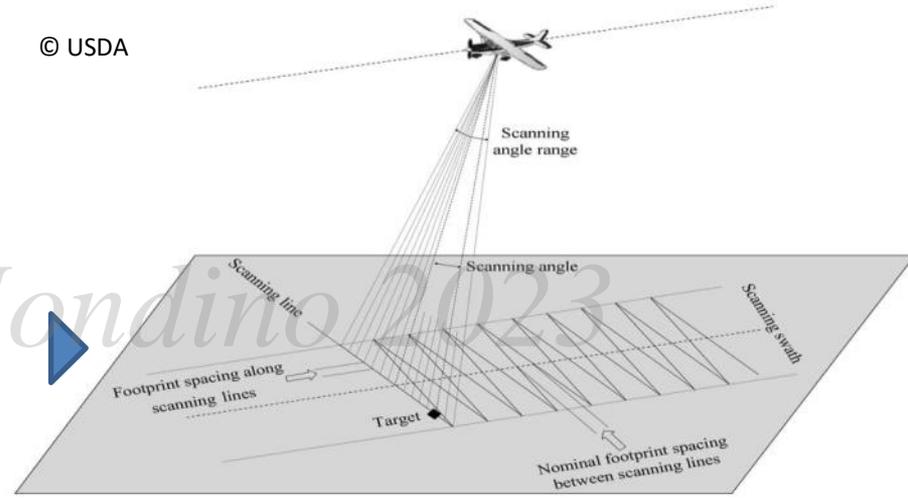
DEFINIZIONI

- **SCANRATE** numero di linee al secondo (50 – 200 Hz)
- **PULSE RATE** numero di impulsi al secondo (50K – 500K Hz)
- **FOV** (Field of View, °): campo di vista del sensore [0-75°]



IFOV (Instantaneous Field of View o Beam Divergence, **mrad**): divergenza angolare del raggio Laser inviato a terra [0.1-1.0 **mrad**, cioè 20'.63 – 3.44]

© USDA



- **ANGOLO DI SCANSIONE (°)**: angolo formato tra l'asse ottico del sistema (normale al piano focale) e la direzione di puntamento del fascio (varia lungo la linea di scansione). Coincide con la direzione di puntamento del laser solo se l'asse ottico è verticale.

CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA SINGOLA ACQUISIZIONE

Densità di impulso: numeri di impulsi inviati per m² di superficie piana (dipende dal Pulse Rate, dalla Beam Divergence e dalla quota di volo)

	Scan rate (SR, linee/s)	Pulse rate (PR, impulsi/s)	Quota di volo (H, m)	Tempo di volo (Tv, s)	Velocità luce (c, m/s)	Velocità aereo (v, km/h)	FOV
	150	250000	400	2.66851E-06	299792458	250	30
Durata dell'impulso/linea (1/SR,1/PR)	0.006667	0.000004					
N. impulsi nel tempo di volo (Nt)		0.67					
Massima distanza in assenza di ambiguità di impulso (Dmax, m)	600	$D_{max} = \frac{1}{2PR} \cdot c$					
Spaziatura linee di scansione nella direzione del volo (DL, m)	0.46	$DL = v \cdot \frac{1}{SR}$					
N. punti lungo la linea di scansione (NL)	1667	$NL = \frac{PR}{SR}$					
		$L = 2 \cdot H \cdot \text{atan}\left(\frac{FOV}{2}\right)$					
Lunghezza di una linea di scansione (L, m)	204.84	209.44					
Spaziatura media tra i punti lungo la linea di scansione (DP, m)	0.12	$DP = L/NL$					
densità media dei punti (pt/m2)	24	$DmP = \text{floor}[1/DP \cdot \text{ceil}(1/DL)]$					

CLASSIFICAZIONE DEI LASER SCANNER

TOFLIDAR

Il tempo di volo di un impulso, misurato con orologi di alta qualità, viene utilizzato per determinare la distanza di un punto dal sensore.

$$D = \frac{c \cdot t}{2}$$

dove c = velocità della luce (circa 299,792,458 m/s), t = tempo di volo (andata e ritorno).

La risoluzione temporale (Δt) è definita dalla sensibilità dell'orologio che deve garantire misure dell'ordine di 10^{-10} secondi (es. distanza di 500 m $\rightarrow t = 1000/c = 3.34 \cdot 10^{-6}$ s; per $t = 10^{-10}$ s $\rightarrow D = 10$ cm).

La RANGE RESOLUTION (ΔD) è la distanza minima apprezzabile in conseguenza a Δt .

$$\Delta D = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

1) Sistemi a misura di tempo (Time-based)

1a) Time-of-Flight, TOF (Pulse-based)

1b) Phase-based (misure di fase)

2) Sistemi Triangolatori (accoppiano laser e camera digitale)

PHASE-BASED LIDAR

Si misura lo sfasamento tra l'impulso emesso e il suo ritorno.

$$D = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} + n \frac{\lambda}{2}$$

dove φ = sfasamento onda sinusoidale (radianti), λ = lunghezza d'onda della sinusoide (m), n = multiplo intero.

- più veloce rispetto a TOF,

- distanza limite (circa 150 m) oltre la quale gli sfasamenti non possono essere convertiti in distanze.

Es. Leica HDS6000 (79 m), Faro LS120 (120 m).

Precisione: $\sigma_D = \pm \frac{\lambda}{2} 10^{-3}$

MODALITA' di ACQUISIZIONE

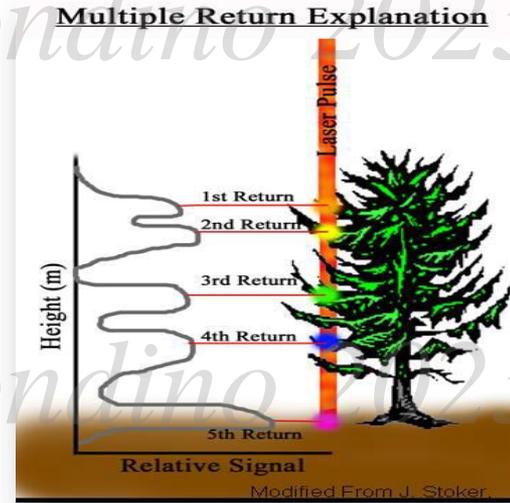
Borgogno Mondino 2023

DISCRETE RETURN SYSTEM

Registrano diversi picchi energetici di ritorno di un singolo impulso inviato corrispondenti, ad esempio, a diverse altezze della chioma.

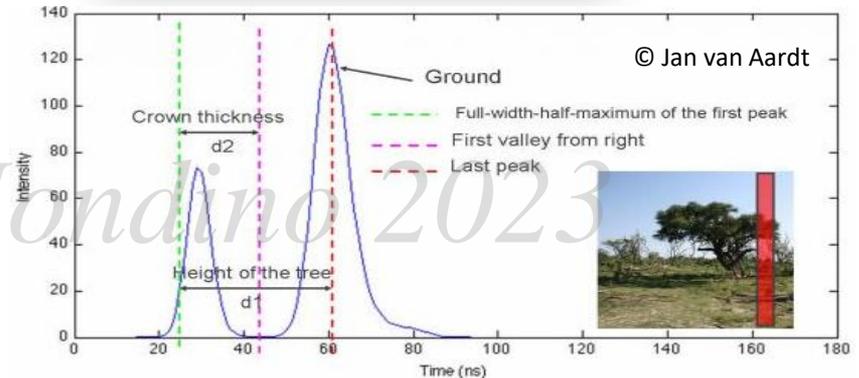
Esistono sistemi:

- a ritorno singolo (*Single Return Sensor*) → il primo
- a ritorno doppio: primo (*First Pulse*) e ultimo picco (*last pulse*)
- a ritorno multiplo (*Multiple Return Sensor*): fino a 5 ritorni dallo stesso impulso



FULL WAVEFORM SYSTEMS

Registrano l'intera successione di ritorni corrispondenti ad un singolo impulso campionando con regolarità il segnale in ingresso.



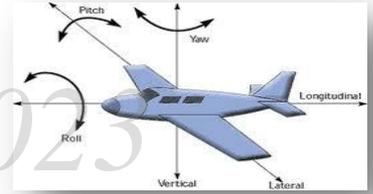
CARATTERISTICHE delle ACQUISIZIONI ALS (TOF)

- Le osservazioni possono essere diurne e notturne (sensore attivo);
- Le misure sono numerose, con precisioni elevate (cm) e veloci;
- ALS non può operare in presenza di nebbia, nuvole, pioggia o neve (conseguenza delle lunghezze d'onda utilizzate).

© Leica Geosystem

	Model		
	ALS70-CM	ALS70-HP	ALS70-HA
Maximum Flying Height (m AGL)	1'600	3'500	5'000
Maximum Measurement Rate (kHz)	500	500	250
Field of view (degrees)	0- 75 (full angle, user adjustable)		
Roll stabilization (automatic adaptive, degrees)	75- active FOV		
Scan patterns (user selectable)	sine, triangle, raster		
Maximum Scan Rate (Hz)	sine	200	100
	triangle	158	79
	raster	120	60
Numbers of returns	unlimited		
Number of intensity measurements	3 (first, second, third)		
Accuracy	see graph		
Storage media	removable 500 GB SSD		
Storage capacity (hours @ max measurement rate)	6	12	

ACCURATEZZA E FONTI D'ERRORE



Ogni componente del sistema ALS opera misure con diversa precisione:

- Msuratore di distanza (scanner) : $s=1-5$ cm
- GNSS RTK: 2-5 cm
- Msura dell'angolo di scansione: 0.01°
- Msure di ASSETTO (IMU) per beccheggio/rollio: $<0.005^\circ$, per imbardata: $<0.008^\circ$, con beam divergence 0.25-5 mrad.

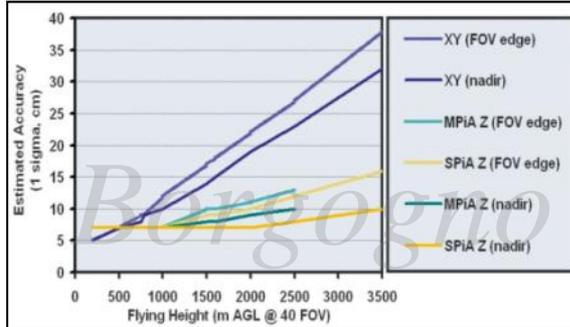
Accuratezza del rilievo (posizione del punto generico della nuvola)

Accuratezza verticale: 5-15 cm

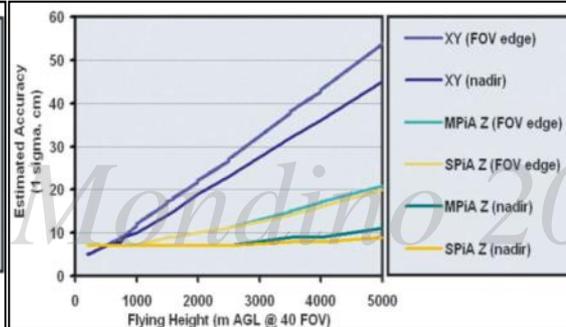
Accuratezza orizzontale: 15-50 cm (forte dipendenza dalla *Beam Divergence*).



