





Estrazione di parametri forestali da dati laser scanning in alcune aree delle foreste regionali del Cansiglio, di Caltea e di Fusine

RELAZIONE TECNICA

Regione Autonoma FVG

Direzione centrale risorse agricole, naturali e forestali Servizio gestione forestale e antincendio boschivo

Udine, 6 agosto 2009

E-LASER Srl

c/o Parco Scientifico e Tecnologico "Luigi Danieli"

Via Jacopo Linussio, 51 – Z.I<mark>.U.</mark>

33100 Udine (UD)

Cod. Fisc./P.IVA: 02525300303

REA: UD 267787

Tel. +39 0432 629-911/751

Fax +39 0432 603887

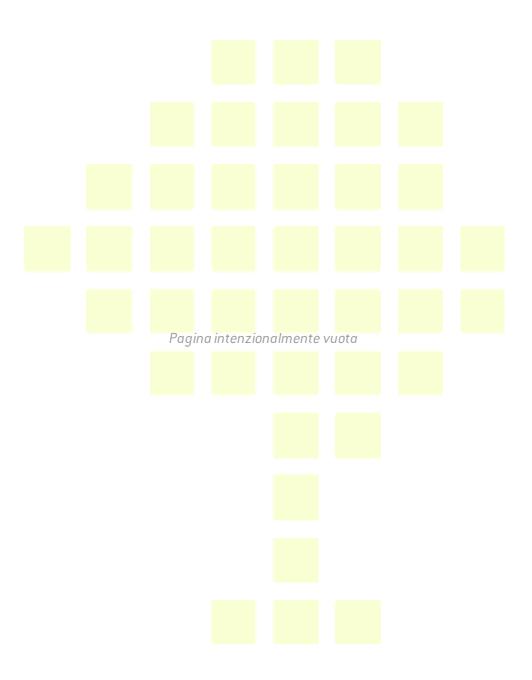
e-mail: info@e-laser.it

www.e-laser.it



Indice

1.	Introduzio	ne	5
	1.1 Pren	nessa	5
	1.2 La te	ecnologia laser scanning	5
	1.3 Obie	ttivi del lavoro	7
	1.4 Aree	oggetto d'indagine <mark></mark>	7
	1.5 dat	i di base	8
	1.5.1	Densità di campionamento	9
	1.5.2	Sovrapposizione d <mark>i scans</mark> ion <mark>i adiace</mark> nti	
	1.5.3	Intensità di riflessione	11
	1.5.4	Copertu <mark>ra delle</mark> pa <mark>rticelle</mark>	12
	1.6 Desc	crizione s <mark>chemat</mark> ica <mark>delle attività svol</mark> te	12
2.	Descrizion	ne degli elaborati	15
	2.1 Pren	nessa	15
	2.2 Sche	ema degli elaborati consegnati	15
	2.3 Cart	ografia s <mark>u suppo</mark> rto <mark>raster</mark>	
	2.3.1	Modello Digitale del Terreno (DTM)	15
	2.3.2	Modello Digitale d <mark>el Terren</mark> o <mark>Ombrizz</mark> ato (DTM sha <mark>de)</mark>	16
	2.3.3	Modello Digitale di Altezza delle Chiome	16
	2.3.4	Modelli raster: overview	18
	2.4 Cart	ografia su supporto G.I.S	26
	2.4.1	Cartografia Bosco/non Bosco	26
	2.4.2	Cartografia Struttura	28
	2.4.3	Cartografia Specie	31
	2.4.4	Cartografia Rinnovazione	32
	2.4.5	Statistiche riassuntive su particelle	33
	2.4.6	Cartografie: overview	34
3.	Analisi		43
	3.1 Accu	uratezza dei prodotti	43
4.	Considera	zioni finali	47
Bib	oliografia cit	tata	49





1. Introduzione

La presente relazione è realizzata a corollario del servizio di elaborazione di dati laser scanning da aeromobile effettuato dalla scrivente Azienda su commissione della Direzione centrale delle risorse agricole, naturali e forestali – Servizio gestione forestale e antincendio boschivo, con lettera d'incarico del 4 maggio 2009, n. RAF14/9.5/32853.

1.1 Premessa

Negli ultimi anni il panorama dei sistemi di t<mark>elerilevamento si è notevolm</mark>ente arricchito con l'introduzione del laser scanning, tecnologia in grado di acquisire informazioni tridimensionali sul territorio con un'elevata precisione metrica.

Già l'utilizzo di immagini aeree e/o satellitari ad alta risoluzione ha fornito e fornisce ai tecnici un ausilio per la caratterizzazione qualitativa degli ecosistemi forestali su vasta scala. Questo tipo di rilievo però ha ancora dei limiti circa la possibilità di estrarre da essi informazioni a livello quantitativo sulla consistenza in termini di volume delle foreste ad un livello di dettaglio tale da consentire un passaggio, pur parziale, da metodi diretti comunemente praticati (es. cavalettamento, relascopia, aree saggio) verso l'acquisizione di dati assestamentali da strumentazione remota.

La stesura di inventari forestali e di piani di assestamento del bosco richiede peraltro informazioni dettagliate sulle caratteristiche dei popolamenti (es. altezza, diametro, specie, volume e condizioni ecologiche ed ecosistemiche). Alcune di queste variabili sono particolarmente indicative delle proprietà e dello stato evolutivo del bosco. In particolare la densità del popolamento, la distribuzione relativa e l'altezza della vegetazione rappresentano variabili conoscitive fondamentali, al fine di porre in essere le più opportune strategie di gestione selvicolturale delle aree forestali.

Nuove possibilità applicative di indagine sono offerte dallo sviluppo, relativamente recente, della tecnologia laser scanning da aeromobile (ALS) che, al contrario dei sistemi passivi di telerilevamento (fotografie aeree, immagini satellitari), permette di analizzare il territorio, ed in particolare le foreste, nella loro struttura tridimensionale e volumetrica.

Oltre alla tridimensionalità dell'informazione, il rilievo per punti della copertura arborea e degli strati sottostanti fino al campionamento accurato del terreno sotteso dalla vegetazione sono elementi distintivi della tecnica laser, caratteristiche che rendono possibile elaborare un approccio innovativo per la realizzazione di cartografie vegetazionali di elevato dettaglio metrico, direttamente accessibili in fase di pianificazione per gli Enti territoriali.

1.2 La tecnologia laser scanning

La tecnologia laser scanning si inserisce nel quadro delle tecniche per il rilievo a distanza del territorio. Più in particolare, assieme alla famiglia dei radar, costituisce un sistema di telerilevamento attivo, dal momento che le superfici sono rilevate attraverso l'utilizzo di energia luminosa emessa direttamente dal sensore. Il principale punto di forza della tecnica Laser scanning (comunemente conosciuta anche con il termine LiDAR, *Light Detection And Ranging*), che allo stesso tempo ne costituisce un elemento di grande originalità rispetto al telerilevamento classico, consiste nella capacità di restituire in modo tridimensionale gli elementi presenti sulla superficie terrestre.

La tecnologia è costituita da un telemetro laser (che emette gli impulsi luminosi e registra la risposta degli oggetti colpiti), un ricevitore GPS (Global Positioning System) ed un apparato di navigazione inerziale IMU (Inertial Measuring Unit).

Tali apparati sono installati a bordo di un vettore aereo. L'uso integrato di GPS ed IMU consente di ricostruire istantaneamente la posizione e l'assetto angolare del velivolo sul quale la strumentazione è posta. Combinando opportunamente queste informazioni con le misure di distanza eseguite dal telemetro si risale alle coordinate tridimensionali dei punti battuti dall'onda elettromagnetica sulla superficie terrestre. Il risultato della scansione è una "nube di punti" georeferenziati corrispondenti agli elementi presenti sulla superficie (terreno, vegetazione, edifici, strade, linee elettriche ecc.) (es. Figura 1.1).

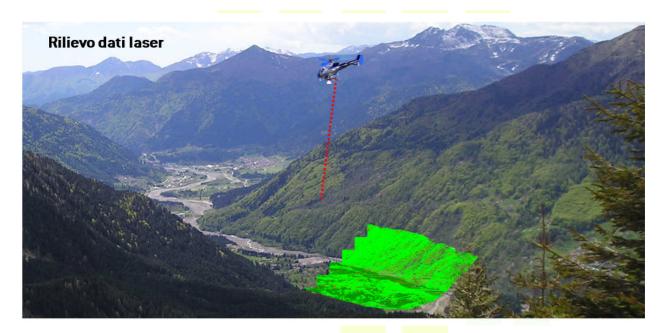


Figura 1.1: Esempio di rilievo di coordinate tridimensionali di punti (nu<mark>vole di p</mark>unti) attraverso strumentazione laser scanning aerotrasportata.

Nell'ambito dello studio della vegetazione, l'elemento di assoluta innovazione apportato dalla tecnologia laser è costituito dalla possibilità di superare la coltre vegetale grazie alla proprietà di diffrazione del fascio luminoso. Parte dell'energia luminosa può infatti oltrepassare la coltre vegetale e, con una certa probabilità, raggiungere il terreno. Questa proprietà fisica del sistema laser scanning consente di ottenere informazioni geometriche e morfologiche sulla copertura del bosco oltre che sull'altimetria del terreno sotteso dalla vegetazione.

In particolare, il bosco ed i singoli alberi che lo costituiscono sono acquisiti attraverso il campionamento discreto della chioma fogliare. L'elevata densità di punti per unità di superficie, possibile grazie all'elevata frequenza dei sistemi LiDAR (attualmente alcuni strumenti acquisiscono i dati con una frequenza di 250 KHz), determina una copertura pressoché omogenea del territorio.

1.3 Obiettivi del lavoro

L'obiettivo del lavoro consisteva nell'elaborazione di dati Laser scanning per estrarre parametri forestali finalizzati alla redazione del Piano di gestione forestale (PGF) della Foresta regionale di Caltea e di progetti di interventi silvicolturali e di viabilità forestale in determinate aree della Foresta regionale di Fusine e della Foresta regionale del Cansiglio (cfr. lettera d'incarico).

Nello specifico, l'incarico prevedeva la restituzione, per ciascuna delle aree indicate di:

- a) Modello Digitale del Terreno;
- b) Cartografia tematica in ambiente G<mark>IS dell'a</mark>re<mark>a a bos</mark>co, <mark>con di</mark>stinzione dei seguenti parametri dendrometrici e strutturali:
 - struttura verticale (boschi mono/bi/pluristratificati);
 - fasi cronologic o-strutturali;
 - numero di piante ad ettaro;
 - presenza/assenza di materiale intercalare;
 - presenza/assenza di rinnovazione affermata;
 - composizione (percentuale di conifere e di latifoglie).

Data l'innova<mark>tività della tecnol</mark>ogi<mark>a applic</mark>ata<mark>, l'incar</mark>ico <mark>assum</mark>eva il caratte<mark>re di "lavoro pilota</mark>". Per questo motivo veniva richiesta la redazione di una relazione sull'attività svolta che comprendesse:

- a) la descrizione tecnica delle varie fasi del lavoro;
- b) indicazioni sul grado di precisione dei dati restituiti;
- c) punti di forza e di debolezza del metodo.

La presente relazione, che costituisce dunque parte integrante del lavoro, contiene inoltre considerazioni sugli aspetti ritenuti rilevanti connessi con le potenzialità dei rilievi laser scanning nel contesto forestale, con particolare riferimento alla finalità di utilizzo applicativo dei dati di sintesi (redazione di progetti di interventi silvicolturali e di un piano di gestione forestale).

1.4 Aree oggetto di indagine

Le aree interessate dall'intervento (Figura 1.3) sono state individuate dal Servizio gestione forestale e antincendio boschivo della Regione Friuli Venezia Giulia e di seguito riportate in Tabella 1.2 con l'indicazione del codice identificativo e delle relative estensioni:

Località	ID particel <mark>le del P</mark> GF	Superficie (ha)
Foresta regionale di Caltea	2 - 3 - 4 - 5 <mark>- 6 - 7 - 8</mark> - 10 - 11 - 12 - 13 - 14 -	208
Foresta regionale del Cansiglio	15 - 16 10a - 11a - <mark>11b - 11</mark> c - <mark>11d - 12</mark> b - 12c - 15a - 17g - 19h - 19g	215
Foresta regionale di Fusine	16c - 18b - 18c	77
		500

Tabella 1.2: Identificativo e superficie delle particelle forestali oggetto di analisi.

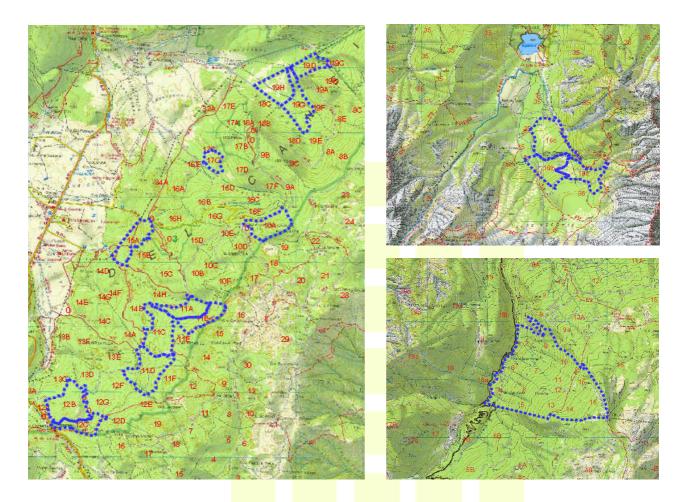


Figura 1.3: Aree oggetto di indagine (come da allegato lettera d'incarico): Cansiglio (sx), Fusine (alto-dx), Caltea (basso-dx). Tratteggiate in blu le particelle forestali in oggetto.