Leica ALS70-**CM** e ALS70-**HP**

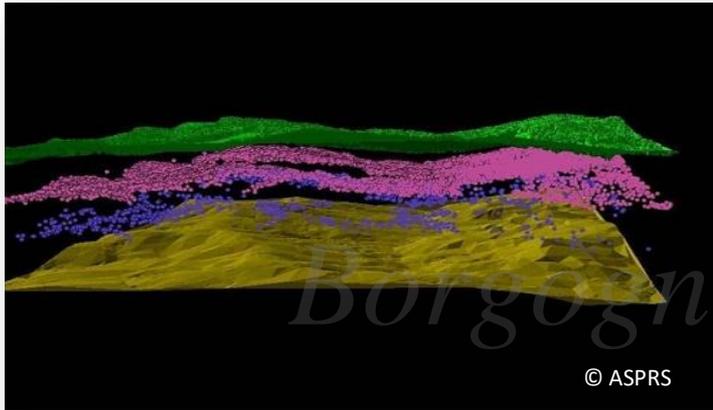


Leica ALS70-**HA**

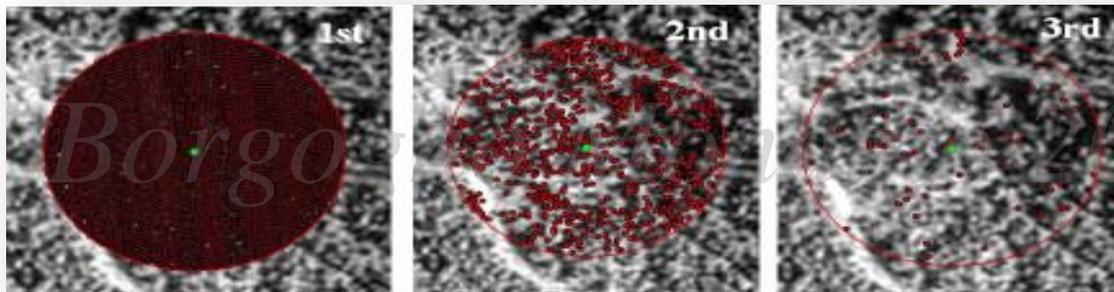


RITORNI MULTIPLI SU SUPERFICIE BOSCATI

Primo ritorno: chioma degli alberi (verde), **secondo e terzo ritorno:** sottobosco «alto» (rosa) e sottobosco «basso» (viola), **ultimo ritorno:** suolo (ocra).



Ritorni multipli su superficie boscata

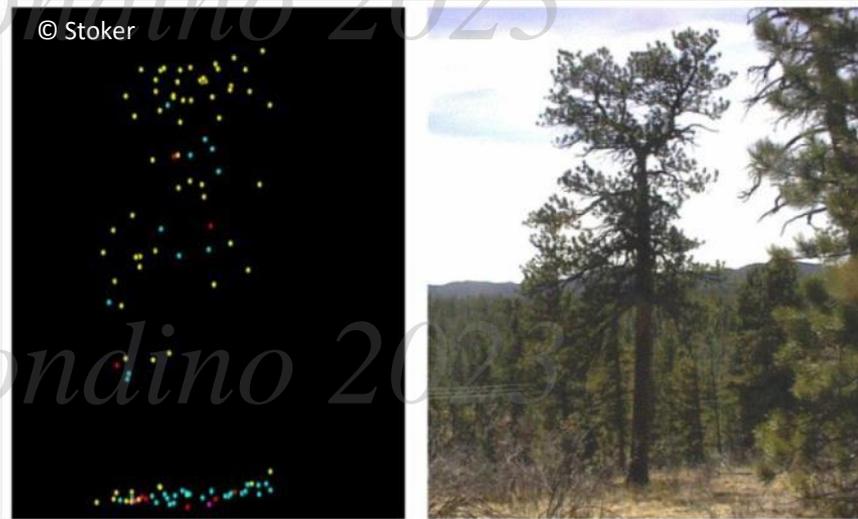


ALLA SCALA DEL SINGOLO INDIVIDUO

- Analisi dei principali parametri dendrometrici per misure dirette o attraverso stime: altezza, volume, biomassa legnosa, altezza e profondità della chioma, area basimetrica;
- Identificazione delle specie e conteggio degli individui di un popolamento;
- Se dati collezionati in anni diversi, misure degli sviluppi ipsometrici per valutazione della qualità della stazione e della produttività.

ALLA SCALA DEL POPOLAMENTO

- Percentuale di copertura;
- Struttura verticale;
- Differenziazione tra latifoglie e conifere, in base all'altezza delle chiome e all'intensità del segnale riflesso. Le diverse specie riflettono gli impulsi in modo differente in base alle geometrie delle chiome, permettendo anche l'individuazione delle specie dominanti del popolamento.



Distribuzione dei ritorni da un singolo individuo e dal suolo.

Applicazioni in campo forestale....

(Supporto agli inventari forestali)

FREQUENZA DI SCANSIONE

Due datasets con uguale densità di ritorni della stessa area acquisiti da strumenti operanti a diverse frequenze di scansione (pulse rate) possono generare distribuzioni dei ritorni molto diverse.

L'energia trasportata da un singolo impulso in un sistema ad alta frequenza di scansione, e quindi la sua abilità di penetrare la vegetazione, è molto più bassa dell'energia di un impulso in un sistema più lento.

Un sistema ad alta frequenza di scansione genera più ritorni dalla parte alta delle chiome;

Un sistema a bassa frequenza di scansione avrà probabilmente una proporzione più alta di ritorni dal sottobosco o dal suolo;

In un popolamento forestale con vegetazione alta e densa è probabile che un sistema di scansione a bassa frequenza possa generare più ritorni al suolo rispetto ad un sistema ad alta frequenza.

Dove è importante avere una descrizione accurata della superficie sotto vegetazione densa, la scelta dovrebbe ricadere su un sistema a bassa frequenza di scansione.

Impostazioni del Beam divergence

Cambiano le dinamiche di interazione del fascio con la vegetazione.

Nel caso di una «**wide beam divergence**» il volume di chiome campionato risulta più ampio rispetto ad un cono stretto ...

... ma con divergenza ampia l'energia dell'impulso viene distribuita su una superficie più ampia → riduzione densità fotoni che porta ad un rapporto di segnale riflesso più disturbato → riduzione della precisione dei ritorni.

Studi (*Andersen et al. 2006*) hanno dimostrato che l'accuratezza di misurazioni di altezza di conifere con sistema LiDAR ottenuta con impostazione di «**narrow beam divergence**» (0.33 m) sono significativamente più accurate di quelle ottenute con impostazioni di «**wide beam divergence**» (0.8 m).

Influenze dell'angolo di scansione

L'angolo di scansione può influenzare la precisione dei dati LiDAR. Si può infatti verificare una deviazione della direzione del fascio quando colpisce oggetti di dimensione considerevole (rami, rocce, suolo...). La frequenza di questo fenomeno è correlata all'angolo di incidenza e, in parte minore, alla distanza alla quale l'impulso viaggia attraverso la chioma. Fenomeni di percorso multiplo si verificano quando l'angolo di scansione supera i 14°. E pertanto consigliabile escludere i punti aventi angoli di scansione:

- >12° in aree piane o a pendenza moderata
- >10° gradi in aree con pendenze più elevate

Borgogno Mondino 2023

Influenza della stagionalità

La progressione della stagione determina lo stadio di sviluppo e densità delle foglie e, quindi, la penetrabilità degli impulsi LiDAR per un tipo di copertura a specie decidue. Il periodo di volo ha un piccolo effetto sulle chiome delle conifere a meno che non ci sia un sottobosco deciduo o che si tratti di un popolamento a *Larix decidua* Miller.

Se l'obiettivo del volo LiDAR è l'estrazione di un DTM «affidabile» è consigliabile considerare un'acquisizione in assenza di foliazione.

Borgogno Mondino 2023

Influenza delle condizioni atmosferiche

L'acquisizione di dati LiDAR è praticamente indipendente dall'illuminazione solare.

Condizioni meteorologiche piovose non sono adatte per le acquisizioni LiDAR poiché l'infrarosso non è in grado di penetrare il vapore acqueo. Anche nel caso di condizioni di scarsa visibilità dovuta a nebbia persistente.

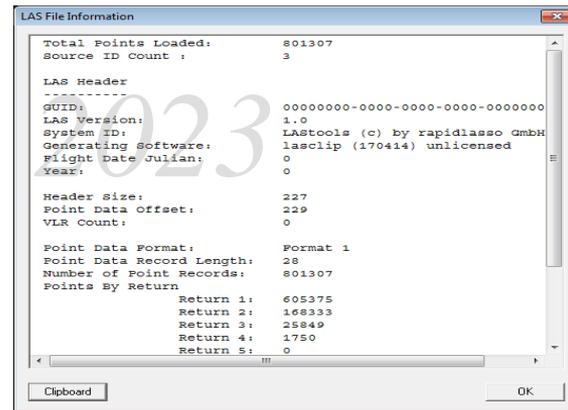
Borgogno Mondino 2023

ATTRIBUTI DEI DATI

I «sistemi LiDAR ad impulsi» sono in grado di registrare diverse caratteristiche (attributi) del segnale di ritorno:

1. Le tre coordinate spaziali (X,Y,Z) del punto riflettente espresse possibilmente in un sistema di coordinate cartografiche ordinarie (es. WGS 84 UTM 32N)
2. L'intensità del segnale registrato per ogni picco
3. Il numero complessivo dei ritorni corrispondenti allo stesso impulso (tra 1 e 5)
4. Il numero sequenziale del ritorno corrispondente allo stesso impulso ed appartenente alla serie costituita da Nritorni (punto 3)
5. L'ID della strisciata a cui il ritorno appartiene
6. L'angolo di scansione (più è elevato più è laterale il punto riflettente rispetto all'asse della strisciata)
7. Il tempo GNSS di registrazione

Tali informazioni vengono salvate all'interno di file nei formati .LAS .LDR



LAS File Information

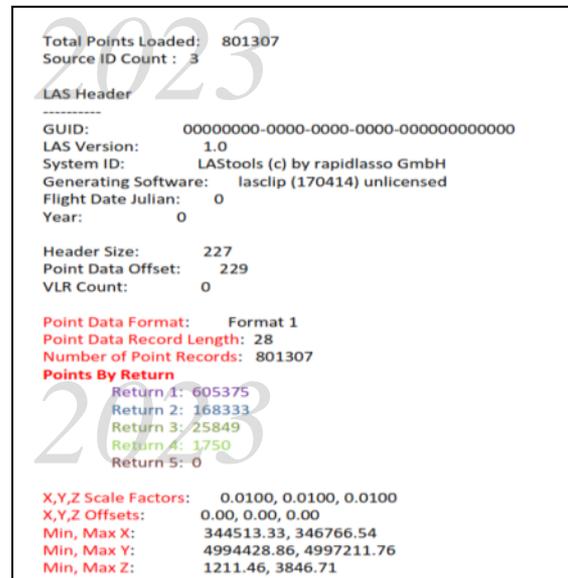
```
Total Points Loaded:      801307
Source ID Count :        3

LAS Header
-----
GUID:                    00000000-0000-0000-0000-000000000000
LAS Version:              1.0
System ID:                LAsTools (c) by rapidlasso GmbH
Generating Software:      lasclip (170414) unlicensed
Flight Date Julian:       0
Year:                     0

Header Size:              227
Point Data Offset:       229
VLR Count:                0

Point Data Format:        Format 1
Point Data Record Length: 28
Number of Point Records: 801307
Points By Return
  Return 1: 605375
  Return 2: 168333
  Return 3: 25849
  Return 4: 1750
  Return 5: 0
```

Clipboard OK



```
Total Points Loaded:      801307
Source ID Count :        3

LAS Header
-----
GUID:                    00000000-0000-0000-0000-000000000000
LAS Version:              1.0
System ID:                LAsTools (c) by rapidlasso GmbH
Generating Software:      lasclip (170414) unlicensed
Flight Date Julian:       0
Year:                     0

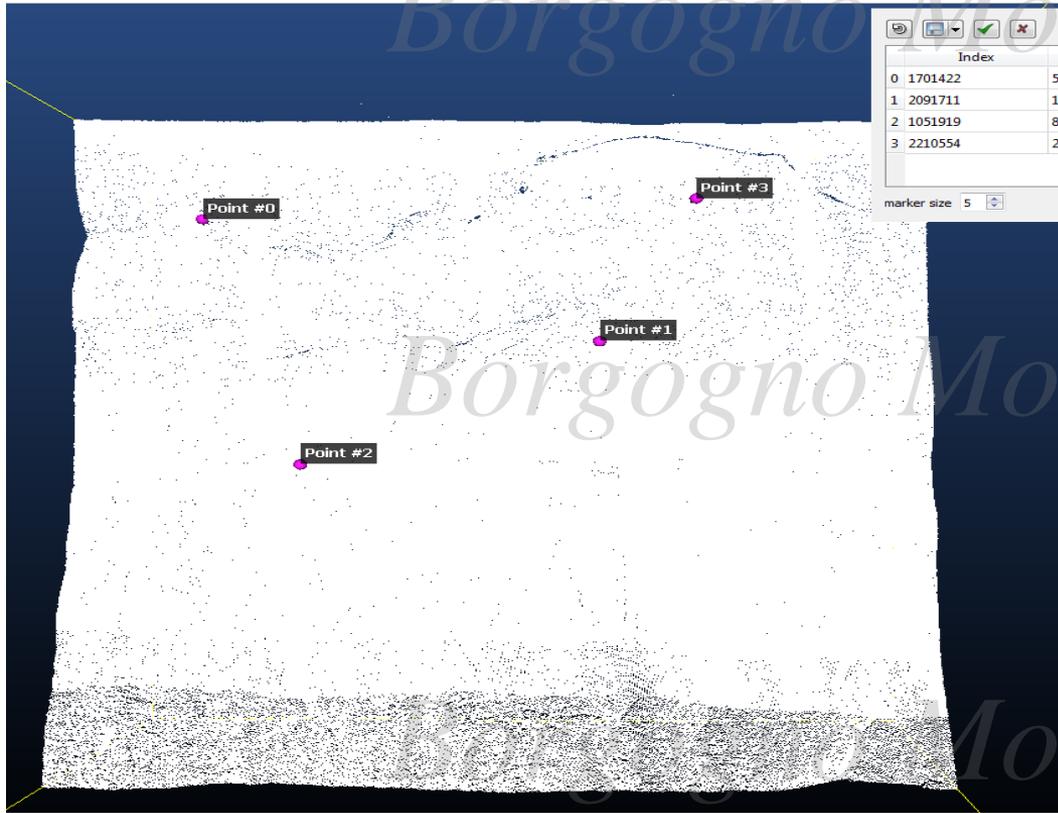
Header Size:              227
Point Data Offset:       229
VLR Count:                0

Point Data Format:        Format 1
Point Data Record Length: 28
Number of Point Records: 801307
Points By Return
  Return 1: 605375
  Return 2: 168333
  Return 3: 25849
  Return 4: 1750
  Return 5: 0

X,Y,Z Scale Factors:     0.0100, 0.0100, 0.0100
X,Y,Z Offsets:           0.00, 0.00, 0.00
Min, Max X:              344513.33, 346766.54
Min, Max Y:              4994428.86, 4997211.76
Min, Max Z:              1211.46, 3846.71
```

La NUVOLA DI PUNTI LIDAR

Borgogno Mondino 2023

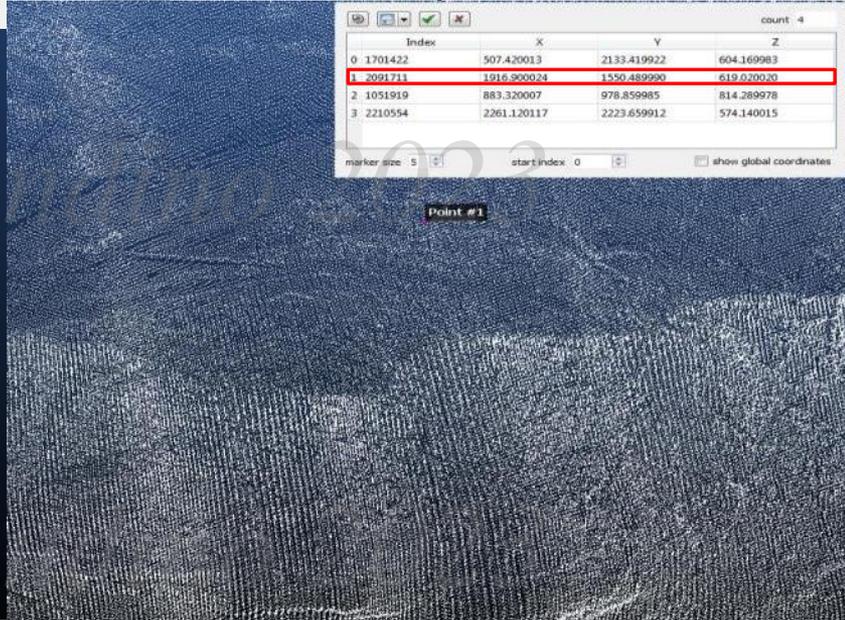


count 4

	Index	X	Y	Z
0	1701422	507.420013	2133.419922	604.169983
1	2091711	1916.900024	1550.489990	619.020020
2	1051919	883.320007	978.859985	814.289978
3	2210554	2261.120117	2223.659912	574.140015

marker size 5

Borgogno Mo



count 4

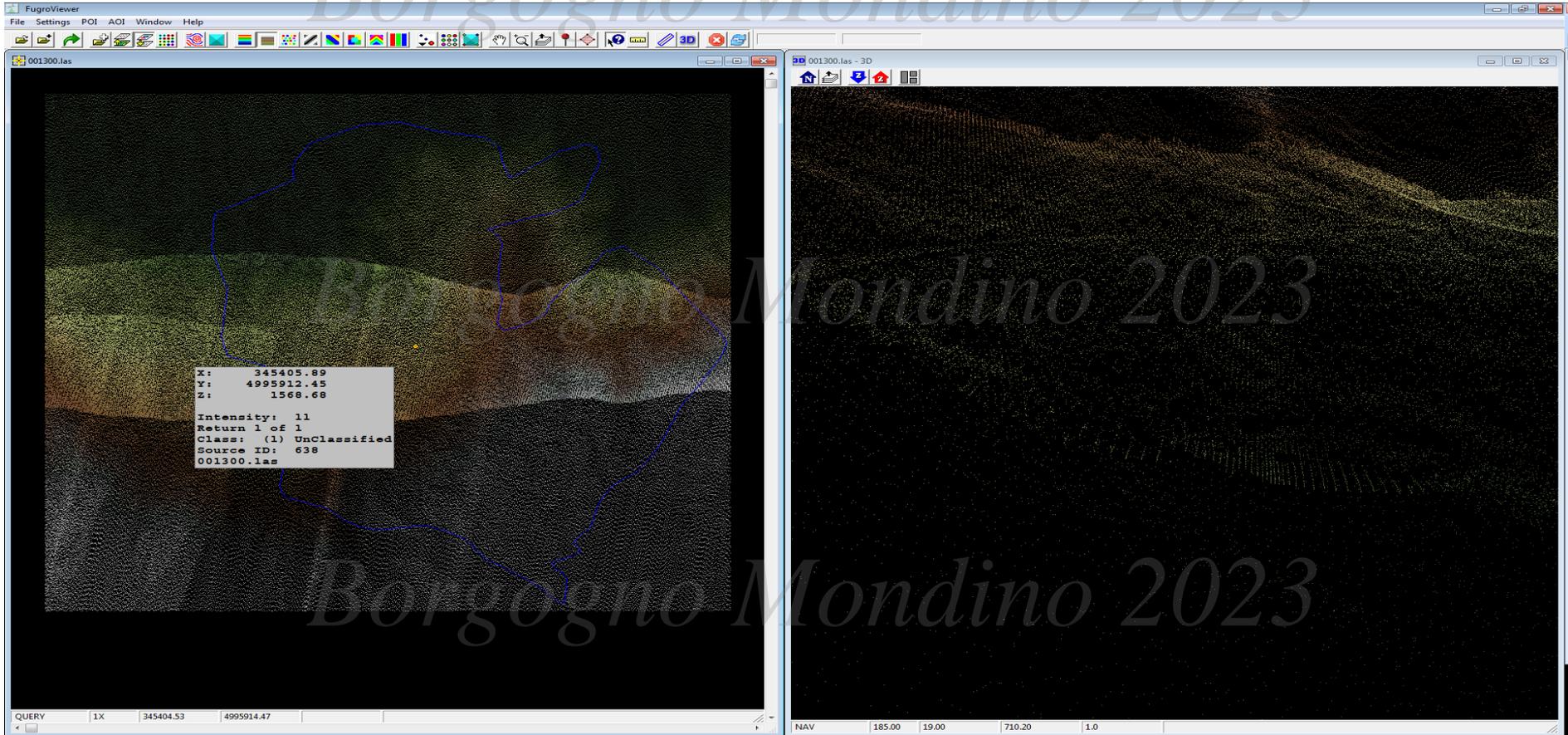
	Index	X	Y	Z
0	1701422	507.420013	2133.419922	604.169983
1	2091711	1916.900024	1550.489990	619.020020
2	1051919	883.320007	978.859985	814.289978
3	2210554	2261.120117	2223.659912	574.140015

marker size 5 start index 0 show global coordinates

Mo

La NUVOLA DI PUNTI LIDAR

Borgogno Mondino 2023



ATTRIBUTI dei PUNTI
SCAN ANGLE (°)

Borgogno Mondino 2023

DB Tree

- 1300
 - 001300 - Cloud
 - 001300.las (D:\Progetti2017\PSR_berretti\lidar aer...)
 - 001300 - Cloud

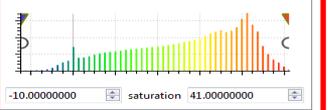
Proprietà

Property	State/Value
Steps	256
Visible	<input type="checkbox"/>

display params

Display ranges

-10.00000000 displayed 41.00000000



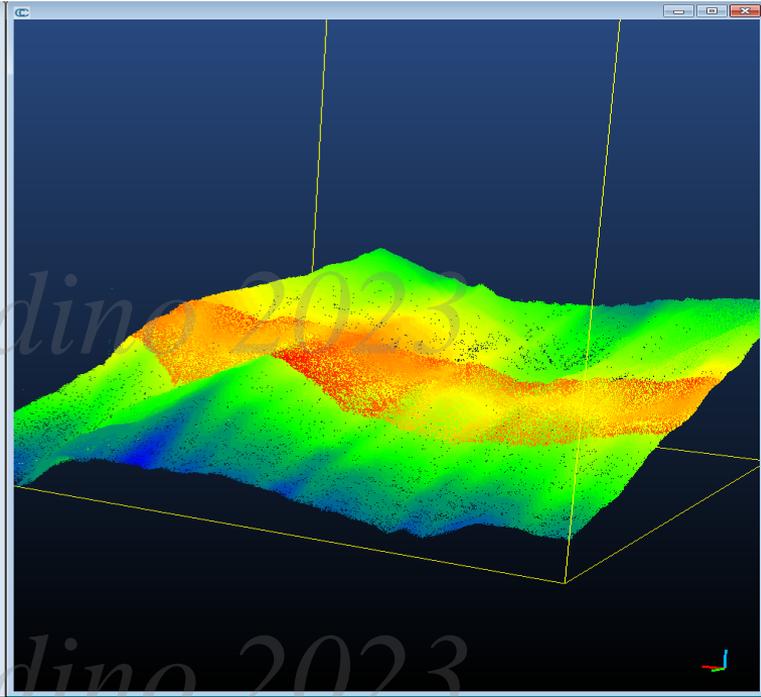
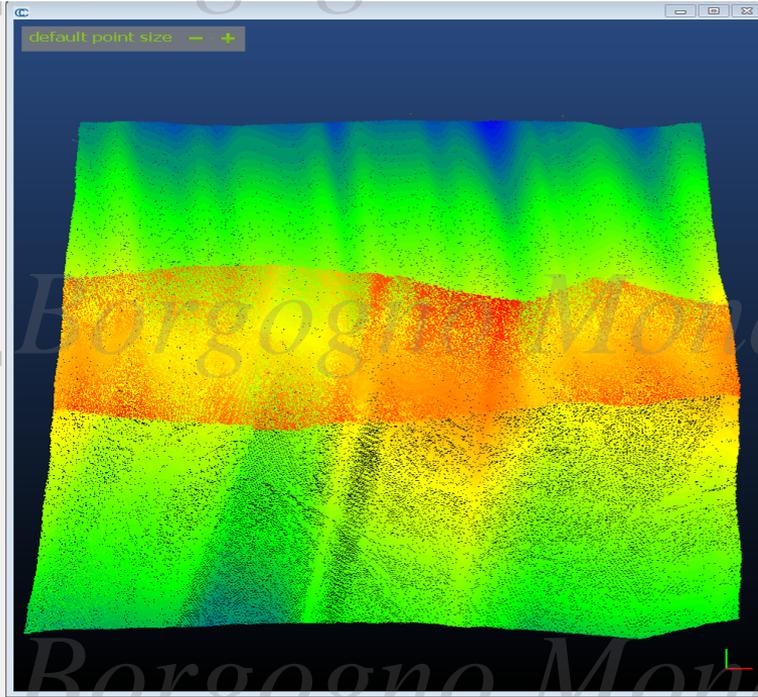
-10.00000000 saturation 41.00000000

Matrix Axis/Angle Export

Axis 0.000000 ; 0.000000 ; 1.000000

Angle 0.000000 deg.