1.5 I dati di base

I dati di base per lo svolgimento del presente lavoro sono stati messi a disposizione, come ricordato, dalla Regione FVG. In particolare sono stati forniti ed utilizzati nelle varie fasi di elaborazione i seguenti prodotti cartografici:

- a) cartografia particellare;
- b) cartografia dei tipi for estali;
- c) dati LiDAR.

Sia la cartografia particellare che quella dei tipi forestali sono stati consegnati su supporto GIS (shape file). La cartografia particellare entra direttamente nel flusso di elaborazione dei dati LiDAR dal momento che costituisce il vincolo geometrico a livello del quale realizzare le statistiche sui parametri forestali d'interesse. La cartografia dei tipi forestali invece non entra nel processo produttivo, ma rappresenta un utile strumento di supporto e di raffronto per l'identificazione della composizione delle aree d'indagine.

I dati LiDAR utilizzati sono stati acquisiti nel corso del 2007 con lo strumento Laser Scanner Optech ALTM 3100 installato su elicottero. I dati risultano essere stati rilevati in modalità "multiple pulse" (max 4 echi di ritorno per ogni impulso emesso) con una densità media di campionamento variabile nelle tre aree d'indagine (cfr Tabella1.5).

Pagina 8 di 49



I dati LiDAR sono stati forniti in due differenti modalità:

- ASCII (*.XYZi), area di Caltea e Cansiglio;
- binario(*.las), area di Fusine.

In entrambi i casi, i dati sono corredati dall'indicazione dell'intensità di riflessione per ogni eco di ritorno. Nel caso dei file di tipo binario (Fusine), oltre alle coordinate dei punti e relativa intensità, sono indicati anche il numero di riflessione (1°, 2°, 3° o 4° eco) e il numero della strisciata aerea di riferimento (flightline). In generale, i dati laser a disposizione per le tre differenti aree d'indagine presentano le caratteristiche generali di seguito riportate.

1.5.1 Densità di campionamento

I rilievi laser scanning forniti si caratterizzano per una sostanziale disomogeneità nella distribuzione dei punti nelle tre aree in esame. Piuttosto variabile risulta essere la densità del rilievo all'interno delle particelle forestali afferenti alla stessa area (vedi Tabella 1.5) come anche all'interno delle singole particelle (vedi esempio in Figura 1.4).

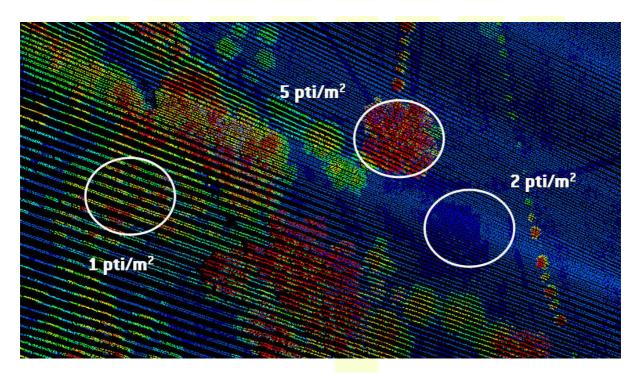


Figura 1.4: Variazioni di densità locale di punti sulle scansioni LiDAR utilizzate. Nell'esempio, a fronte di una densità media del rilievo di circa 3,5 pti/m², le aree cerchiate in bianco mostrano da sinistra a destra rispettivamente:

- area in copertura forestale con bassa densità di punti;
- area in copertura forestale con alta densità di punti;
- area senza copertura forestale (terreno) con densità media di punti.

In Tabella 1.5 sono riportate le statistiche riassuntive della numerosità e densità di punti classificati ed analizzati per ogni particella forestale.

ldentificativo dell'area	ID Partic	Pur ella rilie		rilievo	Densità rilievo (pt/m²)		Dens terre (pt/	eno	Punti vegetazione		Densità vegetazio ne (pt/m²)	
Caltea	2	862	2.401	4,4		105.618	0,6		666.192		3,4	
	3	472	2.553	3,6		65.348	0,5		359.629	2	2,8	
	4	544	1.342	3,2		90.783	0,6		393.702	2	2,4 3,5	
	5	688	3.159	4,8		102.806	0,7		502.893	3		
	6	585	5.505	4,4		95.288	0,7		422.245	3	3,2	
	7	968	3.918	5,3		138.210	0,8		701.717	3	3,9	
	8	941	.915	5,5		116.431	0,7		<mark>723.</mark> 688	4	l,3	
	10	768	5.945	5,8		113.294	0,9		<mark>557.</mark> 094	4	1,2	
	11	738	5.252	6,8		106.579	1,0		508.641	4	l,8	
	12	723	3.977	5,7		101.685	0,8		<mark>503.</mark> 913	4	, ,1	
	13	998	5.756	7,3		155. 7 01	1,1		<mark>643.</mark> 910	4	1,7	
	14	638	3.160	4,7		109.461	0,8		368. ₂₄₇	2	2,7	
	15	690	0.855	5,8		111.714	0,9		454.288	3	3,9	
	16	1.1	33.723	5,0		215.079	1,0		613. <mark>976</mark>	2	2,9	
	media			5,2			0,8			3	3,6	
Cansiglio	10a	915	5.238	4,9		163.220	0,9		619.267	3	3,3	
	11a	804	1.001	5,3		125.840	0,8		544.981	3	3,6	
	11b	788	3.799	5,6		139.051	1,0		467.221	3	3,4	
	11c	994	1.013	3,6		158.923	0,6		697.697	2	2,6	
	11d	1.5	20.332	5,4		242.452	0,9		<mark>993.</mark> 012	3	3,6	
	12b	1.3	03.761	4,6		251.691	0,9		843. ₇₉₂	3	3,0	
	12c	563	3.248	4,3		107.445	0,8		374.078	2	2,9	
	15a	736	5.239	4,0		86.042	0,5		553.708	3	3,1	
	17g	275	5.927	3,8		35.672	0,5		194.766	2	2,9	
	19h	507	'.178	2,7		104.394	0,6		307.729	1	.,9	
	19g	463	3.368	2,3		107. <mark>4</mark> 84	0,6		277.343	1	.,6	
	media			4,2			0,7			2	2,9	
Fusine	16c	830	0.109	2,3		101.088	0,3		642.275	1	.,9	
	18b	390).874	1,7		55.987	0,3		289.635	1	.,3	
	18c	316	5.459	1,5		53.63 9	0,3		229.684	_1	.,1	
	media			1,8			0,3			1	.,4	

Tabella 1.5: Analisi della numerosità e della densità di punti per ogni particella forestale in esame con distinzione tra densità totale dei punti rilevati, densità dei punti classificati come terreno e densità dei punti vegetazione effettivamente utilizzabili per l'estrazione dei parametri forestali d'interesse.

1.5.2 Sovrapposizione di scansioni adiacenti

I dati laser sono generalmente acquisiti attraverso strisciate parallele o perpendicolari tra loro. I rilievi devo essere fatti in modo da garantire che ci sia una sovrapposizione tra le strisciate pari almeno al 30%,



in modo tale da evitare buchi nella copertura del territorio scansionato. Tale zona di sovrapposizione, che risulta in questo modo essere coperta da punti di presa differenti, contiene una densità di punti che può raddoppiare rispetto alle zone poste al centro della strisciata. In fase di post processamento dei dati tali sovrapposizioni possono essere eliminate e le strisciate ritagliate in modo che i bordi risultino perfettamente combacianti (esempio in Figura 1.6).

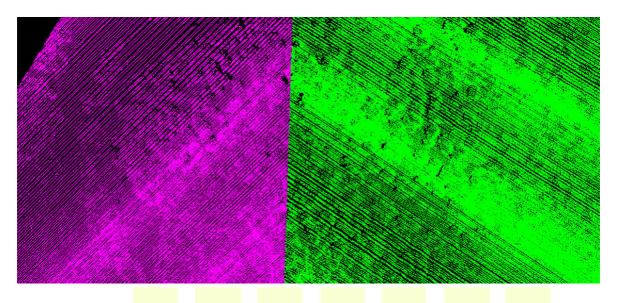


Figura 1.6: Confine tra strisciate adiacenti.

1.5.3 Intensità di riflessione

Come ricordato in precedenza, le coordinate X, Y, Z dei punti scansionati sono corredati dalla rispettiva intensità di riflessione, parametro associabile alla tipologia di materiale colpito dall'impronta laser. Nel caso dei dati in esame, i valori di intensità non possono essere direttamente utilizzati per operare delle classificazioni di oggetti dal momento che, come si vede in Figura 1.7, i valori risultano non calibrati.

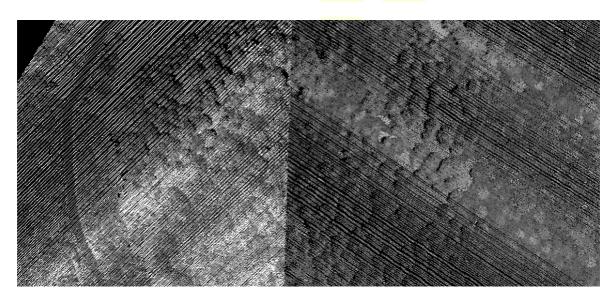


Figura 1.7: Intensità di riflessione dei punti laser in strisciate adiacenti.

1.5.4 Copertura delle particelle

Per alcune particelle della foresta del Cansiglio (vedi immagini in Figura 1.8) si riscontra la non totale copertura del dato laser in alcune zone di bordo.

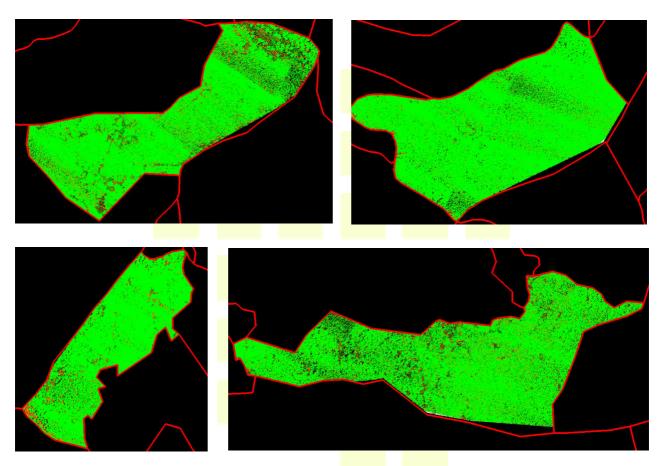


Figura 1.8: Particelle forestali in cui si verifica la non totale copertura dei dati LiDAR (da alto-sx a basso-dx rispettivamente: particelle CNS11b, CNS10a, CNS15a, CNS12c).

1.6 Descrizione schematica delle attività svolte

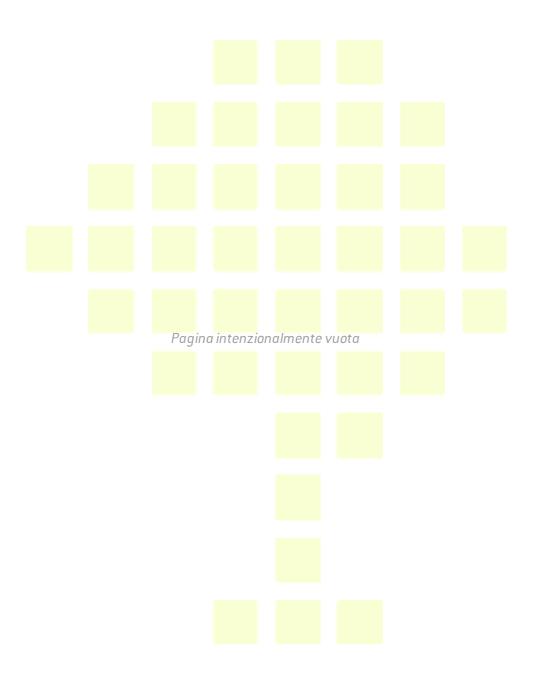
Per raggiungere le finalità poste ed indicate al par. 1.3, il lavoro è stato sviluppato nelle seguenti fasi interconnesse:

- 1) Operazioni preliminari:
 - Recupero ed analisi preliminare dei dati a disposizione;
 - Ritaglio dei dati corrispon<mark>denti alle particel</mark>le <mark>foresta</mark>li in esame e preparazione dei datasets per le successive elaborazioni;
 - Individuazione e rimozione degli outliers (errori grossolani, come punti aerei e punti sotto la superficie media del terreno);
- 2) Classificazione dei dati grezzi:
 - Filtraggio in modalità semiautomatica dei punti terreno per la realizzazione dei Modelli Digitali del Terreno (DTM);

- Individuazione, classificazione e rimozione di linee elettriche ed edifici ove eventualmente presenti;
- Classificazione dei punti appartenenti alla vegetazione;
- 3) Realizzazione della cartografia su supporto raster:
 - Interpolazione dei punti terreno su griglie equispaziate (DTM) di dimensione 1 x 1 metri;
 - Pretrattamento dei dati per l'interpolazione dei punti su griglie regolari 1 x 1 metri e la realizzazione dei Modelli Digitali di Superficie (DSM);
 - Realizzazione dei Modelli Digitali di Altezza delle Chiome (CHM);
- 4) Estrazione dei singoli alberi:
 - Analisi delle nuvole di punti laser classificate e applicazione di algoritmi basati su morfologia matematica per l'individuazione dei singoli alberi delle particelle forestali;
- 5) Realizzazione della cartografia su supporto GIS:
 - Individuazione delle aree di bosco/non bosco in modalità semiautomatica;
 - Analisi della struttura delle aree a bosco e realizzazione di un geodatabase spaziale a diversi livelli di dettaglio geometrico (area minima per struttura omogenea);
 - Analisi statistica del popolamento all'interno di ciascuna fase strutturale individuata;
 - Svilupp<mark>o e app</mark>lica<mark>zione d</mark>i al<mark>goritmi</mark> pe<mark>r la stim</mark>a d<mark>el mat</mark>eriale intercal<mark>are in c</mark>iascuna fase strutturale;
 - Realizzazione della copertura statistica del suolo con distinzione tra popolamenti a dominanza di conifere, latifoglie o boschi misti;
 - Sintesi statistica dei parametri forestali in oggetto a livello di singola particella;
- 6) Analisi di qualità dei risultati ottenuti:
 - Attività di verifica in campo dei dati prodotti;
 - Analisi della congruenza topologica delle cartografie vettoriali;
 - Analisi della congruenza del database associato alle cartografie.
- 7) Stesura della relazione tecnica.