Center 0.000000 ; 0.000000 ; 0.000000

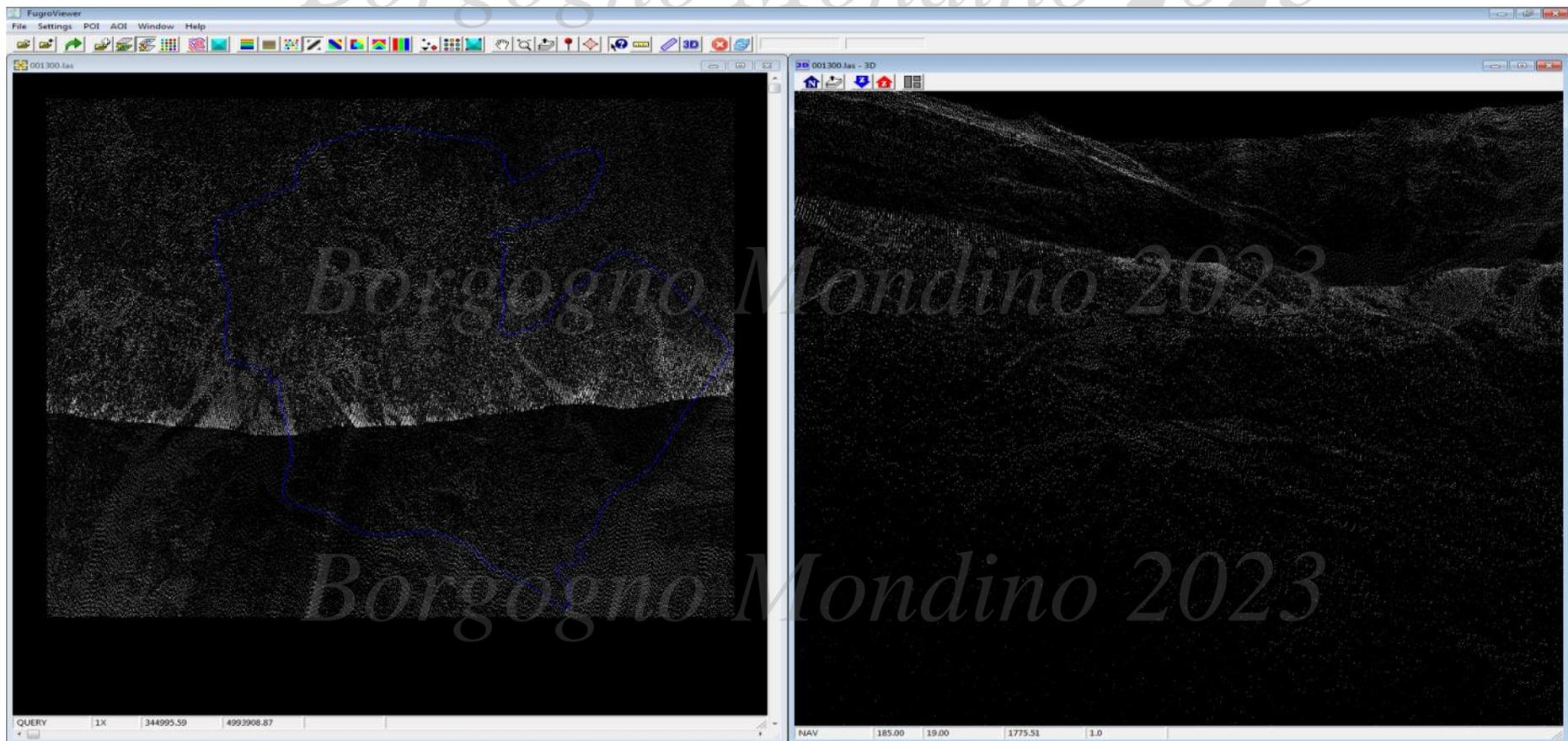


Borgogno Mondino 2023

ATTRIBUTI dei PUNTI

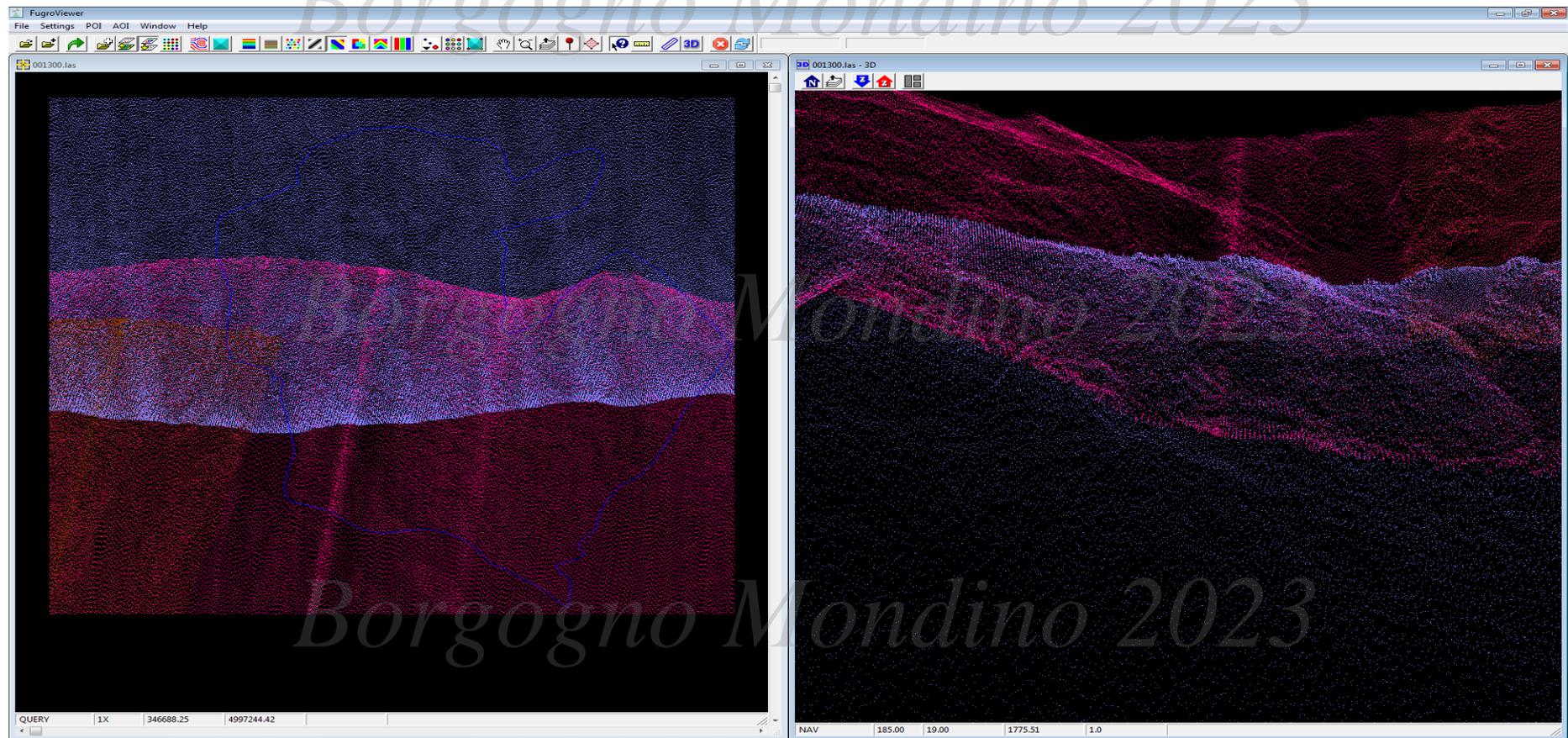
INTENSITA' del RITORNO

Borgogno Mondino 2023



ATTRIBUTI dei PUNTI

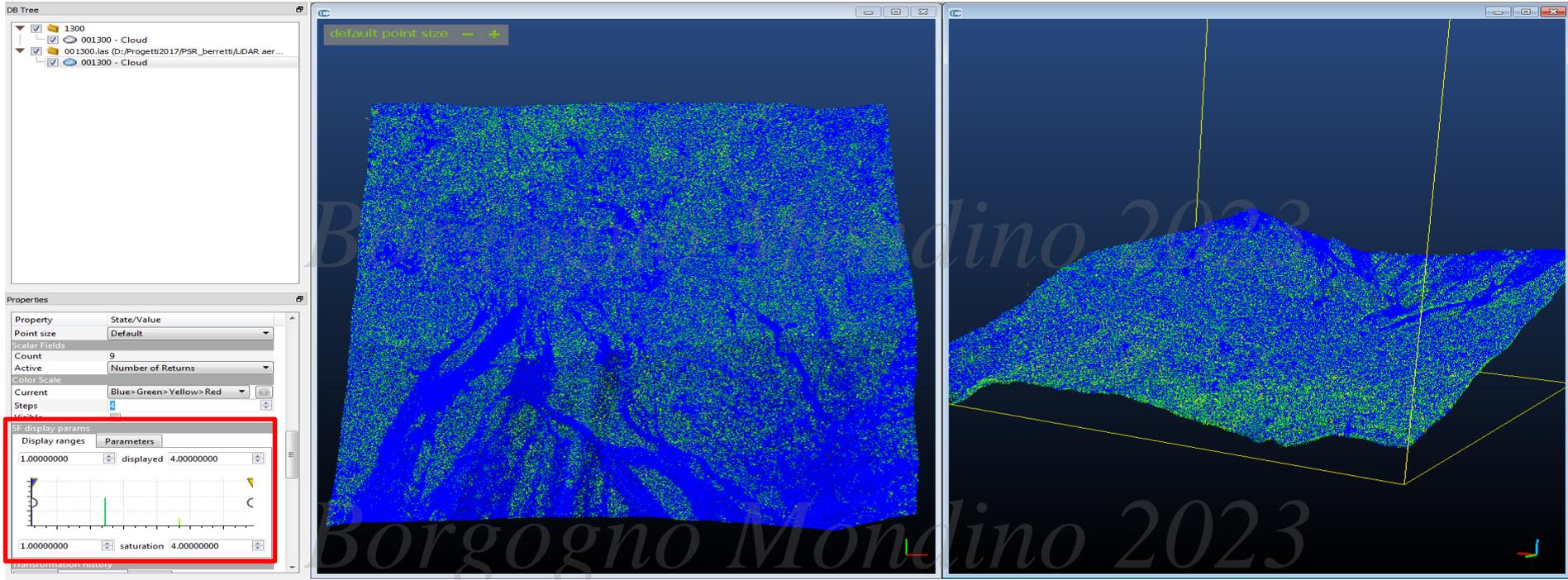
ID strisciata → densità di ritorni non costante



ATTRIBUTI dei PUNTI

Numero di ritorni (Number of Returns)

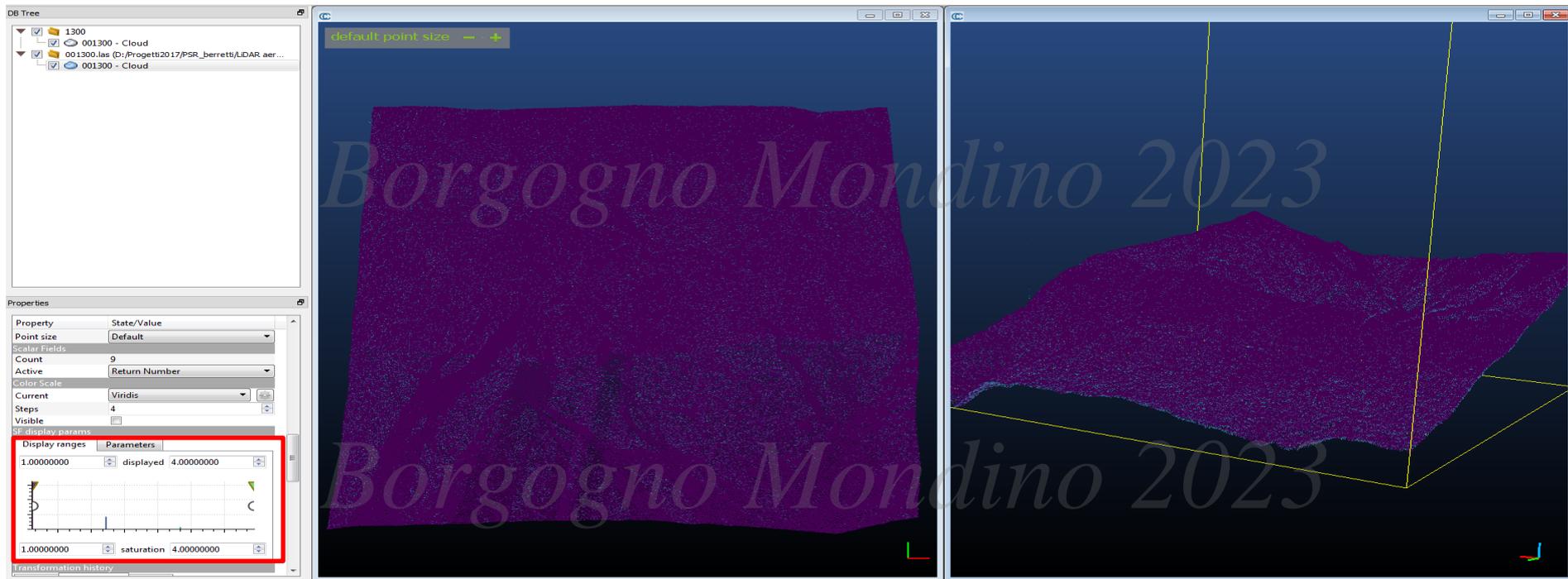
Borgogno Mondino 2023



ATTRIBUTI dei PUNTI

Numero del singolo ritorno (Return Number)

Borgogno Mondino 2023



VOLI AD ALTA e BASSA DENSITA' di RITORNI

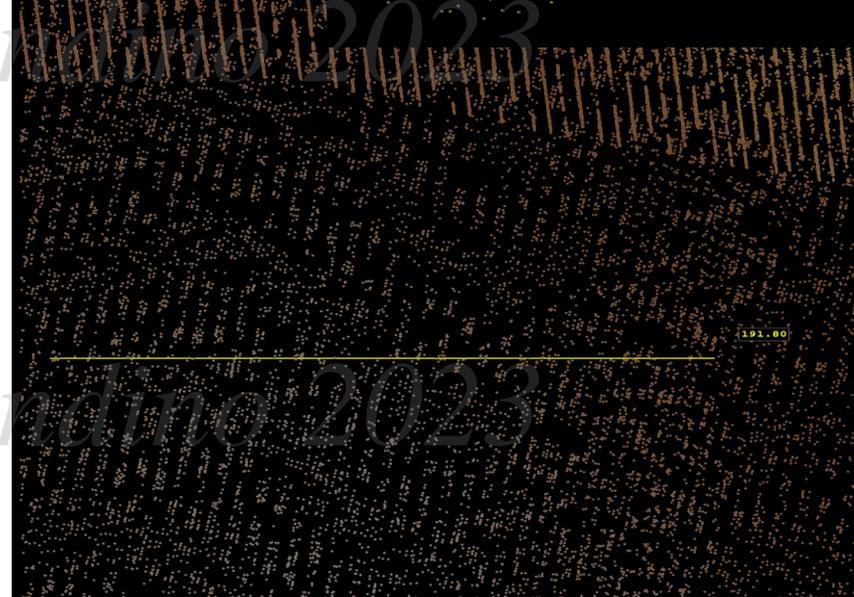
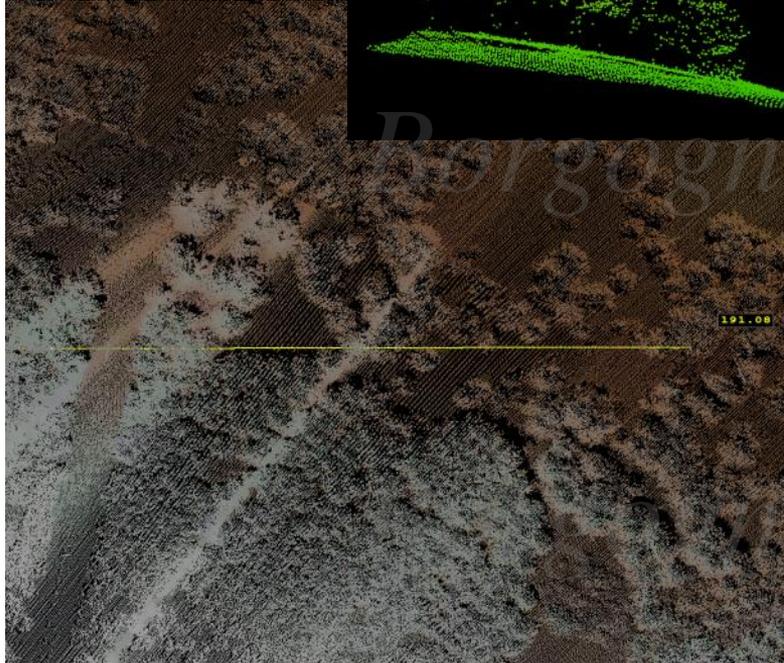
Statistiche ottenute con LAStools

Borgogno Mondino 2023

Point density: all returns 9.26
pt/m²; last only 7.95 pt/m²
Spacing: all returns 0.33 m
last only 0.35 m



Point density: all returns 0.47
punti/m²; last only 0.36
punti/m²
Spacing: all returns 1.45 m last
only 1.67 m



Borgogno Mondino 2023

Borgogno Mondino 2023

Come gestire le NUVOLE di PUNTI per ottenere informazioni utilizzabili ?



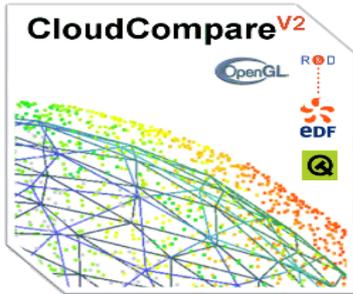
SOFTWARE GRATUITI PER il PROCESSAMENTO DEI DATI

L'approccio operativo prevede che la nuvola di punti venga regolarizzata «selettivamente» attraverso un processo di rasterizzazione geometricamente basata. Come funziona?

1. SELEZIONE della porzione di nuvola di interesse (AOI, Area of Interest) + FILTRATURA degli OUTLIERS (OC)
2. CLASSIFICAZIONE dei RITORNI (suolo/non suolo)
3. Modellazione delle superfici di interesse (LASTools)
4. Rasterizzazione delle superfici per ottenere DTM e DSM (LASTools o CC)
5. La differenza tra DSM e DTM in ambito forestale, definisce il CHM (SAGA GIS)

Segue la lettura e la misura del CHM (SAGA GIS).

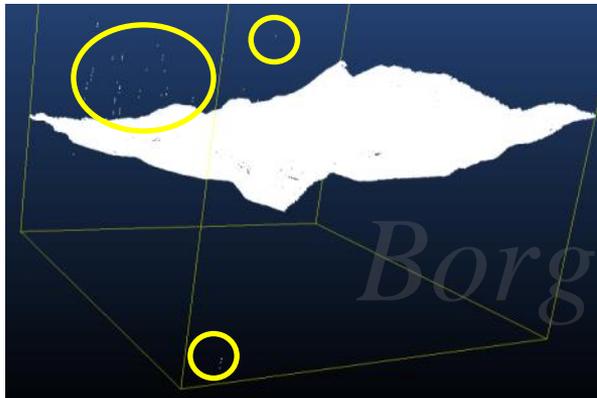
1. Segmentazione del CHM (watershed)
2. Statistiche zonali dei SEGMENTI ottenuti
3. Selezione dei SEGMENTI candidati ad essere chiome
4. Conteggio degli individui del piano dominante
5. Applicazione curve ipsometriche inverse ($D_f(H)$)
6. Cubatura



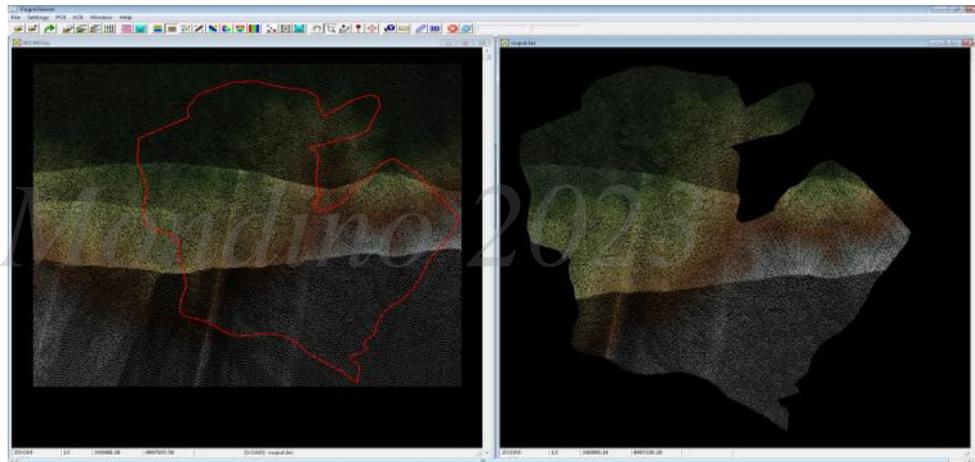
PRE-PROCESSAMENTO delle NUVOLE DI PUNTI

Borgogno Mondino 2023

FILTRATURA OUTLIERS

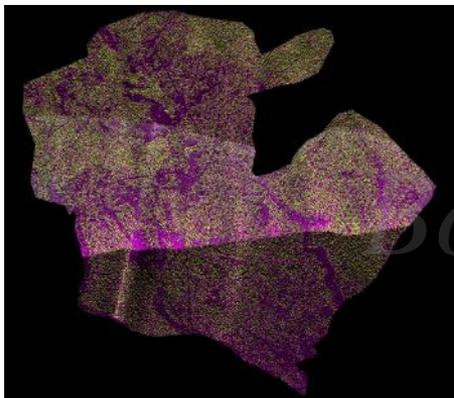


SELEZIONE AOI (Area of INTEREST) → CLIP



CALCOLO STATISTICHE (compresa densità di ritorni e distanza media tra i punti)
Serve per capire con quale passo regolarizzare la nuvola di punti