Nello svolgimento del lavoro sono stati tenuti cont<mark>inui co</mark>ntatti con il *Servizio gestione forestale e antincendio boschivo*, con l'obiettivo di raggiungere al meglio le finalità proprie dell'incarico.







2. Gli elaborati

2.1 Premessa

In questo capitolo, si descrivono i prodotti cartografici realizzati e restituiti per il lavoro in oggetto. Particolare attenzione sarà posta all'illustrazione delle principali caratteristiche tecniche dei modelli e delle cartografie prodotte ed ai contenuti alfanumerici dei differenti database realizzati.

Si ricorda che tali modelli e cartografie der<mark>ivano e</mark>scl<mark>usivam</mark>ent<mark>e dall'e</mark>laborazione delle nuvole di punti laser scanning, con metodologie ed algoritm<mark>i propri, sviluppati</mark> da<mark>ll'azien</mark>da.

2.2 Schema degli elaborati consegnati

Gli elaborati richiesti (cfr. obiettiv<mark>i al par. 1.3) sono</mark> st<mark>ati prod</mark>ot<mark>ti e con</mark>seg<mark>nati su</mark> supporto digitale, in 3 distinti cd, ciascuno per ogni area geografica d'indagine.

In tabella 2.1 è riportato	lo schem	n <mark>a gener</mark> ale	e <mark>del con</mark> te	nuto di ogni CD.

CD	directory	sub directory	tipo files	esempio
		BnB		fus_particelle_bnb_2000.shp
		Particelle_gis	idluogo idparticelle tipodato.dbf	fus_particelle_gis.shp
	Cartografia	Rinnovazione	idluogo_idparticelle_tipodato.shp	fus_particelle_rinnovazione.shp
Nome		Specie	idluogo_idparticelle_tipodato.shx	fus_particelle_specie_1000.shp
CD		Struttura		fus_particelle_struttura_500_gis.shp
		СНМ		fus_16c_18bc_chm.tif
	Raster	DTM	idluogo_idparticelle_tipodato.tif idluogo idparticelle tipodato.aux	fus_16c_18bc_dtm.tif
		DTM_SHADE	0 1 1 2 1 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	fus_16c_18bc_dtm_sh.tif

Tabella 2.1: Identificativo e superficie delle particelle forestali oggetto di analisi

La cartografia vettoriale è stata realizzata su formato shape di ESRI, che come noto è costituito da un file principale con estensione *.shp (contenente le geometrie) e da altri 2 files che lo completano (*.dbf: file del database collegato alle geometrie e *.shx: file per l'indicizzazione delle geometrie).

La cartografia raster è invece fornita su supporto tiff (*.tif) con annesso file di georeferenziazione (*.aux).

Entrambi i formati sono leggibili ed utilizzabili nei più comuni software GIS, siano essi di tipo commerciale che open source.

2.3 Cartografia su supporto raster

2.3.1 Modello Digitale del Terreno (DTM)

La cartografia numerica è spesso utilizzata come base informativa dalla quale estrarre dati utili alla produzione di modelli digitali del terreno (DTM). L'operazione è agevolata dalla natura stessa dei dati cartografici numerici: si tratta perlopiù di dati di tipo vettoriale, nei quali ogni oggetto cartografico è rappresentato da una sequenza di punti georiferiti tridimensionalmente, organizzati topologicamente e

classificati per categorie. La creazione di una base dati per un DTM avviene estraendo dal file cartografico tutti gli elementi che descrivono l'altimetria, quali i punti singoli quotati e i vertici delle poligonali delle curve di livello, e interpolandoli con un opportuno algoritmo (TIN o altro).

Un problema effettivo nell'utilizzo dei DTM di natura aerofotogrammetria riguarda l'affidabilità e la precisione ottenibile nella descrizione delle quote soprattutto nelle aree montane ricoperte da fitta vegetazione che ostacola la visione del terreno da parte del restitutista e, conseguentemente, la corretta restituzione della morfologia sotto copertura.

Lo sviluppo della tecnologia LiDAR offre la possibilità di ottenere informazioni sulla morfologia del terreno anche nel caso vi sia la presenza di fitta copertura arborea. Da questo tipo di rilievo, il DTM è derivabile attraverso tecniche di filtraggio numerico e classificazione dei dati grezzi (coordinate di punti) che costituiscono il cosiddetto DSM (Modello Digitale della Superficie) di partenza.

L'estrazione del DTM dal DSM LIDAR è stata effettuata in modalità semiautomatica. Ad una prima classificazione automatica dei punti terreno, mediante opportuni parametri operativi nell'algoritmo di filtraggio, ha fatto seguito un rigoroso lavoro di validazione a video, di rifinitura e riclassificazione manuale dei punti. Procedendo per sezioni verticali alla superficie del suolo, di ampiezza e profondità variabili, l'operatore ha isolato e riclassificato i punti che dall'analisi visiva del profilo e dalle verifiche metriche apparivano erroneamente classificati.

Il DTM così o<mark>ttenuto ha consen</mark>tit<mark>o una ri</mark>pro<mark>duzione ad elevat</mark>a r<mark>isoluzio</mark>ne <mark>della m</mark>orf<mark>ologia d</mark>el terreno in grado di evidenziare forme della sua superficie invisibili ad altri metodi di telerilevamento.

Il Modello Digitale del Terreno finale è stato poi realizzando attraverso il passaggio dalla superficie per punti, come derivante dal procedimento di filtraggio, alla superficie interpolata su griglia con passo costante di 1 x 1 metri. La risoluzione della griglia è stata scelta in modo che i nodi della stessa avessero una densità maggiore o uguale a quella dei dati originari (vedi le immagini in Figura 2.2a, 2.3a, 2.4a)

2.3.2 Modello Digitale del Terreno Ombrizzato (DTM shade)

Il Modello Digitale del Terreno Ombrizzato è realizzato a partire dal DTM in formato raster. Applicando una funzione cosiddetta di "shading" si determina il valore di illuminazione ipotetica di ciascuna cella del DTM rispetto alle celle vicine. Si calcolano dunque nuovi valori per ogni cella impostando una fonte luminosa ad una altezza e ad un angolo opportuno rispetto alla superficie di partenza. Questo nuovo modello "shade" è molto utile perchè enfatizza la morfologia del modello del terreno ed in questo modo ne agevola l'interpretazione visiva.

I valori di questo modello sono espressi in 256 livelli di grigio. Non sono quindi valori che esprimono l'altimetria (vedi le immagini in Figura 2.2b, 2.3b, 2.4b).

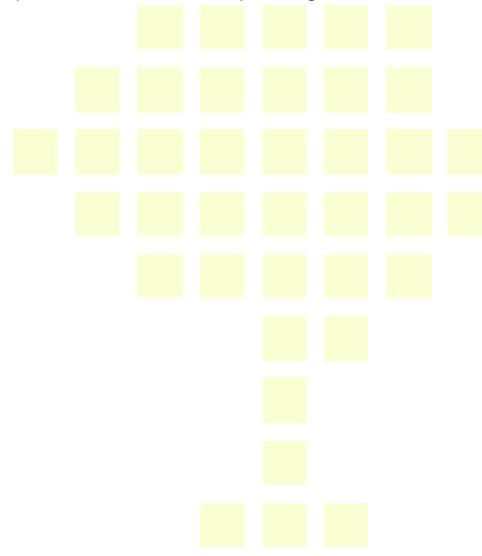
2.3.3 Modello Digitale di altezza delle chiome (CHM)

La sottrazione algebrica dei valori di quota espressi dal Modello Digitale del Terreno ed il Modello Digitale di Superficie consente di ottenere un nuovo modello di superficie (2,5 D) chiamato nDSM (normalized DSM). In territorio forestale, tale nDSM prende il nome di Modello Digitale di Altezza delle Chiome (CHM) che, per semplicità, può essere identificato come una superficie rasterizzata e normalizzata sul piano in cui il valore del singolo pixel indica l'altezza sul terreno della porzione di copertura forestale ad esso relativa.

Da questo deriva che la realizzazione di un CHM prevede una classificazione a priori della nuvola di punti, in modo da classificare ed escludere nel processo di interpolazione manufatti ed altri oggetti diversi dalla vegetazione (es: linee elettriche, edifici ecc.).

Ulteriori procedure sono necessarie in merito alla rimozione dei punti sottostanti la coltre vegetazionale, in modo tale da ridurre al minimo lo smussamento delle quote del DSM dovuto all'interpolazione su griglia regolare. Basata su queste considerazioni, la procedura implementata da e-laser consente di ottenere CHM effettivamente aderenti allo strato superiore della copertura forestale (true CHM).

Le immagini nella sequenza di Figure 2.2c, 2.3c, 2.4c nel paragrafo 2.3.4 mostrano i prodotti cartografici realizzati in formato raster tiff georeferenziato per ciascuna delle aree d'indagine. Dei Modelli Digitali delle Chiome si propone una visualizzazione 3D nella sequenza di Figura 2.2d, 2.3d, 2.4d.



2.3.4 Modelli raster: overview

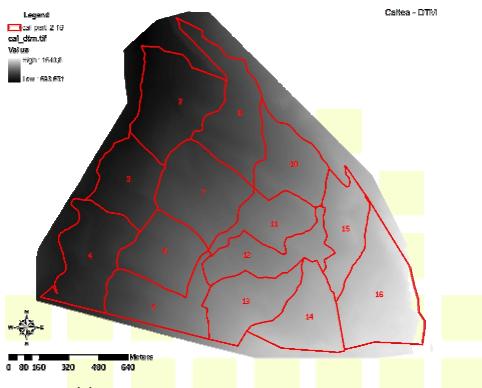


Figura 2.2 (a): Modello Digitale del Terreno relativo alle particelle forestali di Caltea.

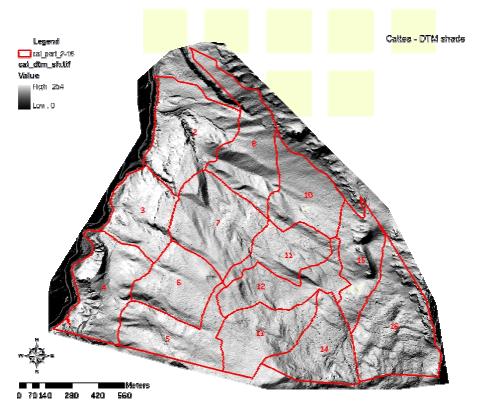


Figura 2.2 (b): Modello Digitale del Terreno ombrizzato relativo alle particelle forestali di Caltea.



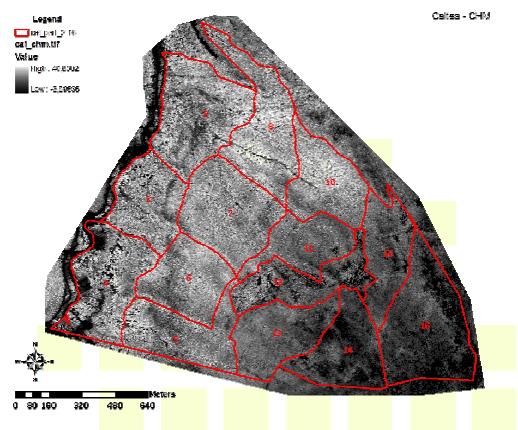


Figura 2.2 (c): Modello Digitale delle Chiome relativo alle particelle forestali di Caltea.

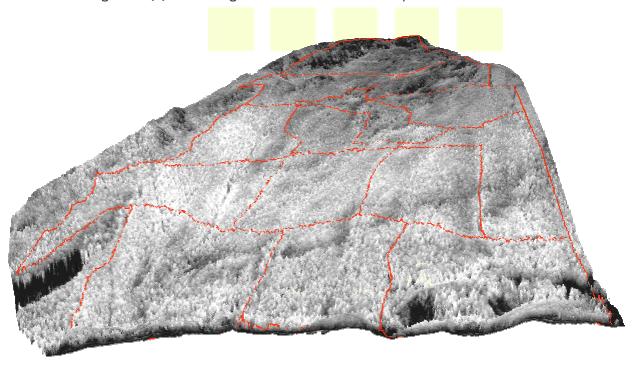


Figura 2.2 (d): Visualizzazione 3D del Modello Digitale delle Chiome relativo alle particelle forestali di Caltea.

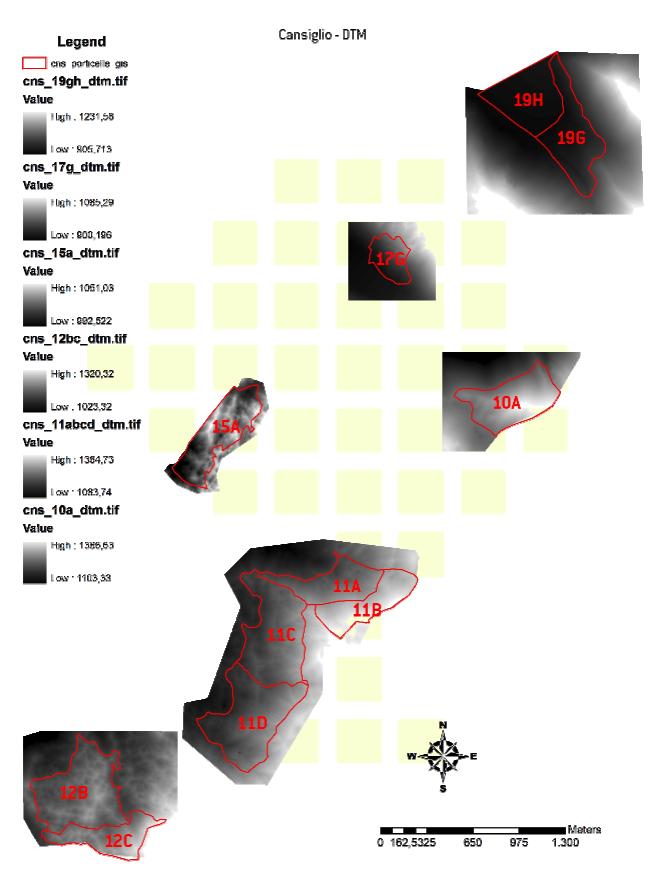


Figura 2.3 (a): Modelli Digitali del Terreno relativi alle particelle forestali del Cansiglio.

Pagina 20 di 49



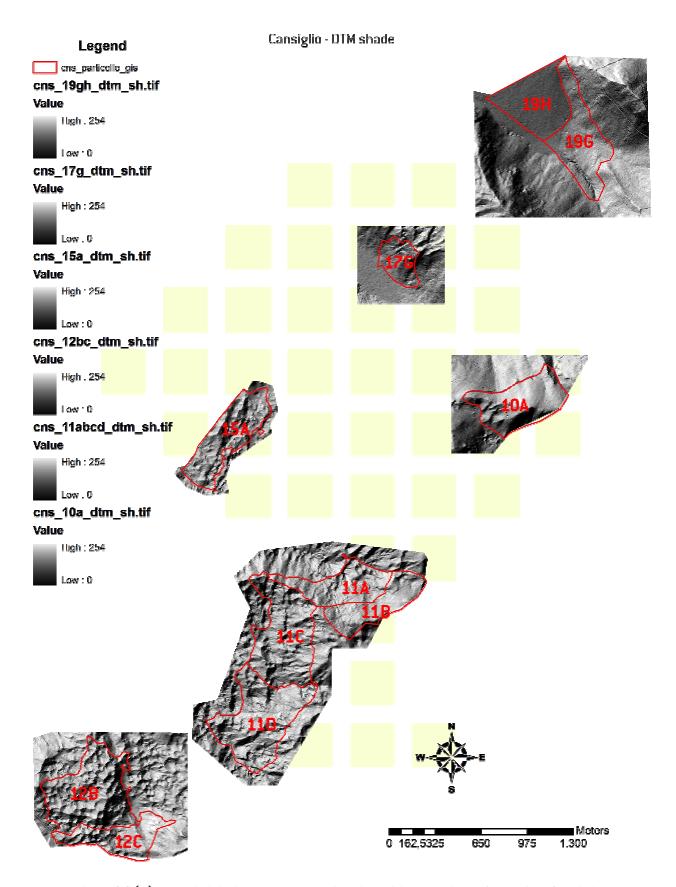


Figura 2.3 (b): Modelli Digitali del Terreno ombrizzati relativi alle particelle forestali del Cansiglio.

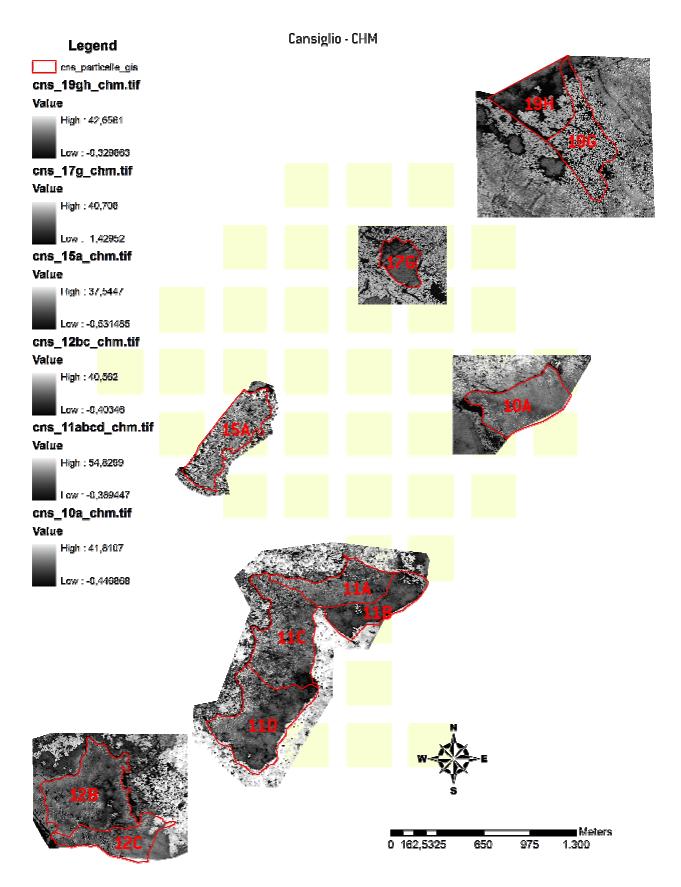


Figura 2.3 (c): Modelli Digitali delle Chiome ombrizzati relativi alle particelle forestali del Cansiglio.



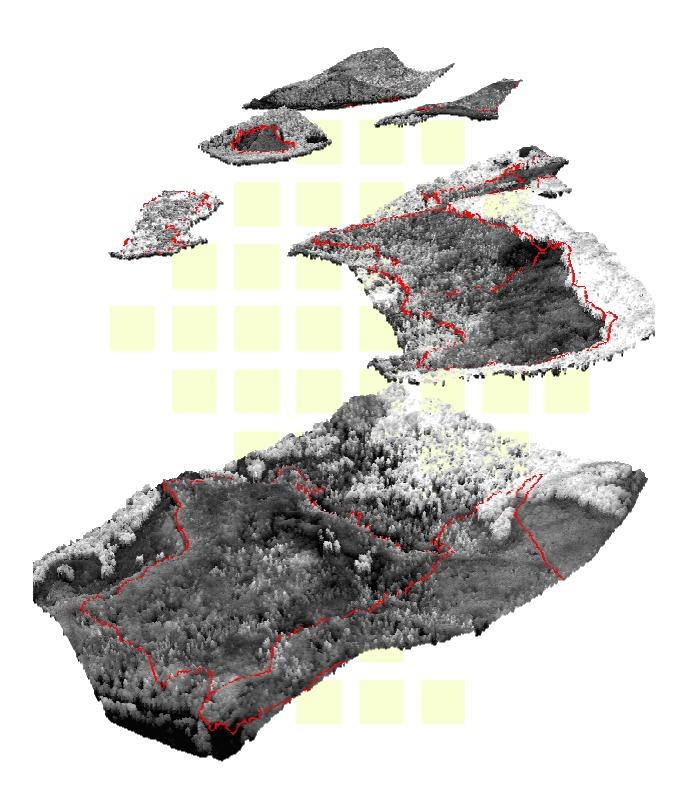


Figura 2.3 (d): Visualizzazione 3D dei Modelli Digitali delle Chiome ombrizzati relativi alle particelle forestali del Cansiglio.

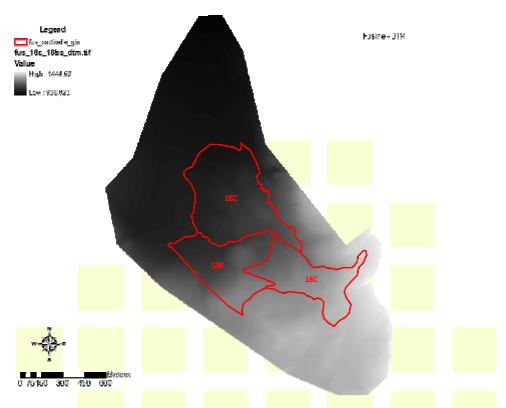


Figura 2.4 (a): Modello Digitale del Terreno relativo alle particelle forestali di Fusine.

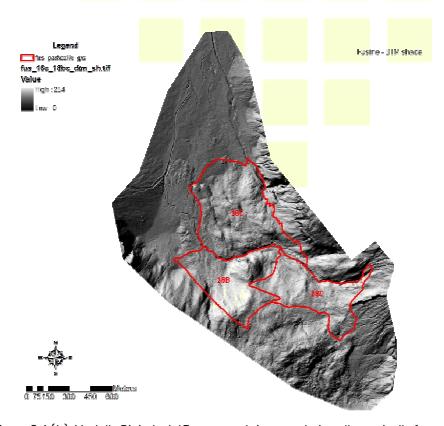


Figura 2.4 (b): Modello Digitale del Terreno ombrizzato relativo alle particelle forestali di Fusine.

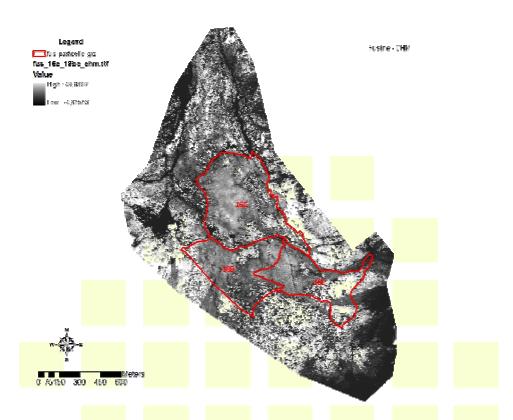


Figura 2.4 (c): Modello Digitale delle Chiome relativo alle particelle forestali di Fusine.

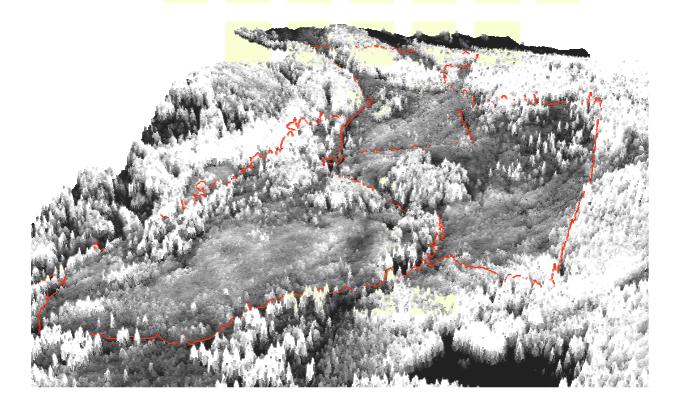


Figura 2.4 (d): Visualizzazione 3D del Modello Digitale delle Chiome relativo alle particelle forestali di Fusine.

2.4 Cartografia su supporto G.I.S.

I modelli di tipo raster, precedentemente descritti, possono essere interrogati in ambiente GIS in modo da "leggere" sia i valori puntuali espressi dai singoli pixel (ad esempio la quota del terreno sul DTM o l'altezza della vegetazione sul CHM) sia valori statistici riguardanti l'intera superficie (ad esempio l'altezza media di una data porzione di territorio o l'altezza media di una data copertura forestale). I modelli raster dunque, consentono efficaci visualizzazioni del territorio, essendo adatti ad una sua rappresentazione puntuale.

Modelli o cartografie di tipo vettoriale si prestano invece più efficacemente ad una rappresentazione areale di una determinata caratteristica del territorio, qualora di questa caratteristica si voglia rappresentarne l'omogeneità di distribuzione in una data area. In ambiente GIS, inoltre, ad ogni poligono che individua la spazializzazione della variabile omogenea cartografata è associato un database alfanumerico, interrogabile, che raccoglie i valori statistici della variabile rappresentata come anche i valori di altri parametri riferibili alla stessa area.

Nei paragrafi che seguo<mark>no sono</mark> d<mark>escritti i</mark> co<mark>ntenuti</mark> de<mark>lle carto</mark>gr<mark>afie GIS</mark> rea<mark>lizzate</mark> per questo lavoro.