CLASSIFICAZIONE DEI RITORNI
Sudo/Nbn Sudo



SPAZIALIZZAZIONE DEI DATI: dai punti alle superfici

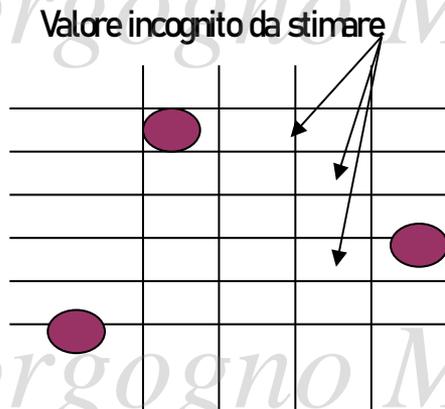
Borgogno Mondino 2023

Infittimento-regolarizzazione delle misure

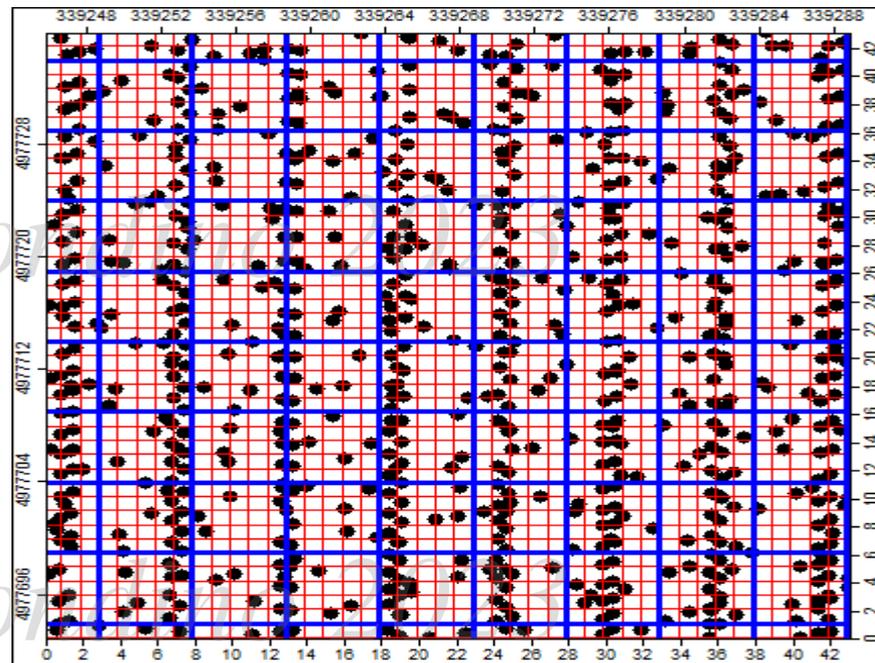
I processi di interpolazione spaziale consentono di trasformare nuvole di punti in superfici (o comunque rappresentazioni continue).

Se la dimensione della cella del raster include più punti del seminato si parla di **REGOLARIZZAZIONE**

In caso contrario di **INTERPOLAZIONE VERA E PROPRIA**



DEMMATRICIALE - RASTER

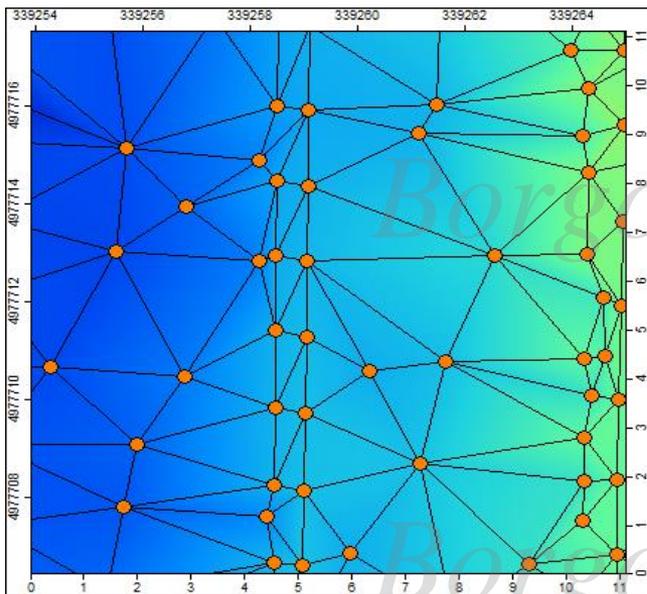


TIN

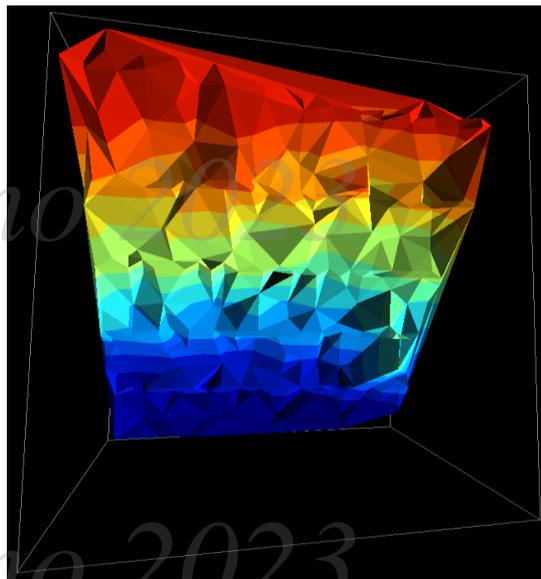
SPAZIALIZZAZIONE DEI DATI: dai punti alle superfici

Nel contesto LiDAR la prassi più diffusa per la RASTERIZZAZIONE è quella che si appoggia alla rappresentazione TIN (Triangulated Irregular Network).

RASTER = (1) da nuvola a TIN + (2) da TIN a raster



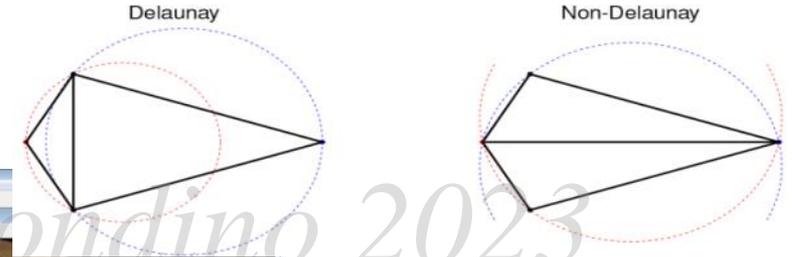
Non necessita di una regolarizzazione della nuvola di punti



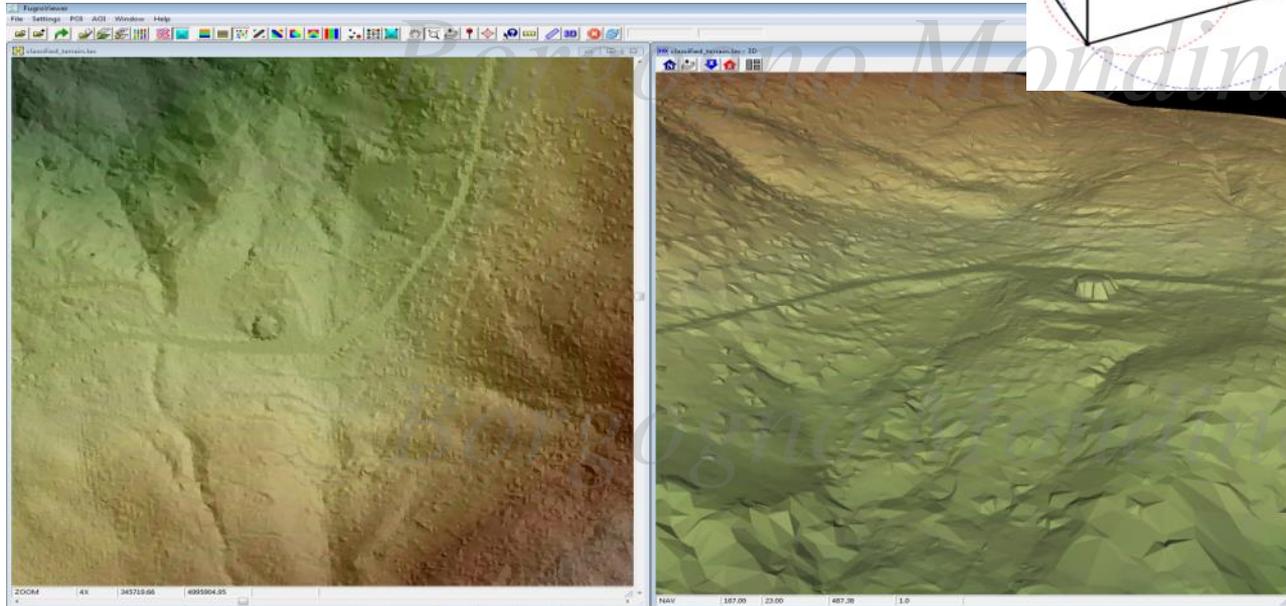
Equazione del piano
 $Ax+By+Cz+1=0$ per i 3 punti

TIN

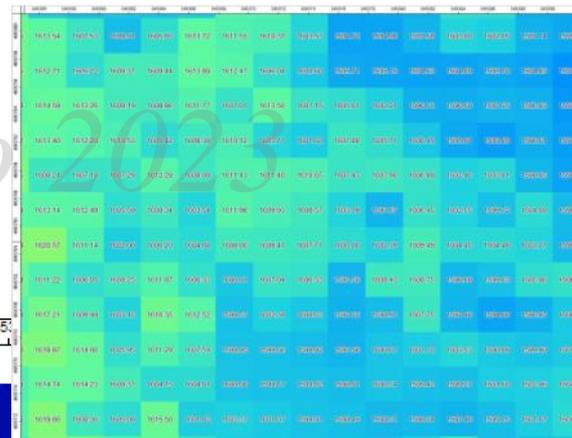
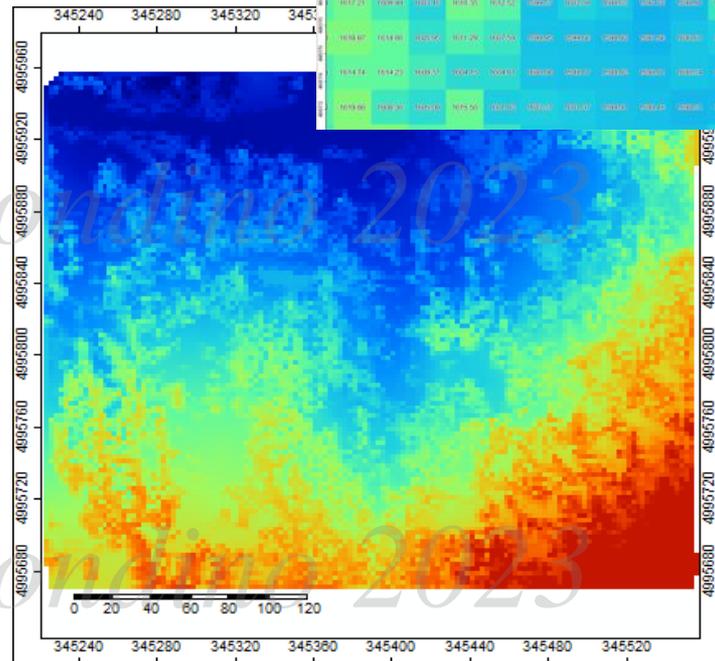
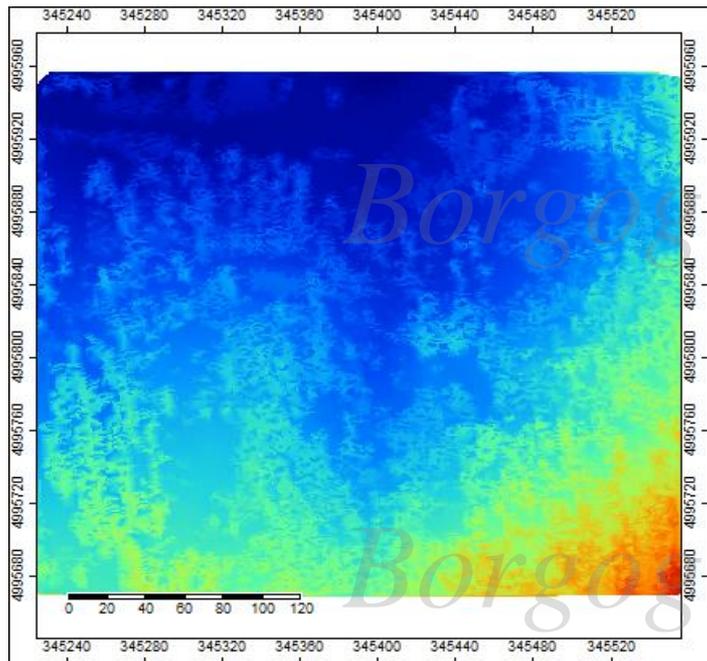
L'ipotesi è che la superficie che collega tre vertici sia un piano. Esistono tante soluzioni allo stesso problema quante sono le combinazioni di collegamento tra vertici per dar vita alla rete di triangoli. Comunemente viene adottato il criterio di *Delaunay* (sceleggi i tre vertici vicini che massimizzano il minimo angolo interno del triangolo)



© Stefano Rebay - Università di Brescia



RASTER = (1) da nuvola a TIN + (2) da TIN a raster

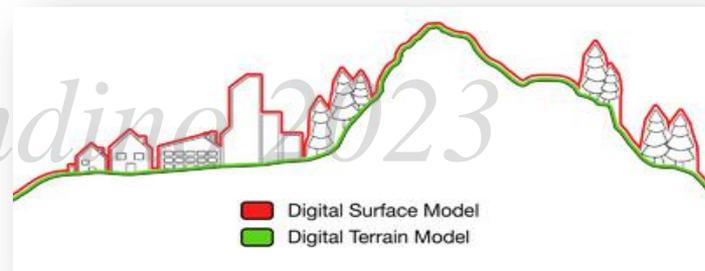


SPAZIALIZZAZIONE DEI DATI: dai punti alle superfici

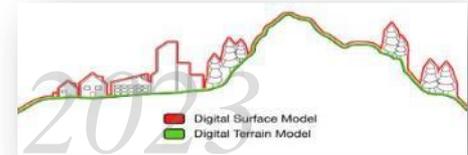
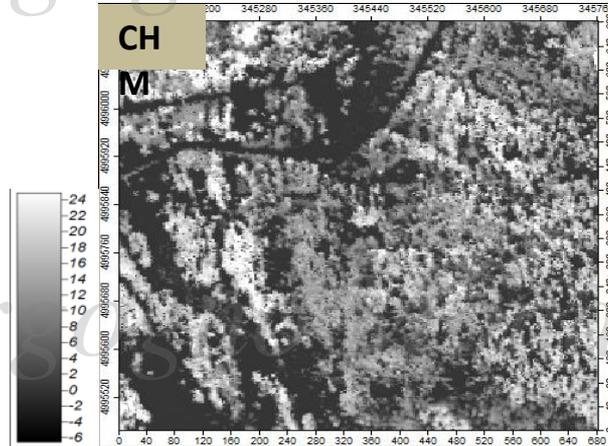
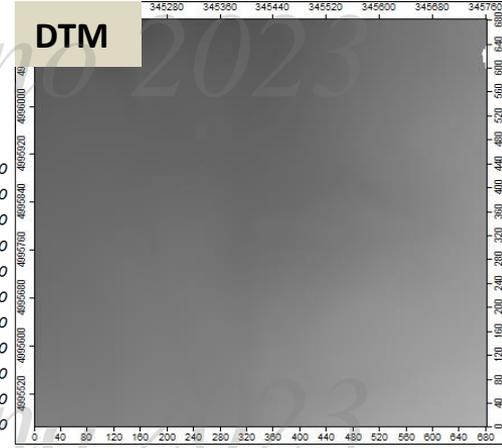
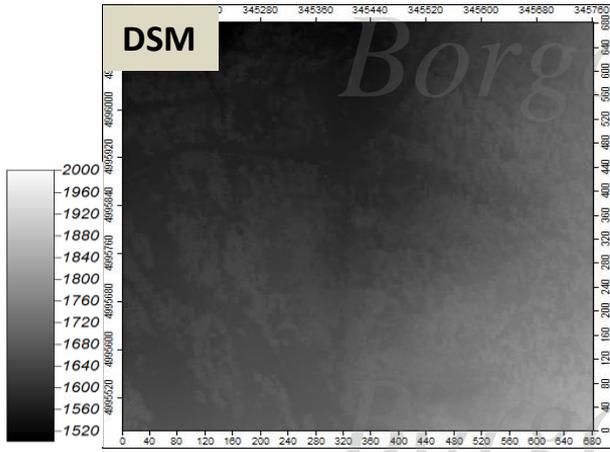
Il significato del dato RASTER ottenuto cambia a seconda dei ritorni che considero per la generazione delle superfici di riferimento. Diverse filosofie portano a risultati potenzialmente diversi → passaggio critico.

Cosa considerare:

1. Sulla base della densità media dei ritorni e della loro distanza media (ottenibile per es. tramite LAsTools) si stabilisce il passo del grigliato raster
2. Sulla base del tipo di ritorno considerato si stabilisce il tipo di superficie da generare:
Le superfici di riferimento sono minimalmente due:
 - a. **DTM** (*Digital terrain Model*) → superficie del piano campagna: uso solo ritorni classificati come SUOLO, (codice 2) e magari taglio angoli di scansioni superiori ad una certa soglia (vedere di seguito)
 - b. **DSM** (*Digital Surface Model*) → superficie che insegue la sommità dell'elemento territoriale più alta: uso solo i primi ritorni
3. La differenza tra DSM e DTM (ottenibile con strumenti di calcolo matriciale qualunque) è un nuovo RASTER che definisce l'altezza degli oggetti sul piano campagna. Se l'oggetto è un'area forestata, la differenza tra DSM e DTM prende il nome di **CHM** (**Canopy Height Model**)



DTM, DSM e CHM



$DSM - DTM = CHM$ (Canopy Height Model)

DAL CHM AI PARAMETRI FORESTALI

LIDAR

DTM, DSM

CHM → misura altezza chiome (in generale solo lo strato dominante)

Ma con quale precisione? → aree di saggio (H come misura diretta o mediante curve ipsometriche?)

Quanto si scosta la precisione delle H da LIDAR rispetto a quella derivabile con metodi tradizionali?

Curve ipsometriche inverse:
 $D = f(H)$

Cubatura unitaria (m³)

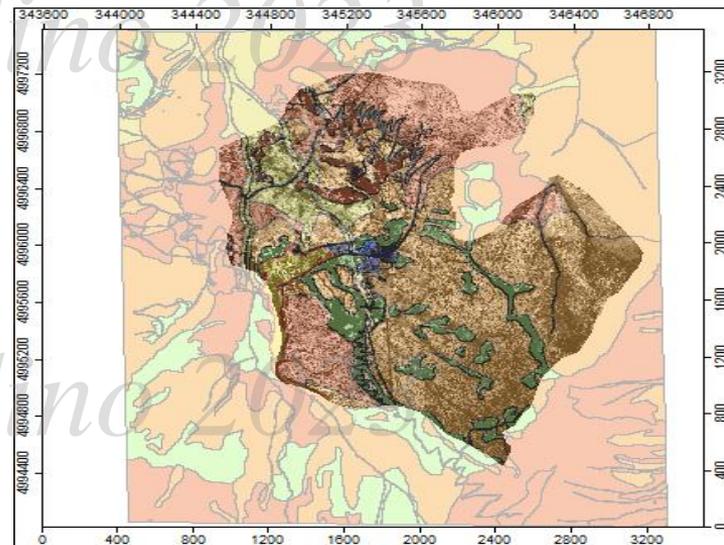
Area basimetrica unitaria (m²)

$$D = f(H) = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot H}$$

$$D = f(H) = a_0 \cdot H^{a_1}$$

$$V = f(D, H) = a_0 \cdot H + (a_1 + a_2 H) \cdot D^2$$

$$A = f(D) = \pi \frac{D^2}{4}$$



Se è disponibile una carta di copertura del suolo (PFT?) → posso applicare selettivamente le curve ipsometriche inverse una volta calibrate sulla base delle aree di saggio

DAL CHMAI PARAMETRI FORESTALI

A seconda della densità dei ritorni i ragionamenti possono avvenire:

- **Alla scala del popolamento (bassa densità): misure aggregate per area di saggio** → per cubare bisogna conoscere valori stimati di densità dei popolamenti (magari differenziate per specie o aree)
- **Alla scala del singolo individuo (alta densità)** → è possibile il conteggio degli individui dalla nuvola di punti e dunque anche la densità del popolamento (piano dominante) è misura derivabile.

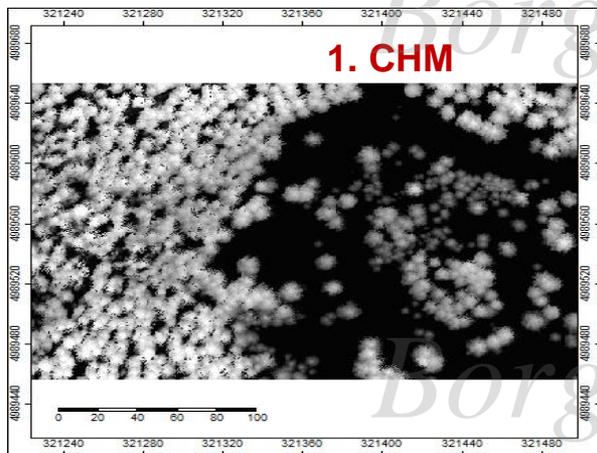
In entrambi i casi servono **COMUNQUE** aree di saggio su cui calibrare i modelli.

Come fare:

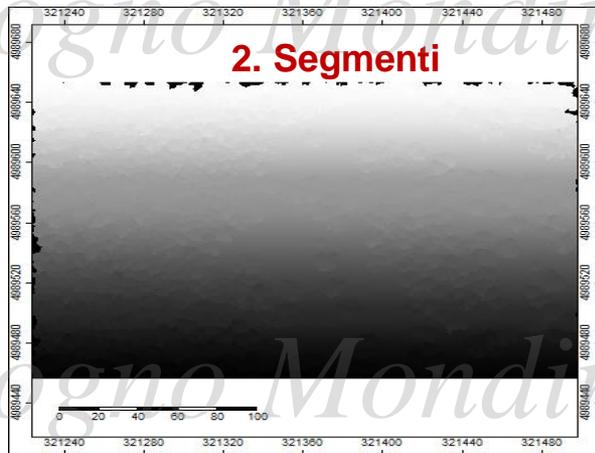
1. In un foglio Excel stimo i parametri dei modelli (curve ipsometriche inverse) per le specie prevalenti della AOI. La zonizzazione della AOI avviene su base di dati ancillari esistenti (es. PFT o LU/LC) o mediante telerilevamento (ragionevole suddivisione solo tra conifere e latifoglie)
2. Trasferisco i coefficienti stimati allo *shapefile* PFT/LU secondo indicazione della specie sotto forma di nuovi attributi
3. Trasferisco mediante operazione di SPATIAL JOIN gli stessi attributi al layer (se disponibile) degli individui derivati da LiDAR mediante segmentazione e successiva individuazione centroidi.