2.4.1 Cartografia Bosco/non Bosco

La distinzione delle due categorie di bosco e non bosco è stata realizzata a partire dall'applicazione di un algoritmo che consente di individuare automaticamente le aperture, anche di piccola entità (< 5 m²) della copertura forestale (canopy gaps). Da questo primo mosaico di copertura sono state poi escluse e riclassificate come bosco quei poligoni con superficie inferiore ai 2000 m² e larghezza media inferiore ai 20 metri.

In Figura 2.5 si riporta un esempio di cartografia di bosco/non bosco realizzata nelle particelle forestali 19g e 19h relative all'area del Can<mark>siglio. L</mark>a F<mark>igura ev</mark>id<mark>enzia i s</mark>eg<mark>uenti as</mark>petti:

- 1. I poligoni aderiscono alla parte esterna delle chiome arboree;
- 2. Sono considerate non bosco le aree coperte da alb<mark>eri ma c</mark>on estensione inferiore ai 2000 m²;
- Sono considerate non bosco quelle superfici in cui la copertura di alberi e/o arbusti non raggiunge il 20% dell'area stessa.

Si rimarcano inoltre i seguenti aspetti:

- 1. La cartografia deriva dall'elaborazione dei dati laser scanning. Conseguentemente, il posizionamento della linea di passaggio tra aree classificate bosco e aree di non bosco non risente di:
 - eventuali ombre (problema frequente nel caso si utilizzi un approccio di foto interpretazione a partire da immagini aeree);
 - distorsioni prospettiche (il rilievo laser è, per sua natura, un dato orto rettificato);
- 2. Qualora un poligono di bosco o non b<mark>osco in</mark>ter<mark>sechi due o più particelle forestali, questo viene ritagliato sulle stesse particelle, con conseguente possibilità che siano create aree inferiori ai 2000 m². Tali aree sono mantenute, in quanto si da priorità alla continuità della tipologia di copertura del suolo, rispetto ai limiti delle singole particelle.</mark>

In Tabella 2.6 si riporta un esempio di database collegato alla cartografia di bosco/non bosco. I valori riportati in rosso evidenziano i valori delle righe di database corrispondenti ai poligoni in Figura 2.5.





Figura 2.5: Esempio di cartografia de<mark>lle aree</mark> di bosco e non bosco. Sx: Particelle 19G e 19H, Cansiglio; Dx: dettaglio.

DENOMINAZI	NUMEROPART	CODIFICAPA	COPERTURA	SUPHATOTGE	AREA	PERC_HA
Cansiglio	10A	CNS11F010A	bos <mark>co</mark>	18,66	18,60	99,67
Cansiglio	10A	CNS11F010A	non bosco	18,66	0,06	0,33
Cansiglio	11A	CNS11F011A	bosco	14,73	14,73	100,00
Cansiglio	11B	CNS11F011B	bos <mark>co</mark>	13,75	13,75	100,00
Cansiglio	11C	CNS11F011C	bos <mark>co</mark>	26,89	26,03	96,79
Cansiglio	11C	CNS11F011C	non bosco	26,89	0,86	3,21
Cansiglio	11D	CNS11F011D	bosco	27,64	27,38	99,05
Cansiglio	11D	CNS11F011D	non bosco	27,64	0,26	0,95
Cansiglio	12B	CNS11F012B	bos <mark>co</mark>	27,64	27,64	100,00
Cansiglio	12C	CNS11F012C	bosco	12,88	12,88	100,00
Cansiglio	15A	CNS11F0 <mark>15</mark> A	bosco	17,96	17,55	97,68
Cansiglio	15A	CNS11F0 <mark>15</mark> A	non bosco	17,96	0,42	2,32
Cansiglio	17G	CNS11F0 <mark>17G</mark>	bosco	7,06	6,15	86,99
Cansiglio	17G	CNS11F017G	non bosco	7,06	0,92	13,01
Cansiglio	19G	CNS11F019G	bosco	19,35	18,85	97,46
Cansiglio	19G	CNS11F019G	non bosco	19,35	0,49	2,54
Cansiglio	19H	CNS11F019H	bosco	18,27	14,16	77,49
Cansiglio	19H	CNS11F019H	non bosco	18,27	4,11	22,51

Tabella 2.6: Esempio di database alfanumerico collegato alla cartografia delle aree di bosco-non bosco.

2.4.2 Cartografia della struttura

La cartografia della struttura è realizzata a partire dall'individuazione della seriazione ipsometrica totale delle aree d'indagine. Attraverso l'applicazione di appositi algoritmi di elaborazione dei dati laser scanning implementati ad hoc, sono stati individuati sulle nuvole di punti gli apici corrispondenti ai singoli alberi di ciascun popolamento forestale. Conseguentemente di ciascun apice (albero) è stata calcolata l'altezza sul terreno.

La posizione dei singoli alberi e le altezze così calcolate sono utilizzate per l'individuazione delle aree a struttura omogenea attraverso un opportuno algoritmo.

In Figura 2.7 si mostra un esempio di seriazione ipsometrica, con sovrapposizione dei derivanti poligoni che costituiscono la cartografia della struttura per le varie particelle forestali. La Figura 2.8 mostra invece il database risultante dalle elaborazioni per ciascun poligono individuato.

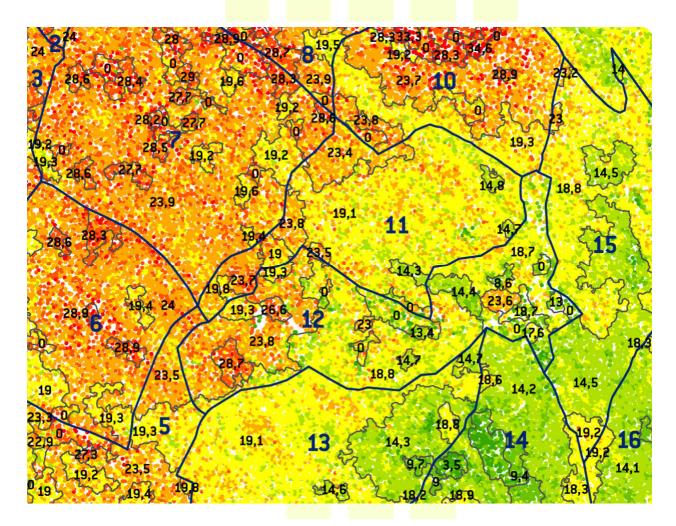


Figura 2.7: Esempio cartografia della struttura in parte della superficie forestale di Caltea. In Figura:

- singoli alberi, colorati in funzione della classe altimetrica relativa (dal verde al rosso rispettivamente per classi altimetriche crescenti);
- delimitazione delle aree a struttura omogenea e/o disomogenea (poligoni in nero) con indicazione delle altezze dominanti per ciascun poligono;
- particelle forestali (poligoni in blu).



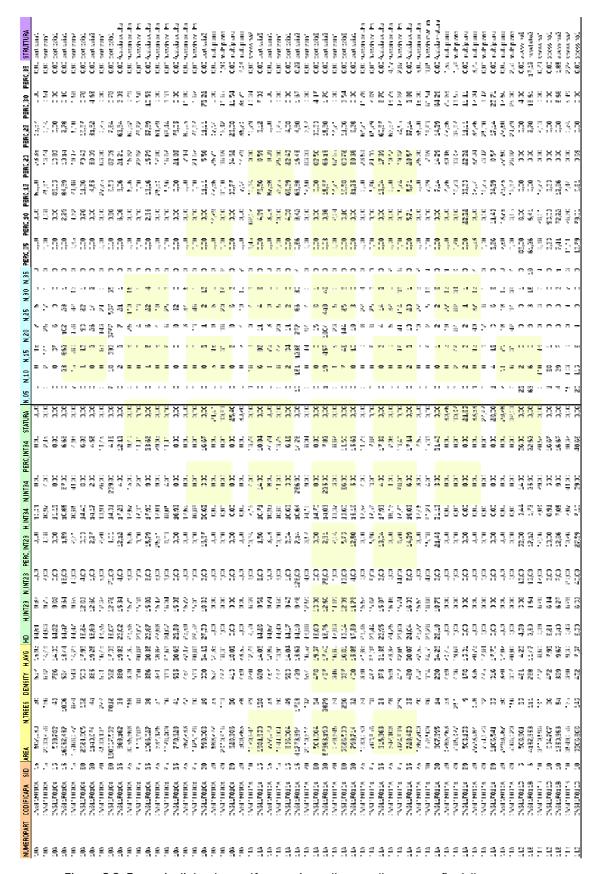


Figura 2.8: Esempio di database alfanumerico collegato alla cartografia della struttura.

Come si vede in Figura 2.7, il confine tra due strutture è posto al centro della zona di passaggio tra le stesse.

Il database risultante dalle elaborazioni (fig. 2.8) ed associato a ciascun poligono contiene 30 campi. Tali campi possono essere raggruppati in 6 diverse categorie, come schematizzato in Tabella 2.9. La stessa tabella riporta alcune note esplicative sul contenuto dei campi di database presenti sulla cartografia.

Gruppi	Campi	Nome esteso	Note			
	NUMEROPART	Numero della particella	Campi derivati dalla cartografia dei			
	CODIFICAPA	Codifica della particella	piani di assestamento.			
Campi identificativi della particella	SID	Identificativo della classe altimetrica do minante	I valori identificano la classe di altezza predominante all'interno dell'area. 99 indica l'assenza di una classe dominante (data una percentuale di dominanza sta bilita a priori).			
	AREA	Area	Ugua <mark>le o supe</mark> riore all'area minima d'indagine prestabilita.			
Valori statistici riferiti a ciascuna	N_TREES	Numero di alberi				
area	DENSITY	Densità di alberi	Rifer <mark>ita allo s</mark> trato do mina dominante			
	H_AVG	Altezza media				
	HD	Altezza dominante	Media delle altezze dei 100 alberi più alti per ettaro. È calcolata per le are e con SID ≠ 99. So no esclusi dal calcolo gli alberi più alti della classe dominante.			
Parametri statistici forestali derivanti dall'altezza dei	H_INT23 (H_INT34)	Altezza del piano intercala <mark>re</mark>	Sono calcolati due differenti piani intercalari, rispettivamente: H_INT23 = ² / ₃ HD H_INT = ³ / ₄ HD			
singoli alberi	N_INT23 (N_INT34)	Numero <mark>di alberi d</mark> ello strato in <mark>tercalare</mark>	Numero di alberi al di sotto dei due differenti piani intercalari.			
	PERC_INT23 (PERC_INT34)	Percentu <mark>ale di alb</mark> eri dello strato in <mark>tercalare</mark>	Percentuale di alberi al di sotto dei due differenti piani i ntercalari.			
	STATURA	Statura	Media delle altezze dei 5 alberi più alti per ettaro. È calcolata per le aree con SID = 99.			
Numero di alberi per classe altimetrica	N_05 - N_10 - N_15 - N_20 - N_25 - N_30 - N_35	Numero di alberi per ciascuna classe altimetrica	Es: N_05 = numero di alberi con 0 m < altezza < 5 m; N_35 = numero di alberi con altezza > 30 m			
Densità di al beri per classe altimetrica	PERC_05 - PERC_10 - PERC_15 - PERC_20 - PERC_25 - PERC_30 - PERC_35	Percentuale di alberi per ciascuna classe altimetrica	Es: PERC_05 = percentuale di alberi con 0 m < altezza < 5 m; PERC_35 = percentuale di alberi con altezza > 30 m			
Indicazione della struttura	Struttura	Classificazione della struttura	Sono individuate 11 differenti classi strutturali, a partire dalla classificazione indicata nei volumi "Direttive per i piani di qestione delle			





	proprietà forestali" e "Regolamento
	forestale per la salva guardi a e
	l'utilizzazione dei boschi e per la tutela
	dei terreni soggetti a vincolo
	idrogeologico" della Regione FVG.

Tabella 2.9: Campi del database della cartografia della struttura e relative note esplicative.

In Tabella 2.10 sono esplicitate le 11 tipologie di struttura individuabili sulla relativa cartografia.

Classificazione struttura	Struttura derivata	Altezza dei soggetti (m)	Note
	Novelleto 1		Scarsa presenza di individui apparte nenti alle classi superiori.
Novelleto	N <mark>ovelleto</mark> 2	0 < h < 3	Presenza di individui delle classi superiori (numero e densità riportati nel database).
	Spessina 1		Scarsa presenza di individui apparte nenti alle classi superiori.
Spessina	Spessina 2	3 < h < 10	Presenza consistente di individui delle classi superiori, ovvero residui del vecchio ciclo (numero e de nsità riportati nel database).
	P <mark>erticaia 1</mark>		Scarsa presenza di individui apparte nenti alle classi superiori.
Perticaia	Perticaia 2	10 < h < 18	Presenza consistente di individui delle classi superiori, ovvero residui del vecchio ciclo (numero e densità riportati nel database).
	Perticaia 3		Tendente alla struttura biplana.
Fustaia adulta	Fustaia adulta	18 < h < 25	Eventuale presenza di rinnovazione da valutare utilizzando la relativa cartografia fornita.
Fustaia matura	Fustaia matura	h > 25	Eventuale presenza di rinnovazione da valutare utilizzando la relativa cartografia fornita.
Biplano	Biplano		Marcata presenza di 2 distinte classi altimetriche prevalenti.
Multiplano	Multiplano		Distribuzione continua delle classi.

Tabella 2.10: Classificazione delle fasi cronologico-strutturali e relative note esplicative

Le immagini nella sequenza di Figure 2.15<mark>a, 2.16</mark>a, <mark>2.17a n</mark>el <mark>paragra</mark>fo 2.4.6 mostrano la cartografia della struttura realizzata in formato GIS per ciascuna delle aree d'indagine.

2.4.3 Cartografia Specie

La cartografia della distribuzione conifere/latifoglie/misto, che per semplicità viene definita in questo lavoro come cartografia della specie, è realizzata attraverso l'utilizzo esclusivo dei dati laser scanning. La distinzione tra queste tre tipologie di area è determinata previa individuazione di una percentuale minima

di dominanza di una specie rispetto all'altra. Il metodo utilizzato è basato sullo studio dell'intensità di riflessione (precedentemente calibrata attraverso algoritmi proprietari) e su criteri morfologici distintivi tra le specie. In questo caso l'elaborato necessita dell'individuazione delle singole chiome e del calcolo dei relativi parametri biometrici.

In Tabella 2.11 si riporta un esempio di database collegato alla cartografia della specie mentre le immagini nella sequenza di Figure 2.15b, 2.16b, 2.17b nel paragrafo 2.4.6 mostrano la cartografia realizzata in formato GIS per ciascuna delle aree d'indagine. Nel database, oltre ai campi identificativi della particella forestale a cui appartiene ciascun poligono sono indicati:

- la copertura prevalente (COPERTPREV);
- l'area di ciascun poligono (AREA);
- la percentuale in ettari (PERC HA) di ciascun poligono rispetto al totale della particella.

DENOMINAZI	NUMEROPART	CODIFICAPA	COPERTPREV	SUPHATOTGE	AREA	PERC_HA
Cansiglio	10A	CNS11F010A	misto	18,66	1,06	5,66
Cansiglio	10A	CN <mark>S11F01</mark> 0A	misto	18,66	0,39	2,08
Cansiglio	10A	CN <mark>S11F01</mark> 0A	misto	18,66	0,38	2,03
Cansiglio	10A	CNS11F010A	misto	18,66	0,12	0,64
Cansiglio	10A	CNS11F010A	misto	18,66	0,31	1,64
Cansiglio	10A	CN <mark>S11F01</mark> 0A	misto	18,66	0,28	1,51
Cansiglio	10A	CN <mark>S11F01</mark> 0A	la <mark>tifoglia</mark>	18,66	0,23	1,24
Cansiglio	10A	CNS11F010A	latifoglia	18,66	0,41	2,19
Cansiglio	10A	CN <mark>S11F01</mark> 0A	la <mark>tifoglia</mark>	18,66	12,78	68,48
Cansiglio	10A	CN <mark>S11F01</mark> 0A	conifera	18,66	0,19	1,00
Cansiglio	10A	CNS11F010A	conifera	18,66	1,52	8,16
Cansiglio	10A	CNS11F010A	conifera	18,66	0,40	2,16

Tabella 2.11: Esempio <mark>di datab</mark>as<mark>e alfanu</mark>mer<mark>ico colle</mark>ga<mark>to alla ca</mark>rto<mark>grafia de</mark>lla specie.

2.4.4 Cartografia Rinnovazione

La cartografia della rinnovazione è realizzata sfruttando la capacità del segnale laser di penetrare la coltre forestale esterna e campionare, seppur con notevole riduzione della densità d'informazione (pt/m²), gli strati vegetazionali più bassi. In questo lavoro si è inteso proporre una distinzione della rinnovazione in due classi specifiche: rinnovazione affermata e rinnovazione dominata.

Nel primo caso, la rinnovazione è "visibile" sui dati laser direttamente dall'analisi della copertura esterna (motivo che giustifica l'uso del termine "affermato"); nel secondo caso invece, l'analisi è condotta sotto copertura arborea. In entrambi i casi, si procede all'individuazione di possibili nuclei di rinnovazione, che sono effettivamente classificati come tali qualora l'estensione dell'area individuata come "in rinnovazione" sia superiore ad una certa soglia. L'immagine in Figura 2.12 mostra un esempio di cartografia della rinnovazione nella particella forestale Cansiglio — 11B.

In Tabella 2.13 si riporta un esempio di database collegato alla cartografia della rinnovazione mentre le immagini nella sequenza di Figure 2.15c, 2.16c, 2.17c nel paragrafo 2.4.6 mostrano la cartografia realizzata in formato GIS per ciascuna delle aree d'indagine.

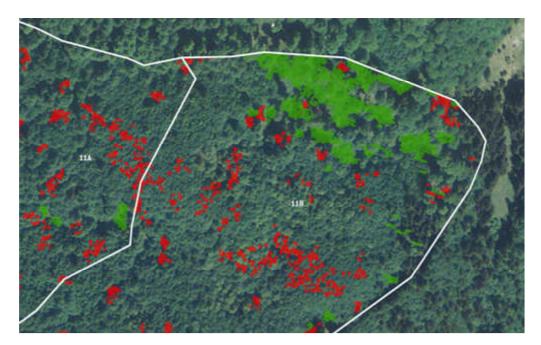


Figura 2.12: Esempio di cartografia della rinnovazione affermata e dominata.

DENOMINAZ	I NUMEROPAI	RT CODIFICAPA	RID	AREA	RINNOVAZ	
Cansiglio	11C	CNS11F011C	1	12,89	domina <mark>ta</mark>	
Cansiglio	11C	CNS11F011C	1	12,12	dom <mark>ina</mark> ta	
Cansiglio	11C	CNS11F011C	1	9,82	dominata	
Cansiglio	11C	CNS11F011C	1	44,95	dominata	
Cansiglio	11C	CNS11F011C	2	80,96	<mark>affer</mark> mata	
Cansiglio	11C	CNS11F011C	2	39,68	<mark>affer</mark> mata	

Tabella 2.13: Esempio di database alfanumerico collegato alla cartografia della rinnovazione.

2.4.5 Statistiche riassuntive su particelle

La cartografia denominata Particelle GIS contiene, per ogni particella forestale, le statistiche riassuntive derivate dalle cartografie descritte in precedenza. In particelle e della località geografica, il database riassume:

- la percentuale di bosco e non bosco;
- la percentuale di area coperta delle varie "categorie" di specie;
- la percentuale di area coperta dalle varie fasi crono<mark>logiche</mark>.

La Figura 2.14 mostra un esempio di database contenente le statistiche riassuntive a livello di singola particella forestale.

DENOMINAZI	NUMEROPART	CODIFICAPA	SUPHATOTGE	BOSCO	NONBOSCO	CONIFERE	LATIFOGLIE	MISTO	NOVELLETO1	NOVELLETO2	SPESSINA1	SPESSINA2	PERTICAIA1	PERTICAIA2	PERTICAIA3	ADULTO	MATURO	BIPLANO	MULTIPLANO
Cansiglio	110	CNS11F011C	26,888280	96,79	3,21	34,69	31,05	31,05	0,00	0,00	1,66	1,98	11,94	28,72	0,00	4,58	3 2,7	1 0,84	44,36
Cansiglio	120	CNS11F012C	12,876340	100,00	0,00	12,76	80,00	3,65	0,00	0,00	0,00	0,00	10,90	61,02	5,61	7,27	1,26	0,00	10,34
Cansiglio	17G	CNS11F017G	7,064863	86,99	13,01	85,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	62,86	2,19	0,00	9,03	0,8	0,00	11,84
Cansiglio	11A	CNS11F011A	14,729163	100,00	0,00	6,82	72,57	20,61	0,00	0,00	0,00	0,73	4,82	73,23	0,00	7,1	0,99	0,00	13,12
Cansiglio	11D	CNS11F011D	27,641360	99,05	0,95	11,32	70,52	17,21	0,00	0,00	3,71	4,36	46,98	23,29	2,04	0,36	7,5	0,61	10,19
Cansiglio	10A	CNS11F010A	18,662525	99,67	0,33	11,32	71,91	13,56	0,00	0,00	0,00	0,00	79,51	8,74	0,32	5,94	0,00	0,00	2,27
Cansiglio	19H	CNS11F019H	18,267241	77,49	22,51	77,22	0,00	0,00	0,00	0,00	13,86	0,00	18,28	0,91	0,00	8,02	34,2	5 0,00	1,89
Cansiglio	11B	CNS11F011B	13,745638	100,00	0,00	0,00	91,37	6,78	0,00	3,01	6,04	8,07	68,15	0,00	0,00	0,00	0,8	6,87	5,10
Cansiglio	15A	CNS11F015A	17,961209	97,68	2,32	86,97	5,35	4,67	0,00	0,00	0,00	0,36	0,33	55,60	0,00	11,10	11,0	3 5,79	12,77
Cansiglio	196	CNS11F019G	19,345410	97,46	2,54	82,84	9,78	4,75	0,00	0,00	3,09	0,77	2,24	0,00	0,00	0,00	90,0	0,31	0,96
Cansiglio	12B	CNS11F012B	27,638467	100,00	0,00	16,09	76,76	7,15	0,00	0,00	1,99	4,56	25,11	52,80	0,25	5,02	2 0,0	0,44	9,85

Figura 2.14: Esempio di database alfanumerico collegato alla cartografia riassuntiva a livello di singola particella.

2.4.6 Cartografie: overview

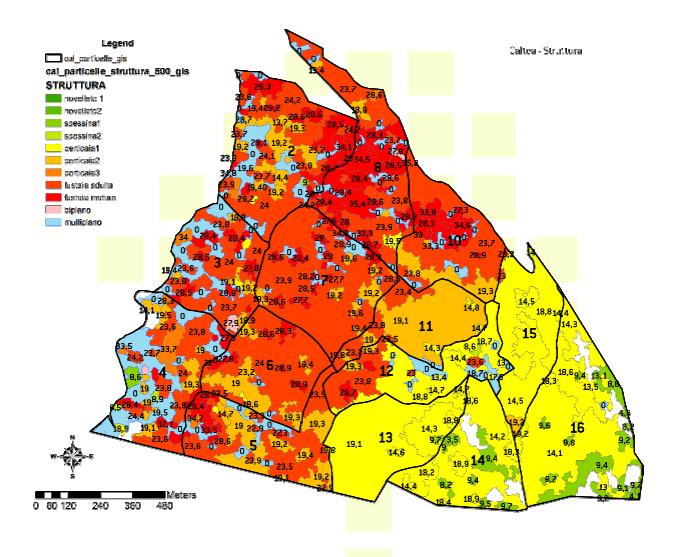


Figura 2.15 (a): Cartografia della struttura delle particelle forestali di Caltea con indicazione dell'altezza dominante (HD).

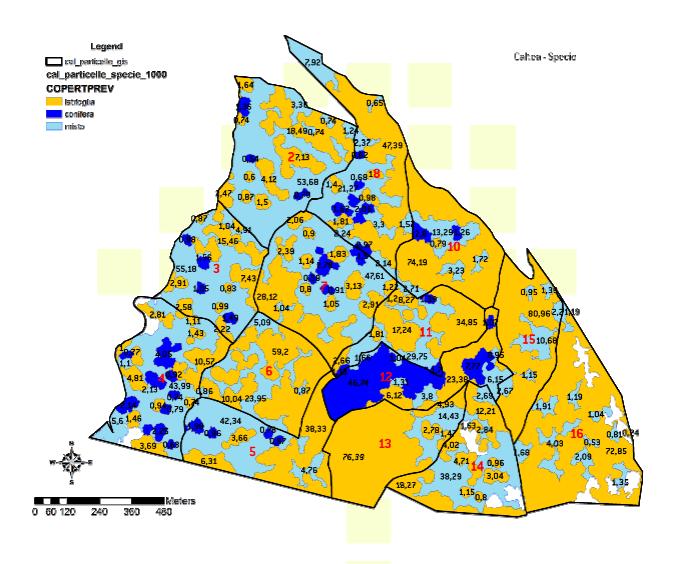


Figura 2.15 (b): Cartografia della specie delle particelle fore stali di Caltea con indicazione della percentuale relativa di ciascuna area.

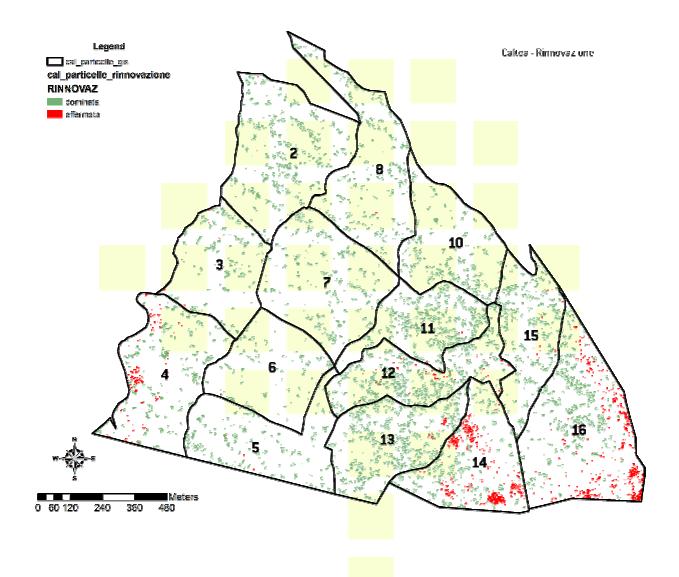


Figura 2.15 (c): Cartografia della rinnovazione delle particelle forestali di Caltea.