DAL CHM AI PARAMETRI FORESTALI

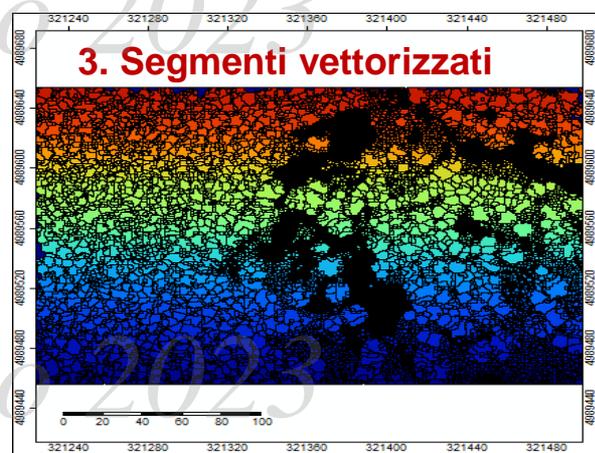
1. CHM



2. Segmenti



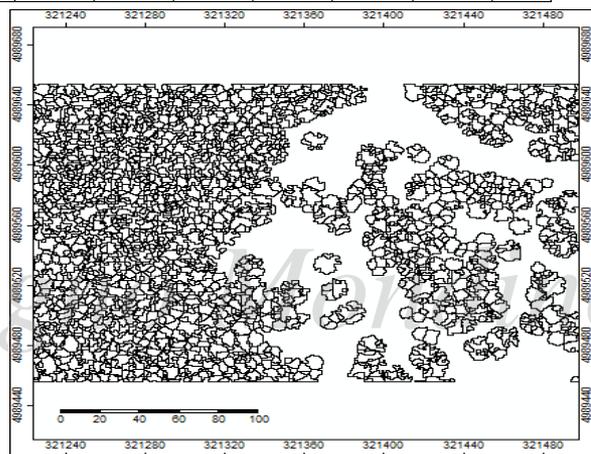
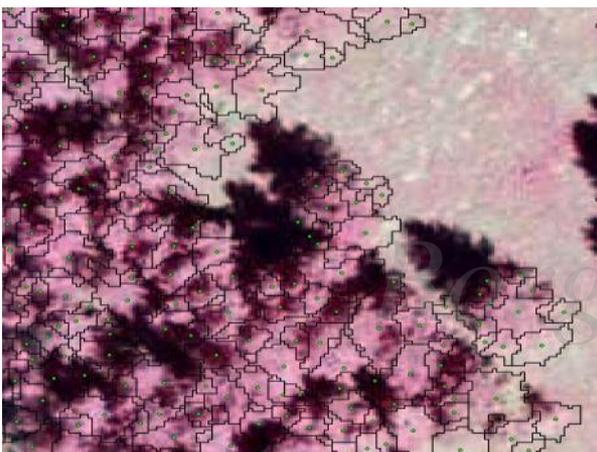
3. Segmenti vettorizzati



4. Statistiche zonali ottenute dal CHM in corrispondenza dei segmenti

ID	NumCell	H_min	H_max	H_MEDIA	PERIM	AREA	
1	38542	20	14.199951	22.01001	19.036511	17	5
2	13072	20	0	16.660083	6.559052	14	5
3	42986	20	0	20.688941	6.522504	11	5
4	12751	20	0.300063	15.809962	11.178998	11	5
5	13003	20	0	16.400024	7.880505	13	5
6	11083	20	16.160034	23.320056	21.050006	10	5
7	18719	20	0.010001	16.970099	10.438013	11	5
8	10342	20	-0.020040	9.050048	2.013008	11	5
9	9	20	5.619995	14.219971	9.965015	9	5
10	978	20	7.939941	26.27002	20.554997	12	5
11	36849	20	0	17.888941	6.888909	13	5
12	42583	20	0	20.048951	12.673004	12	5
13	17181	20	0	17.888995	5.788486	12	5
14	26172	20	1.75	16.468971	12.289996	11	5
15	17043	20	-0.020002	24.859985	14.762488	10	5
16	36832	20	0	17.770002	12.076489	12	5

5. Criteri di filtratura chiome candidate



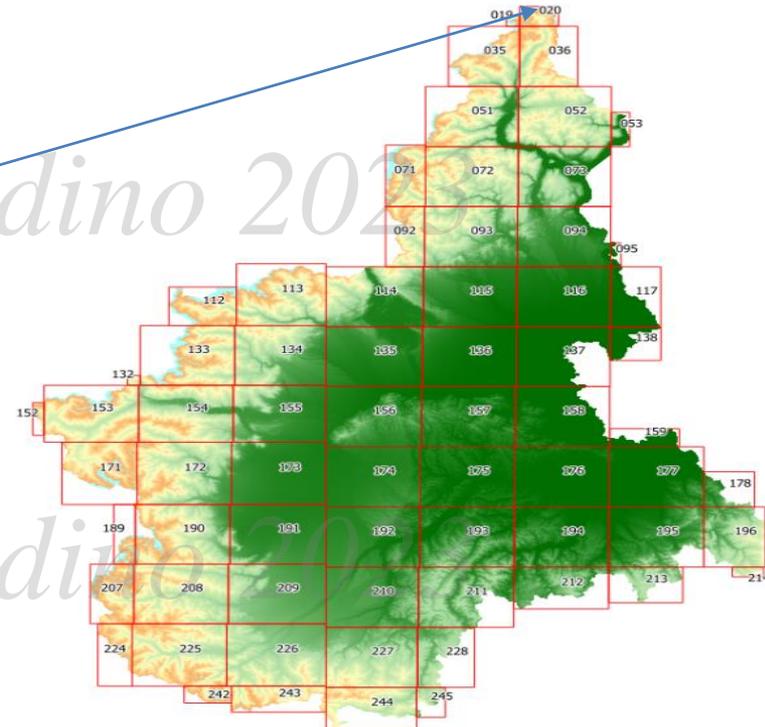
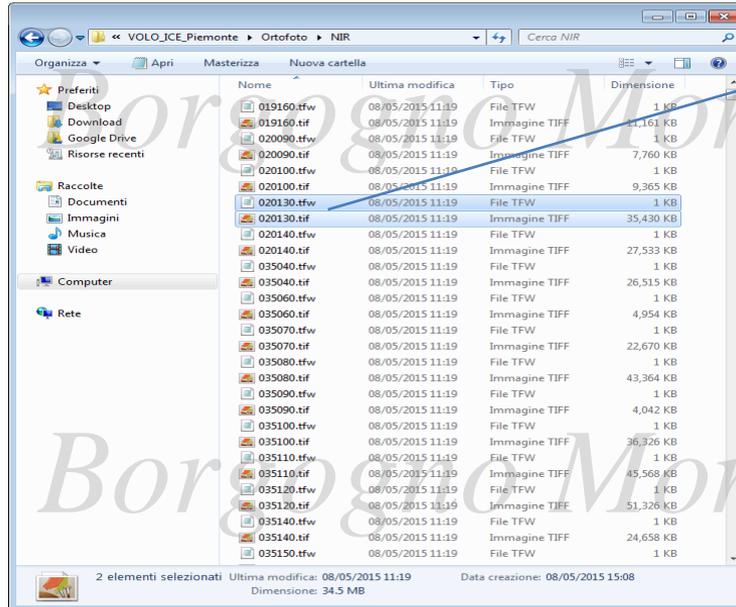
REGIONE PIEMONTE
VOLO ICE 2009/2011

Borgogno Mondino 2023

ORTOFOTO DIGITALI NIR ERGB

Risoluzione geometrica: 0.40 m

Scala cartografica nominale di riferimento: 1:5000 ($\alpha_{xy} < 1 m$)



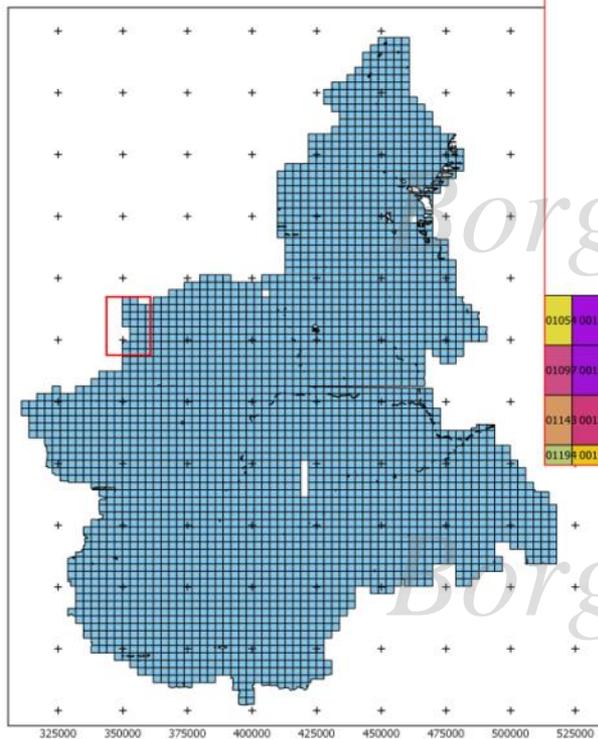
REGIONE PIEMONTE - VOLO ICE 2009/2011

DSM e DTM con passo 5m

<http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/index.jsp>

Borgogno Mondino 2023

QUADRO di UNIONE SEZIONI LiDAR volo ICE



	000702	000703	000704	
	000748	000749	000750	
		000794	000795	
		000840	000841	
	000886	000887	000888	
	000930	000931	000932	
	000973	000974	000975	
	001014	001015	001016	
0105	001055	001056	001057	001058
0109	001098	001099	001100	001101
0114	001144	001145	001146	001147
0119	001195	001196	001197	001198

- Quota Relativa di volo : **4500 m**
- Densità media dei punti della nuvola LiDAR **0.5 punti/m²**
- Precisione: σ_z (95%) = **0.6 min aree «ordinarie», 1.44 min aree «difficili».**
- N ritorni registrati: fino a 5

Nome	Ultima modifica	Tipo	Dimensione
000001.las	27/02/2012 17:31	FugroViewer Lidar...	35,167 KB
000002.las	27/02/2012 17:38	FugroViewer Lidar...	35,821 KB
000003.las	27/02/2012 17:46	FugroViewer Lidar...	35,596 KB
000004.las	27/02/2012 15:36	FugroViewer Lidar...	35,549 KB
000005.las	27/02/2012 18:27	FugroViewer Lidar...	39,615 KB
000006.las	27/02/2012 17:30	FugroViewer Lidar...	38,825 KB
000007.las	27/02/2012 17:38	FugroViewer Lidar...	37,473 KB
000008.las	27/02/2012 15:29	FugroViewer Lidar...	36,276 KB
000009.las	27/02/2012 13:14	FugroViewer Lidar...	36,376 KB
000010.las	27/02/2012 17:46	FugroViewer Lidar...	45,748 KB
000011.las	27/02/2012 18:41	FugroViewer Lidar...	45,758 KB
000012.las	27/02/2012 12:29	FugroViewer Lidar...	39,072 KB
000013.las	27/02/2012 18:06	FugroViewer Lidar...	43,452 KB
000014.las	27/02/2012 12:58	FugroViewer Lidar...	44,341 KB
000015.las	27/02/2012 18:08	FugroViewer Lidar...	44,308 KB
000016.las	27/02/2012 15:29	FugroViewer Lidar...	40,937 KB
000017.las	27/02/2012 15:08	FugroViewer Lidar...	38,204 KB
000018.las	27/02/2012 13:55	FugroViewer Lidar...	36,329 KB
000019.las	27/02/2012 15:20	FugroViewer Lidar...	42,267 KB
000020.las	27/02/2012 14:41	FugroViewer Lidar...	50,132 KB
000021.las	27/02/2012 18:27	FugroViewer Lidar...	37,817 KB
000022.las	27/02/2012 14:00	FugroViewer Lidar...	48,462 KB
000023.las	27/02/2012 13:13	FugroViewer Lidar...	47,910 KB
000024.las	27/02/2012 15:15	FugroViewer Lidar...	47,981 KB
000025.las	27/02/2012 14:32	FugroViewer Lidar...	47,747 KB
000026.las	27/02/2012 12:59	FugroViewer Lidar...	33,910 KB
000027.las	27/02/2009 18:43	FugroViewer Lidar...	54,526 KB
000028.las	27/02/2012 12:40	FugroViewer Lidar...	48,792 KB
000029.las	27/02/2012 15:40	FugroViewer Lidar...	66,473 KB
000030.las	27/02/2012 15:05	FugroViewer Lidar...	64,925 KB
000031.las	27/02/2012 13:50	FugroViewer Lidar...	68,365 KB
000032.las	27/02/2012 14:01	FugroViewer Lidar...	65,224 KB
000033.las	27/02/2012 13:01	FugroViewer Lidar...	66,226 KB
000034.las	27/02/2012 13:54	FugroViewer Lidar...	71,001 KB
000035.las	27/02/2012 18:21	FugroViewer Lidar...	60,480 KB
000036.las	27/02/2012 18:07	FugroViewer Lidar...	65,787 KB