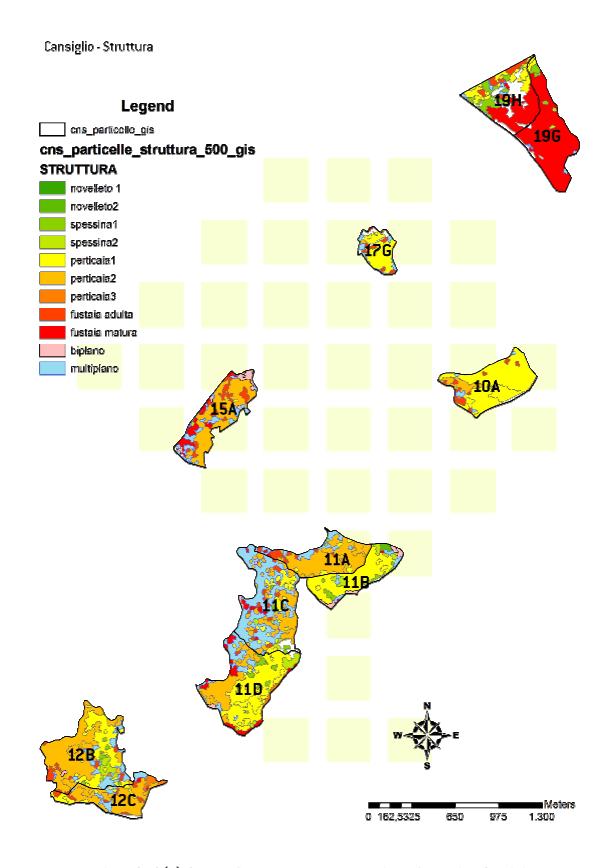


Figura 2.16 (a): Cartografia della struttura delle particelle forestali del Cansiglio.

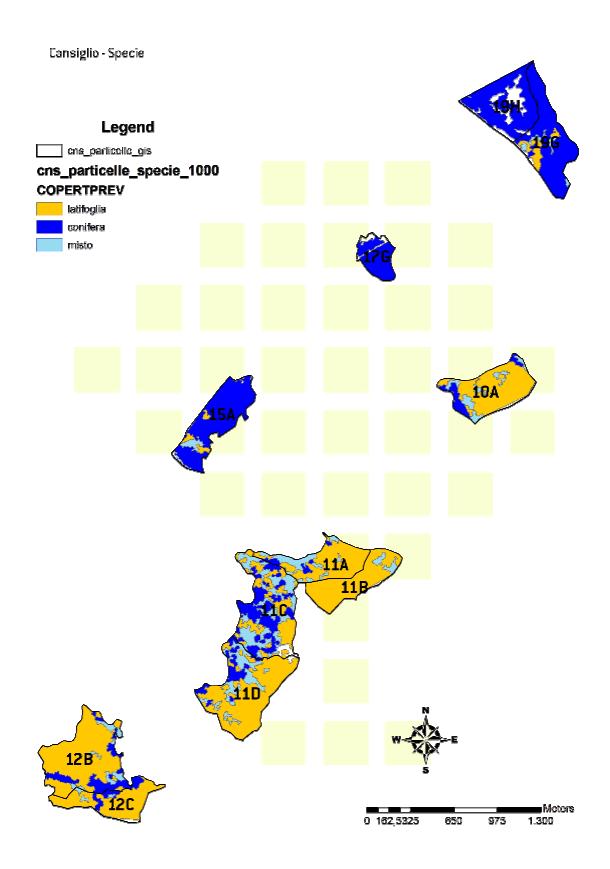


Figura 2.16 (b): Cartografia della specie delle particelle forestali del Cansiglio.



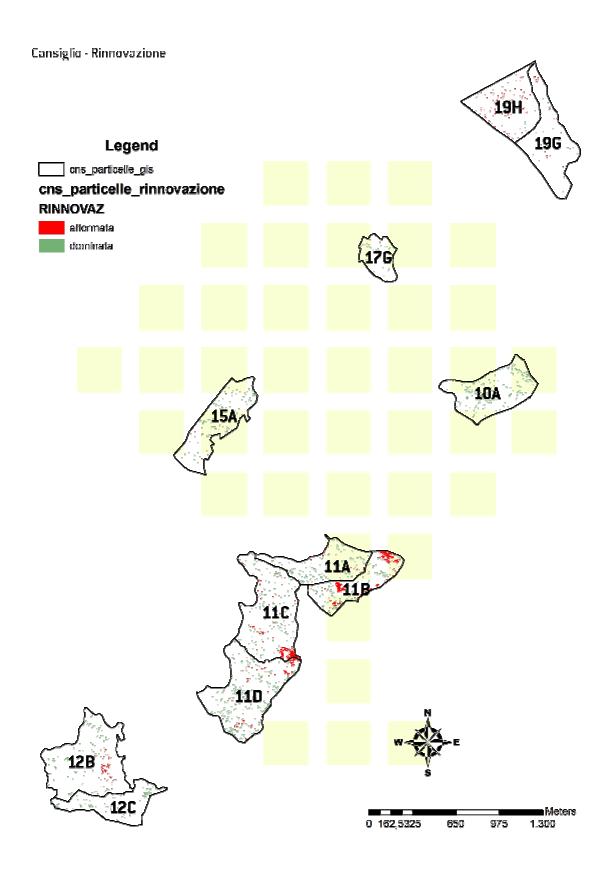


Figura 2.16 (c): Cartografia della rinnovazione delle particelle forestali del Cansiglio.

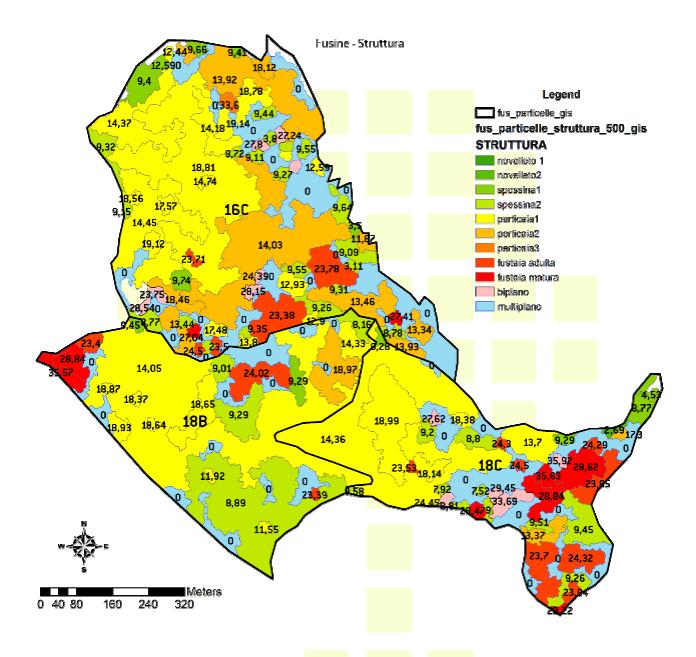


Figura 2.17 (a): Cartografia della struttura delle <mark>particell</mark>e f<mark>orestali d</mark>i F<mark>usine co</mark>n indicazione dell'altezza dominante (HD).

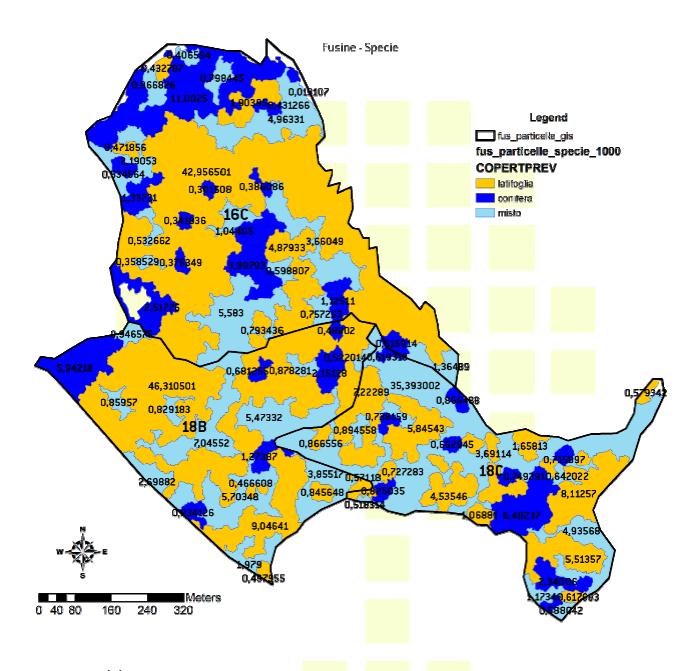


Figura 2.17 (b): Cartografia della specie delle pa<mark>rticelle f</mark>ore<mark>stali di F</mark>usine con indicazione della percentuale relativa di ciascuna area.

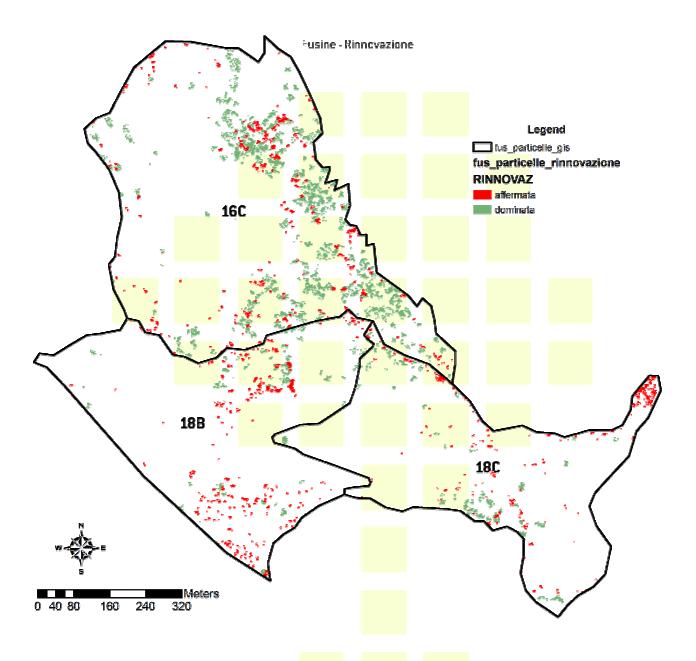


Figura 2.17 (c): Cartografia de<mark>lla rinno</mark>vaz<mark>ione dell</mark>e particelle forestali di Fusine.

3 Analisi

3.1 Premessa

I risultati della scansione "fotografano", secondo le caratteristiche peculiari di questa tipologia di informazione tele rilevata (nuvola di punti), la condizione esistente sul territorio alla data di acquisizione dei dati grezzi. Le elaborazioni che vengono effettuate su tali dati puntuali dunque, al pari di quanto avverrebbe se si utilizzassero dati telerilevati di altra natura (e.g. ortofoto, scene satellitari ecc.), devono essere riferite alla data di acquisizione. Da ciò consegue che, nello specifico del lavoro in esame, eventuali cambiamenti nell'uso del suolo o nella copertura forestale intercorsi e/o prodotti successivamente al rilievo dei dati grezzi, non possano essere evidenziati a partire dai soli dati forniti in input per le elaborazioni.

3.2 Accuratezza dei prodotti

Come ricordato nell'introduzione, il dato LiDAR è costituito da un insieme di coordinate xyz di punti, inserite in un sistema di riferimento cartografico e che possono essere o meno corredate da informazioni di altro tipo quali intensità di riflessione, numero di ritorno, flightline etc. Analizzare l'accuratezza dei prodotti realizzati (o realizzabili) a partire da questo tipo di dato non può prescindere, dunque, dall'analisi preventiva delle caratteristiche intrinseche al rilievo laser stesso.

In particolare, la densità di scansione costituisce la variabile più importante per valutare l'accuratezza di molti dei parametri rest<mark>ituiti ne</mark>lle cartografie vettoriali.

In Tabella 3.1, si riassumono i principali parametri forestali calcolati, alcuni tra i fattori che ne determinano l'accuratezza e l'accuratezza attesa, date le scansioni utilizzate. Per alcuni di tali parametri, si fa inoltre riferimento contributi bibliografici (a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti), individuati tra i lavori di ricerca che presentavano caratteristiche più affini a quelle delle aree oggetto d'indagine, sia dal punto di vista della composizione forestale, che di specifiche dei dati las er utilizzati.

Prodotto	Parametri	Fattori di criticità	Accuratezza attesa	Riferimenti
DTM	Planimetria	Corretta georeferenziazione dei puntilaser Densità del rilievo	0 ± 0,30 m	Barilotti et al., 2005; Barilotti et al., 2006;
	Altimetria	 Allineamento tra le strisciate (registrazione) Densità del rilievo Densità della copertura arborea Correttezza del processo di filtraggio dei punti laser 	0 ± 0,40 m (terreno nudo) 0 ± 1 m (terreno sotto copertura)	
	Morfologia	- Fattori legati alla planimetria e all'altimetria - Complessità strutturale dell'area (es: grado di acdività, scabrezza)	Possibile smussamento delle micro forme (per basse percentuali di penetrazione del segnale laser) e delle pareti particolarmente acclivi	

Bosco/ non Bosco	Area poligoni		> 95 %	
Holl Bosco	Tipologia area	- Aree considerate forestali ma temporaneamente prive di copertura arborea ed arbustiva - Aree imboschite ma considerate territorio agro-pastorale da altri	100 % (se non presenti aree come da fattori di criticità)	Bollettino Ufficiale Region e
Struttura	Area poligoni	sistemi pianificatori - Effetto bordo, al passaggio fra	> 95%	
Structura	Arca poligorii	strutture m <mark>onoplane</mark> a m <mark>ultiplane</mark>	- 33h	
	Numero e densità di alberi	 Densità del rilievo laser Estrazione dei singoli alberi Composizione e struttura forestale 	60 % (fasi cronologiche più giovani) 95 % (fasi cronologiche mature e multiplani)	Barilotti et al., 2007 "Tree Extraction" test
	Altezza media	- Caratteristiche e densità del rilievo laser - Estrazione dei singoli alberi - Accuratezza del DTM	Errore < 50 cm (strato dominante) Errore < 1 m (strato dominante + codominante)	"Tree Extraction" test
	Altezza dom <mark>inante e statura - Accurat</mark> ezza del DTM > 95 %	> 95 %		
	Percentuale intercalare	- Densità del rilievo laser	Vedi "numero e densità di alberi"	
	Struttura	- Può dipendere dal tipo di suolo - Corretta definizione dei parametri d'indagine	> 95 % (strutture monoplane)	Del Favero et al., 2000 Region e FVG, Regolamento forestale
Specie (conifera/lati foglia/misto)	Area poligoni	- Possibile effetto bordo, al passaggio fra composizioni mono-specifiche ad aree miste	> 95%	Barilotti et al., 2009
	Tipologia area	Densità del rilievo lidar Omogen eità del rilievo Corretta definizione dei parametri d'indagine Corretta restituzione del popolamento Composizione e struttura forestale Dipende dai due parametri precedenti	Fino al 70 % (per densità punti vegetazione <2 pti/m²) Fino al 95 % (per densità punti vegetazione > 4 pti/m²)	
Rinnovazione	Localizzazione	- Tipologia (First & last Vs multipulse Vs full waveform), densità e omogeneità del dato laser	> 90% (Rinn. Affermata) Possibili sottostime	Barilotti et al, 2008



		(Rinn. Dominata)
Tipologia area		Corretta
Area	 Tipologia (First & last Vs multipulse Vs full waveform), densità e omogeneità del dato laser Sensibilità del metodo 	Da verificare, possibili sottostime

Tabella 3.1: Accuratezza attesa dei parametri forestali calcolati.

Riassumendo, la forbice di valori che compare in tabella sotto la colonna "accuratezza" dipende dunque dalla combinazione dei due fattori principali: le caratteristiche forestali del sito e la densità locale della scansione (cfr Tab. 1.5).

Più nel dettaglio di alcuni parametri chiave si può affermare che:

- I parametri legati a<mark>lla densità di popolamento r</mark>ag<mark>giungono i miglior</mark>i risultati della forbice indicata in tabella qualora la d<mark>ensità di scansione approssimi o sia superiore ai 4 pti/m²</mark> e la struttura forestale sia tendente agli stadi adulti, maturi o multiplani;
- Nelle classi cronologiche più giovani, la densità di popolamento tende ad essere sottostimata per la difficoltà di rilevare direttamente gli individui sottocopertura con diametro molto piccolo (materiale intercalare); in queste classi, il parametro di riferimento diventa l'altezza dominante e conseguentemente la classe strutturale stessa;
- L'errore sul calcolo dell'altezza dominante e della statura può essere considerato trascurabile in tutte le fasi cronologico/strutturali, anche per basse densità di scansione, dal momento che tali parametri sono calcolati utilizzando gli alberi più alti del popolamento e quindi rilevabili con la massima efficienza nel processo di estrazione dei singoli alberi; conseguentemente anche la stima del piano intercalare risulta corretta;
- La densità dello strato intercalare risulta invece essere il parametro più critico dal momento che è essenzialmente costituito da alberi dominati di piccola o piccolissima taglia spesso non rilevabili a livello quantitativo sulle scansioni. Le stime di materiale intercalare fornite nella cartografia della struttura e relative alle spessine ed alle perticaie vanno dunque considerate come indicative.

Ulteriori considerazioni sono fornite in merito a parametri forestali da relazionare alla determinazione delle aree a diversa struttura e a diversa composizione.

Nella sequenza di immagini in Figura 3.2 si mostra la variazione della cartografia della struttura al variare dell'area minima d'indagine (500 m², 1 000 m² e 2 000 m² rispettivamente). Nell'esempio, relativo alle particelle 11 a,b,c,d del Cansiglio, si osserva che:

- All'aumentare dell'area minima d'indagine di<mark>minuisc</mark>e la frammentazione della cartografia, conseguentemente diminuisce il dettaglio geometrico raggiungibile;
- Le aree molt o frammentate tendono ad essere inglobate dalle strutture multiplanari;
- L'area minima definisce la risoluzione massima della carto grafia.

La sequenza di immagini in Figura 3.3 mostra invece la variazione della cartografia della specie al variare delle diverse percentuali di dominanza considerate indicative del popolamento (60%, 70% e 75% rispettivamente). Nell'esempio, relativo a parte della superficie di Caltea, si nota che:

- Il confine tra i popolamenti monospecifici di conifere e/o di latifoglie rimangono invariati al variare della percentuale (indice di robustezza del metodo);
- Come atteso, l'aumentare della percentuale di dominanza produce un aumento delle superfici considerate "miste" solo qualora vi sia l'effettiva presenza di alternanza tra alberi di specie diversa.



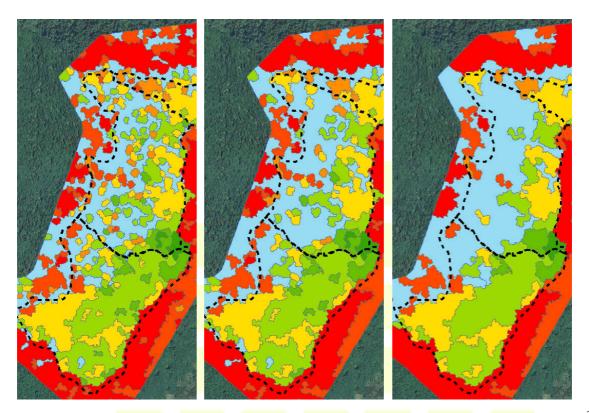


Figura 3.2: Esempio di va<mark>riazione</mark> del<mark>la cartog</mark>rafia della struttura al variare dell'area minima di indagine (500 m² – 1000 m² – 2000 m² rispettivamente da sinistra a destra nella sequenza).

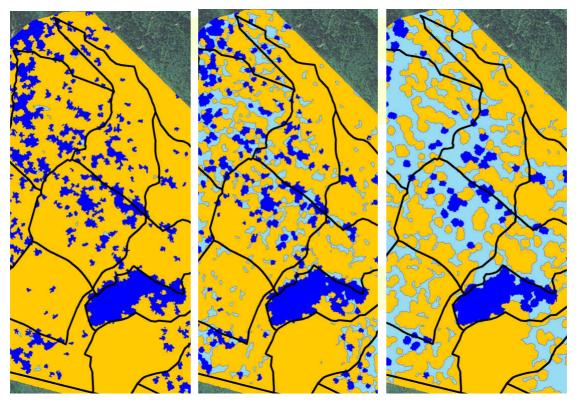


Figura 3.3: Esempio di variazione della cartografia della specie al variare della percentuale minima di dominanza (60% - 70% - 75% rispettivamente da sinistra a destra nella sequenza).

Pagina 46 di 49



4. Considerazioni conclusive

Negli ultimi anni il panorama dei sistemi di telerilevamento si è notevolmente arricchito con l'introduzione del laser scanning, tecnologia in grado di acquisire informazioni tridimensionali sul territorio con un'elevata precisione metrica. Grazie a questa nuova tecnologia, e al parallelo sviluppo di metodi che consentono di estrarne informazioni a livello quali/quantitativo, vi è stato un notevole miglioramento nella percezione e nell'analisi dell'ambiente da pianificare, e in particolare delle foreste, fatto che ha permesso un salto di qualità negli elaborati tecnici e di supporto alle scelte pianificatorie ottenibili con sistemi di rilievo a distanza.

Questo progetto ha riguardato, in estrema sintesi, l'applicazione di metodi innovativi di analisi dei dati laser scanning in ambito forestale al fine di verificare in concretezza la possibilità di ottenere, in tempi e costi contenuti, dati su altezze, fasi strutturali, composizione, uso del suolo, densità di soprassuoli presenti in alcune particelle delle foreste regionali di Caltea, Cansiglio e Fusine.

Le elaborazioni condotte hanno consentito di ottenere diversi strati cartografici di dettaglio su supporto GIS che costituiscono lo "stato di fatto" dei popolamenti forestali in esame e attraverso il quale l'assestatore/gestore potrà impostare la realizzazione ex-novo di piani di gestione forestali o pianificare gli interventi silvicolturali più opportuni.

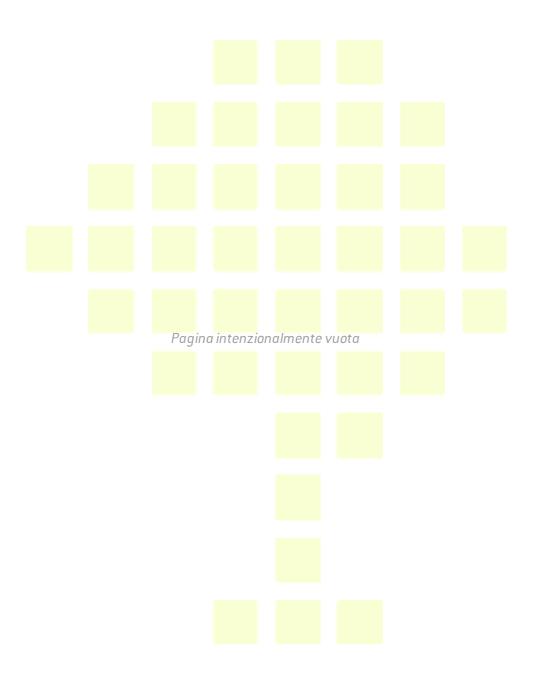
D'altra parte, allorché una tecnologia innovativa di rilevamento inizia a diffondersi nel campo delle scienze applicative, e in particolare in quelle ambientali, è necessario dare impulso ad una fase di confronto, comparazione e rivisitazione critica dei vecchi e nuovi metodi. Tale verifica è finalizzata a mettere in risalto le potenzialità offerte dalle nuove soluzioni disponibili, integrandole alle necessità proprie della tradizione e delle leggi forestali, riferite, nel caso specifico, alla Regione Friuli Venezia Giulia.

Questa è stata l'ottica con la quale si è cercato di impostare e di realizzare questo progetto pilota, che può rappresentare un ottimo punto di partenza, pur nella consapevolezza che vi siano ulteriori margini nell'affinamento e nell'implementazione di nuovi metodi che consentano di estrarre informazioni di sintesi a partire dai dati LiDAR.

Udine, 6 agost o 2009



|dott. Andrea Barilotti





Bibliografia citata

Articoli scientifici

- Abramo, E., Barilotti, A., Sepic, F., 2007. Dalla dendrometria diametrica alla dendrometria ipsometrica: stima del volume degli alberi da rilievi laser-scanning. Forest@ 4 (4): 373-385, 20 Dicembre 2007, ISSN: 1824-0119
- Barilotti, A., Crosilla, F., Sepic, F., 2009. Curvature analysis of LiDAR data for single tree species classification in alpine latitude forests. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, In press.
- Barilotti, A., Sepic, F., Abramo, E., 2008. Automatic detection of dominated vegetation under canopy using Airborne Laser Scanning data. Proceedings of SilviLaser 2008: 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. Hill R.A., Rosette, J. and Suárez, J. (Eds). September 2008. Edinburgh, UK, pp: 134-143, ISBN 978-0-85538-774-7.
- Barilotti, A., Sepic, F., Abramo, E., Crosilla, F., 2007. Assessing the 3D structure of the single crowns in mixed alpine forests. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, 3/W52, ISBN/ISSN: 1682-1750.
- Barilotti, A., Beinat, A., Fico, B., Sossai, E., 2006. Produzione e verifica di DTM da rilievi LiDAR aerei su aree montane ricoperte da foresta. In: 51° Convegno Nazionale della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia. Castellaneta Marina (Ta), 14-16 Giugno 2006, Castellaneta Marina (TA).
- Barilotti, A., Turco, S., Beinat, A., 2<mark>005. L'i</mark>nfluenza del DTM per la valutazione del rischio da scivolamento superficiale nei bacini montani. MondoGIS, 49, p. 25-29, ISSN: 1128-8175.

Altre fonti:

Bollettino ufficiale della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2 maggio 2007

- Del Favero, R., Bortoli, P.L., Solari, V., Vanone, G., Moro, E., 2000. Direttive per i piani di gestione delle proprietà forestali nella Regione Friuli-Venezia Giulia. A cura di Roberto Del Favero, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia ed., pp. 64-65
- Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Regionale delle Foreste e della Caccia, 2003. REGOLAMENTO FORESTALE per la salvaguardia e l'utilizzazione dei boschi e per la tutela dei terreni soggetti a vincolo idrogeologico. A cura della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Maggio 2003, pp. 65-67

